

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШНЕКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ЛЕСОПОЖАРНЫХ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНЫХ МАШИН С НАПОЧВЕННЫМ ПОКРОВОМ

доктор технических наук, профессор **П.И. Попиков**

аспирант **А.К. Поздняков**

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

В работе представлен обзор исследований рабочих процессов шнековых рабочих органов технологических машин. Отмечено, что в настоящее время не полностью решены такие важные вопросы в теории по шнековым рабочим органам, как необходимое число витков шнека, требуемое положение спирали шнека по отношению к центру и т.п., так как решение данных вопросов может обеспечить повышенную производительность орудия. Предлагается конструктивно-технологическая схема лесопожарной машины с многофункциональными модулями, которая состоит из шнековых рабочих органов, которые возможно сменять модульно с винтовой металлической нарезкой на щеточную в зависимости от участка и вида почвы, ротора метателя, с возможностью замены на роторы-метатели с различной формой и расположением лопаток, осуществления привода фрез-метателей и шнековых рабочих органов как от вала отбора мощности трактора, так и от гидромоторов, регулируемого кожуха-направителя с возможностью изменять направленный поток грунта. Составлена математическая модель шнекового рабочего органа с гидроприводом для удаления напочвенного покрова с лесной подстилкой при тушении лесных пожаров грунтометом, чтобы горючие материалы не попадали вместе с потоком грунта от ротора-метателя в зону огня. Рабочий процесс гидропривода шнековых рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины описан системой дифференциальных уравнений, включающей уравнения поступательного и вращательного движений шнекового рабочего органа и уравнение расходов рабочей жидкости. Поставлена задача оптимизации кинематических и динамических параметров шнековых рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины.

Ключевые слова: напочвенный покров, шнеки, лесной пожар, грунтометательная машина, рабочий процесс

MATHEMATICAL MODEL OF THE INTERACTION OF THE SCREW WORKING BODIES OF FOREST FIRE GROUND-THROWING MACHINES WITH THE GROUND COVER

DSc (Engineering), Professor **P.I. Popikov**

Post-graduate student **A.K. Pozdnyakov**

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

Abstract

The paper provides an overview of research on the working processes of screw working bodies of technological machines. It is noted that at present such important issues in the theory of auger working bodies as the required number of auger turns, the required position of the auger spiral in relation to the center, etc. have not been fully resolved, since the solution of these issues can provide an increased productivity of the tool. A structural and technological scheme of a forest fire machine with multifunctional modules is proposed, which consists of auger working bodies, which can be

changed modularly with a screw metal thread for a brush, depending on the area and type of soil, the rotor of the thrower, with the ability to drive the cutters-throwers and auger working bodies both from the power take-off shaft of the tractor, and using a hydraulic motor, a guide casing. A mathematical model of an auger working body with a hydraulic drive has been compiled for removing the ground cover with forest litter when extinguishing forest fires with a ground gun, so that combustible materials do not fall into the fire zone together with the soil flow from the rotor-thrower. The working process of the hydraulic drive of the auger working bodies of a forest fire ground-sweeping machine is described by a system of differential equations, including the equations of translational and rotational movements of the auger working body and the equation of the flow rate of the working fluid. The problem of optimization of kinematic and dynamic parameters of auger working bodies of forest fire ground-sweeping machine is set.

Keywords: ground cover, augers, forest fire, earth-throwing machine, working process

Введение

Одна из основных трудностей в борьбе с лесными пожарами обычными методами, использующими воду, связана с трудной топографией и с тем фактом, что обычно нет доступных дорог, чтобы приблизить противопожарную технику к очагу возгорания. На сегодняшний день большое количество научных коллективов прорабатывает тематику тушения кромки лесного пожара почвогрунтом. Одним из эффективных средств для профилактики и ликвидации низовых лесных пожаров являются грунтометательные машины, но у них отсутствует оборудование для удаления напочвенного покрова и горючих материалов из потока грунта, подаваемого роторами-метателями в зону огня. На наш взгляд, для этих целей подходят шнековые рабочие органы, которые широко применяются на различных технологических машинах для перемещения пластичных, сыпучих и пылевидных материалов. Однако они имеют серьезные недостатки – низкую производительность и высокую энергоемкость, вследствие чего почвогрунт прилипает на шнек и не имеет осевого перемещения, кроме этого, замечен повышенный износ винта, также возросли потери на перегрузки. Все это объясняется тем, что уровень теории по шнековым рабочим органам отстает от практических испытаний. Поэтому работа направлена на повышение эффективности применения шнековых рабочих органов на лесопожарных грунтометательных машинах и является актуальной.

Цель исследования

Повышение эффективности профилактики и тушения лесных пожаров путем обоснования кинематических и динамических параметров шнековых

рабочих органов лесопожарных грунтометательных машин на основании математической модели их взаимодействия с лесным напочвенным покровом при его перемещении от кромки огня.

Материалы и методы исследования

Теории и экспериментам роторно-винтовых и шнековых машин, где шнек – это движитель, посвящены работы российских учёных: Н.Ф. Кошарного, А.Ф. Николаева, С.В. Рукавишника, В.И. Володина, В.И. Захаренкова, А.П. Куляшова, В.А. Шапкина, а также зарубежных ученых: Дж. Гордона, Х. Дугоффа, Р. Эрлиха, А. Солтынского, Б. Коула и др.

В работе Т.А. Погорова [1] рассмотрен рабочий процесс шнекового рабочего органа косилки с осью вращения в горизонтальной плоскости для осуществления безподпорного среза и измельчения стеблей растений. При исследованиях технологического процесса рабочего органа шнека был определен параметр высоты зуба. Решены уравнения проекций скорости по крайним точкам зуб l (рис. 1) в параметрическом виде:

$$\begin{cases} dx/dt = \pm V_{\text{окр}} \cos \varphi + V_{\text{ж}} \\ dy/dt = V_{\text{окр}} \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

где φ – угол разворота ножа в плоскости Y, O, X , $\varphi = \omega t$;

ω – угловая скорость зуба, с^{-1} ;

t – время поворота зуба, с .

В результате проведенных теоретических исследований с помощью программы Microsoft Excel были получены данные траектории ленты ножа в зоне разрезания растений в зависимости от оборотов рабочего органа, диаметра, угла подъема лезвия шнека (рис. 2).

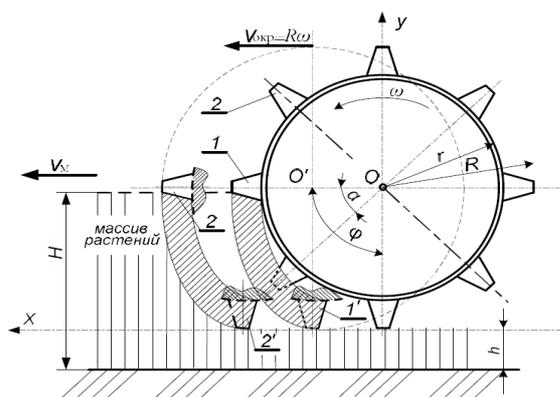


Рис. 1. Траектория движения ленты ножа шнекового рабочего органа относительно покрова разрезаемых растений (вид сбоку) [1]

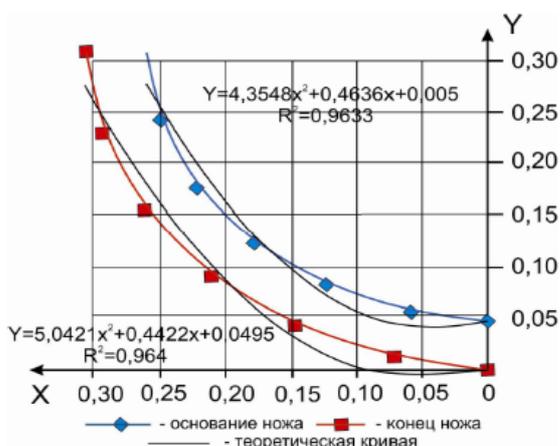


Рис. 2. Траектория движения лезвия ножа [1]

Конечные параметры опытов вошли в создание мелиоративной косилки КОС-2,5. Данная косилка отлично проявила себя в государственных приемочных испытаниях на Северо-Кавказском машиноиспытательном предприятии.

М.Ф. Закиров [2] провел экспериментальные исследования рабочего процесса малогабаритного шнекороторного снегоочистителя. Рабочий орган шнека диаметром 0,3 м сделан в виде барабана с ленточной лопастью из острого листа, приваренной к валу диаметром 0,07 м, шириной 0,7 м и проходом лопасти 0,3 м при угле подъема лезвия рабочего органа шнека всего 17,8°. Данные тензометрических датчиков указывались с преобразователя LTR-212, запитанного от ПК. В ходе испытаний на различных оборотах рабочего органа шнека использовали преобразователь Delta. В эксперименте было установлено, что при скорости движения лабора-

торной тележки 0,25 км/ч частоты вращения рабочего органа в диапазоне 350–450 об/мин хватает для удаления снега толщиной 110 мм. Общее сопротивление на рабочем органе возрастает в 2-5 раза для уровня снега 120 и 26 мм. После обработки полученных данных опытов был построен график значений сопротивлений на шнековом рабочем органе (рис. 3).

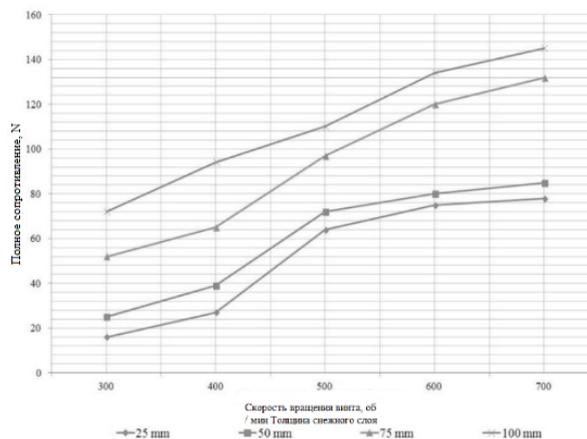
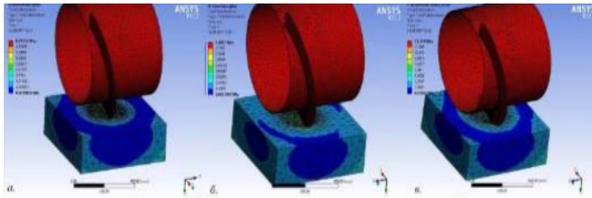


Рис. 3. Общее сопротивление резанию и перемещению снега шнеком [2]

Задачей будущих опытов является выявление соответствия оптимальной скорости движения базового шасси и частот вращения шнека при различных толщинах снега.

В результате исследований А.А. Липина [3] были получены картины напряженно-деформированного состояния НДС для трех типов грунтов: а) пластичной супеси, б) глины текучей, в) насыщенного водой песка (рис. 4). Установлено, что для получения таких зависимостей требуется проведение трудоемких экспериментов по получению экспериментальных зависимостей «нагрузка-перемещение», возникают трудности из-за постоянно меняющейся площади контакта оболочки шнека с грунтовым основанием, также не учитываются особенности деформирования грунта при сложном напряженном состоянии. В настоящее время в области машиностроения наиболее перспективным является использование систем автоматического инженерного анализа на основе метода конечных элементов с использованием объемных моделей.



а) пластичная супесь, б) глина текучая,
в) насыщенный водой песок

Рис. 4. Картина распределения перемещений [3]

Исследования А.В. Согина, А.Г. Китова, N.J. Whitehouse [5, 7] предназначены для решения вопросов технологии очистки водоемов. Донные отложения являются глинистыми грунтами, илом, песками и т.п. Проведен анализ кинематических параметров рабочих органов, физических и механических свойств грунта. Приведена зависимость скорости перемещения отложений по шнеку, момент сопротивлений на шнеке, объем производительности шнека от радиуса цилиндра воспроизведены в программе *Math CAD* (рис. 5).

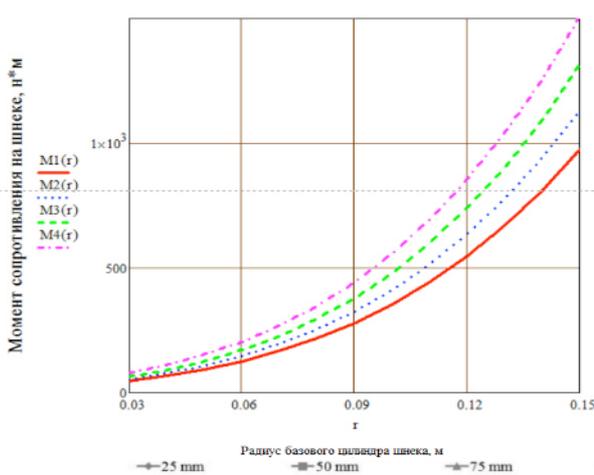


Рис. 5. Зависимость момента сопротивления на шнеке от радиуса базовой точки шнека [5]

В работах И.М. Бартенева, С.В. Малюкова, L. Nunez-Regueira, V.N. Parahina [4, 8, 9, 12-15] использовано математическое моделирование рабочих процессов шнековых рабочих органов лесопожарной машины, при котором лесной грунт представляется множеством (порядка 6000) шарообразных элементов (диаметром порядка 7 см). Из геометрических параметров шнекового барабана наиболее важными являются глубина нарезки (или высота винтовой полосы) h и шаг винта s . Для ис-

следования глубины ленты был проведен компьютерный эксперимент из 7 серий, в которых изменили h от 4 до 16 см с шагом в 4 см.

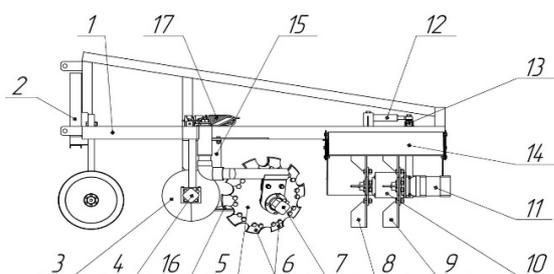
Мощность, потребляемая грунтометательной машиной, около 16-24 кВт, при этом основная часть мощности потребляется шнековым барабаном, который глубоко внедряется в почвенный покров. Оптимальная глубина нарезки шнекового барабана должна быть в пределах 8-10 см, при которой шнек практически полностью очищает рабочую полосу от напочвенного слоя, но в то же время не слишком сильно заглублен, чтобы вызвать большие потери мощности. В этом случае доля напочвенного покрова в метаемом грунте составляет 11-15 %, производительность грунтомета – около 41 кг/с, потребляемая мощность – 11-16 кВт.

Таким образом, анализ исследований, проведенных в смежных научных областях, позволяет проводить дальнейшее изучение процессов взаимодействия шнековых рабочих органов лесопожарных грунтометательных машин с напочвенным покровом.

Результаты и обсуждение

На основании совместных исследований с проф. И.М. Бартеневым [6, 9, 10, 11] предлагается конструктивно-технологическая схема лесопожарной грунтометательной машины с многофункциональными модулями: шнековых рабочих органов, которые возможно менять модульно с винтовой металлической нарезкой на щеточную в зависимости от участка и вида почвы, ротора-метателя с возможностью замены на роторы-метатели с различной формой и расположением лопаток, осуществления привода фрез-метателей и шнековых рабочих органов как от вала отбора мощности трактора, так и от гидромоторов, регулируемого кожуха-направителя с возможностью изменять направленный поток грунта (рис. 6).

Согласно расчетной схеме (рис. 7) нами составлена математическая модель шнекового рабочего органа с гидроприводом для удаления напочвенного покрова с лесной подстилкой, чтобы горючие материалы не попадали в зону огня вместе с потоком грунта от ротора-метателя.



рама – 1, механизм навески – 2, шнековый рабочий орган – 3, гидромотор привода шнека – 4, сферические диски – 5, съемная режущая кромка – 6, гидромоторы привода сферических дисков – 7, фрезы-метатели – 8, 9, гидромоторы привода фрез-метателей – 10, 11, выносной гидроцилиндр – 12, вертикальная ось – 13, щитки-направители – 14, стойка – 15, рыхлитель – 16, пружины растяжения – 17, опорные катки – 18

Рис. 6. Конструктивно-технологическая схема лесопожарной грунтометательной машины с шнековыми рабочими органами для удаления напочвенного покрова (собственные разработки)

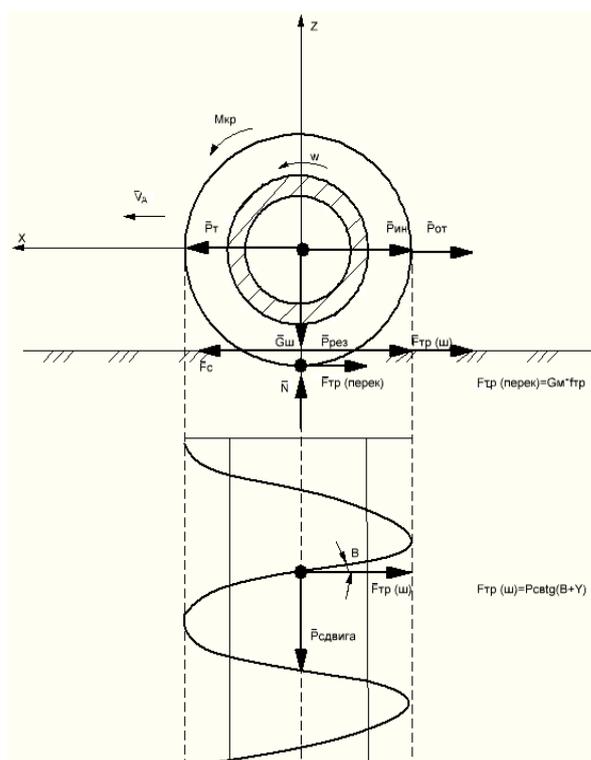


Рис. 7. Расчетная схема шнекового рабочего органа (собственные разработки)

Рабочий процесс шнековых рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины описан системой дифференциальных уравнений, включающей уравнения поступательного и вращатель-

ного движения шнекового рабочего органа и уравнения расходов рабочей жидкости в гидроприводе

$$\begin{cases} (M_{ш} + M_{гр}) \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = P_t - (M_{ш} \cdot g + M_{гр} \cdot g + P_{пр}) \cdot f - K_y \cdot h \cdot L - \frac{\delta \cdot M_{гр} \cdot R \cdot d \cdot \varphi}{2 \cdot t \cdot \frac{d\varphi}{dt}}; \\ I_{пр} \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{q_n \cdot P}{2\pi} - F_c \cdot \left(R - \frac{h}{2}\right); \\ q_n \cdot n_n = \frac{q_n}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \alpha_y \cdot p + k_p \cdot \frac{dp}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где $M_{ш}$ – масса шнека, кг;

$M_{гр}$ – масса напочвенного покрова, проходящего через ротор, кг;

P_t – сила тяги трактора, Н;

$P_{пр}$ – сила пружины предохранителя, Н;

f – коэффициент перекатывания, $f=0,15 \dots 0,20$;

δ – коэффициент отбрасывания напочвенного покрова ($0,15 \dots 0,25$);

R – радиус шнека, м;

K_y – коэффициент удельного сопротивления резанию ($0,15 \dots 0,30$), МПа;

L – длина шнека, м;

h – глубина отделяемого покрова ($0,10 \dots 0,15$), м;

ω – угловая скорость шнека, c^{-1} ; $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$;

t – время, с;

$I_{пр}$ – приведенный к валу гидромотора момент инерции, определяется по формуле

$$I_{пр} = (M_{ш} + M_{г}R^2), \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (3)$$

φ – угол поворота вала шнека, рад;

q_n, q_m – рабочие объемы насоса и гидромотора, $\text{м}^3/\text{об}$;

p – давление рабочей жидкости, Па;

α_y – коэффициент утечек, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{Па})$;

n_n – частота вращения насоса, с^{-1} ;

k_p – коэффициент податливости упругих элементов гидропривода, $\text{м}^5/(\text{Н} \cdot \text{с})$;

$$K_p = \frac{10^{-5}}{7,28p + 10^6} (\text{М}^3/\text{Па}). \quad (4)$$

Силу сопротивления F_c резанию и сдвига напочвенного покрова с растительными горючими остатками по шнеку с учетом исследований [5] можно определить по формуле

$$F_c = b \cdot h \cdot \tau \cdot f \cdot \cos\beta + \frac{2}{g} \cdot b \cdot \mu \cdot v_0 \cdot \left(\frac{g \cdot h \cdot \tau}{\mu \cdot v_0} + 1 \cdot \frac{3 \cdot \cos\beta + 1}{\sin\beta} + b \cdot g \cdot \frac{h^2}{2} \right), \quad (5)$$

где b – ширина винтовой лопасти, м;

τ – сопротивление сдвигу напочвенного покрова, Па;

V_0 – скорость резания, м/с;

ρ – плотность напочвенного покрова, кг/м³;

μ – вязкость напочвенного покрова, Па·с.

Подставляем формулы (3), (4), (5) в уравнения (2), получим математическую модель рабочего процесса шнекового рабочего органа с гидроприводом

$$\left\{ \begin{array}{l} (M_{\text{ш}} + M_{\text{гп}}) \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = P_{\text{T}} - (M_{\text{ш}} \cdot g + M_{\text{гп}} \cdot g + P_{\text{гп}}) \cdot f - K_{\text{y}} \cdot \\ \cdot h \cdot L - \frac{\delta \cdot M_{\text{гп}} \cdot R \cdot d\varphi}{2 \cdot \tau \cdot dt}; \\ (M_{\text{ш}} + M_{\text{гп}} R^2) \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{qM \cdot p}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\begin{array}{l} b \cdot h \cdot \tau \cdot R \cdot \cos\beta + \frac{2}{g} \cdot b \cdot \mu \cdot v_0 \cdot R \\ \left(\sqrt{\frac{g \cdot h \cdot \tau}{\mu \cdot v_0} + 1} \cdot \frac{3 \cdot \cos\beta + 1}{\sin\beta} + b \cdot g \cdot \frac{h^2}{2} \right) \cdot \right. \\ \left. \cdot \left(R - \frac{h}{2} \right); \right. \\ q_{\text{ш}} \cdot n_{\text{ш}} = \frac{q_{\text{ш}}}{\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \alpha_{\text{y}} p + \frac{10^{-5}}{7,28p + 10^6} \cdot \frac{dp}{dt}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Влияние кинематических и динамических параметров шнекового барабана – угловой скорости шнека и давления рабочей жидкости в гидромоторе – на показатели эффективности рабочего процесса можно оценить на основании решения задачи двухфакторной оптимизации кинематических и динамических параметров шнекового барабана. Решить задачу оптимизации можно с помощью изменения фактора угловой скорости и давления жидкости, в которой одновременно будут минимальными доля напочвенного покрова в потоке грунта и потребляемая шнеком мощность, а также будет максимальной производительность грунтомета.

При использовании метода конечных элементов силу сопротивления резанию и сдвига F_c можно определить через ее составляющие в системе координат ZOXY с помощью системы уравнений [7]

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{\text{э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{э}}} (F_{xij}^{\text{y}} + F_{xij}^{\text{B}}) + \sum_{k=1}^{N_{\text{п}}} (F_{yik}^{\text{y}} + F_{yik}^{\text{B}}); \\ m_{\text{э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{э}}} (F_{yij}^{\text{y}} + F_{yij}^{\text{B}}) + \sum_{k=1}^{N_{\text{п}}} (F_{yik}^{\text{y}} + F_{yik}^{\text{B}}); \\ m_{\text{э}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{\text{э}}} (F_{zij}^{\text{y}} + F_{zij}^{\text{B}}) + \sum_{k=1}^{N_{\text{п}}} (F_{yik}^{\text{y}} + F_{yik}^{\text{B}}) - m_{\text{э}} g, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $m_{\text{э}}$ – масса элемента; t – время; $N_{\text{э}}$ – количество элементов; $N_{\text{п}}$ – количество элементарных

поверхностей; $F_{xij}^{\text{y}}, F_{yij}^{\text{y}}, F_{zij}^{\text{y}}$ – компоненты силы упругости, действующей между элементами и пропорциональной внедрению элементов друг в друга; $F_{xij}^{\text{B}}, F_{yij}^{\text{B}}, F_{zij}^{\text{B}}$ – компоненты силы вязкого трения между элементами, пропорциональной разности скоростей элементов; $F_{yik}^{\text{y}}, F_{yik}^{\text{B}}, F_{yik}^{\text{y}}$ и $F_{yik}^{\text{y}}, F_{yik}^{\text{B}}, F_{yik}^{\text{y}}$ – компоненты сил упругости и вязкого трения при сопряжении элемента i с элементарной поверхностью k ; g – ускорение свободного падения.

Рабочие поверхности шнекового барабана состоят из боковой поверхности цилиндра, моделируемой как отдельная геометрическая фигура, и элементарных треугольников, образующих винтообразную поверхность. Барабан вращается с заданной угловой скоростью, образуя торообразную поверхность. Влияние кинематических и динамических параметров шнекового барабана (скорости подачи и скорости резания шнека, динамических нагрузок в переходных режимах и др.) на показатели эффективности рабочего процесса можно оценить на основании решения задачи с помощью компьютерной программы. Решить задачу оптимизации можно с помощью изменения фактора, в котором одновременно будут минимальными доля напочвенного покрова в потоке грунта, потребляемая шнеком мощность, а также будет максимальной производительность лесопожарной грунтометательной машины.

Заключение

Таким образом, анализ исследований, проведенных в смежных научных областях и в лесном хозяйстве, позволяет проводить дальнейшее изучение процессов взаимодействия шнековых рабочих органов с напочвенным покровом. Предложена конструктивно-технологическая схема лесопожарной грунтометательной машины с многофункциональными модулями шнековых рабочих органов. Составлена математическая модель удаления напочвенного покрова при тушении лесных пожаров грунтометательной машиной с гидроприводом шнековых рабочих органов. Поставлена задача оптимизации кинематических и динамических параметров шнековых рабочих органов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90082 «Аспиранты»

Библиографический список

1. Лобанов, Г. Л. Математическая модель траектории движения ножей шнекового режущего аппарата в зоне резания стеблей растений / Г. Л. Лобанов, Т. А. Погоров // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2017. – № 1 (25). – С. 207–216.
2. Закиров, М. Ф. Исследование влияния шага шнека на мощность привода питателя малогабаритного шнекороторного снегоочистителя / М. Ф. Закиров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 2. – С. 56–57.
3. Липин, А. А. Статический прочностной расчет системы «шнек-грунт» / А. А. Липин, А. Д. Стрижак // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития. – 2017. – С. 17–19.
4. Bartenev, I. M. Research and development of the method of soil formation and delivery in the form of a concentrated flow to the edge of moving ground forest fire / I. M. Bartenev, P. I. Popikov, S. V. Malyukov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – No. 226 (1). – 012052. – DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052.
5. Согин, А. В. Средства гидромеханизации для очистки водных объектов от донных отложений : специальность 05.20.01 «Технология и средства механизации сельского хозяйства» : дис. ... д-ра техн. наук : защищена 07.06.2011 / Согин Александр Васильевич. – Москва, 2011. – 360 с.
6. Бартнев, И. М. Анализ рабочих органов технических средств для тушения лесных пожаров / И. М. Бартнев, А. К. Поздняков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2020. – № 1 (48). – С. 119–122. – DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-119-122.
7. Whitehouse, N. J. Forest fires and insects: palaeontomological research from a subfossil burnt forest / N. J. Whitehouse // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2000. – Vol. 164. – № 1-4. – P. 231–246.
8. Calculation of forest biomass indices as a tool to fight forest fires / L. Nunez-Regueira, J. A. Rodriguez-Anon, J. Proupn-Castineiras, O. Nunez-Fernandez // Thermochemica Acta. – 2001. – Vol. 378. – № 1-2. – P. 9–25. – DOI: 10.15372/SJFS20150609.
9. Комбинированный лесопожарный грунтomet и рекомендации по его применению / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк, П. Э. Гончаров [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 174–184.
10. Патент № 2684940 Российская Федерация, МПК E02 F 3/18. Пожарный грунтomet-полосопрокладыватель : № 2016104672; заявл. 09.07.2018; опублик. 16.04.2019 / И. М. Бартнев, П. И. Попиков, С. В. Малюков, С. В. Зимарин, Н. А. Шерстюков ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ».
11. Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров / М. В. Драпалюк, И. М. Бартнев, М. А. Гнусов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 232–246.
12. Повышение эффективности предупреждения и тушения лесных пожаров с помощью лесопожарной машины / М. А. Гнусов, П. И. Попиков, С. В. Малюков, Н. А. Шерстюков, А. К. Поздняков // IOP Conference Series: Материаловедение и инженерия. – 2020. – Т. 919. – № 3. – С. 032025.
13. Kruggel-Emden, H. A study on tangential force laws applicable to the discrete element method (DEM) for materials with viscoelastic or plastic behavior / H. Kruggel-Emden, S. Wirtz, V. Scherer // Chemical Engineering Science. – 2008. – No. 63 (6). – P. 1523–1541.
14. Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method / Y. Tsunazawa, Y. Shigeto, C. Tokoro, M. Sakai // *Chemical engineering science*. – 2015. – No. 138. – P. 791–809. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.23.11876.
15. Guo, Y. Discrete element method simulations for complex granular flows / Y. Guo, J. S. Curtis // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2015. – No. 47. – P. 21–46.

References

1. Lobanov G. L., Pogorov T. A. (2017) *Matematicheskaja model traektorii dvizhenija nozhey shnekovogo rezhushchego apparata v zone rezanija stebelj rastenij* [Mathematical model of screw cutterbar cutting blades movement trajectory in the cutting zone of plant stems]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 1 (25), pp. 207-216 (in Russian).
2. Zakirov M. F. (2015) *Issledovanie vlijanija shaga shneka na moshhnost' privoda pitatelja malogabaritnogo shnekorotornogo snegoochistitelja* [Investigation of the influence of the auger pitch on the power of the feeder drive of a small-sized auger snow blower]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Scientific journal IzhSTU named after M.T. Kalashnikov. Intelligent systems in production], no. 2, pp. 56-57 (in Russian).
3. Lipin A. A., Strizhak A. D. (2017) *Staticheskij prochnostnoj raschet sistemy «shnek-grunt»* [Statistical strength calculation of the «auger – soil» system]. *Nauka segodnja: global'nye vyzovy i mehanizmy razvitija* [Science today: global challenges and development mechanisms]. Vologda, part 1, pp. 17-19 (in Russian).
4. Bartenev I.M., Popikov P.I., Malyukov S.V. (2019) Research and development of the method of soil formation and delivery in the form of a concentrated flow to the edge of moving ground forest fire. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, no. 226 (1), 012052. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012052.
5. Sogin A. V. Means of hydro-mechanization for cleaning water bodies from bottom sediments : DSc thesis (Engineering). Moscow, 2011. 360 p.
6. Bartenev I.M., Pozdnyakov A.K. (2020) *Analiz rabochih organov tehniceskikh sredstv dlja tushenija lesnyh pozharov* [Analysis of the working bodies of technical means for extinguishing forest fires]. *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice]. Voronezh, no. 1 (48), pp. 119-122 (in Russian). DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-119-122.
7. Whitehouse N. J. (2000) Forest fires and insects: palaeoentomological research from a subfossil burnt forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 164, No. 1-4, pp. 247-262.
8. Nunez-Regueira L., Rodriguez-Anon J. A., Proupn-Castineiras J., Nunez-Fernandez O. (2001) Calculation of forest biomass indices as a tool to fight forest fires. *Thermochimica*, Vol. 378, no. 1-2, pp. 9-25. DOI: 10.15372/SJFS20150609.
9. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Goncharov P. E. (et al.) (2012) *Kombinirovannyj lesopozharnyj gruntomet i rekomendacii po ego primeneniju* [Combined forest fire primer paper and recommendations for its use]. *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], no. 84, pp. 174-184 (in Russian).
10. Bartenev I. M., Popikov P. I., Malyukov S. V., Zimarin S. V., Sherstyukov N. A. (2019) *Pozharnyj gruntomet-polosoprokladnyj* [Firefighting soil-thruster and fire-break maker]. Patent RF, no. 2018125062.
11. Drapalyuk M. V., Bartenev I. M., Gnusov M. A. (et al.) (2012) *Matematicheskaja model protsessa podachi i vybrosa grunta rabochimi organami kombinirovannoj mashiny dlja tushenija lesnykh pozharov* [Mathematical model of the process of feeding and ejecting soil by the working bodies of a combined machine for extinguishing forest fires]. *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], no. 84, pp. 232-246 (in Russian).
12. Gnusov M. A., Popikov P. I., Malyukov S. V., Sherstyukov N. A., Pozdnyakov A. K. (2020). Improving the efficiency of forest fire prevention and suppression with of forest fire machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 919, No. 3, p. 032025.

13. Kruggel-Emden H., Wirtz S., Scherer V. (2008). A study on tangential force laws applicable to the discrete element method (DEM) for materials with viscoelastic or plastic behavior. *Chemical Engineering Science*, 63 (6), pp. 1523-1541.

14. Tsunazawa Y., Shigeto Y., Tokoro C., Sakai M. (2015). Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method. *Chemical engineering science*, 138, pp. 791-809. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.23.11876.

15. Guo Y., Curtis J. S. (2015). Discrete element method simulations for complex granular flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 47, pp. 21-46.

Сведения об авторах

Попиков Петр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Поздняков Антон Константинович – аспирант второго курса кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: pozdnyakov101@gmail.com.

Information about authors

Popikov Petr Ivanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Pozdnyakov Anton Konstantinovich – second year postgraduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: pozdnyakov101@gmail.com.