

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья  
УДК 674.81  
<https://agroconf.sgau.ru>

**Результаты выявления тенденций в колебаниях энергопотребления  
и динамических параметров процесса дробления древесного сырья**

**С.В. Фокин<sup>1</sup>, Д.В. Есков<sup>1</sup>, Касторнова А.В.<sup>2</sup>, Фомина О.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия.

<sup>2</sup>Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия.

**Аннотация.** Представлены итоги лабораторных испытаний, направленных на выявление зависимостей между энергозатратами, динамическими параметрами и процессом измельчения древесины многоступенчатым рубильным ножом. Предложенная конструкция ножа позволит добиться эффективной переработки древесного материала в топливную щепу с мелкой фракцией.

**Ключевые слова:** рубильный нож, топливная щепка, рубильная машина

**Для цитирования:** Фокин С.В., Есков Д.В., Касторнова А.В., Фомина О.А. Результаты выявления тенденций в колебаниях энергопотребления и динамических параметров процесса дробления древесного сырья // Аграрные конференции. 2025. № 52(4). С. 20-25. <http://agroconf.sgau.ru>

TECHNICAL SCIENCES

Original article

**Results of identification of trends in energy consumption fluctuations  
and dynamic parameters of the wood raw material crushing process**

**S.V. Fokin<sup>1</sup>, D.V. Eskov<sup>1</sup>, A.V.Kastornova<sup>2</sup>, O.A. Fomina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Saratov State University of genetics, biotechnology and engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

<sup>2</sup>State Agrarian University of the North Trans-Urals, Tyumen, Russia

**Abstract.** The results of laboratory tests aimed at revealing the dependences between energy inputs, dynamic parameters and the process of wood chopping by a multistage chopping knife are presented. The proposed knife design will allow to achieve efficient processing of wood material into fuel chips with a fine fraction.

**Keywords:** chopping blade, fuel chips, chopping machine

**For citation:** Fokin S.V., Eskov D.V., Kastornova A.V., Fomina O.A.. Results of revealing the trends in the fluctuations of energy consumption and dynamic parameters of the process of wood raw material crushing // Agrarian Conferences, 2025;(52(4)): 20-25(InRuss.). <http://agroconf.sgau.ru>

**Введение.** Современное производство энергетической древесины включает использование как стационарных, так и мобильных рубильных машин. Однако, наибольшей популярностью пользуются именно мобильные рубильные машины, благодаря своей мобильности и возможности быстрого перемещения к месту, где находится сырье. Кроме этого, они не требуют дополнительных работ для обеспечения процесса переработки отходов лесосечных работ, таких как строительство фундамента или прокладка энергетических коммуникаций. На данный момент проблема разработки эффективных рубильных машин для производства топливной щепы является актуальной [1,2]. Фракционный состав щепы, получаемой из порубочных остатков, может содержать мелкие элементы из-за особенностей материала. Именно скорость движения щепы, ее траектория, а также конструктивные особенности лопаток и щепопровода оказывают основное влияние на выброс данных мелких частиц из кожуха рубильной машины [3,4]. Для совершенствования конструктивно-технологических параметров дисковых рубильных машин необходимо провести дополнительное исследование конструктивных схем выброса щепы из них.

**Методика исследований.** Для проведения лабораторных опытов, направленных на изучение изменений энергозатрат и динамических параметров процесса измельчения древесины при разных углах наклона режущих краев ножей и углах обработки, были разработаны режущие инструменты размером 30x50 мм с различными углами заточки, согласно намеченному плану экспериментов. Также были подготовлены древесные заготовки диаметром 10 мм.

Выбор диаметра древесных образцов для экспериментов обусловлен конструктивными особенностями лабораторного оборудования, которое включало в себя маятниковый копер и соответствовал геометрическому строению измельчаемых остатков, диаметр которых значительно варьировался. Кроме того, принимался во внимание достаточный запас мощности рубильной машины, позволяющий не учитывать породу древесины в образцах. В связи с этим, в ходе лабораторных исследований использовались образцы древесины из осины. [5].

Для изучения изменений в потреблении энергии и динамических параметров процесса измельчения древесных отходов, учитывая различные углы заточки ножей и ориентации плоскости рубки, использовались образцы древесины с наклонами от 20 до 40 градусов. Данный диапазон соответствует углам наклона загрузочного механизма в дисковых дробилках, применяемых в промышленном производстве щепы.

Теоретические изыскания показали, что оптимальная скорость вращения измельчительного диска с многоступенчатыми ножами составляет 15-16 оборотов в секунду, что эквивалентно линейной скорости движения ударного механизма в пределах 8-12 м/с. Объем работы резания, необходимой для дробления отходов древесины, рассчитывался теоретически. Линейная скорость движения ударного механизма определялась по общеизвестной формуле.

После настройки и калибровки ударного копра были проведены опыты, направленные на оценку изменений энергозатрат и динамических характеристик процесса раскалывания древесных отходов при различных углах заточки ножей и углах наклона поверхности среза. Исследования проводились по следующей схеме.

Образец древесины закреплялся в специальном приспособлении. Затем маятник копра с установленным на нем ножом устанавливался под определенным углом. После этого копер запускался в действие. Процесс измельчения древесных отходов считался завершенным в момент отделения стружки от образца осины режущим ножом. Лабораторные испытания выполнялись в трехкратной повторности для обеспечения надежности результатов.

**Результаты и обсуждение.** В ходе серии экспериментальных изысканий была поставлена цель установить, каким образом энергетические затраты и динамические характеристики процесса измельчения древесных отходов изменяются в зависимости от параметров, таких как угол наклона лезвия ножа и угол расположения плоскости рубки.

Теоретический анализ процесса дробления древесных отходов выявил, что ключевыми факторами, оказывающими наибольшее влияние на энергоемкость, являются: размер измельчаемых отходов, скорость резания, угол резания, острота ножей и величина угла режущей кромки в горизонтальной проекции.

Анализ наиболее существенных факторов, влияющих на процесс резания, осуществляемый прототипом дисковой рубительной машины при переработке древесных отходов, опирался на результаты исследований, выполненных в рамках научных работ, посвященных изучению процесса резания древесины с использованием рубительных установок.

В результате анализа этих работ было установлено, что вышеуказанные факторы должны находиться в следующих диапазонах: диаметр измельчаемых отходов, м -  $D$  (0,01); угол заточки ножей, град. -  $\sigma$  (30); скорость резания, м/с –  $v$  (8-12); угол резания, град. -  $\alpha$  (20-40); угол режущей кромки ножа в плане, град. -  $\lambda$  (0-12).

Для изучения закономерностей, определяющих энергоемкость и динамические параметры процесса рубки древесных отходов при различных углах наклона лезвия ножей и плоскости рубки, были проведены экспериментальные исследования с использованием методологии многофакторного планирования.

Проведение полного факторного эксперимента позволило создать математическую модель, описывающую взаимосвязь между энергоемкостью и динамическими характеристиками процесса измельчения древесных отходов и изменениями углов наклона плоскости режущей кромки ножей и плоскости рубки. Значения и диапазоны варьирования указанных факторов в ходе лабораторных испытаний были определены ранее. В соответствии с методологией планирования экспериментов были подготовлены сводные данные и программа исследований.

В результате реализации плана исследований закономерностей энергоемкости и динамических характеристик процесса измельчения древесных отходов при различных углах наклона, было получено значение работы резания древесных отходов. В ходе регрессионного анализа было получено уравнение, позволяющее оценить изменения энергоемкости и динамических характеристик в зависимости от углов наклона. Обработка данных осуществлялась с использованием программных средств MS Excel и Statistica.

Математическая обработка полученных результатов продемонстрировала, что влияние различных углов наклона плоскости режущей кромки и углов наклона на работу резания может быть описано следующим регрессионным уравнением:

$$A = 3,86 - 0,41 \ln \alpha - 0,075 \ln v - 0,03 \ln \lambda \quad (1)$$

( $27 \leq \alpha$ , град.  $\leq 37$ ;  $4 \leq v$ , м/с  $\leq 14$ ;  $1 \leq \lambda$ , град.  $\leq 11$ )

Анализ коэффициентов в уравнении подтверждает предположение о тесной взаимосвязи между коэффициентами факторов, влияющих на качество резания при переработке древесных отходов (коэффициент корреляции  $R > 0,91$ ). Данное уравнение объясняет более 83% наблюдаемых изменений (коэффициент детерминации  $R^2 > 0,83$ ).

**Заключение.** Анализ полученного уравнения с использованием  $t$ -критерия выявил значимость угла резания, скорости резания и угла плоскости реза. Значимость значений уравнения регрессии определялась с помощью  $F$ -критерия и  $p$ -уровня. С увеличением диаметра образца древесины, угла резания и скорости резания, величина работы резания также изменяется. Минимальные значения работы резания (от 8,1 до 9,4 Нм) наблюдаются при угле резания 30...40 градусов и скорости резания 2...8 м/с с углом в плане до 8 градусов. Максимальные значения работы резания (более 11,99 Нм) достигаются при угле резания до 25 градусов и скорости резания 10...13 м/с с углом в плане 8...12 градусов.

### Список литературы

1. Цыплаков, В. В. О применении устройства для измельчения порубочных остатков при реконструкции защитных лесонасаждений / В. В. Цыплаков, С. В. Фокин // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 253-257.
2. Фокин, С. В. Способы транспортирования щепы из рубительных машин / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Научная жизнь. – 2018. – № 2. – С. 10-15.

3. Фокин, С. В. О перспективных технических средствах для ведения агролесомелиоративных мероприятий / С. В. Фокин, А. Н. Фетяев, О. Н. Шпортько // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – С. 158.

4. Фетяев, А. Н. Об имитационной модели процесса измельчения порубочных остатков / А. Н. Фетяев, С. В. Фокин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 291-294.

5. Фокин, С. В. Об использовании математических методов моделирования рубительных машин / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике : Материалы 17-ой Международной молодежной научно-практической конференции, Новочеркасск, 06–07 сентября 2018 года. – Новочеркасск: ООО "Лик", 2018. – С. 158-159.

6. Фокин, С. В. К вопросу переработки древесных отходов на предприятиях АПК / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько, К. С. Манышев // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования : II международная научно-практическая интернет-конференция, с. Соленое Займище, 28 февраля 2017 года / ФГБНУ «Прикаспийский НИИ аридного земледелия». – с. Соленое Займище: Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия, 2017. – С. 1822-1825.

7. Фокин, С. В. Обоснование конструкции машин фрезерного типа для получения биотоплива в условиях лесов степной и лесостепной зон Поволжья / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 5-3(10-3). – С. 156-160.

8. Фокин, С. В. К обоснованию параметров и режимов работы устройства для измельчения порубочных остатков / С. В. Фокин // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2011. – № 3. – С. 36-44.

9. Фокин, С. В. Технические средства, применяемые при очистке вырубок от отходов лесосечных работ / С. В. Фокин, А. В. Храмченко // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 9-2(20-2). – С. 280-283.

10. Фокин, С. В. Об основных видах энергетической древесины / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Forest Engineering : материалы научно-практической конференции с международным участием, Якутск, Россия, 30–31 мая 2018 года. – Якутск, Россия: Издательский дом СВФУ, 2018. – С. 273-276.

## References

1. Tsyplakov, V. V. On the application of the device for shredding felling residues in the reconstruction of protective forest plantations / V. V. Tsyplakov, S. V. Fokin // Scientific Review. - 2011. - № 5. - P. 253-257.

2. Fokin, S. V. Methods of transporting wood chips from chipping machines / S. V. Fokin, O. A. Fomina // Scientific Life. - 2018. - № 2. - P. 10-15.
3. Fokin, S. V. About perspective technical means for agroforestry activities / S. V. Fokin, A. N. Fetyaev, O. N. Shportko // Modern problems of science and education. - 2015. - № 2-1. - P. 158.
4. Fetyaev, A. N. About the simulation model of the process of chopping of felling residues / A. N. Fetyaev, S. V. Fokin // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. - 2012. - № 2. - P. 291-294.
5. Fokin, S. V. On the use of mathematical methods for modelling chopping machines / S. V. Fokin, O. A. Fomina // Fundamental research, methods and algorithms of applied mathematics in engineering, medicine and economics : Proceedings of the 17th International Youth Scientific and Practical Conference, Novocherkassk, 06-07 September 2018. - Novocherkassk: LLC 'Lik', 2018. - P. 158-159.
6. Fokin, S. V. To the issue of wood waste processing at the enterprises of agro-industrial complex / S. V. Fokin, O. N. Shportko, K. S. Manyshev // Modern ecological state of the natural environment and scientific and practical aspects of rational nature management : II international scientific and practical internet-conference, s. Solenoye Zaimishche, 28 February 2017 / FGBNU 'Pre-Caspian Research Institute of Arid Agriculture'. Solenoye Zaimishche, 28 February 2017 / FGBNU 'Caspian Research Institute of Arid Agriculture'. - Solenoye Zaimishche village: Caspian Research Institute of Arid Agriculture, 2017. - P. 1822-1825.
7. Fokin, S. V. Justification of the design of milling-type machines for biofuel production in the conditions of forests of steppe and forest-steppe zones of the Volga region / S. V. Fokin, O. N. Shportko // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. - 2014. - T. 2, № 5-3(10-3). - P. 156-160.
8. Fokin, S. V. To substantiation of parameters and operating modes of the device for chopping felling residues / S. V. Fokin // Bulletin of Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management. - 2011. - № 3. - P. 36-44.
9. Fokin, S. V. Technical means used in clearing clearcuts from waste woodcutting operations / S. V. Fokin, A. V. Khrumchenko // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. - 2015. - T. 3, № 9-2(20-2). - P. 280-283.
10. Fokin, S. V. About the main types of energy wood / S. V. Fokin, O. A. Fomina // Forest Engineering : proceedings of the scientific and practical conference with international participation, Yakutsk, Russia, 30-31 May 2018. - Yakutsk, Russia: Publishing House of SVFU, 2018. - P. 273-276.

*Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена после рецензирования 01.08.2025; принята к публикации 22.08.2025.  
The article was submitted 27.06.2025; approved after reviewing 01.08.2025; accepted for publication 22.08.2025.*