

УДК 621.928

## ДВИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ СЕПАРАТОРЕ ПРИ СОРТИРОВКЕ

Полянин И.А., Макаров В.Е.

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,  
Йошкар-Ола, e-mail: MakarovVE@volgatech.net

Рассмотрены вопросы движения технологической щепы, полученной из пневой и некондиционной древесины, в электростатическом поле по смолистости. Рассмотрены существующие способы движения и последующей сортировки технологической щепы по смолистости. Получена математическая модель отклонения технологической щепы в электростатическом поле в зависимости от расстояния между электродами и напряжением между ними. Разработана экспериментальная установка и приведены результаты экспериментальных исследований. Определены основные режимы работы установки по сортировке технологической щепы в электростатическом поле. Получены зависимости влияния смолистости и влажности технологической щепы на её отклонение в постоянном электростатическом поле при свободном падении. Предложены технологические схемы движения и сортировки щепы полученной из пневой и некондиционной древесины на предприятиях лесохимической промышленности. Сделаны основные выводы и рекомендации.

**Ключевые слова:** технологическая схема, движение, технологическая щепка, смолистость, электростатическое поле, напряжение, пневая древесина, влажность

## MOVEMENT PULPCHIPS THE ELECTROSTATIC SEPARATOR AT SORTING

Polyanin I.A., Makarov V.E.

Povolzhsky State Technological University, Yoshkar-Ola, e-mail: MakarovVE@volgatech.net

The questions pulpchips movement derived from Pniewy and substandard wood, in an electrostatic field on gummosity. The existing methods of movement and the subsequent processing chip sorting gummosity. The mathematical model of deflection of wood chips in an electrostatic field, depending on the distance between the electrodes and the voltage between them. The experimental setup and the results of experimental studies. The basic installation of the operating modes of sorting of wood chips in an electrostatic field. The dependence of the effect of resinous and technological chips humidity on its deviation in constant electrostatic field in free fall. Proposed technological scheme of movement and sorting of wood chips obtained from Pniewy and substandard timber enterprises resin industries. Made the main conclusions and recommendations.

**Keywords:** technological scheme, movement, technological wood chips, gummosity, electrostatic field, the voltage deviation, stump wood, humidity

Одним из важнейших условий для успешного выполнения задач в области лесной промышленности является повышение механизации технологических процессов и внедрения передовой ресурсосберегающей технологии на основе полного использования биомассы всех видов сырья лесозаготовительного производства. Одним из направлений полного использования биомассы дерева является широкое использование побочного вида сырья – пневой древесины, горбыля, сучьев, вершинок дерева и т.д., которое при современных условиях лесозаготовок составляет 15–25% от общего объема заготавливаемой древесины. Кроме того, полное использование отходов деревообрабатывающих предприятий является одним из факторов безотходной технологии производства [4–6].

Производство технологической щепы как исходного материала для целлюлозно-бумажного, гидролизного производства имеет большое народнохозяйственное значение. Максимальная переработка на технологическую щепу отходов древесины в лесопилении, деревообработке, а также пневой древесины приобретает огромное значение.

Основным сырьем канифольно-экстракционных и смоло-скипидарных предприятий является просмолившаяся хвойная древесина, а также пневой осмол, накапливающийся на вырубках в течение последующих 10–15 лет. За этот период заболонная часть пня сгнивает и остается ядровая древесина с высоким содержанием смолистых веществ. Рациональнее использовать в качестве сырья канифольно-экстракционного производства древесину и пни свежей порубки путем отделения смолистой части дерева от несмолистой. Так, например, свежие пни и отходы перерабатывающих предприятий следует превращать в технологическую щепу и сортировать её на щепу малой смолистости (менее 13%) и щепу высокой смолистости (выше 13%). Первая может быть успешно использована на целлюлозно-бумажных комбинатах, а вторая – на канифольно-экстракционных и смоло-скипидарных предприятиях.

**Цель исследования** – совершенствование эффективности электростатической сортировки технологической щепы из пневой древесины для канифольно-экстракционных и целлюлозно-бумажных предприятий лесохимического комплекса.

### Решаемые задачи, направленные на достижение цели

В отечественной и зарубежной практике промышленного производства существуют различные способы сортировки твёрдых и сыпучих материалов. Однако специфические особенности сортировки технологической щепы по смолистости исключают использование существующих способов для её разделения на высоко- и низксмолистую. Единственным способом позволяющим достичь положительного результата, на наш взгляд, является разделение технологической щепы с помощью электростатического сепаратора [2].

В Сибирском технологическом институте разработан способ отделения частиц коры от стружечной массы в электрическом поле [3] в специальном сепараторе с биполярной короной. Основные узлы сепаратора – проволочные и пластинчатые электроды. Принцип работы сепаратора заключается в создании поля коронного разряда путём подачи на электроды высокого полярного напряжения. Стружечная смесь равномерно сбрасывается с транспортёра по направляющей в поле с биполярной короной.

При этом частицы коры приобретают избыточный отрицательный заряд и перемещаются в сторону положительных электродов, собираясь в секции приёмного бункера. Древесные частицы приобретают положительный заряд и перемещаются к отрицательным электродам.

В КирНИИЛПе разработан способ сортировки технологической щепы по смолистости, в основу которого положен способ электростатического разделения материалов, включающий доведение исходного материала до одинаковой степени влажности и обработку его в электрическом поле [1].

Предлагаемый способ [1] осуществляют в сепараторе свободного падения, который включает электроды размером 1000×1000 мм, размещённые под углом к вертикали, причем расстояние между электродами вверху и внизу составляет соответственно 100 и 200 мм. На электроды подают напряжение 100 кВ, при этом в межэлектродном пространстве образуется электростатическое поле, напряжённость которого находится в пределах от 5 до 10 кВ/см. Пневмой осмол, содержащий древесину двух видов, например заболонную и ядровую, измельчают, доводят до одина-

ковой степени влажности 4,3%, сортируют по крупности и направляют в электростатическое пространство. Поскольку содержание канифоли в указанных видах древесины различно, диэлектрические свойства их при влажности 4,3% значительно отличаются, что приводит к тому, что частицы с разным количеством канифоли получают заряды разной величины и притягиваются к разным электродам, при этом происходит отделение заболонной древесины от ядровой. Основным недостатком данного способа является его высокая энергоёмкость.

### Математическое моделирование

Составим уравнение равновесия всех сил действующих на заряженную щепу движущуюся в электрическом поле [8]. В проекции на ось абсцисс имеем

$$\sum X = 0; \quad -m\ddot{X} + \rho E - W \sin \alpha = 0. \quad (1)$$

В проекции на ось ординат запишем

$$m\ddot{y} - mg + W \cos \alpha = 0. \quad (2)$$

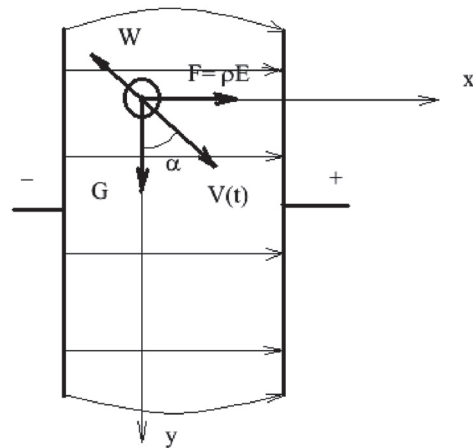


Рис. 1. Движение щепы в электростатическом поле

После двукратного интегрирования с учетом начальных условий получатся

$$\begin{aligned} x &= \frac{\rho E - W \sin \alpha}{2m} t^2; \\ y &= \frac{mg - W \cos \alpha}{2m} t^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $W$  – сила сопротивления положена не зависящей непосредственно от времени.

После исключения времени из уравнений как параметра, запишем уравнение

$$y = \frac{mg - W \cos \alpha}{\rho E - W \sin \alpha} x = \frac{G + 6\pi\mu a V_0 \cos \alpha}{\rho \frac{U_0}{(l_1 - l_2)} + 6\pi\mu a V_0 \sin \alpha} X, \quad (4)$$

которое описывает траекторию (прямую линию).

Отклонение щепы при падении составит

$$l^* = \frac{\rho \frac{U_0}{(l_1 + l_2)} + 6\pi\mu\alpha V_0 \sin \alpha}{G + 6\pi\mu\alpha V_0 \cos \alpha} l_0, \quad (5)$$

где  $l_0$  – высота падения щепы,

$$l^* = l_0 \frac{4\pi F (l_1 - l_2)^3}{(l_1 - l_2)\epsilon} + 6\pi\mu\alpha V_0 \sin \alpha}{G + 6\pi\mu\alpha V_0 \cos \alpha}. \quad (6)$$

Щепа представляет легкое продолговатое тело, падающее в воздухе в поле электрических сил и силы тяжести. В такой постановке возможны два варианта движения щепы: без вращения относительно продольной оси и с вращением, приобретаемым от случайного толчка. В последнем варианте при действии электростатического поля возможны два случая соответственно направлению вращения относительно направления поля.

Сила гидродинамического давления на щепу при ее вращательном движении в соответствии с известной теоремой Жуковского определяется в виде

$$W = \rho l V \Gamma, \quad (7)$$

где  $V$  – скорость щепы (переменная величина);  $\Gamma$  – циркуляция скорости по контуру вокруг щепы.

Определим теперь виды траекторий центров тяжести щепы, падающей с заданным начальным вращением около продольной оси, остающейся горизонтальной.

При постоянной величине циркуляции скорости  $\Gamma$ , что предполагает пренебрежение

трением и непрерывность скоростей жидкости, дифференциальные уравнения щепы в плоскости  $(x, y)$  (рис. 2) запишутся в виде

$$\begin{cases} \frac{md^2x}{dt^2} = -\rho l V \Gamma \cos \alpha + qE; \\ \frac{md^2y}{dt^2} = \rho l V \Gamma \sin \alpha + mg, \end{cases} \quad (8)$$

где  $q$  – заряд щепы;  $\rho$  – плотность воздуха;  $l$  – длина щепы.

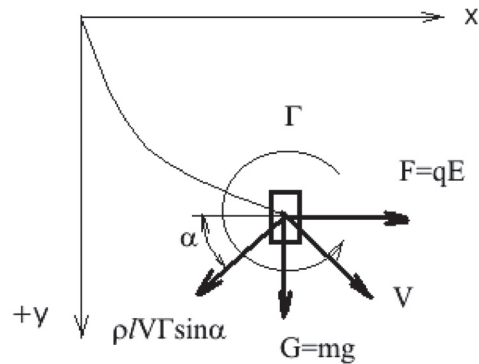


Рис. 2. Падение технологической щепы с вращением

После решения уравнения движения щепы будут:

а) при движении щепы в стационарном поле:

$$\begin{cases} x_c = \pm \frac{\pi\alpha}{4\mu^3} (1 - \cos \mu t) \pm \frac{g}{\mu^2} (\mu t - \sin \mu t); \\ y_c = \pm \frac{\pi\alpha}{4\mu^3} (\mu t - \sin \mu t) + \frac{g}{\mu^2} (1 - \cos \mu t); \end{cases} \quad (9)$$

б) при движении щепы в переменном по закону  $\cos \omega t$  поле:

$$\begin{cases} x_n = \pm \frac{g}{\mu^2} (\mu t - \sin \mu t) \pm \frac{\pi\alpha}{8\omega\mu} t \sin \omega t; \\ y_n = + \frac{g}{\mu^2} (1 - \cos \mu t) + \frac{\pi\alpha}{8\omega^2} \left( \sin \omega t - \frac{t}{\omega} \cos \omega t \right); \end{cases} \quad (10)$$

в) при движении щепы, в поле изменяющемся по закону «детектированной» синусоиды:

$$\begin{aligned} x_b &= \pm \frac{\alpha}{2\mu^3} (1 \pm \cos \mu t) \pm \frac{g}{\mu^2} (\mu t - \sin \mu t) \mp \frac{\alpha}{12\mu\omega} t \sin 2\omega t \mp \frac{\alpha}{120\mu\omega} t \sin 4\omega t; \\ y_b &= \pm \frac{\alpha}{2\mu^3} (\mu t - \sin \mu t) + \frac{g}{\mu^2} (1 - \cos \mu t) + \frac{\alpha}{12\omega^3} \left( \frac{1}{4} \sin 2\omega t - \frac{t}{2\omega} \cos 2\omega t \right) - \\ &\quad - \frac{\alpha}{120\omega^3} \left( \frac{1}{16} \sin 4\omega t - \frac{t}{4\omega} \cos 4\omega t \right). \end{aligned} \quad (11)$$

### Результаты исследования

Для определения конфигурации электродов сепаратора свободного падения необходимо знание траектории движения щепы в электрическом поле. С этой целью проведена серия экспериментальных исследований. В экспериментах использовалась щепка естественной и искусственной смолистости 8, 10, 13 и 22%. Предварительно определялось её отклонение в электрическом поле путем пропуска через сепаратор свободного падения [7]. Для определенной массы щепы каждой величины смолистости выбирались единичные экземпляры, одинаковые по размерам и массам, а затем совместно пропускались через установку. Каждый экземпляр щепы маркировался соответствующими условными знаками (точками). При этом устанавливалось, что маркировка не влияет на степень отклонения. Определение траектории движения щепы осуществлялось методом фотографирования. Предварительно определялось время движения щепы в сепараторе, служащее для определения соответствующей выдержки фотографирования. Для четкого определения траектории движения щепы окрашивалась в белый цвет меловым покрытием. Также было проверено отсутствие влияния окраски щепы на отклонение её в электрическом поле. При фотографировании была применена специальная подсветка. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.



Рис. 3. Траектория движения щепы в электростатическом поле

Как видно из приведенных фотографий, в момент отрыва щепы от подзаряжающего транспортера щепка движется по дуге перпендикулярно силовым линиям электрического поля. Затем в пространстве между пластинами происходит постепенное отклонение в сторону положительного элект-

рода. При этом траектории движения во всех случаях представляют собой прямые линии. Наблюдается незначительное вращение щепы по часовой стрелке.

### Интерпретация результатов и их анализ

При эксперименте менялось положение электродов относительно осевой линии и величина подаваемого на электроды высокого напряжения. В ходе экспериментов было установлено, что при влажности щепы от 13 до 28% наилучшее разделение щепы происходит при напряжении 75 кВ. При данных начальных параметрах технологическая щепка повышенной смолистости в основном отклонялась к отрицательному электроду, а щепка малой смолистости – к положительному электроду. Таким образом, в процессе сортировки щепы необходимо в конструкции установки предусмотреть шторку, для разделения технологической щепы на высоко- и низкосмолистую. Разделительную шторку необходимо установить в нижней части установки два бункера для сбора технологической щепы.

С учетом проведенных экспериментальных исследований разработана технологическая схема переработки пнейвой древесины с использованием установки сортировки технологической щепы.

Очистка пнейвой древесины производится следующим образом (рис. 4).

Цельные пни (спелый осмол), заготовленные путем корчевания, подвозятся погрузочно-транспортной машиной на площадку к загрузочному конвейеру. С помощью манипулятора 1 пни подаются на загрузочный конвейер 2 и конвейером в установку гидроимпульсной очистки 3. Цельные пни при прохождении вдоль установки ЛО-107 подвергаются воздействию гидравлических импульсных струй, создаваемых гидроимпульсаторами. За счет этого происходит их очистка от грунта и гнили. Отходы попадают на вибросито, где происходит отделение воды, и затем удаляются ленточным конвейером 4. Очищенные пни выгружаются из установки гидроимпульсной очистки, попадают на выгрузочный конвейер 5 и подаются в приемный бункер 6 установки ЛО-109. Измельченные куски выгрузочным конвейером 7 и ленточным конвейером 8 подаются в рубильную машину 9 МРПП-30 для переработки в технологическую щепу. Полученная щепка скребковым конвейером 10 подается на подзаряжающий транспортер 11, а затем в установку 12 для сортировки технологической щепы на высоко и низко смолистую ЛО-115. Пневмотрубопроводами 13 и 14 разделенная щепка поступает для дальнейшей переработки.

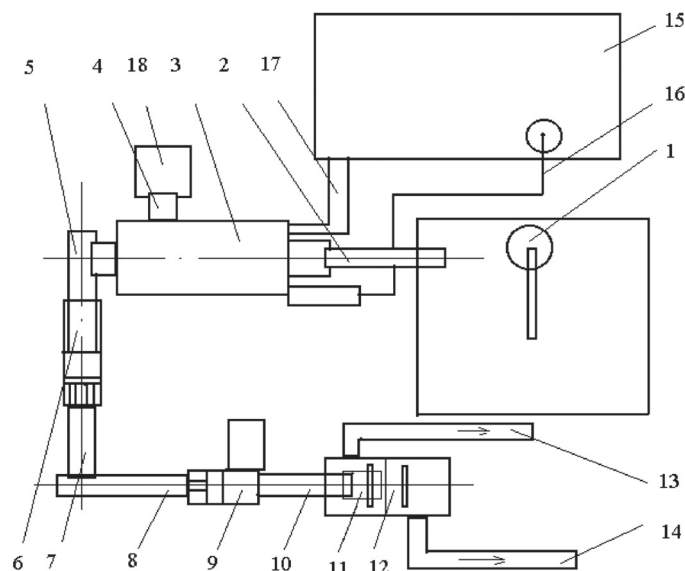


Рис. 4. Технологическая схема переработки спелого пневого осмола

**Выводы**

1. Разработан новый способ сортировки технологической щепы на мало- и высокосмолистую в постоянном электростатическом поле высокого напряжения с предварительной подзарядкой отрицательным зарядом и может быть рекомендован для промышленного внедрения.

2. На основе законов физики и механики получены математические зависимости движения технологической щепы при свободном падении в постоянном и переменном электростатическом поле.

3. В момент отрыва щепы с подзаряжающего транспортера щепы движется по дуге перпендикулярно силовым линиям электрического поля. Затем в пространстве между пластинами происходит постепенное отклонение в сторону положительного электрода. Наблюдается незначительное вращение щепы по часовой стрелке.

4. Оптимальная величина выпрямленного высокого синусоидального напряжения для разделения щепы на высоко- и малосмолистую (критерий 13%) равна 75 кВ. Постоянное напряжение может меняться в пределах от 65 до 85 кВ. Напряжения, лежащие за этими пределами, неэффективны.

5. При установке в сепараторе свободного падения на уровне нижних кромок плоских электродов вертикальной твердой шторки разделяет технологическую щепу на две фракции соответственно ниже и выше 13% смолистости.

6. Разработаны схемы для технологического процесса лесозаготовительных предприятий с использованием предлагаемой установки для переработки пневой древесины на технологическую щепу.

**Список литературы**

1. А.с. 858920 СССР, МКИЗ В 03 С 1/00. Способ электростатического разделения материалов преимущественно древесины / Ю.Г. Санников, Ю.Г. Мыров, Ю.П. Ивонин, П.И. Ротаренко, и Г.А. Андреев (СССР). – № 2788745/22-03; Заяв 02.07.79; Оpubл. 30.08.81, Бил. № 32. – 2 с.
2. Баруллин, В.Н. Сортировка древесных частиц в производстве древесно-стружечных плит. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 45 с.
3. Вайс А.А. Отделение частиц коры от стружечной массы // Деревообрабатывающая промышленность. – 1975. – № 1. – С. 5–6.
4. Гелес И.С. Биомасса дерева и ее использование / И.С. Гелес, З.А. Коржицкая. – Петрозаводск, 1992. – 230 с.
5. Коробов В.В. Комплексное использование древесины / В.В. Коробов, Н.П. Рушнов. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 88 с.
6. Коробов В.В. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии) / В.В. Коробов, Н.П. Рушнов. – М.: Экология, 1991. – 288 с.
7. Патент РФ № 2231395, МКИ7 В 03 С 7/00. Способ электростатического разделения древесных материалов по смолистости / И.А. Полянин, А.Я. Полянин (Россия). – № 2002132607/03; Заявлено 12.04.02 Оpubл. 27.06.2004 – 4 с.
8. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1968. – 624 с.

**References**

1. A.s. 858920 SSSR, MKI3 V 03 S 1/00. Sposob jelektrostaticeskogo razdelenija materialov preimushhestvenno drevesiny / Ju.G. Sannikov, Ju.G. Myrov, Ju.P. Ivonin, P.I. Rotarenko, i G.A. Andreev (SSSR). no. 2788745/22-03; Zajav 02.07.79; Opubl. 30.08.81, Bil. no. 32. 2 p.
2. Barullin, V.N. Sortirovka drevesnyh chastic v proizvodstve drevesno-struzhechnyh плит. M.: Lesnaja promyshlennost, 1977. 45 p.
3. Vajs A.A. Otdelenie chastic kory ot struzhechnoj massy // Derevoobrabatyvajushhaja promyshlennost. 1975. no. 1. pp. 5–6.
4. Geles I.S. Biomassa dereva i ee ispolzovanie / I.S. Geles, Z.A. Korzhickaja. Petrozavodsk, 1992. 230 p.
5. Korobov V.V. Kompleksnoe ispolzovanie drevesiny / V.V. Korobov, N.P. Rushnov. M.: Lesn. prom-st, 1981. 88 p.
6. Korobov V.V. Pererabotka nizkokachestvennogo syrja (problemy bezothodnoj tehnologii) / V.V. Korobov, N.P. Rushnov. M.: Jekologija, 1991. 288 p.
7. Patent RF no. 2231395, MKI7 V 03 S 7/00. Sposob jelektrostaticeskogo razdelenija drevesnyh materialov po smolistosti / I.A. Poljanin, A.Ja. Poljanin (Rossija). no. 2002132607/03; Zajavleno 12.04.02 Opubl. 27.06.2004 4 p.
8. Tamm I.E. Osnovy teorii jelektrichestva. M.: Nauka, 1968. 624 p.