УДК 631.319.3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАСКАЛЫВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

ФОКИН Сергей Владимирович, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ЖУКОВА Анна Олеговна, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

НАЗАРОВ Андрей Алексеевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ЧУГОШКИНА Анна Валерьевна, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ШПОРТЬКО Оксана Николаевна, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

В статье приводится новая конструкция винтового дровокола, в которой, помимо винтового раскалывающего органа, предусматривается установка дополнительных рубительных ножей, позволяющих повысить производительность выполняемых работ по получению дровяной продукции. Разработана математическая модель процесса раскалывания древесины новым устройством, в основе которой лежит представление древесины как совокупности дискретных элементов и рабочих поверхностей устройства (раскалывающего органа, ножей, направляющей) как совокупности элементарных плоскостей, взаимодействующих между собой. Разработанная компьютерная программа позволяет с большой степенью адекватности проводить компьютерные эксперименты с полученной математической моделью рабочего процесса и в дальнейшем всесторонне исследовать полученные результаты.

Введение. При лесозаготовках возникает проблема использования низкокачественной древесины [1]. Одним из путей решения является переработки низкокачественных лесоматериалов на дрова. Для эффективного раскалывания древесины ранее нами предложена новая конструкция устройства для раскалывания [2]. Устройство работает следующим образом (рис. 1). Раскалывающий орган 4 приводится в движение посредством соединения с валом привода вращения. Древесина, расположенная на установленной на платформе 1 направляющей 2, подается при помощи подвижного толкателя 5 на раскалывающий орган 4 и ножи 3, установленные на основании 6.

Раскалывающий орган 4 и ножи 3 внедряются в древесину. Резание древесины ножами происходит в том же направлении, что и образовавшиеся трещины после внедрения раскалывающего органа. Вследствие нарушения связей между волокнами древесины происходит ее раскалывание на несколько частей. Благодаря применению направляющей, которая ограничивает движение древесины в стороны, и подвижного толкателя при подаче древесины на раскалывающий орган и ножи улучшаются условия труда оператора устройства.

Для предварительной проверки эффективности предложенного устройства и оптимизации его конструктивных и технологических параметров целесообразно использовать современные методы моделирования [3, 4, 5]. Поэтому целью данной статьи являлась разработка высокоадекватной математической модели устройства с широкими возможностями ее дальнейшего исследования.

Методика исследований. При моделировании устройства для раскалывания древесины необходимо корректно представить в модели древесину, конический винтовой раскалывающий орган, систему ножей, направляющую, а также процессы взаимодействия древесины с элементами устройства. Древесина является

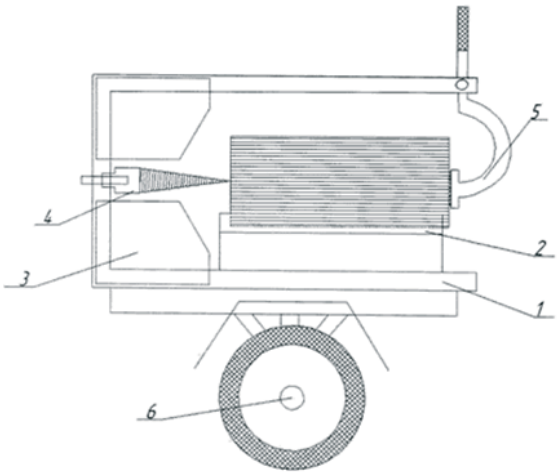

Рис. 1. Принципиальная схема устройства для раскалывания древесины: 1 – транспортировочная платформа; 2 – направляющая; 3 – система ножей; 4 – раскалывающий орган; 5 – подвижный толкатель; 6 – основание

сложным для моделирования объектом из-за своего типологического разнообразия, анизотропии, сложной структуры, большого количества возможных механических явлений и соответственно большого количества описывающих ее физико-математических параметров. Взаимодействие между двумя контактирующими элементами считается вязкоупругим. Уравнения движения элементов составляются на основе второго закона Ньютона:

$$
\begin{cases}
m_э \dfrac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum\limits_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N_э} \left(\begin{cases} c(d_э - r_j)\dfrac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k(r_{ij} - d_э)(v_{xi} - v_{xj}) & r_{ij} < d_o; \\ 0, \ r_{ij} \geq d_o; \end{cases} \right) + \\
\qquad + \sum\limits_{j=1}^{N_п} \left(\begin{cases} c_п(\dfrac{d_э}{2} - r_{i-пj})\dfrac{(x_i - x_{пj})}{r_{i-пj}} + k_п(r_{i-пj} - \dfrac{d_э}{2})(v_x - v_{xпj}) & r_{i-пj} < \dfrac{d_э}{2}; \\ 0, \ r_{i-пj} \geq \dfrac{d_э}{2}; \end{cases} \right); \\
m_э \dfrac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum\limits_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N_э} \left(\begin{cases} c(d_э - r_{ij})\dfrac{(y_i - y_j)}{r_j} + k(r_{ij} - d_э)(v_{yi} - v_{yj}) & r_{ij} < d_o; \\ 0, \ r_j \geq d_o; \end{cases} \right) + \\
\qquad + \sum\limits_{j=1}^{N_п} \left(\begin{cases} c_п(\dfrac{d_э}{2} - r_{i-пj})\dfrac{(y_i - y_п)}{r_{i-п}} + k_п(r_{i-пj} - \dfrac{d_э}{2})(v_{yi} - v_{yпj}), & r_{i-пj} < \dfrac{d_э}{2}; \\ 0, \ r_{i-пj} \geq \dfrac{d_э}{2}; \end{cases} \right); \\
m_э \dfrac{d^2 z_i}{dt^2} = -m_э g + \sum\limits_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N_э} \left(\begin{cases} c(d_э - r_j)\dfrac{(z_i - z_j)}{r_j} + k(r_{ij} - d_э)(v_{zi} - v_z) & r_{ij} < d_o; \\ 0, \ r_j \geq d_o; \end{cases} \right) + \\
\qquad + \sum\limits_{j=1}^{N_п} \left(\begin{cases} c_п(\dfrac{d_э}{2} - r_{i-п})\dfrac{(z_i - z_п)}{r_{i-п}} + k_п(r_{i-п} - \dfrac{d_э}{2})(v_z - v_{zпj}) & r_{i-п} < \dfrac{d_э}{2}; \\ 0, \ r_{i-пj} \geq \dfrac{d_э}{2}; \end{cases} \right),
\end{cases}
$$

где $m_э$ – масса элемента; x_i, y_i, z_i – декартовы координаты элемента; i – номер элемента; t – время; $N_э$ – количество элементов; j – номер элемента, возможно контактирующего с i-м элементом; c и d – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия элементов между собой; $d_э$ – диаметр элемента; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j; v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – декартовы составляющие скорости i-го элемента; d_o – расстояние ограничения взаимодействия между элементами; $N_п$ – количество элементарных треугольных поверхностей; $c_п$ и $d_п$ – коэффициенты жесткости и вязкости взаимодействия элемента с элементарной поверхностью; $r_{i-пj}$ – расстояние от центра i-го элемента до j-й поверхности; $v_{xпi}$, $v_{yпi}$, $v_{zпi}$ – декартовы составляющие скорости движения геометрического центра поверхности; g – ускорение свободного падения.

Для воспроизведения механических процессов (деформация, раскалывание, движение фрагментов) предлагаемая модель древесины основана на методе динамики частиц: древесина представляется совокупностью большого количества шарообразных элементов (порядка 2500 элементов) малого размера (около 3 см), способных взаимодействовать как между собой, так и с рабочими поверхностями и движущихся в пространстве по законам классической динамики [6].

Рабочие поверхности устройства (раскалывающий орган, ножи, направляющая) задаются совокупностью элементарных поверхностей треугольной формы, которые взаимодействуют, также вязкоупругим образом, с элементами древесины (рис. 2). Для образования протяженной поверхности треугольники стыкуются между собой по ребру: для соседних треугольников совпадают по две вершины. В целом, устройство для раскалывания древесины описывается довольно громоздкой системой дифференциальных и алгебраических уравнений. Решение системы производится численным методом – модифицированным методом Эйлера–Коши [7]. Для удобства исследования модели составлена компьютерная программа “Программа для моделирования устройства для раскалывания древесины” на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.0.

Программа предназначена для моделирования процесса раскалывания древесины. Перед началом работы в программу вводятся геометрические параметры раскалывающего органа, направляющей, ножей и механические параметры древесины. В процессе работы программой на экран компьютера непрерывно выводятся на экран три проекции работающего устройства и древесины (рис. 3).

Результаты исследований. Первые компьютерные эксперименты с моделью подтверждают работоспособность предлагаемой конструкции устройства (рис. 4).

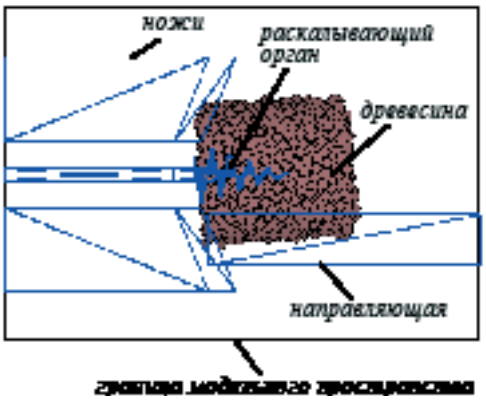

Рис. 2. Представление в модели древесины и рабочих поверхностей

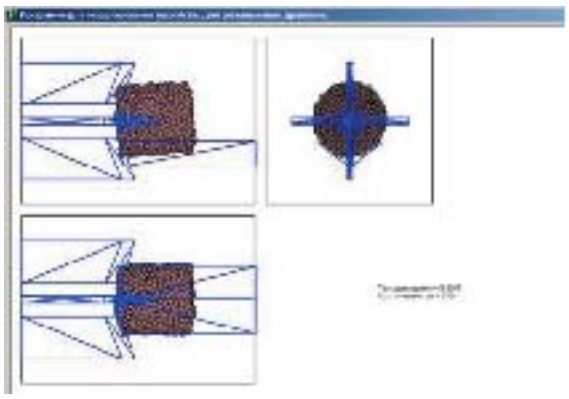

Рис. 3. Интерфейсная форма вывода результатов моделирования в разработанной программе

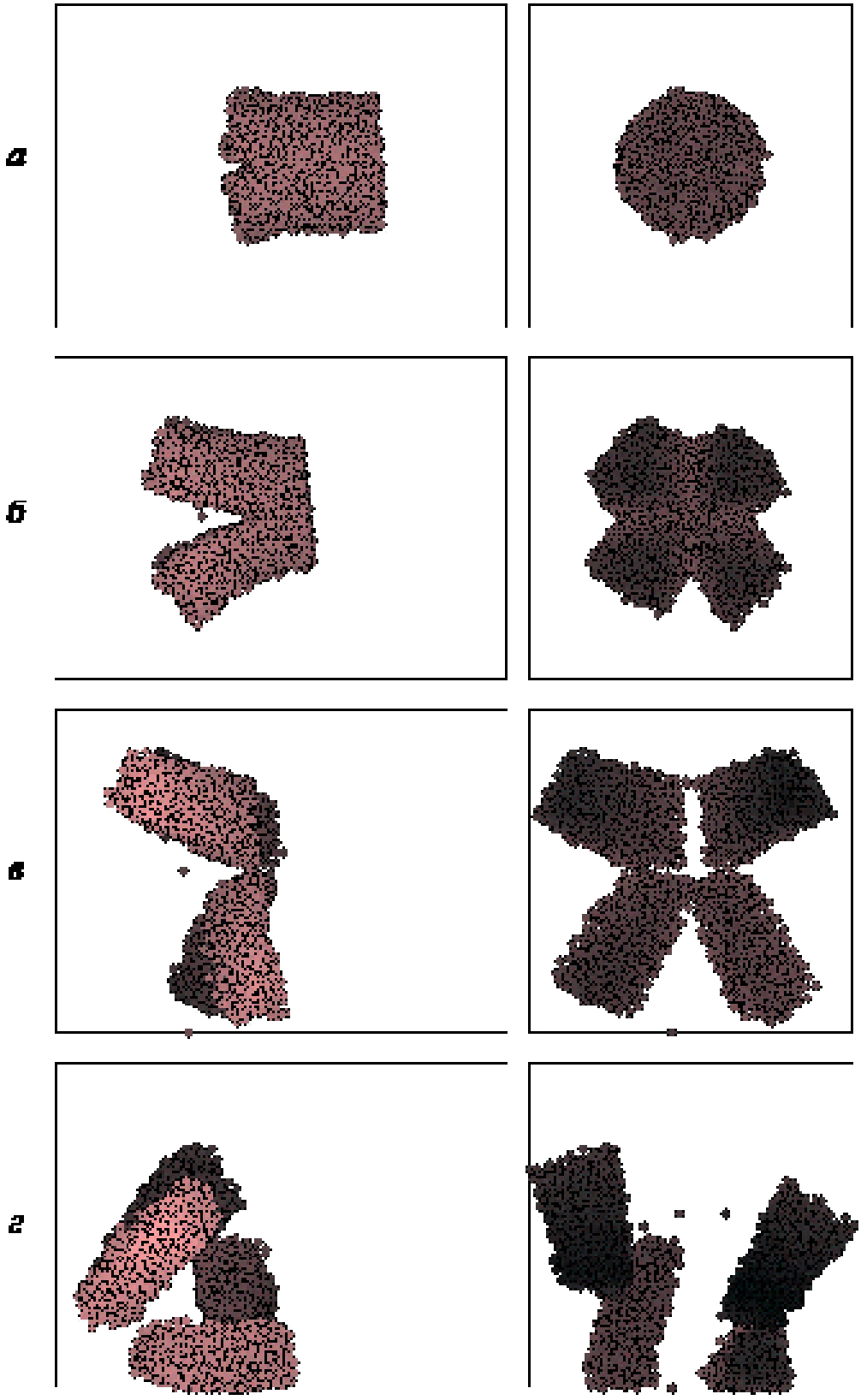

Рис. 4. Этапы раскалывания древесины устройством (две проекции, рабочие поверхности не показаны): а – касание ножей; б – установившийся процесс раскалывания древесины; в – разделение древесины на четыре фрагмента; г – падение фрагментов рядом с устройством для раскалывания древесины

Перед началом имитационного моделирования элементы древесины располагаются в цилиндрической области, представляющей фрагмент ствола дерева, и выдерживаются в течение некоторого модельного времени для формирования случайной плотной упаковки (см. рис. 4, а).

Раскалывающий орган, вращаясь с заданной частотой, увлекает древесину в направлении ножей, в результате чего происходит постепенное разделение древесины на четыре фрагмента (см. рис. 4, б).

В некоторый момент времени происходит окончательное отделение фрагментов друг от

друга (см. рис. 4, *в*). В модели просчитывается также дальнейшее движение фрагментов (см. рис. 4, г), что позволяет проверить различные геометрические конфигурации устройства и выбрать наиболее оптимальную с точки зрения эргономики.

В приведенном примере древесина имеет низкие значения модуля упругости и твердости, поэтому фрагменты древесины испытывают довольно сильные деформации, прежде, чем происходит раскол древесины.

При задании высоких значений модуля упругости и твердости раскалывание древесины происходит уже на начальном этапе контакта древесины с ножами. Модель позволяет определить силовое воздействие древесины на ножи, потребляемую устройством мощность, оценить качество раскалывания древесины (равенство размеров фрагментов, отклонение древесины от осевой линии и др.).

Заключение. Таким образом, в рамках настоящей работы предложена математическая модель устройства для раскалывания древесины, позволяющая изучить влияние основных его конструктивных и технологических параметров, а также древесины на характер раскалывания и показатели эффективности раскалывания. Разработанная модель может использоваться для оптимизации параметров устройства.

Программа рассчитана на использование компьютера не ниже Pentium 2,3 ГГц, с оперативной памятью объемом не менее 512 Мбайт. Исходный текст программы имеет объем 28 кбайт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривцов А.М.* Деформирование и разрушение тел с микроструктурой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 304 с.

2. Патент 115288 RU U1 Рабочий орган устройства для раскалывания древесины / Фокин С.В., Цыплаков В.В., Григорьев Ю.С., Заявл. 03.11.2011. Опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.

3. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / под ред. Е.Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.

4. *Фокин С.В.* Совершенствование технологического оборудования для заготовки энергетической древесины при расчистке вырубок: дис. ... д-ра техн. наук. – Саратов, 2013. – 412 с.

5. *Фокин С.В.* Современное состояние рынка биоэнергетических технологий // Актуальные направления научных исследований XXI века.- – 2014. – Т. 3. – № 4 (8). – С. 107–110.

6. *Фокин С.В., Шпортько О.Н.* Обоснование конструкции машин фрезерного типа для получения биотоплива в условиях лесов степной и лесостепной зон Поволжья// Актуальные направления научных исследований XXI века. – 2014. – Т. 5. – № 3 (10). – С. 156–160.

7. *Фокин С.В., Фетяев А.Н., Шпортько О.Н.* О перспективных технических средствах для ведения агролесомелиоративных мероприятий // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – С. 158.

Фокин Сергей Владимирович, *д-р техн. наук, проф. кафедры «Лесное хозяйство и лесомелиорация», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Жукова Анна Олеговна, *магистрант, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Назаров Андрей Алексеевич, *магистрант, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Чугошкина Анна Валерьевна, *магистрант, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Шпортько Оксана Николаевна, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Лесное хозяйство и лесомелиорация», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.

Тел.: (8452) 74-96-51.

Ключевые слова: *математическая модель; раскалывание древесины; метод динамики частиц.*

MATHEMATICAL MODEL FOR WOOD SPLITTING

Fokin Sergey Vladimirovich, *Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Forestry and Forest Melioration", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Zhukova Anna Olegovna, *Magistrandt, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Nazarov Andrey Alekseevich, *Magistrandt, Saratov State Agrarian University named after N.I.* **Vavilov. Russia.**

Chugoshkina Anna Valerievna, *Magistrandt, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Shportko Oksana Nikolaevna, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Forestry and Forest Melioration", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Keywords: *mathematical model; splitting wood; particle dynamics.*

The article provides a new design of screw wood splitters. In it, besides splitting the screw body provides extra chipping blades that allow increasing productivity of work performed for obtaining a wood product. The authors have developed a mathematical model of the process of wood splitting a new device, which is based on the performance of wood as the aggregate of discrete elements and the working surfaces of the device (split body, blades, and guide), as a set of elemental planes interact with each other. The computer program allows a high degree of adequacy to carry out computer experiments with mathematical model of working process in the future to thoroughly investigate the results.