

674  
К64

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский технологический институт  
имени С.М.Кирова

на правах рукописи

КОНАН Григорий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ ОПИЛОК В  
ТОНКИЕ ДРЕВЕСНЫЕ ЧАСТИЦЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ С МЕЛКОСТРУКТУРНОЙ  
ПОВЕРХНОСТЬЮ

Специальность 05.21.01

"Процессы и технология лесозаготовок, лесозаготовок,  
лесного хозяйства, лесопильных и деревообрабатывающих  
производств"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Минск - 1977

Работа выполнена на Костопольском ордена Ленина домостроительном комбинате им.50-летия Великой Октябрьской социалистической революции и в Украинском научно-исследовательском институте механической обработки древесины Минлесдревпрома УССР.

Научный руководитель - кандидат  
технических наук А.И.ИСАКОВ

Научный консультант - кандидат  
технических наук, доцент И.А.ОТЛЕВ

Официальные оппоненты: профессор,  
доктор технических наук В.А.БАШЕНОВ

профессор, кандидат технических  
наук А.Н.МИНИН

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение промышлен-  
ности древесных плит ( Научплитпром ).

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1977 г. в \_\_\_\_ часов на за-  
седании специализированного совета К-427/2 по присуждению ученой  
степени кандидата наук в Белорусском технологическом институте  
им.С.М.Кирова.

Адрес: 220630, г.Минск , ул.Свердлова, 13 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского техно-  
логического института им.С.М.Кирова.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1977 г.

Ученый секретарь специализированного совета,  
доцент, кандидат технических наук ГРУШЕВСКАЯ Е.А.

КНХ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Ускоренное развитие производства древесностружечных плит способствует решению задач, поставленных XXIV и XXV съездами КПСС и последующими Постановлениями партии и правительства перед лесной и деревообрабатывающей промышленностью в вопросах комплексного использования древесины и освоения более эффективных материалов. Значительное увеличение объема производства плит, предусмотренное на 10-ую пятилетку, требует и расширения источников сырья для их производства. В этом аспекте большой интерес представляет использование опилок от лесопильных и деревообрабатывающих производств, которые до настоящего времени не находят массового применения в промышленности. Разработка способов, обеспечивающих широкое использование опилок в производстве древесностружечных плит, позволит значительно расширить сырьевую базу и обеспечить комплексное использование древесины, а также получить с наименьшими затратами тонкие древесные частицы для формирования наружных слоев плит с мелкоструктурной поверхностью.

4703 ар.

На основании изложенного в данной работе ставилась задача:

1. Изготовить тонкие древесные частицы из опилок для формирования наружных слоев древесностружечных плит.
2. Изучить свойства плит с наружными слоями из мелких древесных частиц.

Научная новизна работы. Дана теоретическая разработка процесса измельчения древесных частиц типа опилок в шаровой мельнице. Разработаны режимы расслоения опилок в тонкие древесные частицы в молотковой и шаровой мельницах. Получены математические модели, описывающие зависимость фракционного состава тонких древесных частиц от основных технологических режимов расслоения опилок и зависимость прочности плит при статическом изгибе от основных технологических параметров, характеризующих конструкции и механические показатели плит. Разработана новая технология расслоения опилок в тонкие древесные частицы в шаровой мельнице непрерывного действия.

Практическая ценность. Доказана возможность использования шаровых мельниц непрерывного действия для измельчения опилок и других аналогичных древесных частиц в тонкие древесные частицы для формирования наружных слоев плит. Предложенные режимы расслоения опилок в молотковой и шаровой мельницах могут быть использованы при разработке нового оборудования для измельчения опилок. Результаты исследований по изучению зависимости прочности плит при изгибе от основных технологических факторов могут быть использованы при разработке технологического процесса производства плит с мелкоструктурной поверхностью.

БИБЛИОТЕКА БТИ  
им. С. М. Кирова

Реализация работы в промышленности. Результаты исследования внедрены в производство на Костопольском домостроительном комбинате, где создан участок комплексной переработки отходов производства, включая опилки и стружку - отходы деревообрабатывающих цехов. Для получения тонких древесных частиц из опилок и стружки-отходов установлена шаровая мельница непрерывного действия.

Апробация работы. Основные положения по работе докладывались и получили положительную оценку на Всесоюзной научной конференции по рациональному и комплексному использованию древесины в деревообрабатывающей промышленности ( Минск, 1974 ), на секции древесных плит Минлеспрома СССР ( Москва, 1973 ), на научно-технической конференции по совершенствованию техники и технологии деревообрабатывающей промышленности ( Киев, 1974 ), на Всесоюзном совещании по улучшению качества и расширению ассортимента древесностружечных плит ( Майкоп, 1976 ). Костопольский ДСК в 1976 г. являлся участником ВДНХ СССР по производству древесностружечных плит с мелкоструктурной поверхностью и награжден дипломом II степени, а три работника комбината награждены одной серебрянной и двумя бронзовыми медалями.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав основного текста, выводов и рекомендаций на 164 страницах машинописного текста, включая 25 рисунков и 31 таблицу.

Список использованной литературы включает 89 наименования, из них 15 зарубежных авторов.

## СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Одна из важнейших задач, стоящих перед промышленностью древесностружечных плит, - организация производства плит с мелкоструктурной поверхностью, пригодной для облицовки новыми эффективными синтетическими материалами. Для получения плит с такой поверхностью требуются мелкие или волокнистые древесные частицы.

Цель нашей работы заключалась в исследовании возможности изготовления тонких древесных частиц из опилок-отходов лесопиления и деревообработки для наружных слоев плит с мелкоструктурной поверхностью.

Для решения этой задачи были исследованы два наиболее распространенных в промышленности метода измельчения материалов. Один из них основан на мгновенном ударе за счет разности скоростей материала и измельчающих устройств в молотковой дробилке, другой - на ударном сжатии с помощью мельющих тел в шаровых мельницах.

Из обзора выполненных работ по использованию опилок в производстве древесностружечных плит, а также по изготовлению из них мелких древесных частиц и волокон, пригодных для формирования наружных слоев плит, видно, что проблема получения древесных частиц, обеспечивающих изготовление древесностружечных плит с гладкой и ровной поверхностью, необходимым для облицовки их синтетическими материалами, является актуальной.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
МАТЕРИАЛА /ОПИЛОК/ МЕТОДОМ УДАРА

Разрушение твердых тел происходит под действием усилий, приложенных извне, величина которых должна быть достаточной для преодоления внутренних сил когезии. Процесс измельчения является сложной операцией и зависит от свойств перерабатываемого материала: однородности его структуры, плотности, вязкости, твердости, формы и размеров частиц, их влажности и т.д.

Существует несколько теории измельчения материалов.

Теория поверхностей, разработанная проф. Риттингером, согласно которой работа, затрачиваемая при измельчении материалов, прямо пропорциональна степени измельчения.

Теория объемов, разработанная проф. В.Л. Киричевым, по которой "энергия, необходимая для одинакового измельчения формы геометрически подобных тел, пропорциональна объемам или массам этих же тел".

Акад. П.А. Ребиндером разработана теория вибрационного разрушения материалов. По этой теории "при деформации твердых тел в период, непосредственно предшествующий его разрушению, т.е. в период упругих и пластических деформаций, накапливается объемная энергия, которая при до-

6.

стижении критического значения приводит к разрушению твердых тел".

Применение той или иной теории зависит от свойств исходного материала, степени и способа его измельчения.

Одним из показателей, характеризующих работу дробильно-размольных машин, является степень измельчения материала, которая определяется отношением первоначальных размеров неизмельченного материала к величине образовавшихся частиц и выражается формулой:

$$i = \frac{D_{cp}}{d_{cp}}, \quad (1)$$

где  $D_{cp}$  - средний размер частиц до измельчения;  
 $d_{cp}$  - средний размер частиц после измельчения.

В настоящей работе ставилась цель измельчить опилки на тонкие древесные частицы при максимальном сохранении их исходной длины. На основе теории измельчения материалов, анализа существующих способов получения мелких древесных частиц и работы применяемого оборудования установлено, что более эффективным является ударный способ (метод) измельчения в дробилках, паровых мельницах и др.

В дробилке сила удара  $P$  действует на древесную частицу в течение очень короткого времени и возрастает до максимума почти мгновенно. Действие этой силы измеряется ее импульсом.

$$J = \int P dt, \quad (2)$$

где  $t$  - время удара.

Согласно закону сохранения количества движения механической системы при ударе (рис. I) имеем:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2', \quad (3)$$

где  $v_1, v_2$  - проекции скоростей молотка и отдельной частицы на ось параллельную векторам  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  до удара;

$v_1', v_2'$  - то же после удара;

$m_1$  и  $m_2$  - массы молотка и древесной частицы.

Если коэффициент восстановления при ударе обозначить через  $K$ , то

$$K = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2} \quad (4)$$

Тогда после соответствующих преобразований получим:

$$v_2' = \frac{m_1(1+K)v_1 + (m_2 - m_1K)v_2}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

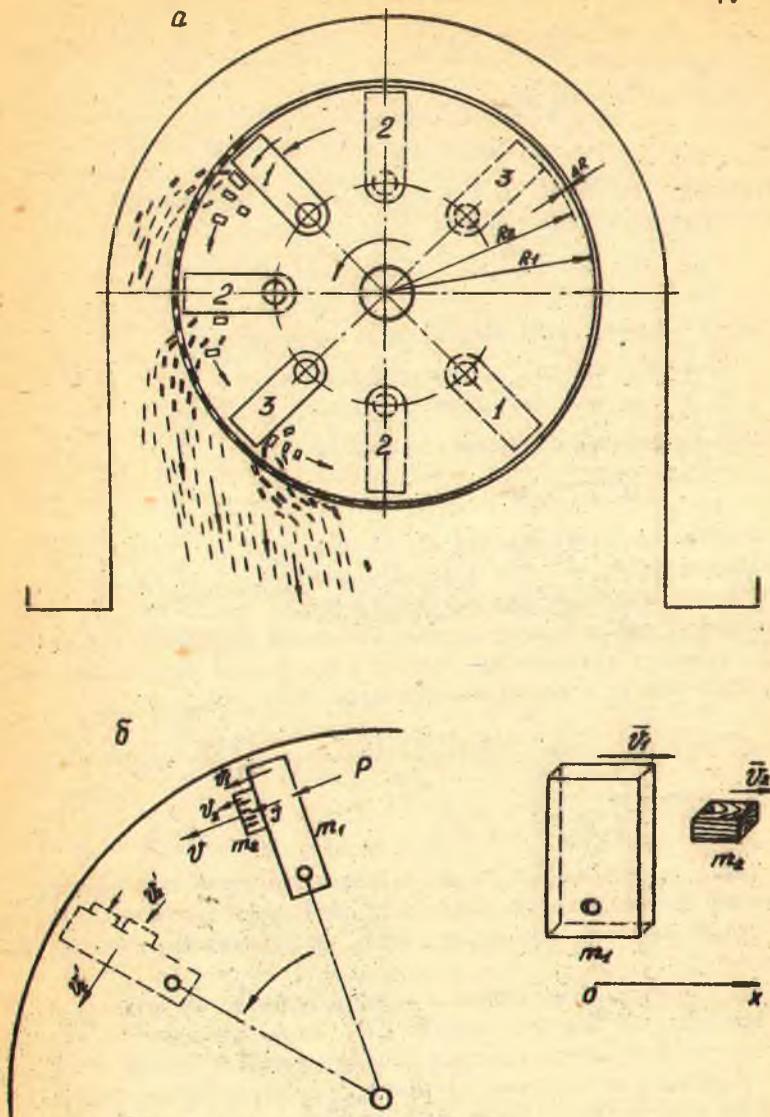


Рис. I. Схема расслоения опилок в молотковой дробилке:  
 а - процесс расслоения, б - момент удара молотков по древесной частице

Величину ударного импульса можно определить по формуле:

$$J = m_2(v_1' - v_2') \quad (6)$$

или

$$J = \frac{m_1 m_2 (1 + K)(v_1 - v_2)}{m_1 + m_2} \quad (7)$$

Учитывая, что  $v_2' \ll v_1'$ , а  $m_2 \ll m_1$ , то потерянная при ударе кинетическая энергия будет равна:

$$T_1 - T_2 = \frac{m_2 v_1'^2 (1 - K^2)}{2} = \frac{G_2 v_1'^2 (1 - K^2)}{2g}, \quad (8)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  - кинетическая энергия до и после удара;

$G$  - сила тяжести разрушаемой частицы, Н;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

Работа разрушения определится формулой:

$$A_{\text{разр}} = \frac{\sigma^2 V}{2E}, \quad (9)$$

где  $\sigma$  - напряжение, возникающее при разрушении;

$V$  - первоначальный объем деформируемого тела;

$E$  - модуль упругости деформируемого тела.

Исходя из этого, для разрушения частиц материала необходимо выполнение следующего условия: кинетическая энергия удара должна быть больше энергии, затрачиваемой на измельчение материала, т.е.

$$T_1 - T_2 \geq A_{\text{разр}} \quad \text{или} \quad \frac{G_2 v_1'^2 (1 - K^2)}{2g} \geq \frac{\sigma^2 V}{2E}, \quad (10)$$

$$\text{тогда} \quad v_1' > \sigma \sqrt{\frac{gV}{G_2 E (1 - K^2)}} \quad (11)$$

Как видно из формулы (10), самым существенным фактором, влияющим на расслоение древесных частиц (опилок) в молотковой дробилке, является окружная скорость ротора или число ударов, воспринимаемых измельчаемыми частицами.

Процесс измельчения материала в шаровой мельнице заключается в том, что при вращении барабана мелющие тела (шары), приподнимаясь на определенную высоту, отрываются и, падая по параболической кривой, ударом разрушают измельчаемый материал. Древесина, как пористый материал, сначала сжимается, уменьшаясь в объеме, а затем разделяется на более мелкие частицы по межволоконным связям, т.е. расслаивается. Такой процесс измельчения опилок в шаровой мельнице можно рассматривать как процесс

ударного сжатия. Так как древесина относится к анизотропным материалам и имеет волокнистое строение, а опилки к тому же, имеют малую длину, то разрушение их при ударном сжатии произойдет вдоль волокон по наиболее слабым местам, с образованием тонких древесных частиц.

Теоретически ударный импульс шара можно рассматривать как изменение количества движения материальной точки в проекциях на нормаль  $n$  и касательную  $\tau$  (рис. 2). Тогда теорему об изменении количества движения материальной точки можно записать в таком виде:

$$\begin{cases} \frac{G}{g}(u_c - v_c) = S_c \\ \frac{G}{g}(u_n - v_n) = S_n \end{cases} \quad (12)$$

$$u_c = \kappa_1 v_c = \kappa v_{cx}$$

$$u_n = -\kappa_2 v_n = \kappa v_{cy}$$

$$S_c = -\frac{G v_{cx}}{g}(1 - \kappa_1)$$

$$S_n = -\frac{G v_{cy}}{g}(1 + \kappa_2)$$

(13)

при этом  $S_c < 0$ , т.к.  $v_{cx} > 0$  и  $\kappa < 1$  соответственно  $S_n > 0$ , т.к.  $v_{cy} > 0$ . Следовательно, на древесную частицу будут действовать импульсы

$$\begin{cases} S'_c = \frac{G v_{cx}}{g}(1 - \kappa_1) \\ S'_n = \frac{G v_{cy}}{g}(1 + \kappa_2) \end{cases}, \quad (14)$$

$$S'_c = -S_c \text{ и } S'_n = -S_n$$

где  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  коэффициенты восстановления при ударе, или

$$\begin{cases} |S'_c| = S'_c = \frac{G(1 - \kappa_1)n^3 R^3}{g \cdot 9000} \\ |S'_n| = S'_n = \frac{G(1 + \kappa_2)nR \sqrt{1 - \frac{n^4 R^2}{30^4}}}{g \cdot 300} \end{cases} \quad (15)$$

Тогда ударный импульс определится по формуле:

$$S = \sqrt{S_c'^2 + S_n'^2} \quad (16)$$

Сила ударных импульсов, необходимая для разрушения материалов, как видно из формулы (15), зависит от прочностных свойств самого материала, массы и размера мельющих тел, частоты вращения и диаметра барабана мельницы.

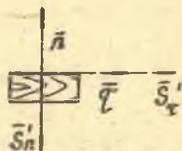
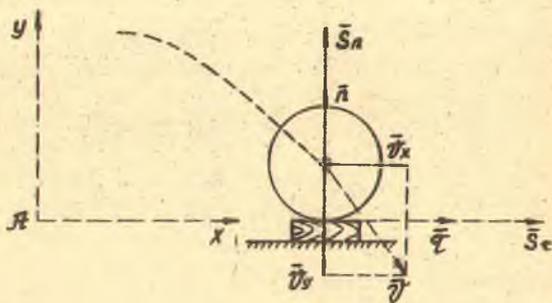
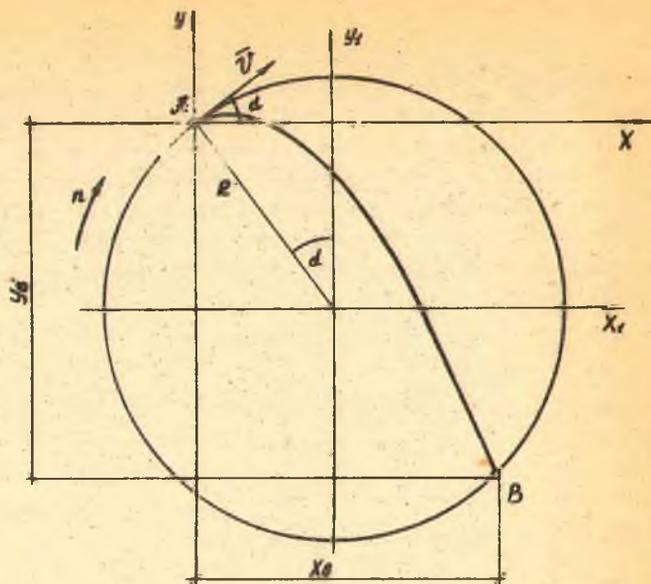


Рис. 2. Движение мелкого тела в барабане мельницы и действие оги в момент удара шара по древесной частице

При этом разрушении материала способствует и сила давления, создаваемая массой мелющих тел, находящихся в непрерывном движении.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЛОЕНИЯ ОПИЛОК В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ И ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

При проведении экспериментальных исследований была поставлена задача установить зависимость качества расслоения опилок от различных факторов. Для опытов применяли опилки хвойных пород, полученных при распиловке бревен на двухэтажных лесопильных рамах пилами с пилочным зубом.

Опыты по расслоению опилок проводили на молотковой дробилке ДКУ-И и в шаровой мельнице периодического действия, изготовленной на Костопольском домостроительном комбинате.

Изучали влияние на качество расслоения опилок следующих факторов.

В молотковой дробилке: влажности опилок (10, 20, 30, 50, 70, 90 и 100%), толщины молотков (1 и 2 мм), количества молотков и расстояния между ними (соответственно 72 и 100, 4 и 2 мм), величины зазора между ситовыми вкладышами и кромками молотков (10 и 2 мм), диаметра отверстий ситовых вкладышей (2, 3, 6 и 8 мм), количества опилок, подаваемых в дробилку за 1 ч (50, 100, 150 и 200 кг в пересчете на абс. сухую древесину).

В шаровой мельнице: количества загружаемых опилок по отношению к массе мелющих тел (2,3,4; 3,9; 4,4%), влажности опилок (10, 30, 50, 80 и 100%), размера мелющих тел (металлические шары диаметром 40, 50 и 60 мм и смесь шаров и цилиндров), частоты вращения шаровой мельницы (15, 20, 30, 40 и 50 об/мин); продолжительности расслоения опилок (10, 20, 30, 40, 50 и 60 мин).

Качество древесных частиц из расслоенных опилок определяли следующими показателями: фракционным составом, размерами частиц каждой фракции, среднезвешенными размерами, а также их парусность.

При проведении экспериментальных исследований по расслоению опилок как в молотковой, так и в шаровой мельнице предусматривали получение максимального количества тонких древесных частиц фракции 1/0, 2. Предварительными опытами по прессованию плит с наружными слоями из древесных частиц различных фракций и исследованиями, выполненными в ЦНИИФЕ, ВНИДреве и за рубежом, установлено, что плиты, пригодные для облицовки пленочными материалами, можно получить при формировании наружных слоев из частиц фракции 1/0. Однако плиты имеют более высокую прочность на статический изгиб, когда наружные слои формируются из тонких частиц, содержащих не более 15% древесной пыли (фракции 0,2/0). Установлено, что

при всех способах расслоения опилок получаются частицы, которые остаются на сите с ячейками диаметром 1 мм. Поэтому при оценке качества расслоения опилок учитывали соотношение фракции  $-/1$  и  $1/0$  в процентах, а также средневзвешенные размеры древесных частиц.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАССЛОЕНИЮ ОПИЛОК В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

Исследованиями установлено, что при зазоре между рабочими кромками молотков и ситовыми вкладышами 10 мм в измельченном материале остается значительное количество частиц фракции  $5/3$  и  $3/2$ . Это объясняется тем, что при слишком большом зазоре (10 мм) по сравнению со средневзвешенными размерами опилок ( $3,6 \times 1,7 \times 0,86$  мм) на периферии рабочей камеры накапливается движущийся слой древесных частиц, которые находятся вне зоны действия молотков. Поэтому зазор  $\Delta R$  был уменьшен до 1-2 мм (изготовлен новый комплект молотков), в соответствии с известным выражением (17)

$$D < \Delta R < 2D, \quad (17)$$

где  $D$  — величина измельчаемых частиц.

Исследованиями Е.Н.Кудрявцева установлено, что уменьшение толщины молотков с 8 до 2 мм повышает эффект процесса измельчения древесных частиц. Нами изучалось влияние молотков толщиной 2 и 1 мм на эффективность процесса расслоения опилок. Установлено, что при толщине молотка 1 мм несколько увеличивается содержание частиц фракции  $0,5/0$ . Однако удельный вес их сравнительно невелик. Поэтому можно считать, что изменение толщины молотков с 2 до 1 мм существенно не влияет на эффективность расслоения опилок.

Количество молотков или расстояние между ними влияет на качество расслоения опилок. При уменьшении числа молотков (расстояние между ними 6 мм) или увеличении (расстояние 2 мм) снижается качество расслоенных древесных частиц.

Диаметр ячеек ситовых вкладышей оказывает основное влияние на качество расслоения. На рис.3 показано изменение фракционного состава расслоенных опилок в зависимости от диаметра ячеек ситовых вкладышей.

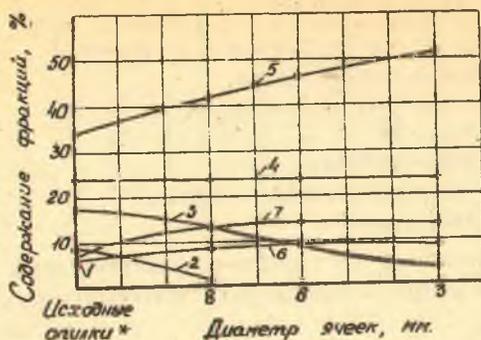


Рис.3. Зависимость фракционного состава древесных частиц от диаметра ячеек ситовых вкладышей

1-фракция 10/7; 2-7/5; 3-5/3; 4-3/2;  
5-2/1; 6-1/0,5; 7-0,5/0

\* фракционный состав опилок до измельчения

В табл. I приведены средневзвешенные размеры исходных опилок и расслоенных частиц при разных диаметрах ячеек ситовых вкладышей.

Таблица I

Средневзвешенные размеры опилок и расслоенных частиц

Размер	Средневзвешенные размеры, мм				
	исходных опилок	частиц из опилок, расслоенных в дробилке с ячейками сит диаметром, мм			
		8	6	3	2
Длина	4,71	4,54	3,66	2,57	2,3
Ширина	1,95	1,33	0,9	0,61	0,54
Толщина	0,76	0,5	0,5	0,4	0,32

Исследования показали, что начальная влажность опилок не оказывает существенного влияния на фракционный состав полученных частиц.

Количество опилок, загружаемых в дробилку в единицу времени, не влияет значительно на фракционный состав конечного продукта. Производительность молотковой дробилки на 1 м<sup>2</sup> ситовых вкладышей с ячейками диаметром 3 мм при расслоении опилок составляет 467 кг/ч, а энергозатраты — 70 кВт-ч/т расслоенных опилок ( в пересчете на абс.сухие). На осно-

пании выполненных исследований рекомендуется следующий режим расслоения опилок в молотковой дробилке:

угловая скорость вращения ротора ( по диаметру рабочих кромок молотков), рад/с	50-60
диаметр ячеек ситовых вкладышей, мм	3
толщина молотка, мм	I-2
расстояние между молотками, мм	4
зазор между рабочими кромками молотков и ситовыми вкладышами, мм	I-2

Эти данные получены при выполнении экспериментов и могут быть использованы при разработке конструкции молотковой дробилки для расслоения опилок.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАССЛОЕНИЮ ОПИЛОК В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Для оптимизации процесса расслоения опилок в шаровой мельнице применен математический метод планирования экспериментов. С целью определения постоянных и переменных факторов и уровня их варьирования были проведены предварительные опыты. На основе теоретического анализа и выполненных опытов определены следующие независимые переменные:

$X_1$  - количество загружаемых опилок, % по отношению к массе мельющих тел;

$X_2$  - влажность расслаиваемых опилок, %;

$X_3$  - размер мельющих тел, мм;

$X_4$  - окружная скорость барабана шаровой мельницы, м/с;

$X_5$  - продолжительность расслоения опилок в шаровой мельнице, мин.

Опытами установлено, что все эти факторы совместимы и независимы один от другого. Выбор базового уровня и уровней варьирования для каждого фактора приведены в табл.2.

Задача состояла в построении полиномиальных математических моделей, связывающих критерии оценки с исследуемыми факторами.

Эксперимент реализован по принципу центрального композиционного униформ-ротатабельного планирования второго порядка. Матрица представляет полуреплику плана пяти факторов ( $2^{5-1}$ ) с определяющим контрастом  $I = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5$ , содержащую 16 опытов и включающую 10 "звездных" точек с величиной "звездного" плеча  $d = 2^{k/4} = 2^{5-1/4} = 2$  и 6 точек в центре плана.

Параметром оптимизации принято количество древесных частиц фракции  $I/0,2 - 4_1$ ;  $I/0 - 4_2$ ;  $2/0 - 4_3$  в общей массе расслоенных опилок.

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Обозначение	Уровни варьирования					Интервалы варьирования X
		отрицательная величина на звезде "звездного плеча" -2	нижний уровень -1	центр эксперимента 0	верхний уровень +1	положительная величина на звезде "звездного плеча" +2	
Количество загружаемых опилок, % от массы мелодших тел	$X_1$	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	0,6
Влажность опилок, %	$X_2$	10	30	50	70	90	20
Размер мелодших тел, мм	$X_3$	30	40	50	60	70	10
Окружная скорость барабана, м/с	$X_4$	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	0,2
Продолжительность расслоения опилок, мин.	$X_5$	10	20	30	40	50	10

Статистический анализ результатов эксперимента проводили с учетом униформ-ротатабельного планирования. Однородность дисперсии опытов определяли с помощью критерия Кохрена. Выполненные расчеты подтвердили гипотезу об однородности дисперсии опытов и позволили определить дисперсию воспроизводимости эксперимента.

Вычислив коэффициенты регрессии, получили математические уравнения в условиях перемещенных для принятых параметров оптимизации в виде полиномов второго порядка.

для фракции 1/0,2

$$y_1 = 60,3,2 X_1 + 1,2 X_2 + 0,5 X_3 + 2,3 X_4 + 3,1 X_5 - 0,25 X_1 X_2 - 0,88 X_1 X_3 + 0,25 X_1 X_4 + 0,38 X_1 X_5 + 0,38 X_2 X_3 + 0,5 X_2 X_4 - 0,75 X_3 X_4 + 0,13 X_3 X_5 - 0,25 X_4 X_5 - 1,49 X_1^2 - 0,37 X_2^2 - 2,37 X_3^2 - 0,74 X_4^2 \quad (18)$$

для фракции 1/0

$$y_2 = 65,1 - 4,38 X_1 + 1,04 X_2 + 0,38 X_3 + 3,2 X_4 + 4,29 X_5 - 0,19 X_1 X_2 - 1,06 X_1 X_3 - 0,06 X_1 X_4 + 0,19 X_1 X_5 + 0,56 X_2 X_3 - 0,06 X_2 X_4 + 0,94 X_2 X_5 - 0,96 X_3 X_4 - 0,18 X_3 X_5 + 0,06 X_4 X_5 - 1,16 X_1^2 - 0,57 X_2^2 - 0,2 X_3^2 - 2,7 X_4^2 - 0,82 X_5^2 \quad (19)$$

для фракции 2/0

$$y_3 = 94,5 - 1,62 X_1 + 0,42 X_2 + 0,63 X_3 + 1,2 X_4 + 1,54 X_5 + 0,31 X_1 X_2 - 0,44 X_1 X_3 + 0,06 X_1 X_4 + 0,06 X_1 X_5 - 0,06 X_2 X_3 + 0,44 X_2 X_4 + 0,44 X_2 X_5 - 0,31 X_3 X_4 + 0,18 X_3 X_5 - 0,06 X_4 X_5 - 0,34 X_1^2 + 0,38 X_2^2 - 0,34 X_3^2 - 1,25 X_4^2 - 0,25 X_5^2 \quad (20)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии показала, что в уравнении (18) нельзя считать статически значимым коэффициент  $b_{35}$ , в уравнении (19) незначимыми являются коэффициенты  $b_{12}, b_{14}, b_{15}, b_{24}, b_{25}, b_{25}$  и  $b_{32}$ , а в уравнении (20)  $b_{14}, b_{15}, b_{23}, b_{45}$ .

В результате реализации матрицы эксперимента получена адекватная математическая модель и установлены ограничения переменных факторов. Это позволило приступить к решению задачи оптимизации процесса расслоения опилок в шаровой мельнице и установить зависимость оптимума (параметров оптимизации) от исследуемых факторов.

Задача решалась на ЭВМ "Проминь 2" методом полного перебора.

Для решения задачи на основании полученных уравнений (18, 19 и 20) разработана программа.

Результаты решения задачи по оптимизации (максимизации) выходных параметров (для древесных частиц фракции 1/0,2; 1/0; 2/0) приведены в табл.3.

Как видно из табл.3, максимальное количество тонких древесных частиц фракции 1/0,2; 1/0 и 2/0 достигается в установленных ограничениях переменных факторов за счет снижения количества загружаемых опилок, увеличения размера шаров и продолжительности расслоения.

Расчетные оптимальные режимы проверены экспериментально (табл.3). Полученные результаты показали близкую сходимость расчетных и опытных данных.

Для изучения возможностей увеличения количества опилок, загружаемых в барабан, без значительного снижения содержания фракции 1/0,2,

Таблица 3  
Результаты оптимизации выходных параметров

Параметры оптимизации		Оптимальные режимы расслоения опилок при $X_2 = X_4 = 70\%$				Расчетное значение выходного параметра, %	Экспериментальное значение выходного параметра, %
обозначение	фракция	$X_1$ , %	$X_3$ , мм	$X_4$ , м/с	$X_5$ , мин		
	1/0,2	2,7	70	1,18	50	68,2	67,4
	1/0	2,4	70	1,24	50	81,2	79,8
	2/0	2,4	65	1,3	45	100	99,3

онли решены задачи оптимизации процесса для модели 18 в трех вариантах пяти фиксированных значения следующих переменных: загрузки ( $X_1$ ), размера шаров ( $X_3$ ) и скорости вращения барабана ( $X_4$ ). Результаты оптимизации, полученные при решении задач, приведены в табл.4.

На основе математических моделей для определения количества частиц фракции 1/0,2 и 1/0 при изменении каждого фактора в отдельности в пределах варьирования (от -2 до +2) построены графики (рис.4).

Таблица 4

Параметры оптимизации режимов при пяти фиксированных значениях факторов  $X_1$ ;  $X_2$ ;  $X_4$

Фиксированные факторы		Оптимальные режимы расслоения опилок					Расчетное значение
обозначения	величины	$\bar{X}_1$ , %	$\bar{X}_2$ , %	$\bar{X}_3$ , мм	$\bar{X}_4$ , м/с	$\bar{X}_5$ , мин.	
$X_1$	2,4	-	90	70	1,16	50	68,7
	3,0	-	90	70	1,17	50	68,45
	3,6	-	84	60	1,14	50	65,56
	4,2	-	85	41	1,34	50	61,8
	4,8	-	72	30	1,34	50	55,2
$X_2$	30	3,42	83	-	1,3	50	63,1
	40	3,2	86	-	1,26	50	65,0
	50	3,0	85	-	1,24	50	66,58
	60	2,82	90	-	1,16	50	68,0
	70	2,64	90	-	1,16	50	69,0
$X_4$	0,8	2,55	90	70	-	50	60,1
	1,0	2,7	90	70	-	50	65,5
	1,2	2,66	90	70	-	50	67,86
	1,4	3,0	83	55	-	50	65,2
	1,6	2,77	76	70	-	46	61,0

Анализируя результаты, приведенные в табл.3 и 4, и графики, можно сделать вывод, что основными факторами, обеспечивающими получение максимального количества тонких древесных частиц при расслоении опилок, являются частота вращения барабана мельницы, степень загрузки его и продолжительность расслоения опилок. Установлено, что при расслоении опилок окружная скорость барабана должна быть 1 - 1,4 м/с.

На основании выполненных исследований и анализа полученных результатов рекомендуется следующий режим расслоения опилок в шаровой мельнице:

частота вращения барабана, обеспечивающая окружную скорость 1,0 - 1,4 м/с, об/мин.	12 - 15
количество загружаемых опилок в пересчете на абс.сухие, % к массе мелющих тел	3 - 4
продолжительность расслоения в шаровой мельнице непрерывного действия, мин.	15

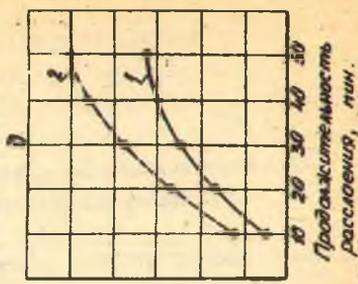
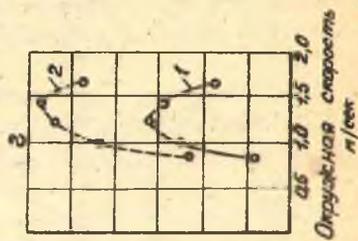
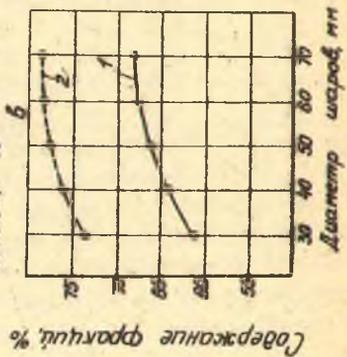
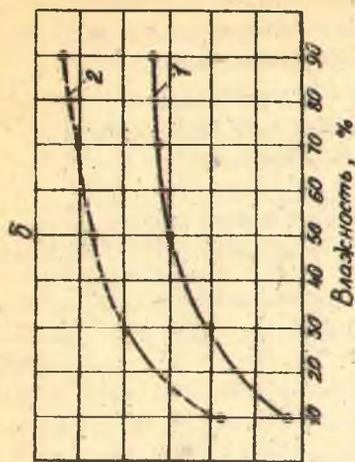
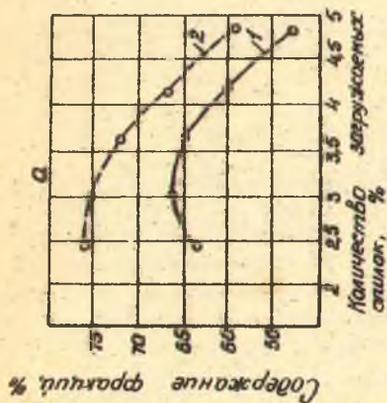


Рис. 14. Зависимость параметров оптимизации  $\psi$  (фракции 1/0, 2),  $\frac{1}{\psi}$  (фракция 1/0) от изучаемых факторов: а- процента загрузки опилок по отношению к массе мелких тел; б- влажность опилок перед расслоением; в- диаметр мелких тел (шаров); г- окружной скорости мельницы; д- продолжительность расслоения опилок

Диаметр загружаемых шаров, мм	40-60
Коэффициент заполнения мельницы шарами	0,3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРЕССОВАНИЮ  
ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ С НАРУЖНЫМИ СЛОЯМИ ИЗ  
РАССЛОЕННЫХ ОПИЛОК

Были изготовлены плиты с наружными слоями из различных древесных частиц. В таблице 5 приведены обобщенные результаты испытаний физико-механических показателей древесностружечных плит (после приведения показателей к единой плотности  $650 \text{ кг/м}^3$  и математической обработки).

Таблица 5

Физико-механические показатели древесностружечных плит с наружными слоями из расслоенных в молотковой дробилке и шаровой мельнице опилок и других видов древесных частиц

№ опы-та	Вид плит и частиц для наружных слоев	Предел прочности при статическом изгибе, Па $10^5$	Предел прочности при разрыве перпендикулярно пластине, Па $10^5$	Разбухание, % (за 24 часа)	Класс шероховатости
1.	Наружные слои из стружки от дисковых стружечных станков	224	5,37	14,2	5-6
2.	Наружные слои из опилок хвойных пород от лесопильных рам	135	3,8	17,5	3
3.	Наружные слои из опилок, расслоенных в молотковой дробилке	179	3,5	13,1	6
4.	Наружные слои из опилок, расслоенных в шаровой мельнице	203	5,3	14,5	6-7
5.	Наружные слои из расслоенных опилок фракции 1/0	194	5,56	13,5	8
6.	Наружные слои из технологической пыли (отсев фракции 1/0 от специально резанной стружки)	164	5,97	13,1	7-8
7.	Наружные слои из пыли от шлифования плит	156	4,06	11,2	8
8.	С пневматическим фракционированием частиц наружных слоев из расслоенных в молотковой дробилке опилок	190	6,15	11,4	7-8
9.	То же из опилок, расслоенных в шаровой мельнице	208	7,1	12,6	8
10.	Многослойные плиты из смеси стружек и расслоенных опилок в соотношении 1:1	192	5,27	15,7	8

Древесные частицы, кроме 5 опыта, не сортировались.

Для более полного исследования взаимодействия изучаемых факторов и получения математической модели конструкции 3-слойных древесностружечных плит с наружными слоями из тонких древесных частиц был применен математический метод планирования эксперимента.

Для построения матрицы планирования применен равномер-рототабельный план Бокса-Хантера.

В матрицу планирования введены следующие независимые переменные контролируемые факторы:

$X_1$  - плотность древесностружечных плит, кг/м<sup>3</sup>

$X_2$  - количество тонких древесных частиц из расслоенных в шаровой мельнице опилок, % от общей массы древесных частиц в плите;

$X_3$  - количество связующего в тонких древесных частицах, %.

В табл. 6 приведены уровни варьирования независимых переменных.

Критерием оптимизации принят предел прочности при статическом изгибе, который в данном случае является определяющей и исчерпывающей характеристикой объекта исследования ( $y = \sigma_{изг}$ ).

Все опыты по матрице планирования проводились в двух параллелях, рандомизированных во времени. Показатель точности при испытании образцов не превышал 5%.

В результате реализации матрицы планирования, статистического анализа результатов экспериментов и соответствующих расчетов получено уравнение регрессии в виде

$$y = 194 + 13,4X_1 - 7,2X_2 + 6,4X_3 - 0,62X_1X_2 + 1,12X_1X_3 - 0,87X_2X_3 - 4,2X_1^2 - 0,89X_2^2 - 2,89X_3^2 \quad (21)$$

Расчеты показали, что коэффициенты  $b_{12}$  и  $b_{23}$  статистически незначимы, а полученная модель адекватна.

Полученная полнотелная модель позволила установить зависимость выходного параметра ( $\sigma_{изг}$ ) от исследуемых факторов. Коэффициенты регрессии при  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  характеризующие линейные эффекты, позволяют сделать вывод, что плотность плит оказывает наибольшее влияние на их прочность при изгибе. Количество связующего, вводимого в мелкие древесные частицы, в 2 раза меньше влияет на прочность плит при изгибе, чем их плотность. Отсюда следует, что прочность плит при статическом изгибе эффективнее увеличивать в первую очередь за счет повышения их плотности.

Увеличение доли наружных слоев из мелких древесных частиц от общей массы плиты приводит к снижению прочности ее на изгиб. Однако это уменьшение по абсолютной величине почти в два раза меньше, чем увеличение прочности на изгиб за счет повышения плотности. Следовательно, при

Таблица 6

Уровни и интервалы варьирования факторов

Ф а к т о р ы	Обозначение	Уровни варьирования					Интервалы варьирования
		отрицательная величина "звездного плеча" -1,682	нижний уровень -I	центральный уровень 0	верхний уровень +I	положительная величина "звездного плеча" +1,682	
Плотность древесностружечных плит, кг/м <sup>3</sup>	X <sub>1</sub>	650	670	700	730	750	30
Количество тонких древесных частиц, % от общей массы стружки	X <sub>2</sub>	8	15	25	35	42	10
Количество связующего в тонких древесных частицах, %	X <sub>3</sub>	9,5	11	13	15	16,5	2

изготовлении плит плотность 700 кг/м<sup>3</sup> и выше доля наружных слоев не будет оказывать существенного влияния на прочность плит при статическом изгибе, что весьма важно с точки зрения использования сырья и получения плит с высокими качеством поверхности.

Чтобы выявить зависимость прочности плит на статический изгиб от доли наружных слоев из мелких частиц и плотности плит, были выполнены расчеты по математической модели (21). Фактор X<sub>3</sub> зафиксировали на нулевом уровне, т.е. X<sub>3</sub> = 13%. По результатам вычислений построены графики (рис. 5), пользуясь которыми можно определить плотность плит и долю наружных слоев в ее общей массе в зависимости от требуемой прочности на статический изгиб. Установленные зависимости позволяют решать практические вопросы при разработке технологического процесса.

#### ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Результаты исследований по расслоению опилок на тонкие древесные частицы и использование последних для изготовления многослойных и трехслойных плит с мелкоструктурной поверхностью внедрены на Костопольском ордена Ленина домостроительном комбинате. Для этого автором разработана технологическая схема участка переработки отходов от лесопильного и деревообрабатывающих цехов комбината (рис. 6), подобрано необходимое оборудование и выдано техническое задание на разработку и изготовление нестандартного оборудования. Это оборудование изготовлено и установлено.

Опилки (в смеси со щепой) из лесопильного цеха направляются к участку с помощью системы скребковых транспортеров, стружка-отходы из деревообрабатывающих цехов - пневмотранспортными установками. Таким образом, к пункту переработки отходов поступает измельченная древесина разных видов - щепы, опилки, стружка-отходы.

Сушат мелкие древесные частицы при существующих режимах. Сушильные агрегаты (сушильные барабаны или сушилки "Ботнер") не требуют модернизации. Осмоление мелких древесных частиц связующим осуществляется в скоростных смесителях "Ледиге" с безвоздушным распылением связующего (в цехе многослойных плит) или в обычных барабанных смесителях типа "ДРАЙС" (в цехе трехслойных плит). В последнем случае изменена форма лопастей и увеличена частота вращения вала с целью получения окружной скорости лопастей до 5 м/с.

С внедрением технологии переработки опилок и стружки-отходов на тонкие древесные частицы существующий технологический процесс в цехах древесностружечных плит не изменился.

В работе приводится и другая технологическая схема переработки древесных отходов на тонкие древесные частицы, которая рекомендуется для внедрения. Она отличается от рассмотренной выше (рис. 6) тем, что вместо шаровой мельницы для измельчения опилок и стружки-отходов используется молотковая дробилка с технологическими параметрами, установленными нашими исследованиями или зубчато-ситовая мельница типа ДС-5М.

Создание участка комплексной переработки отходов по предлагаемым технологическим схемам позволяет более рационально использовать отходы на изготовление стружки для внутреннего слоя плит и тонких древесных частиц для наружных слоев. Компактность и простота технологической схемы участка, а также отсутствие сложного оборудования позволят широко использовать опилки и другие виды отходов от лесопильных и деревообрабатывающих производств на изготовление древесностружечных плит с высокой экономической эффективностью.

Годовой экономический эффект от переработки отходов на производство плит только на Костопольском ДСК составляет 443 тыс. руб.

Внедрение разработанной технологии на других предприятиях, имеющих цехи по производству древесностружечных плит и отходы лесопиления и деревообработки (опилки и стружка), позволит сэкономить для народного хозяйства более 1 млн. и<sup>3</sup> технологического сырья, для перевозки которого потребовалось бы примерно 40 тыс. железнодорожных вагонов, и повысить производительность труда. Экономический эффект составит около 10 млн. руб в год.

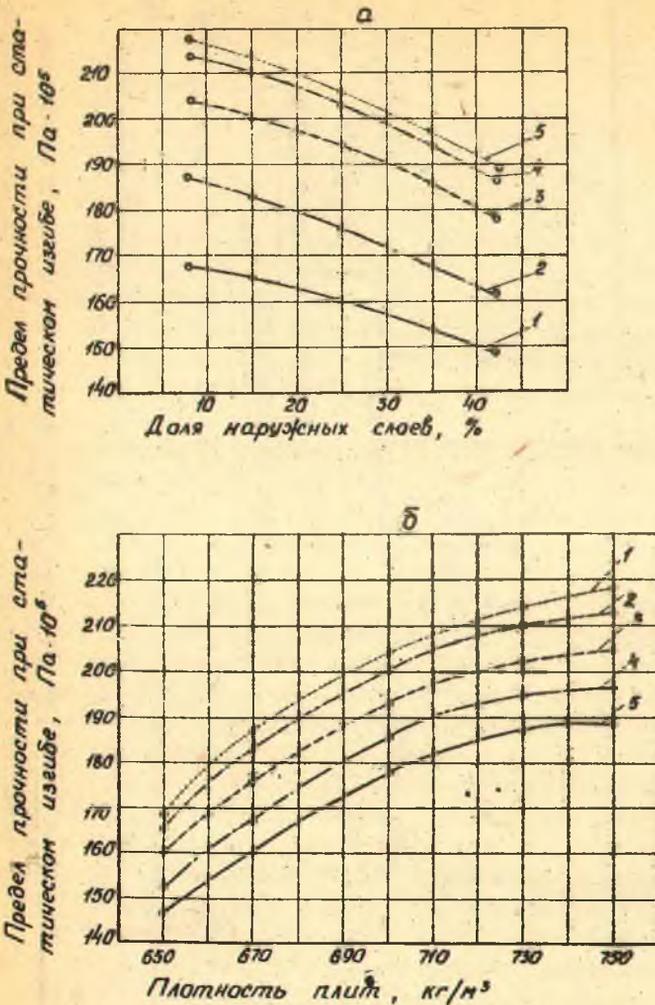


Рис. 5. Зависимость предела прочности при статическом изгибе от плотности плит и доли наружных слоев из тонких древесных частиц

а/ 1- плотность плит 650 кг/м<sup>3</sup>; 2-670 кг/м<sup>3</sup>;  
3- 700 кг/м<sup>3</sup>; 4- 730 кг/м<sup>3</sup>; 5- 750 кг/м<sup>3</sup>

б/ 1- доля наружных слоев 8%; 2- 15%; 3-25%; 4-35%;  
5- 42%

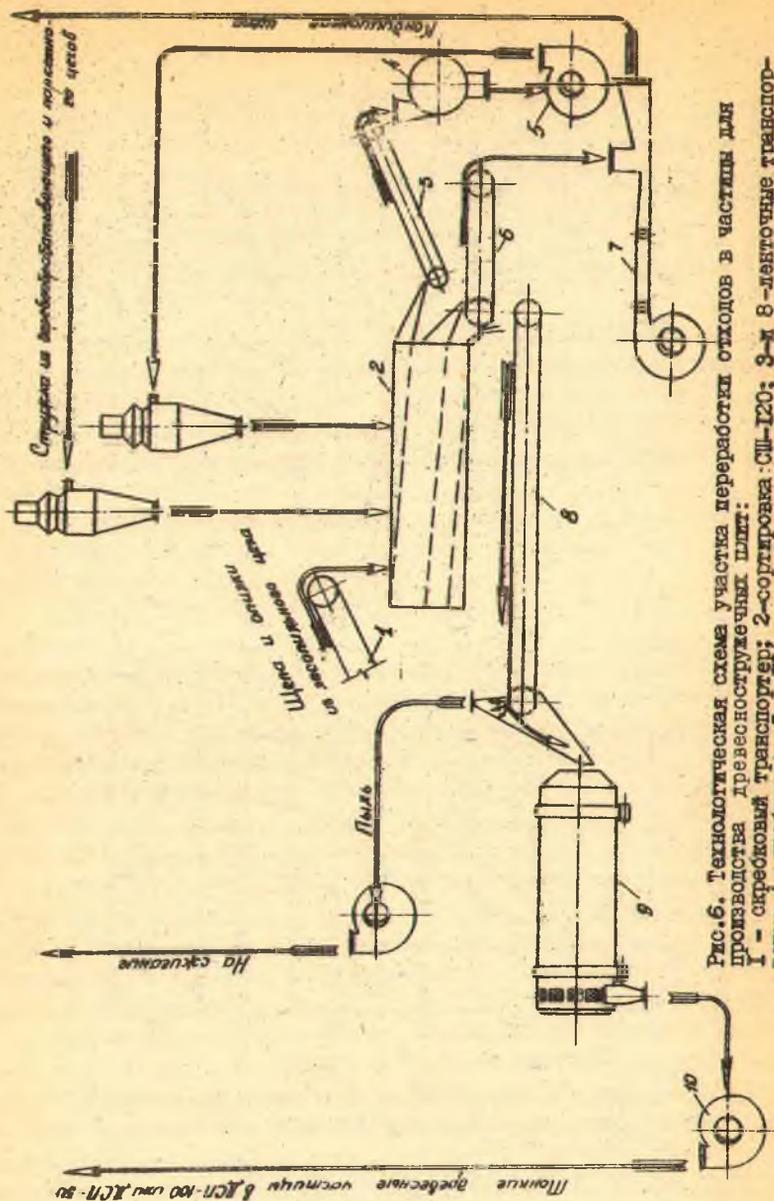


Рис. 6. Технологическая схема участка переработки отходов в частицы для производства древесностружечных плит:  
 1 - сиребковий транспортер; 2-сортировка СШ-120; 3-и 8-ленточные транспортеры; 4-дровялка; 5 и 7 - пневмотранспортные установки; 6- транспортер-дозатор; 9- шаровая мельница; 10- вентилятор

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения настоящей работы получены следующие теоретические и практические результаты.

1. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что основными факторами, определяющими режимы расслоения опилок, являются:

для молотковой дробилки – угловая скорость вращения ротора, диаметр ячеек ситовых вкладышей, толщина молотков и расстояние между ними, зазор между рабочими кромками молотков и ситовыми вкладышами;

для шаровой мельницы – загрузка барабана мелющими телами (по объему), количество загружаемых опилок, окружная скорость барабана, размер мелющих тел и их соотношение, продолжительность расслоения.

2. На основании установленных зависимостей между исследуемыми факторами и качеством расслоения опилок определены оптимальные режимы работы молотковой дробилки и шаровой мельницы.

3. Тонкие древесные частицы, изготовленные из опилок в шаровой мельнице, имеют меньшие размеры по толщине, лучшие свойства набухлости при воздушном фракционировании и обеспечивают примерно на 10% большую прочность плит на статический изгиб по сравнению с частицами, полученными в молотковой дробилке.

4. Предложено и экспериментально доказано, что для расслоения опилок целесообразно применять шаровые мельницы непрерывного действия. Использование последних позволит наряду с расслоением опилок производить подсушку и даже высушивание частиц до определенной влажности за счет тепла, выделяющегося при нагреве мелющих тел (шаров), и подачи в барабан мельницы горячих газов от топочных устройств.

5. Установлено, что расход электроэнергии на изготовление 1т тонких древесных частиц в молотковой дробилке и шаровой мельнице примерно одинаков – 70 кВт/ч.

6. Исследованы физико-механические свойства плит с наружными слоями из тонких древесных частиц – расслоенных опилок, технологической и шлифовальной пыли. На основании выполненных исследований получены математические модели, по которым построены графические зависимости для определения прочности плит на статический изгиб.

7. На основании выполненных исследований установлено, что при изготовлении плит с наружными <sup>слоями</sup> из тонких древесных частиц следует расходовать в соответствии с требованиями технологической инструкции.

8. Определено, что для изготовления плит с наружными слоями из расслоенных опилок прочностью на статический изгиб не менее  $180 \text{ кг/см}^2$ , плотность их должна быть не ниже  $680 \text{ кг/м}^3$ . Плиты плотностью  $700\text{--}750 \text{ кг/м}^3$  имеют высокие физико-механические показатели, соответствующие плитам группы А по ГОСТ 10632-70.

Установлено, что для получения плит с шероховатостью поверхности не ниже 8 класса и требуемой прочностью на статический изгиб для формирования наружных слоев плит нужны частицы фракции 1/0,2 или 1/0. Частицы фракции 2/0 также обеспечивают получение плит с шероховатостью поверхности 8 класса, если наружные слои формируются с пневматическим фракционированием.

Таким образом, в результате проведенных исследований доказана возможность и целесообразность использования опилок в качестве сырья не только для внутреннего, но и для наружных слоев древесностружечных плит.

Перечень печатных статей, в которых отражено содержание работы:

1. Расслоение опилок в молотковой дробилке. "Деревообрабатывающая промышленность", 1973, №8.

2. Древесностружечные плиты с мелкоструктурной поверхностью из расслоенных опилок и древесной пыли. "Деревообрабатывающая промышленность", 1973, №9.

3. Использование опилок для наружных слоев древесностружечных плит. "Лісове господарство, лісова, паперова та деревообробна промисловість", 1974, №1.

4. Устройство и метод для анализа качества стружки в производстве древесностружечных плит. "Фанера и плиты", реф. информ. 2. М., ВНИПИИЛеспром, 1974.

5. Расслоение опилок на древесные частицы с целью применения их для наружных слоев древесностружечных плит. Материалы научно-технической конференции аспирантов, соискателей и молодых специалистов деревообрабатывающей промышленности. Киев, 1974.

6. Оптимизация конструкции трехслойных древесностружечных плит с наружными слоями из расслоенных опилок методом математического планирования. Материалы Всесоюзной научной конференции "Рациональное и комплексное использование древесины в деревообрабатывающей промышленности". Минск, 1974.

7. Приведение механических показателей древесностружечных плит к единой плотности. "Фанера и плиты", реф. информ. 4. М., ВНИПИИЛеспром, 1976.

8. Прочность трехслойных древесностружечных плит с наружными слоями из мелких древесных частиц. "Деревообрабатывающая промышленность", 1976, №10.

Григорий Иванович Конаш

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЛОБЕНИЯ ОПИЛОК В ТОНКИЕ  
ДРЕВЕСНЫЕ ЧАСТИЦЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДРЕВЕСНОСТРУ-  
ЖЕЧНЫХ ПЛИТ С МЕЛКОСТРУКТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Корректор В. П. Макаренкова

АТ 13042. Подписано в печать 22.П.1977 г. Формат 60x84/16

Тираж 100 экз. Уч.-изд.л.1 Заказ 80.

Отпечатано на роталпринте БТИ им.С.М.Кирова.

Минск, Свердлова, 13.