

УДК 630.232.427+004.942

UDC 630.232.427+004.942

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
ЛЕСОПОСАДОЧНОЙ МАШИНЫ****SIMULATION OF TREE PLANTER MAIN  
UNITS**

Шавков Михаил Викторович  
аспирант

*ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная  
лесотехническая академия», Воронеж, Россия*

Shavkov Michael Victorovich  
postgraduate student

*Voronezh State Academy of Forestry and Technologies,  
Voronezh, Russia*

Разработана физико-математическая модель, которая адекватно описывает работу основных рабочих органов лесопосадочной машины. Данная модель позволит с помощью программного обеспечения представить весь технологический процесс механизированной посадки и провести теоретические исследования

The physical-mathematical model which adequately describes the work of tree planter main units has been developed. This model will allow to present all the technological process of the mechanized planting by means of the software and to carry out the analysis researches

Ключевые слова: ЛЕСОПОСАДОЧНАЯ  
МАШИНА, КОМБИНИРОВАННЫЙ СОШНИК,  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПОСАДОЧНЫЙ АППАРАТ,  
УПЛОТНЯЮЩИЕ КАТКИ, ЛЕСНАЯ ПОЧВА

Keywords: TREE PLANTER, COMBINED  
TRENCHER, SIMULATION, PLANTING  
MECHANISM, COVERING ROLLERS, FOREST  
SOIL

**Постановка вопроса.** Существующие лесопосадочные машины обладают общей схемой расположения основных рабочих органов, которые осуществляют одинаковые функции в технологическом процессе посадки растений, а именно – сошник выполняет роль бороздообразующего органа, посадочный аппарат перемещает растения в посадочное место, а уплотняющие катки заделывают корневую систему растений нагнетаемым потоком почвы и производят уплотнение вокруг корней. В результате лесопосадочным машинам присущи идентичные недостатки, связанные с: наклоном сеянцев от вертикали больше допустимого значения, попаданием верхнего подсушенного слоя на дно борозды, образованием кротовин, отсутствием естественного расположения корней посаженных растений в борозде, необходимостью осуществления трудоемких регулировок по определению оптимального расстояния между сошником и уплотняющими катками при использовании лесопосадочной машины на различных типах почв. Исследования конструкций лесопосадочных машин показали, что данные проблемы

механизированной посадки заключаются непосредственно в раздельности функций основных узлов и их взаимной координации выполняемых операций [1, 2]. Для устранения вышеперечисленных недостатков разработана новая конструкция лесопосадочной машины [3].

**Цель работы.** Для теоретического исследования функционирования и оптимизации параметров лесопосадочной машины необходима математическая модель, всесторонне описывающая основные узлы и процесс посадки: взаимодействие поверхностей сошника с почвой, работу посадочного аппарата, движение семян, заделку борозды уплотняющими катками.

**Методика.** Моделирование рабочих органов разрабатываемой лесопосадочной машины осуществляется с помощью метода конечных элементов и классической динамики упругого тела.

**Результаты работы.** Лесная почва является сложным для моделирования объектом ввиду своего типологического разнообразия и большого количества физико-механических параметров (тип почвы, ее твердость, влажность, плотность, рельеф поверхности) [4, 5]. В то же время движение потоков почвы лежит в основе принципа работы лесопосадочной машины, поэтому модель почвы должна быть максимально близкой к реальности. В рамках метода почва представляется совокупностью большого количества шарообразных элементов малого размера, способных взаимодействовать как между собой, так и с сошником лесопосадочной машины. С геометрической точки зрения взаимодействие сошника с почвой представляет собой задачу нахождения расстояния  $r_v$  от некоторой поверхности до сферической поверхности произвольного шарового элемента почвы. При этом вязкоупругая сила  $\mathbf{F}$ , действующая на элемент почвы, определяется по формуле

$$\mathbf{F} = c \cdot r_g \cdot \mathbf{n} - kv, \quad (1)$$

где  $\vec{n}$  и  $\vec{v}$  – направление и скорость взаимодействия шарового элемента и поверхности сошника;  $c$  и  $k$  – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия.

В модели необходимо корректно воспроизвести сложную геометрическую форму сошника, а также взаимодействие поверхностей сошника с элементами-шарами почвы. В рамках конечно-элементного подхода поверхности сложной формы обычно заменяются большим количеством плоских фигур [6, 7]. Как правило, в качестве элементарной фигуры используют треугольники, так как они легко стыкуются между собой и позволяют воспроизводить поверхность любой формы. Поэтому в рамках разрабатываемой модели поверхности сошника представляются в виде совокупности элементарных треугольников. Так как в данной работе необходимо оптимизировать форму сошника, размеры и положение окон в нем, угол отклонения и длину захватов почвы, то представление сошника в виде совокупности треугольников очень удобно тем, что можно легко изменить форму сошника, изменяя координаты лишь нескольких вершин треугольников.

Треугольник в трехмерном пространстве задается координатами трех его вершин  $T_{i1}(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1})$ ,  $T_{i2}(x_{i2}, y_{i2}, z_{i2})$ ,  $T_{i3}(x_{i3}, y_{i3}, z_{i3})$ , где  $T$  – обозначение точки-вершины треугольника;  $i$  – номер треугольника; индексы 1, 2 или 3 – означают номер вершины для  $i$ -го треугольника. Для образования сложных поверхностей треугольники стыкуются между собой по какому-либо ребру: для соседних треугольников совпадают по две вершины (например:  $T_{71} = T_{81}$ ,  $T_{72} = T_{82}$ ). Так как поверхности сошника не являются замкнутыми, после стыковки всех треугольников остаются свободными ребра, которые выступают, например, в качестве верхних и нижних краев металлических листов сошника.

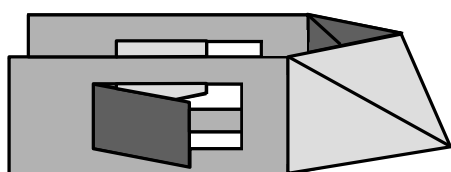
Рабочая поверхность сошника в модели с некоторой степенью заглубления была разбита на большое количество треугольников (24

треугольника для двухоконного сошника и 40 треугольников для четырехоконного сошника) (рис. 1).

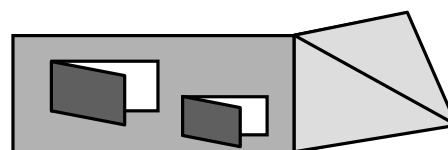
С течением времени сошник движется в продольном направлении по отношению к почве. При этом необходимо непрерывно корректировать координаты точек – вершин треугольников  $T_{ij}$  (где  $i$  – номер треугольника,  $j$  – номер вершины). В рамках приближения о равномерном прямолинейном движении сошника вдоль оси  $OY$  необходимо изменять все игрековые координаты треугольников:

$$y_{ij} = y_{0ij} + v_c \cdot t, \tag{2}$$

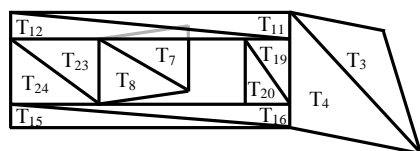
где  $y_{0ij}$  – координаты вершин треугольников в момент начала моделирования;  $v_c$  – скорость поступательного движения сошника;  $t$  – время, прошедшее с начала моделирования.



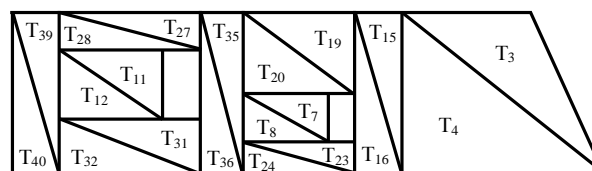
Представление рабочих поверхностей двухоконного сошника в модели



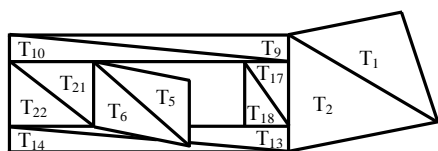
Представление рабочих поверхностей четырехоконного сошника в модели (правая половина сошника)



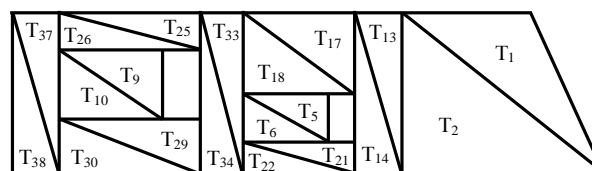
Разбиение левой половины сошника на треугольники



Разбиение левой половины сошника на треугольники



Разбиение правой половины сошника на треугольники



Разбиение правой половины сошника на треугольники

*a*

*б*

Рисунок 1. Схематичное представление рабочих поверхностей двухоконного (*a*) и четырехоконного (*б*) сошника на начальном этапе моделирования в виде совокупности элементарных треугольников  $T_i$

В модели также необходимо учесть постепенное заглубление сошника в первые секунды движения. В момент времени  $t = 0$  сошник находится над почвой (нижние точки касаются поверхности почвы), и за промежуток времени  $t_{\text{заг}}$  он должен выйти на заданную глубину  $a$ . Поэтому до момента времени  $t = t_{\text{заг}}$  координаты  $z_{ij}$  всех вершин треугольников изменяются по следующему линейному закону:

$$z_{ij} = z_{0ij} - a \cdot t / t_{\text{заг}}, \quad (3)$$

где  $z_{0ij}$  – координаты вершин треугольников в момент начала моделирования.

При движении сошника поверхности его входят в контакт с элементами почвы, что вызывает появление как сил, действующих на поверхности сошника и вызывающих сопротивление движению, так и сил, действующих на элементы почвы и вызывающих движение элементов и изменение конфигурации почвенной системы. Силы рассчитываются в предположении о вязкоупругом взаимодействии между поверхностью и элементами почвы [8]. При расчете сил основную сложность вызывает проверка, контактирует ли элемент с данным треугольником  $T_{ij}$ , и, если контактирует, то производится расчет величины внедрения  $r_{\text{вн}}$  элемента в плоскость данного треугольника и направления взаимодействия.

Проверка контакта шара  $j$  с треугольником  $i$  производится в два этапа: сначала находится проекция центра шара  $(x_j, y_j, z_j)$  на плоскость, содержащую треугольник, затем проверяется, попадает ли точка проекции внутрь треугольника. Поэтому сначала составляется уравнение плоскости, проходящей через три точки – вершины  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$ ,  $T_{i3}$  треугольника по известной в аналитической геометрии формуле

$$\begin{vmatrix} x - x_{i1} & y - y_{i1} & z - z_{i1} \\ x_{i2} - x_{i1} & y_{i2} - y_{i1} & z_{i2} - z_{i1} \\ x_{i3} - x_{i1} & y_{i3} - y_{i1} & z_{i3} - z_{i1} \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

После раскрытия определителя последнее уравнение приводится к

виду

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (5)$$

где  $A, B, C, D$  – коэффициенты уравнения плоскости.

Затем уравнение плоскости нормируется путем деления всех коэффициентов уравнения на длину нормального вектора  $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$ . После введения новых обозначений коэффициентов (с индексом "н"), нормированное уравнение плоскости можно записать в следующем виде:

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (6)$$

Тогда отклонение  $r_{вн}$  центра шара  $(x_j, y_j, z_j)$  от плоскости рассчитывается по формуле

$$r_{вн} = A_n x_j + B_n y_j + C_n z_j + D_n = 0. \quad (7)$$

Так как большинство элементов почвы не контактируют с сошником, на данном этапе расчета производится отсечение всех неконтактирующих элементов почвы по условию  $r_{вн} > d_{ПВ}/2$ .

Затем необходимо найти проекцию центра шара на плоскость данного треугольника. Так как известны координаты нормального вектора  $A_n, B_n$  и  $C_n$  и отклонение  $r_{вн}$  от точки до плоскости, проекция  $P(x_{П}, y_{П}, z_{П})$  находится смещением по нормальному вектору:

$$\begin{aligned} x_{П} &= x_j - A_n \cdot r_{вн}; \\ y_{П} &= y_j - B_n \cdot r_{вн}; \\ z_{П} &= z_j - C_n \cdot r_{вн}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для того чтобы проверить, попадает ли точка  $P$  внутрь треугольника  $T_i$ , используется метод проверки по площадям: сумма площадей трех треугольников с вершиной  $P$  должна равняться площади всего треугольника  $T_i$ , то есть

$$S(\Delta T_{i1} T_{i2} T_{i3}) = S(\Delta P T_{i2} T_{i3}) + S(\Delta T_{i1} P T_{i3}) + S(\Delta T_{i1} T_{i2} P). \quad (9)$$

Если суммарная площадь треугольников  $\Delta PT_{i2}T_{i3}$ ,  $\Delta T_{i1}PT_{i3}$  и  $\Delta T_{i1}T_{i2}P$  оказывается больше площади элементарного треугольника  $S(\Delta T_{i1}T_{i2}T_{i3})$ , то это означает, что точка P не лежит внутри треугольника  $T_i$  и шар не контактирует с данным треугольником.

В случае если шар контактирует с треугольником, производится расчет сил, действующих между элементом почвы сошником по известной величине внедрения  $r_{вн}$  по формуле, аналогичной (1).

При механизированной лесопосадке используются сеянцы с близкими геометрическими параметрами: примерно одинаковой длины и практически ровные. Поэтому в рамках модели сеянцы представляются в виде одинаковых тонких стержней. Для того чтобы корректно представить в модели корневую систему сеянца, нижняя часть сеянца считается не стержнем, а цилиндром с некоторым радиусом, равным среднему радиусу корневой системы (рис. 2).

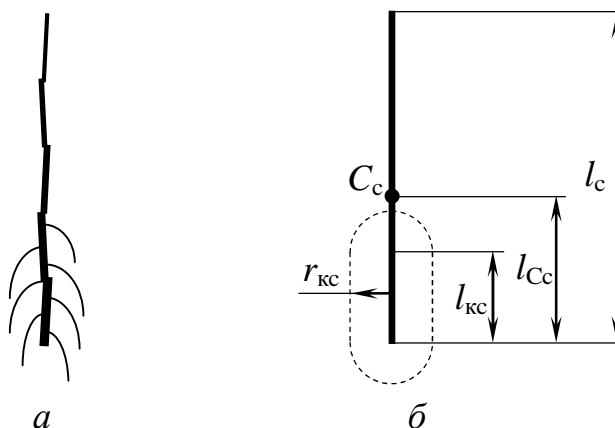


Рисунок 2. Представление сеянца в модели: а – реальный сеянец; б – модель

Сеянец после отпускания посадочным механизмом может совершать как поступательное движение в трехмерном пространстве, так и вращательное, с тремя независимыми осями вращения. Поэтому основные уравнения поступательного и вращательного движения сеянца  $i$

записываются следующим образом.

$$\begin{aligned}
 m_c \frac{d^2 x_{ci}}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{ши}} F_{ci-шj}^x ; \\
 m_c \frac{d^2 y_{ci}}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{ши}} F_{ci-шj}^y ; \\
 m_c \frac{d^2 z_{ci}}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{ши}} F_{ci-шj}^z - m_c g ,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

где  $m_c$  – масса сеянца;

$x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}$  – координаты центра  $C_c$   $i$ -го сеянца;

$N_{ши}$  – количество шаров-элементов почвы, взаимодействующих с  $i$ -м сеянцем;

$F_{ci-шj}^x, F_{ci-шj}^y, F_{ci-шj}^z$  – декартовы составляющие силы взаимодействия  $i$ -го сеянца и  $j$ -го элемента почвы.

Для расчета сил  $F_{ci-шj}^x, F_{ci-шj}^y, F_{ci-шj}^z$  используется алгоритм, основанный на методах аналитической геометрии. Просчет движения сеянцев производится параллельно с просчетом движения элементов почвы, поэтому модель хорошо воспроизводит помещение сеянца в почву, присыпание его боковыми потоками почвы, отпускание его механизмом захвата, усадку и смещение сеянца после отпускания его лесопосадочной машиной.

В модели сеянцы появляются через равные промежутки времени  $\Delta t_c$  через некоторое время после начала компьютерного эксперимента. В зависимости от  $\Delta t_c$  и скорости движения сошника  $v_c$  расстояние между сеянцами  $\Delta l_c$  оказывается равным

$$\Delta l_c = \Delta t_c \cdot v_c.
 \tag{11}$$

В предлагаемой лесопосадочной машине используется ленточный посадочный механизм, который обеспечивает нулевую скорость сеянцу по отношению к почве в течение некоторого времени, необходимого для



присыпания сеянца почвой. В модели воспроизводится движение сеянца, удерживаемого механизмом захвата в течение заданного времени. Сеянец появляется в передней части сошника, движется по отношению к сошнику со скоростью  $v = -v_c$  (или другими словами выдерживается неподвижно по отношению к поверхности) и отпускается на некотором удалении  $y_c$  от сошника. После отпущения сеянца его движение описывается уравнениями (10).

Уплотняющие катки, как и сошник оказывают существенное влияние на почвенную систему, поэтому их необходимо учитывать при моделировании. Для того чтобы учесть прижимающее действие катков и их цилиндрическую геометрическую форму в модели катки, как и сошник, представляются в виде совокупности элементарных плоскостей (рис. 3).

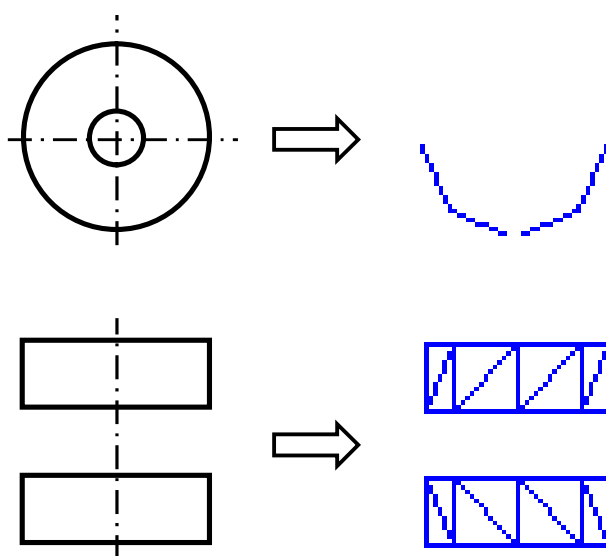


Рисунок 3. Представление уплотняющих катков в модели в виде совокупности элементарных треугольников

Данные элементарные плоскости неподвижно расположены по отношению к сошнику. Для того чтобы корректно учесть, что уплотняющие катки могут вращаться, коэффициент вязкого трения элементов-шаров об элементарные плоскости, представляющие катки,

принимается равным нулю. Таким образом, элементы почвы скользят по неподвижным поверхностям модельных катков, тем самым имитируя вращение катков.

**Вывод.** В результате составлена математическая модель, описывающая функционирование основных рабочих органов лесопосадочной машины и почвенной среды. Данная модель полностью описывает технологический процесс посадки и позволит с помощью программного обеспечения провести виртуальные эксперименты по определению основных параметров разрабатываемой новой конструкции лесопосадочной машины.

#### Список литературы

1. Бартенев И.М., Шавков М.В. Новая конструкция лесопосадочной машины // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 6. – С. 22–24.
2. Шавков М.В., Базарская Н.И. Tree planter design improvement // Лесотехнический журнал. – Воронеж, 2011. – № 3. – С. 175–178.
3. Пат. 2410862 Российская Федерация, МПК А01С11/02. Лесопосадочная машина / И. М. Бартенев, М. Л. Шабанов, М. В. Шавков; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ВГЛТА»-№2009123168/21; заявл. 17.06.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. №4. – 7 с.: 5 ил.
4. Синеоков Г.Н., Панов И.М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.
5. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: Учеб. для вузов / Под ред. А.Б. Лурье. – Л.: Колос. Ленингр. отд., 1979. – 312 с.
6. Советов Б.Я. Моделирование систем: Учеб. пособие / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.
7. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / Под ред. Е.Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.
8. Бартенев И.М., Шавков М.В., Посметьев В.В. Математическая модель функционирования сошника лесопосадочной машины // Вест. КрасГАУ. – 2011.– Вып. 4. – С. 122–128.

#### References

1. Bartenev I.M., Shavkov M.V. Novaja konstrukcija lesoposadochnoj mashiny // Traktory i sel'hozmashiny. – 2012. – № 6. – S. 22–24.
2. Shavkov M.V., Bazarskaja N.I. Tree planter design improvement // Lesotekhnicheskij zhurnal. – Voronezh, 2011. – № 3. – S. 175–178.
3. Pat. 2410862 Rossijskaja Federacija, MPK A01S11/02. Lesoposadochnaja mashina / I. M. Bartenev, M. L. Shabanov, M. V. Shavkov; zajavitel' i patentoobladatel' GOU VPO «VGLTA»-№2009123168/21; zajavl. 17.06.2009; opubl. 10.02.2011, Bjul. №4. – 7 s.: 5 il.

4. Sineokov G.N., Panov I.M. Teorija i raschet pochvoobrabatyvajushhih mashin. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 328 s.
5. Modelirovanie sel'skhozjajstvennyh agregatov i ih sistem upravlenija: Ucheb. dlja vuzov / Pod red. A.B. Lur'e. – L.: Kolos. Leningr. otd., 1979. – 312 s.
6. Sovetov B.Ja. Modelirovanie sistem: Ucheb. posobie / B.Ja. Sovetov, S.A. Jakovlev. – M.: Vyssh. shk., 1998. – 319 s.
7. Raschet i proektirovanie stroitel'nyh i dorozhnyh mashin na JeVM / Pod red. E.Ju. Malinovskogo. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 216 s.
8. Bartenev I.M., Shavkov M.V., Posmet'ev V.V. Matematicheskaja model' funkcionirovanija soshnika lesoposadochnoj mashiny // Vest. KrasGAU. – 2011.– Vyp. 4. – S. 122–128.