



УДК 676.1.054.1

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТЫХ
ПОЛУФАБРИКАТОВ**

© *Н.Г. Чистова, д-р техн. наук, проф.*

Лесосибирский филиал Сибирского государственного технологического университета, ул. Победы, 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662546
E-mail: chistova_n_g@mail.ru

Снижение энергопотребления размалывающих машин и определение оптимальных режимов их работы в технологическом процессе производства древесноволокнистых плит (ДВП) является принципиально важным. Цель работы – исследование удельного расхода электроэнергии для достижения требуемой степени помола древесного полуфабриката при заданных конструктивных и технологических параметрах размалывающих машин.

Исследования проводили в производственных условиях, на промышленных установках заводов ДВП лесопромышленного комплекса г. Лесосибирска.

Результаты экспериментальных исследований обработаны методами, разработанными для получения математических моделей с целью описать объект исследования (удельный расход электроэнергии) и найти оптимальные условия функционирования исследуемой системы (размольный участок).

Получено статистическо-математическое описание взаимосвязи факторов степени помола, технологических, конструктивных параметров размольных машин и удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на размол. Установлено, что степень помола древесного волокна, качественные характеристики плит и затраты электроэнергии на размол зависят от одних и тех же факторов и коррелируют между собой.

На основании полученных результатов можно определить и установить такие параметры процесса размола, при которых показатели физико-механических свойств плит будут наилучшими при возможно минимальных затратах электроэнергии на размол как для мокрого, так и для сухого способа производства древесноволокнистых плит.

Ключевые слова: электроэнергия, оптимизация, критериальный параметр, градус помола, древесноволокнистая масса, рафинатор, дефибратор, рафинер.

Получение древесных полуфабрикатов – наиболее энергоемкий процесс при производстве древесноволокнистых плит (ДВП). Результаты исследований зависимости удельного расхода электроэнергии от технологических и

конструктивных параметров размольных установок, степени помола древесноволокнистой массы показали, что удельный расход электроэнергии возрастает при повышении степени помола, увеличения износа рабочей поверхности гарнитуры, концентрации древесной массы, частоты вращения выносного шнека, уменьшения зазора между сегментами.

Расход электроэнергии на операцию подготовки древесноволокнистых полуфабрикатов в производстве ДВП мокрым и сухим способами различен в связи с тем, что при мокром способе производства размол осуществляется в две ступени, при сухом – в одну. Вопрос снижения энергопотребления размалывающих машин и определение оптимальных режимов их работы, которые обеспечивали бы необходимое качество размола при минимальных энергозатратах особенно актуален для предприятий, эксплуатирующих морально и физически устаревшее оборудование. Это требует теоретического исследования на базе углубленного изучения механизма размола существующих размалывающих машин [4].

Несмотря на ограниченность технологических возможностей наращивания мощности технологического процесса производства ДВП, проведение исследований по выявлению количественных взаимосвязей между удельным расходом электроэнергии на размол и режимными параметрами процесса размола целесообразно.

В качестве управляемых факторов воздействия, влияющих на удельный расход электроэнергии, выбраны основные технологические и конструктивные параметры размалывающих машин: ДС – степень помола массы; L/h – износ сегментов (отношение ширины ячейки L к высоте ножа h); z – зазор между дисками, мм; n – частота вращения выносного шнека, об/мин; c – концентрация массы при всех прочих равных условиях технологического процесса и сохранении качественных показателей ДВП. Будем считать, что влажность щепы, ее фракционный состав, температура, давление в пропарочной камере, продолжительность пропаривания, удельное давление между дисками, дополнительные затраты на содержание оборудования, цеховые расходы и пр. остаются постоянными при варьировании технологических режимов размола [3].

Наложим на исследуемые параметры двусторонние ограничения:

$$\begin{aligned} L/h_1 (-1) \leq L/h (0) \leq L/h_2 (+1); \quad z_1 (-1) \leq z (0) \leq z_2 (+1); \\ n_1 (-1) \leq n (0) \leq n_2 (+1); \quad c_1 (-1) \leq c (0) \leq c_2 (+1). \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначим:

E_{x1} и E_{x2} – расход электроэнергии на размол древесного сырья из хвойных пород (процент хвойной древесины $\Pi_x = 100\%$; лиственной $\Pi_l = 0\%$) соответственно при минимальных ($X_1 = (L/h_1, z_1, n_1, c_1)$) и максимальных ($X_2 = (L/h_2, z_2, n_2, c_2)$) значениях исследуемых параметров размола;

$E_{л1}$ и $E_{л2}$ – расход электроэнергии на размол сырья из лиственных пород ($\Pi_{л} = 100\%$; $\Pi_{х} = 0\%$) при тех же параметрах размола.

Расход электроэнергии E_1 , при X_1 для некоторой смеси хвойных и лиственных пород и расход E_2 для этой же смеси пород при X_2 найдем из следующих выражений:

$$E_1 = E_{х1} - \frac{E_{х1} - E_{л1}}{100} \Pi_{л}; \quad (2)$$

$$E_2 = E_{х2} - \frac{E_{х2} - E_{л2}}{100} \Pi_{л}. \quad (3)$$

Расход электроэнергии на размол смеси хвойных и лиственных пород при некоторых значениях $X = L/h$, z , n , c выразим формулой

$$E = E_1 - \frac{E_1 - E_2}{X_2 - X_1} (X - X_1). \quad (4)$$

Подставим в (4) значения E_1 и E_2 из уравнений (2) и (3):

$$E = E_{х1} - \frac{E_{х1} - E_{л1}}{100} \Pi_{л} - \frac{100(E_{х1} - E_{х2}) + (E_{х2} + E_{л2} - E_{х1} + E_{л1}) \Pi_{л}}{100(X_2 - X_1)} (X - X_1). \quad (5)$$

Тогда удельный (на 1 т плит) расход электроэнергии

$$E_{м} = \frac{E V_{м}}{V_{а.с.в.}}, \quad (6)$$

где $V_{м}$ – расход размолотой массы,

$$V_{м} = V_{а.с.в.} \frac{1}{1 - \alpha}, \quad (7)$$

$V_{а.с.в.}$ – выход абс. сухого волокна, т/ч;

α – коэффициент, зависящий от породы и состояния древесины.

Запишем

$$E_{м} = \frac{E}{1 - \alpha}. \quad (8)$$

Определим затраты электроэнергии на размол в целом, выразив их через технологические и конструктивные параметры размалывающих машин:

$$З_p = \frac{V_{др} C_{л} + V_{а.с.в.} E_p C_3 + V_{ш} C_7}{V_{а.с.в.}}, \quad (9)$$

где $З_p$ – затраты на размол 1 т древесноволокнистой массы, р./т;

$V_{др}$ – объемный расход древесины, м³/ч;

E_p – расход электроэнергии на размол 1 т древесноволокнистой массы, кВт·ч/т;

$V_{ш}$ – расход теплоты на пропарку щепы, ккал/ч;
 $C_d, C_э, C_T$ – стоимость соответственно древесины, электроэнергии и теплоты, р./м³, р. кВт·ч и р./ккал.
 Стоимость смеси пород древесины

$$C_d = C_x - 0,01 \Pi_n (C_x - C_n). \quad (10)$$

Таким образом, по уравнению (5) можно определить расход электроэнергии на размол 1 т древесноволокнистой массы.

Для подтверждения теоретических исследований энергозатрат при получении древесноволокнистых материалов и установления количественной взаимосвязи факторов степени помола, технологических, конструктивных параметров размольных машин и удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на размол, спланирован и реализован многофакторный эксперимент.

В процессе исследований при каждом изменении одного из технологических и конструктивных параметров размола фиксировали удельный расход электроэнергии, затрачиваемой на данную операцию [1].

С целью установить зависимость удельного расхода электроэнергии от варьирования технологических и конструктивных параметров размалывающих машин выбраны следующие основные характеристики моделей:

дефибратор и рафинер

$$E = f(L/h, z, n, ДС); \quad (11)$$

рафинактор

$$E = f(L/h, z, c, ДС). \quad (12)$$

По результатам многочисленных предварительных экспериментов для мокрого способа производства были установлены следующие диапазоны варьирования исследуемых факторов:

$$1,15 \leq L/h \leq 3,29; \quad 0,05 \leq z \leq 0,15; \quad 12 \leq n \leq 15,4; \quad 2,5 \leq c \leq 3,5;$$

дефибратор

$$10,7 \leq ДС \leq 13,7;$$

рафинактор

$$14,5 \leq ДС \leq 21,5;$$

для сухого способа производства:

$$1,15 \leq L/h \leq 3,29; \quad 0,25 \leq z \leq 0,55; \quad 20 \leq n \leq 40.$$

В результате планирования и реализации экспериментальных исследований получены статистическо-математические уравнения [4] для определения выходной величины эксперимента – удельного расхода электроэнергии для дефибратора (E_d), рафинактора (E_p) и рафинера ($E_{рафинер}$):

$$E_d = 179,52 + 2,6 (L/h) - 39,4z + 2,46n + 0,07(L/h)^2 - 25z^2 + 0,02n^2 - 5,63((L/h)z) - 0,09 ((L/h)n) + 1,47(zn); \quad (13)$$

$$E_d = 4281,86 - 672,8 (ДС) + 27,7 (ДС)^2; \quad (14)$$

$$E_p = 621,16 - 13,27(L/h) - 167,05z - 312,46c + 2,48(L/h)^2 + 3876z^2 + 79,76c^2 - \\ -15,63((L/h)z) - 0,94 ((L/h)c) - 347,8(zc); \quad (15)$$

$$E_p = 155680 + 16745(ДС) + 470(ДС)^2; \quad (16)$$

$$E_{\text{рафинер}} = 1245,43 + 11,62L/h - 2504,27z - 6,67n + 1,94L/h^2 + \\ + 2074,17z^2 + 0,2n^2 - 27,65L/hz + 0,41L/hn + 8,88zn. \quad (17)$$

Все полученные уравнения адекватны при доверительной вероятности 95...99 %. Достоверность аппроксимации $0,9902 \leq R^2 \leq 0,9987$.

По уравнениям построены графические зависимости удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой на размол, при различных режимах работы (рис. 1, 2).

Из рис. 1, а, б, видно, что при повышении степени помола на дефибраторе удельный расход электроэнергии увеличивается. Например, для степени помола 12,0 ДС удельный расход электроэнергии составляет 210 кВт·ч/т, для 13,0 ДС – 234 кВт·ч/т.

Исследования показали, что наибольшее влияние на расход электроэнергии оказывают зазор между дисками и частота вращения выносного шнека дефибратора. При износе размольной гарнитуры несколько повышается расход электроэнергии и снижается производительность машин. Из рис. 1, в, г

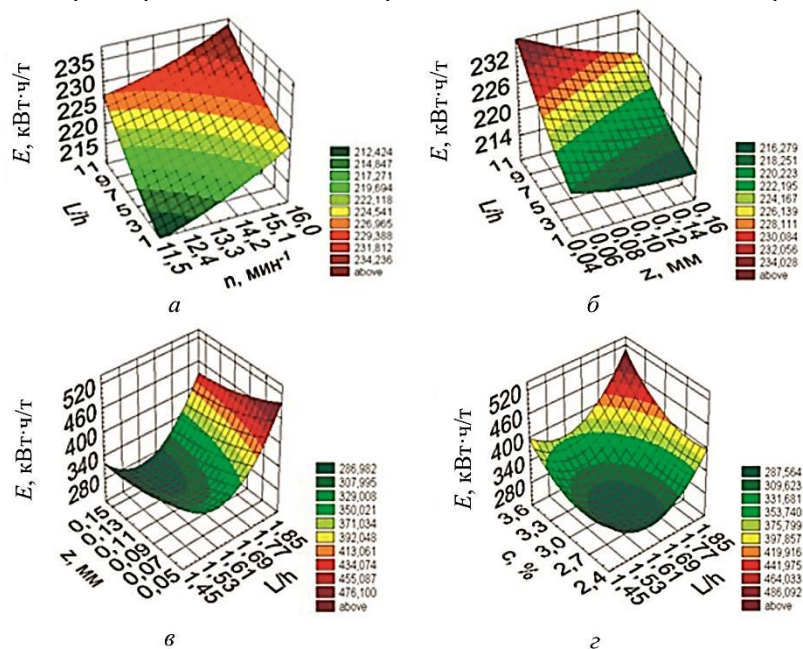


Рис. 1. Удельный расход электроэнергии, затрачиваемой на размол, при различных режимах работы дефибратора (а, б) и рафинатора (в, г)

видно, что при варьировании исследуемых факторов наименьшее значение удельного расхода электроэнергии на рафинаторе составит 270 кВт·ч/т при степени помола 18,5 ДС.

При степени помола 16,0 ДС расход электроэнергии составит 320 кВт·ч/т, при уменьшении этого показателя до 17,0 ДС расход электроэнергии снижается до 290 кВт·ч/т. Таким образом, при увеличении степени помола массы на 1,0...2,0 ДС расход энергии возрастает примерно на 10 %.

Анализируя изменение удельного расхода электроэнергии для обеих ступеней размола при мокром способе производства ДВП, можно отметить, что поддерживать чрезмерно высокий уровень степени помола как для дефибратора, так и для рафинатора нецелесообразно с точки зрения расхода электроэнергии. При износе сегментов до 90 %, уменьшении зазора между размалывающими дисками, а также увеличении частоты вращения выносного шнека удельный расход электроэнергии увеличивается. Скорость вращения нижнего шнека оказывает на расход электроэнергии большее влияние, чем величина зазора. Так, для $z = 0,15$ мм и при $n = 12,0$ об/мин удельный расход электроэнергии составит 215 кВт·ч/т; для $z = 0,15$ мм и при $n = 15,0$ об/мин – $E = 226,5$ кВт·ч/т; для $z = 0,05$ мм и при $n = 12,0$ об/мин – $E = 218,5$ кВт·ч/т; для $z = 0,05$ мм и при $n = 15,0$ об/мин – $E = 232$ кВт·ч/т. При фиксировании L/h на минимальном (износ – 10 %) уровне зависимость удельного расхода электроэнергии от изменения тех же самых конструктивных параметров размалывающей машины сохраняется, но его значения изменяются на 5...8 кВт·ч/т.

С увеличением степени помола удельный расход электроэнергии возрастает. Анализируя уравнения (4) и (6), можно отметить, что при размоле щепы повышение степени помола до 11,0 ДС удельный расход электроэнергии остается неизменным, дальнейшее повышение степени помола приводит к увеличению расхода электроэнергии. Например, для степени помола 12,0 ДС удельный расход электроэнергии составляет 222 кВт·ч/т, а для 13,0 ДС – 234 кВт·ч/т. С ростом степени помола на рафинаторе до 18,5 ДС расход электроэнергии будет минимальным – 275 кВт·ч/т. При дальнейшем росте степени помола удельный расход электроэнергии начинает увеличиваться. Так, при 20,0 ДС расход электроэнергии составит 290 кВт·ч/т, а при 21,0 ДС – 320 кВт·ч/т [2].

Как видно из рис. 2, а, где представлены функции откликов, построенные по уравнению (7), описывающему влияние параметров рафинера на удельный расход электроэнергии, при уменьшении зазора между размалывающими дисками удельный расход электроэнергии повышается. Чем выше степень износа размалывающих сегментов, тем выше, при том же зазоре между ними, расход электроэнергии. Например, при минимальном износе сегментов $L/h = 1,15$ и установлении зазора между дисками $z = 0,3$ мм удельный расход электроэнергии, затрачиваемой на операцию размола, составляет

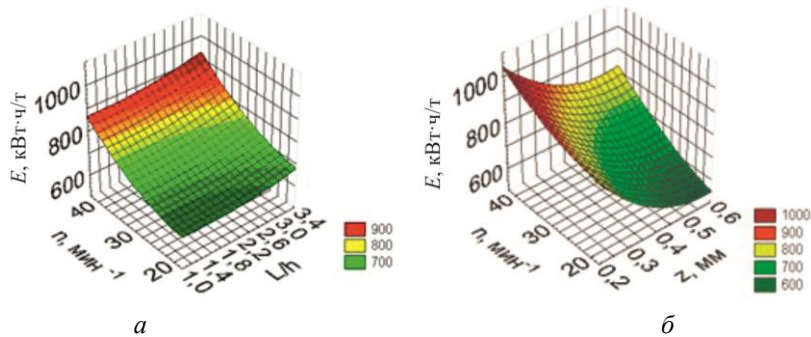


Рис. 2. Удельный расход электроэнергии рафинера при различных частоте вращения выносного шнека, износе размалывающих сегментов и зазоре между ними

720 кВт·ч, при том же значении зазора, но при $L/h = 3,29$ удельный расход электроэнергии увеличивается до 800 кВт·ч.

На рис. 2, б представлена графическая зависимость, отражающая взаимное влияние частоты вращения выносного шнека и степени износа размалывающих сегментов при фиксировании зазора между дисками на среднем уровне, т. е. $z = 0,4$ мм.

При минимальном износе сегментов ($L/h = 1,15$) и увеличении частоты вращения шнека от 20 до 40 мин^{-1} удельный расход электроэнергии изменяется в пределах 680...870 кВт·ч, при максимальном износе сегментов ($L/h = 3,29$) и в том же диапазоне изменения частоты вращения выносного шнека удельный расход электроэнергии повышается от 730 до 980 кВт·ч.

Как видно из рис. 2, при фиксировании степени износа на среднем уровне ($L/h = 2,22$), уменьшении зазора между размалывающими дисками и увеличении частоты вращения выносного шнека удельный расход электроэнергии увеличивается. Скорость вращения нижнего шнека, как и на дефибраторе, оказывает на расход электроэнергии большее влияние, чем зазор. Так, для $z = 0,55$ мм и $n = 20,0$ мин^{-1} расход электроэнергии составит 585 кВт·ч, а для $z = 0,55$ мм и $n = 40,0$ мин^{-1} – $E = 850$ кВт·ч; для $z = 0,25$ мм и при $n = 20,0$ мин^{-1} – $E = 800$ кВт·ч, а для $z = 0,25$ мм и $n = 40,0$ мин^{-1} – $E = 980$ кВт·ч.

На основании теоретических выкладок и реализации серии экспериментов в производстве ДВП мокрым и сухим способами, а также по результатам статистической обработки результатов найдены ограничения для состава исходного древесного сырья, режимные параметры размалывающих машин, качественные характеристики древесной массы и готовых плит.

Исследования показали, что на удельный расход энергии при приготовлении древесноволокнистой массы существенное влияние оказывают технологические и конструктивные параметры пропарочной камеры и размольной установки, исходное состояние и качество древесного сырья, его породный состав, давление и температура процесса, конструкция и материал ножевой

гарнитуры и др. [3]. Установлено, что увеличение содержания доли лиственных пород в сырье приводит к снижению нагрузки на главный электродвигатель. Нагрузка возрастает также с увеличением продолжительности работы размольных дисков, при этом снижается производительность размольных машин, ухудшается качество получаемого волокна [2].

Таким образом, при улучшении отдельных параметров работы размалывающих установок и достижении оптимальных условий их работы удельный расход электроэнергии имеет тенденцию к существенному снижению.

Для использования представленных выше моделей на практике в различных производственных условиях необходимо выявить те условия процесса размола и характеристики размалывающих машин, которые наиболее существенны для поддержания оптимального режима работы оборудования.

Вывод

На основе представленных регрессионных и графических зависимостей, изменяя технологические, конструктивные параметры размалывающих машин, можно подобрать такие параметры процесса размола, при которых возможно снижение затрат удельного расхода электроэнергии для мокрого способа производства плит в среднем на 25...40 кВт·ч/т древесного волокна, для сухого – на 59...70 кВт·ч/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пижурин А.А., Пижурин А.А.* Моделирование и оптимизация процессов деревообработки: учеб. М.: МГУЛ, 2004. 375 с.
2. *Чистова Н.Г., Петрушева Н.А., Алашкевич Ю.Д.* Исследование возможности применения вторичного волокна в производстве ДВП мокрым способом: моногр. Новосибирск: СО РАН, 2009. 136 с.
3. *Чистова Н.Г.* Переработка древесных отходов в технологическом процессе получения древесноволокнистых плит: дис. ... д-ра. техн. наук. Красноярск, 2010. 415 с.
4. *Чистова Н.Г.* Энергозатраты размольного участка в производстве ДВП // Лесн. журн. 2010. № 1. С 125–129. (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 18.07.11

Experimental and Theoretical Modeling of Power Consumption in Fiberboard Production

N.G. Chistova, Doctor of Engineering, Professor

Lesosibirsk Branch of Siberian State Technological University, Pobedy, 29, 662546,
Lesosibirsk, Krasnoyarsk Krai, Russia
E-mail: chistova_n_g@mail.ru

To reduce power consumption of grinding machines and determine the optimal operating mode in fiberboard production is an issue of great importance. The paper aimed to study specific energy consumption to achieve the required degree of grinding of wood fiber semi-products at given design and process parameters of grinding mills.

The studies were conducted on industrial units of the fiberboard plant at the timber industry complex in Lesosibirsk.

The experimental research results were processed using the methods developed for mathematical models in order to describe the object of research (specific energy consumption) and find optimal operating conditions for the system under study.

We obtained a statistical-mathematical description of the relationship between the grinding degree factors, technological and structural parameters of grinding mills and the specific energy consumption for grinding. We found that the degree of fiber grinding, quality characteristics of boards and power consumption for grinding depend on the same factors and correlate with each other.

Based on the data obtained, one can choose the grinding parameters ensuring the best physical and mechanical properties of the board while keeping power consumption for grinding at the lowest possible level both for the wet and dry methods of fiberboard production.

Keywords: power, optimization, criteria, grinding degree, wood fiber mass, refiner, defibrator.

REFERENCES

1. Pizhurin A.A. *Modelirovanie i optimizatsiya protsessov derevoobrabotki* [Modeling and Optimization of Woodworking]. Moscow, 2004. 375 p.
 2. Chistova N.G., Petrusheva N.A., Alashkevich Yu.D. *Issledovanie vozmozhnosti primeneniya vtorichnogo volokna v proizvodstve DVP mokrym sposobom* [Study of the Possible Use of Recycled Fiber in Wet Method Fiberboard Production]. Novosibirsk, 2009. 136 p.
 3. Chistova N.G. *Pererabotka drevesnykh otkhodov v tekhnologicheskom protsesse polucheniya drevesnovolknistykh plit: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Recycling of Waste Wood in Fiberboard Production: Dr. Tech. Sci. Diss.]. Krasnoyarsk, 2010. 415 p.
 4. Chistova N.G. *Energozatraty razmol'nogo uchastka v proizvodstve DVP* [Power Consumption of Grinding Section in Fiber Board Production]. *Lesnoy zhurnal*, 2010, no. 1, pp. 125–129.
-