

УДК 621.0, 630.432.31

DOI 10.48612/ntp/a4hz-mx25-t5ea

## ПРОСТЕЙШЕЕ УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦЫ ГРУНТА НА ПОВЕРХНОСТИ КУЛИСНОЙ ЛОПАТКИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ПОЖАРНОГО ГРУНТОМЕТАТЕЛЯ

**А. А. КРАСНОВ<sup>1</sup>, К. В. СЕМЕНОВА<sup>1</sup>, Т. В. ПАШКОВА<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново

<sup>2</sup>Ивановский государственный университет, г. Иваново  
Российская Федерация, г. Иваново

E-mail: krasnow.a.a@mail.ru, pboz2018@mail.ru, pashtavi@yandex.ru

В работе рассмотрены вопросы простейшей теории движения частиц грунта относительно поверхности лопатки, жёстко связанной с вращающейся кулисой привода метателя. Показано, что движение частиц грунта относительно поверхности лопатки в самом простом случае описываются частным видом уравнения Хилла - обыкновенным линейным дифференциальным уравнением второго порядка с периодическим коэффициентом.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, пожарный грунтометатель, движение грунта в метателе грунта.

## THE SIMPLEST EQUATION OF THE DYNAMICS OF A SOIL PARTICLE ON THE SURFACE OF THE ROCKER BLADE OF THE WORKING BODY OF A FIRE-FIGHTING GROUND-THROWER

**A. A. KRASNOV<sup>1</sup>, K. V. SEMENOVA<sup>1</sup>, T. V. PASHKOVA<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education  
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation  
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo

<sup>2</sup>Ivanovo State University,  
Russian Federation, Ivanovo

E-mail: krasnow.a.a@mail.ru, pboz2018@mail.ru, pashtavi@yandex.ru

The paper considers the issues of the simplest theory of the motion of soil particles relative to the surface of the blade, rigidly connected to the rotating curtain of the thrower drive. It is shown that the motion of soil particles relative to the surface of the blade in the simplest case is described by a special form of the Hill equation - an ordinary linear differential equation of the second order with a periodic coefficient.

**Keywords:** fire safety, fire-fighting ground thrower, soil movement in the ground thrower.

Как известно, низовые пожары весьма опасны [1, 2], поскольку огонь приводит не только к уничтожению растительного покрова и животного мира, но и к деградации почвы. Процесс восстановления плодородного слоя после поражения его огнём может затянуться на несколько десятилетий. Кроме того, низовые пожары в ветреную погоду быстро распространяются, угрожая населённым пунктам, со всеми вытекающими последствиями. Низовые пожары в лесных массивах также легко переходят в верховые пожары, тушение которых обычно представляет собой нетривиальную задачу.

Локализация низовых пожаров достаточно проста при условии, что их можно своевременно обнаружить и если поблизости есть мощные источники воды. Однако в отсутствие таковых организация «водяного» тыла требует значительных ресурсов, времени и средств, что зачастую экономически неподъёмно для удалённых районов. В связи с этим использование грунтов для тушения возгораний представляет собой эффективный метод борьбы с низовыми пожарами, а разработка устройств, способных оперативно доставлять необходимое количество грунта к месту возгорания, грунто-

метателей, является экономически обоснованной и актуальной задачей [3].

Идея использования грунта для засыпки горящих материалов, без сомнения, не нова. Естественнo предположить, что она была знакома уже древним разумным обитателям нашей планеты, достаточно близко познакомившимся со свойствами огня. Более того, можно допустить, что необходимость тушить пожары для спасения своих жилищ и имущества стала одним из факторов, способствовавших развитию кроманьонца, поскольку борьба с огнём требует не столько наличия инстинктов, сколько способностей переносить пиковые когнитивные нагрузки на человеческий разум [4].

Логично, что если на первых порах для тушения огня с помощью грунта использовались лишь руки, то вскоре в ход пошли и примитивные орудия труда. Следовательно, по мере развития технологий и машин должна была совершенствоваться и техника, предназначенная для тушения пожаров с помощью подручных материалов.

Однако, согласно [5], целенаправленная разработка машин для тушения пожаров с помощью грунта в России (СССР) началась лишь в 1939 году, а реальные конструкции появились только к 1961 году. Обзоров, касающихся истории применения подобных землеройных машин для тушения пожаров за пределами России, в открытой литературе найти не удалось. Поэтому, факты, приведённые в [5] требуют осмысления. Вполне возможно, что прогрессу технических устройств в этом направлении препятствовала обычная человеческая инертность и консерватизм мышления. Вполне возможно, что мы имеем провал в историческом нарративе использования землеройных машин.

Позволим себе выдвинуть гипотезу, призванную хоть как-то закрыть этот пробел в истории развития техники. Для её обоснования проведём краткий анализ патентной базы, находящейся в открытом доступе.

Изучение патентных документов на машины для метания грунта датирует их разработку в СССР как минимум двумя десятилетиями ранее. Так, в патенте СССР от 1925 года с приоритетом от 1919 года [6] описывается усовершенствованная машина, метаящая грунт за счёт центробежной силы. Хотя доступ к российским патентам до 1917 года через сети все еще ограничен, содержание этого документа позволяет предположить, что аналогичные машины разрабатывались в России и ранее. Косвенным подтверждением этого служит патент США от 1903 года [7], в котором описано устройство с ротором и ножами, нарезающими и выбрасывающими грунт на значительное расстояние. Было бы очень нелогичным и непрактичным

для американцев не использовать машины для обработки земли, способных к метанию грунта, в целях тушения пожаров.

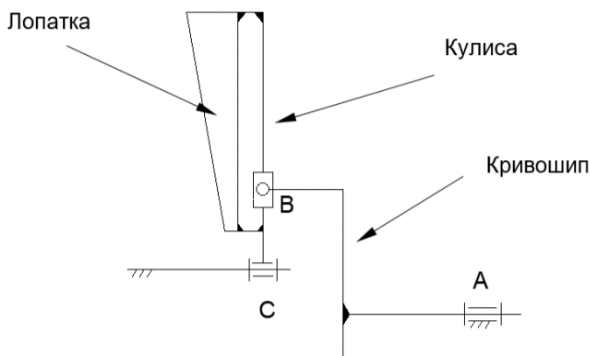
Таким образом, возможность применения машин, способных использовать грунт для тушения пожаров, вполне можно отнести к значительно более раннему периоду, чем 40 годы XX века. А если принять во внимание, что для тушения таких пожаров можно использовать и снег, чьи баллистические свойства близки к грунту, то создание машин, способных метать землю, правомерно отнести ко времени регистрации самых первых патентов на метатели снега, например, в США, к первой половине XIX века [8].

Очевидно, что машины, способные перемещать грунты с помощью их метания, могут иметь разные метательные органы. Известны несколько классификаций этих устройств [5, 9, 10, 11] для метательных машин, в основу которых положены различные таксономические признаки. Но в условиях метания грунтов наибольшее распространение имеет метатель, реализующий метание за счёт центробежных сил, который представляет собой вращающийся диск, ротор с лопатками, способными захватывать подготовленный грунт, сообщать ему центробежное ускорение, за счёт которого грунт приобретает начальную скорость, величина и направление которой в большей степени и обуславливают дальность его метания. Причина этого кроется, скорее всего, в высокой степени надёжности такого рода устройств по сравнению, например, с ленточными метателями, метательные органы которых подвержены интенсивному износу при взаимодействии со слабо подготовленными грунтами, что при тушении пожаров является ключевым параметром.

Заметим, что механика взаимодействия грунтов с поверхностями лопаток не только интересна сама по себе, но необходима как теоретическая база проектирования метателей. Причём, в простейшей своей постановке эта задача сводится к задаче движения материальной точки вдоль вращающегося с постоянной скоростью стержня, которая уже во времена И.В. Мещерского была включена в его знаменитый задачник по теоретической механике [12, 13], что свидетельствует о практической её значимости.

В более сложной постановке вопросы движения частиц грунта по лопаткам вращающегося с постоянной скоростью ротора рассмотрены в [9, 14, 15]. В работах [16–20] ставилась задача описания движения частиц грунта по лопаткам оптимальной формы, решалась задача поиска брахистохроны для поля центробежных сил, возникающего при равномерном вращении метателя.

Недостатками устройств метателя грунта, в качестве которого используется вращающийся ротор с лопатками являются, в частности, с одной стороны, высокие ударные нагрузки, которые приводят к перегрузкам лопаток и к измельчению метаемого грунта, что сказывается на дальности его метания, с другой, к интенсивному износу внутренних поверхностей неподвижных кожухов, на которые отбрасывается грунт во время работы метателя. Кроме этого, при взаимодействии с кожухом частицы грунта испытывают действие сил трения, в результате чего повышают энергетические затраты на метание тушащего материала. Преодоление этих недостатков с помощью устройств подвижных кожухов, например [21], приводит к чрезмерному усложнению конструкции механизма метания грунта, и, как следствие, к снижению его надёжности, что, как было сказано выше, в условиях пожаротушения неприемлемо.



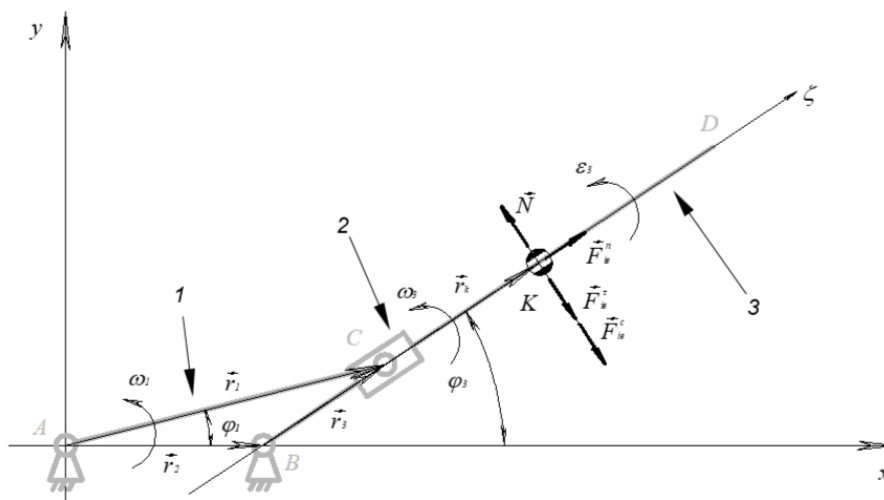
**Рис. 1.** Фрагмент кулисного метателя по патенту [22]

Для улучшения параметров пожарного грунтометателя был предложен метатель, ротор которого выполнен в виде вращающейся кулисы кривошипно-кулисного механизма, на которой закреплена лопатка, способная захватывать грунт (рис. 1) [22]. (Использована терминология Артоболевского И. И. [23]). При этом, очевидно, привод метателя может быть выполнен в виде как четырёхзвенного, так и трёхзвенного механизма.

Такого рода метатель обеспечивает преобразование постоянной скорости вращения кривошипа в переменное вращательное движение кулисы. При этом, ускорение кулисы является переменной величиной, что может обеспечить отрыв грунта от лопатки ротора не только за счёт центробежных сил инерции, но и за счёт сил инерции, действующих на частицы грунта, возникающих при отрицательных значениях ускорения вращения кулисы.

Для анализа возможностей использования метательных органов с таким механизмом привода, необходимо описать движение частиц грунта относительно поверхности лопаток метателя, движение которых описывается нелинейными алгебраическими уравнениями [23, 24].

Для такого описания примем допущения, позволяющие получить дифференциальные уравнения для простейшей задачи движения частиц грунта относительно лопатки кулисного метателя. В частности, будем считать: частицу грунта материальной точкой; все звенья механизма абсолютно твёрдыми телами; силы трения между лопаткой и частицей грунта отсутствуют; внешние силы на частицу грунта не действуют, сама лопатка представляет собой металлический стержень.



**Рис. 2.** Кинематическая схема механизма привода кулисной лопатки метателя с изображённым на ней замкнутым векторным контуром по В. А. Зиньеву.

Обозначения:  
1 — кривошип;  
2 — камень; 3 — кулиса

Итак, пусть имеется механизм привода лопатки грунтометателя, представляющий собой кривошипно-кулисный механизм с вращающейся кулисой. Кинематическая схема механизма показана на рис. 2. Пусть материальная точка расположена на кулисе. В системе координат, связанной с кулисой на материальную точку в рамках принятых допущений, действуют только силы инерции, под действием которых она движется вдоль кулисы, и реакция связи со стороны стержня.

Относительное движение для нашей точки определяется известным [26] уравнением:

$$m \frac{d\vec{v}_r}{dt} = \sum \vec{F} + \vec{F}_{ie} + \vec{F}_{ic} = \vec{N} + \vec{F}_{ie}^n + \vec{F}_{ie}^\tau + \vec{F}_{ic}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса точки;

$\vec{F}$  – внешние силы;

$\vec{N}$  – реакция связи;

$\vec{F}_{ie}$  – переносные силы инерции;

$\vec{F}_{ie}^\tau$  – тангенциальная переносная сила инерции;

$\vec{F}_{ie}^n$  – нормальная переносная сила инерции;

$\vec{F}_{ic}$  – сила Кориолиса, которая описывает движение материальной точки в неинерциальной системе отсчёта.

Так как мы не учитываем внешние силы, а силы взаимодействия частицы грунта с лопаткой уравновешены, выражение (1) упрощается:

$$m \frac{d\vec{v}_r}{dt} = \vec{F}_e^n, \quad (2)$$

и в проекции на ось  $B\zeta$ , после сокращения масс в обеих частях уравнения, будет выглядеть так:

$$\frac{dv_\zeta}{dt} = \frac{d^2\zeta}{dt^2} = \omega_3^2 \zeta, \quad (3)$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость кривошипа;

$\omega_3$  – угловая скорость кулисы;

$\zeta = r_k = BK$  – координата материальной точки в подвижной системе координат, связанной с кулисой 3, (рис. 2).

Таким образом, движение точки вдоль лопатки описывается линейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка. В кулисном механизме угловая скорость движения кулисы является функцией времени или функцией координаты входного кривошипа. Для того, чтобы получить решение (3), необходимо выписать в явном виде зависимость угловой скорости кулисы от времени. Для этого воспользуемся методом Зинovieва [27] (рис. 2). Составляя векторный замкнутый контур:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_2 + \vec{r}_3, \quad (4)$$

где  $\vec{r}_1$  – вектор, направленный от кинематической пары  $A$  к кинематической паре  $C$  вдоль кривошипа  $AC$ ;

$\vec{r}_2$  – вектор, направленный от кинематической пары  $A$  к кинематической паре  $B$  вдоль стойки  $AB$ ;

$\vec{r}_3$  – вектор, направленный от кинематической пары  $B$  к кинематической паре  $C$  вдоль кулисы  $BC$ , и проецируя его на систему координат  $XOY$ , начало которой связана со стойкой  $A$ , получим следующее выражение:

$$\begin{cases} r_1 \cdot \cos(\omega_1 t) = r_2 + r_3(t) \cdot \cos(\varphi_3(t)), \\ r_1 \cdot \sin(\omega_1 t) = r_3(t) \cdot \sin(\varphi_3(t)). \end{cases} \quad (5)$$

Решая систему (5), относительно  $r_3=r_3(t)$  и  $\varphi_3=\varphi_3(t)$ , получаем:

$$\begin{aligned} \varphi_3(t) &= \arctg \left[ \frac{r_1 \cdot \sin(\omega_1 t)}{r_1 \cdot \cos(\omega_1 t) - r_2} \right], \\ r_3(t) &= \sqrt{r_1^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Продифференцировав (5) по времени, получаем систему уравнений, позволяющую найти зависимость угловой скорости кулисы от времени в явном виде:

$$\begin{cases} -r_1 \cdot \omega_1 \cdot \sin(\omega_1 t) = v_{3r} \cdot \cos(\varphi_3) - r_3 \cdot \omega_3 \cdot \sin(\varphi_3), \\ r_1 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t) = v_{3r} \cdot \sin(\varphi_3) + r_3 \cdot \omega_3 \cdot \cos(\varphi_3). \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений (7) линейна, решая её, получаем явный вид зависимости угловой скорости кулисы от времени:

$$\omega_3(t) = \omega_1 \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\varphi_1) + r_2^2}} \cos \left\{ \arctg \left[ \frac{r_1 \cdot \sin(\omega_1 t)}{r_1 \cdot \cos(\omega_1 t) - r_2} \right] - \omega_1 t \right\}. \quad (8)$$

Таким образом, уравнение движение частицы грунта вдоль лопатки будет

описываться дифференциальным уравнением второго порядка вида:

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} - \omega_1^2 \cdot r_1^2 \frac{\cos^2 \left\{ \arctg \left[ \frac{r_1 \cdot \sin(\omega_1 t)}{r_1 \cdot \cos(\omega_1 t) - r_2} \right] - \omega_1 t \right\}}{r_1^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2^2} \zeta = 0 . \quad (9)$$

Преобразуем (9) к более удобному виду. Для этого используем вспомогательный прямоугольный треугольник (рис. 3), у которого противолежащий катет равен  $r_1 \cdot \sin(\omega_1 t)$ , а прилежащий  $r_1 \cdot \cos(\omega_1 t) - r_2$ .

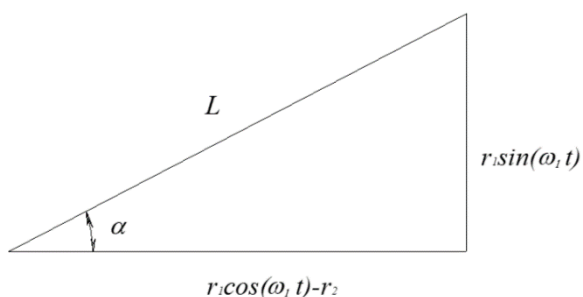


Рис. 3. Вспомогательный треугольник

После преобразований уравнение (9) будет выглядеть так:

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} - \omega_1^2 \cdot r_1^2 \frac{[r_1 - r_2 \cdot \cos(\omega_1 t)]^2}{(r_1^2 - 2r_1 \cdot r_2 \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2^2)^2} \zeta = 0 . \quad (10)$$

Поскольку по условиям задачи  $r_1 > r_2$ , то вводя обозначение  $k = \frac{r_2}{r_1}$ , перепишем (10) в окончательном виде:

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} - \left\{ \omega_1 \frac{1 - k \cdot \cos(\omega_1 t)}{1 - 2 \cdot k \cdot \cos(\omega_1 t) + k^2} \right\}^2 \zeta = 0 . \quad (11)$$

Дифференциальное уравнение (11) представляет собой частный случай уравнения Хилла – дифференциальное линейное уравнение второго порядка без правой части с периодическим коэффициентом [28]. Поиск решения этого уравнения в научной литературе не дал положительного результата. Очевидно, что оно может быть решено численными методами. Вопрос же о возможности решения его в конечном виде может рассматриваться в качестве отдельной математической задачи. Анализ уравнения (11) показывает, что оно при  $r_2 = 0$  сводится к (3), что показывает верность проведённых выкладок.

### Выводы

Таким образом, в простейшем случае движение частицы грунта вдоль поверхности лопатки, жёстко связанной с кулисой механизма привода, описывается частным случаем уравнения Хилла – обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с периодическими коэффициентами без правой части.

*Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Исследование возможности повышения эффективности пожарного грунтометателя» по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).*

### Список литературы

1. Новые технические решения в сфере тушения лесных пожаров / О. И. Григорьева, В. А. Савченкова, И. В. Григорьев [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2024. Т. 28. № 4. С. 66–77.
2. Efficiency and mechanism of fire suppression through pneumatic sandblasting fire-fighting / Fanbao Chen, Tingting Xu, Guanyu Hou [et al.]. Case Studies in Thermal Engineering, 49 (2023), 103361.
3. Авдеева И. Н., Гнусов М. А. Экономическое обоснование целесообразности

использование грунтомета для борьбы с лесными пожарами // Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика. 2014. Т. 2. № 1 (6). С. 320–327.

4. Поршнева Б. Ф. О начале человеческой истории. (Проблемы палеопсихологии). М.: «Мысль». 1974. 487 с.

5. Малюков С. В., Ступников Д. С. Истоки зарождения грунтометательных машин // Воронежский научно-технический вестник. 2018. Т. 4. № 4 (26). С. 83–96.

6. Патент СССР SU 523. Машина для производства земляных работ / К. И. Четыркин; опубл. 31.08.1925.

7. Berglund P. Grove N. Ditching machine. Patent US 738597. opubl. 08.09.1903.
8. Streeter S. Improvement in machinery for clearing snow and ice from railroad-tracks. Patent US 5347. opubl. 30.10.1847.
9. Кукибный А. А. Метательные машины. М.: Машиностроение. 1964. 196 с.
10. О классификации и о кинематике механизмов пожарных грунтометателей / А. А. Краснов, К. В. Семенова, Т. В. Пашкова [и др.] // Актуальные вопросы естествознания: сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2023. С. 47–50.
11. Краснов А. А., Семенова К. В., Пашкова Т. В. Классификация метателей рыхлых материалов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. С. 190–194.
12. Мещерский И. В. Сборник задач по теоретической механике. 3-е издан. Петроград: Издание Студенческого Кооператива «Политехник». 1923. 140 с.
13. Мещерский И. В. Сборник задач по теоретической механике. 12-е издан. Перераб. Л.-М.: Главная редакция технико-теор.-ой. лит-ры. 1937. 264 с.
14. Пиуновский И. И. Теоретические основы работы центробежного разбрасывателя с радиальными лопастями. Минск. Издательство АН БССР Труды института торфа. Т. VIII, 1959. 365 с.
15. Рабинович С. С. Исследование метателей для транспортирования грунта в землеройных машинах. М.: Государственный комитет Совета Министров СССР по автоматизации и машиностроению. ЦИНТИМАШ. Исследование строительных и дорожных машин. Т. XXVI., 1959. 60 с.
16. Семкив О. М., Шатохин В. М., Попова А. Н. Исследование движения частицы грунта по лопатке с профилем оптимальной формы в поле центробежных сил инерции // Міжвідомчий науково технічний збірник «Технічна естетика і дизайн». К.: КНУБА. 2012. Вип. 11. С. 165–174.
17. Шатохин В. М. Дослідження руху частки ґрунту по лопатці: результати комп'ютерних експериментів // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип. 4. Т. 54. С. 135–144.
18. Семків О. М., Попова А. М. Дослідження траєкторії руху частки ґрунту після її вильоту з робочої поверхні лопатки роторного грунтометальника // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ, 2012. Вип. 4. Т. 54. С. 126–134.
19. Шатохин В. М., Шатохина Н. В. Оптимальные траектории движения точки, перемещающейся под действием центробежной силы инерции // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков, 2012. Вып. 4/7 (58). С. 9–14.
20. Шатохин В. М., Семкив О. М., Попова А. Н. Об оптимальной форме лопатки роторного грунтометателя // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2013. № 2. С. 49–55.
21. Карпов А. П., Дашков Н. Г. Метатель грунта. А.С. СССР 388098 М.Кл. E02f 3/18 Оpubl. 22.06.1973. Бюл. № 28.
22. Патент Российская Федерация 2818223C1 E02F 3/18 (2006.01) A62C 3/02 (2006.01) E02F 3/18 (2024.01) A62C 3/02 (2024.01) Грунтометатель / А. А. Краснов, В. И. Караваев, К. В. Семенова [и др.]; опубл. 25.04.2024, Бюл. № 12.
23. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. М.: Издательство «Наука». 1980. 731 с.
24. Сумский С. Н. Расчёт кинематических и динамических характеристик плоских рычажных механизмов: Справочник. М.: Машиностроение. 1980. 312 с.
25. Краснов А. А. Кинематический анализ плоских механизмов с низшими кинематическими парами: учебное пособие. Иваново: ИГАСА. 2005. 153 с.
26. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики: учебник для вузов. 10-е изд., перераб и доп. М.: Высш. шк. 1986. 416 с.
27. Зиновьев В. А. Теория механизмов и машин. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры. 1959. 420 с.
28. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Изд. второе, стереотипное. М.: «Наука», Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры. 1976. 576 с.

## Reference

1. Novye tekhnicheskie resheniya v sfere tusheniya lesnyh pozharov [New technical solutions for extinguishing forest fires] / O. I. Grigor'eva, V. A. Savchenkova, I. V. Grigor'ev [et al.]. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, issue 4, pp. 66–77.
2. Efficiency and mechanism of fire suppression through pneumatic sandblasting fire-fighting / Fanbao Chen, Tingting Xu, Guanyu Hou [et al.]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49 (2023), 103361.
3. Avdeeva I. N., Gnusov M. A. Ekonomicheskoe obosnovanie celesoobraznosti ispolzovanie gruntometa dlya borby s lesnymi pozhamami [Economic justification for the feasibility of using a soil thrower to fight forest fires].



*Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: Teoriya i praktika*, 2014, issue 2, vol. 1 (6), pp 320–327.

4. Porshnev B. F. *O nachale chelovecheskoj istorii. (Problemy paleopsihologii)* [On the Beginning of Human History (Problems of Paleopsychology)]. Moscow: «Mysl». 1974. 487 p.

5. Malyukov S. V., Stupnikov D. S. Istoki zarozhdeniya gruntometatelnykh mashin [The origins of soil-throwing machines]. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik*, 2018, issue 4, vol. 4 (26), pp. 83–96.

6. Chetyrkin K. I. Mashina dlya proizvodstva zemlyanykh rabot [Machine for earthmoving], Patent SSSR SU 523, opubl. 31.08.1925

7. Berglund P. Grove N. Ditching machine. Patent US 738597. opubl. 08.09.1903.

8. Streeter S. Improvement in machinery for clearing snow and ice from railroad-trackc. Patent US 5347. opubl. 30.10.1847.

9. Kukibny A. A. *Metatel'nyye mashiny* [Throwing machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1964, 196 p.

10. O klassifikatsii i o kinematike mehanizmov pozharnykh grunto-metatelej [On the classification and kinematics of fire soil throwers] / A. A. Krasnov, K. V. Semenova, T. V. Pashkova [et al.]. *Aktualnye voprosy estestvoznaniya: sbornik materialov VIII Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2023. Pp. 47–50.

11. Krasnov A. A., Semenova K. V., Pashkova T. V. Klassifikatsiya metatelej ryhlykh materialov [Classification of loose material throwers]. *Sovremennye pozharobezopasnye materialy i tehnologii: sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii*. Ivanovo: Ivanovskaya pozharno-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Rossii, 2024. Pp.190–194.

12. Mesherskiy I. V. *Sbornik zadach po teoreticheskoy mehanike* [Collection of problems in theoretical mechanics]. 3-e izdan. Petrograd: Izdanie Studencheskogo Kooperativa «Politehnik», 1923. 140 p.

13. Meshcherskiy I. V. *Sbornik zadach po teoreticheskoy mekhanike* [Collection of problems in theoretical mechanics.]. 12-ye izdan. Pererab.. L.- Moscow: Glavnaya redaktsiya tekhniko-teor-oy. lit-ry, 1937. 264 p.

14. Piunovskiy I. I. *Teoreticheskie osnovy raboty centrobezhnogo razbrasyvatel'ya s radial'nymi lopast'yami* [Theoretical principles of operation of a centrifugal spreader with radial blades]. Minsk. Izdatelstvo AN BSSR Trudy instituta torfa. vol. VIII, 1959. 365 p.

15. Rabinovich S. S. *Issledovanie metatelej dlya transportirovaniya grunta v zemleroynykh mashinah* [Research of throwers for transporting

soil in earthmoving machines]. Moscow: Gosudarstvennyy komitet Soveta Ministrov SSSR po avtomatizatsii i mashinogstroeniyu. CINTIMASH. Issledovanie stroitelnykh i dorozhnykh mashin. vol. XXVI, 1959. 60 p.

16. Semkiv O. M., Shatohin V. M., Popova A. N. Issledovanie dvizheniya chasticy grunta po lopatke s profilem optimalnoy formy v pole centrobezhnykh sil inercii [Study of the movement of a soil particle along a blade with an optimally shaped profile in a field of centrifugal inertial forces]. *Mizhvidomchij naukovu tehnichnij zbirnik «Tehnichna estetika i dizajn»*. K.: KNUBA, 2012, vol. 11, pp. 165-174.

17. Shatokhin V. M. Doslidzhennya rukhu chastky gruntu po lopattsi: rezul'taty komp'yuternykh eksperymentiv [Research of the movement of a soil particle along a blade: results of computer experiments]. *Pratsi Tavriyskoho derzhavnogo ahrotekhnolohi-chnoho universytetu*. Melitopol: TSATU, 2012, issue 4, vol. 54, pp. 135–144.

18. Semkiv O. M., Popova A. M. Doslidzhennya trayektoriy ruhu chastki gruntu pislya yiyi vilotu z robochoyi poverhni lopatki rotor-nogo gruntometalnika [Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University]. *Praci Tavriyskogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu*. Melitopol: TDATU, 2012, issue 4, vol. 54, pp. 126–134.

19. Shatohin V. M., Shatohina N. V. Optimalnye traektorii dvizheniya tochki, peremeshayushejsya pod dejstviem centrobezhnoy sily inercii [Optimal trajectories of a point moving under the action of the centrifugal force of inertia]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij*. Harkov, 2012, vol. 4/7 (58), pp. 9–14.

20. Shatohin V. M., Semkiv O. M., Popova A. N. Ob optimalnoy forme lopatki rotor-nogo gruntometatelya [On the optimal shape of a rotary soil thrower blade]. *Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*, 2013, issue 2, pp. 49–55.

21. Karpov A. P., Dashkov N. G. Metatel' grunta [Soil thrower]. A.S. SSSR 388098 M.Kl. E02f 3/18, opubl. 22.06.1973. Byul. № 28.

22. Gruntometatel' [Gruntometatel']. A. A. Krasnov, V. I. Karavaev, K. V. Semenova [et al.]. Patent RF 2818223S1 E02F 3/18 (2006.01) A62C 3/02 (2006.01) E02F 3/18 (2024.01) A62C 3/02 (2024.01), opubl. 25.04.2024. Byul. № 12.

23. Artobolevskiy I. I. *Teoriya mehanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Izdatelstvo «Nauka», 1980. 731 p.

24. Sumskiy S. N. *Raschyot kinematicheskikh i dinamicheskikh harakteristik ploskikh rychaznykh mehanizmov: spravochnik* [Calculation of kinematic and dynamic characteristics of flat lever mechanisms: spravochnik]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 312 p.

25. Krasnov A. A. *Kinematicheskij analiz ploskih mehanizmov s nizshimi kinematicheskimi parami: uchebnoe posobie* [Kinematic analysis of flat mechanisms with lower kinematic pairs: tutorial]. Ivanovo: IGASA, 2005. 153 p.

26. Targ S. M. *Kratkij kurs teoreticheskoy mehaniki: uchebnik dlya vtuzov* [A Brief Course in Theoretical Mechanics: A Textbook for Universities]. 10-e izd., pererab i dop. Moscow: Vyssh. shk., 1986. 416 p.

27. Zinovev V. A. *Teoriya mehanizmov i mashin* [A Brief Course in Theoretical Mechanics]. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit-ry, 1959. 420 p.

28. Kamke E. *Spravochnik po obyknovennym differentsialnym uravneniyam* [Handbook of Ordinary Differential Equations]. Izd. vtoroe, stereotipnoe. Moscow: «Nauka», Gl. red. fiz.-mat. lit-ry, 1976. 576 p.

**Краснов Александр Алексеевич**

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин.

E-mail: krasnow.a.a@mail.ru.

*Krasnov Aleksandr Alekseevich*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, the Professor of the Department of Natural Sciences

E-mail: krasnow.a.a@mail.ru.

**Семенова Ксения Васильевна**

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: pboz2018@mail.ru

*Semenova Kseniya Vasilievna*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: skv1\_70@mail.ru

**Пашкова Тамара Викторовна**

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
Российская Федерация, г. Иваново

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор

Ивановский государственный университет,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент

E-mail: pashtavi@yandex.ru

*Pashkova Tamara Viktorovna*

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,  
Russian Federation, Ivanovo

Candidate of Physico-mathematical Sciences, docent, professor

Ivanovo State University,

Russian Federation, Ivanovo,

Candidate of Physico-mathematical Sciences, docent, associate professor

E-mail: pashtavi@yandex.ru