

## МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 662.636

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ ВОРОХА ЛЬНОКОСТРЫ

**В. А. ШАРШУНОВ, Н. С. СЕНТЮРОВ, М. В. ЦАЙЦ**

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: nikolay\_senturov@rambler.ru.

(Поступила в редакцию 11.05.2020)

Современные общемировые тенденции развития источников энергии направлены в область альтернативных технологий, например, использования биомассы. Потенциально важным для сельского хозяйства Республики Беларусь видом биомассы является отходы переработки льна-долгунца (ворох льнокостры). Этот вид биомассы в Республике Беларусь в энергетических целях используется не значительно, в основном котельными самих льнозаводов. Излишки вороха льнокостры, зачастую, просто сжигаются. Между тем, масса накопления вороха льнокостры из года в год увеличивается. В связи с этим существует перспектива переработки вороха льнокостры путем прессования его на брикеты или пеллеты, что предполагает измельчение и прессование вороха льнокостры, при этом наличие в ней льняного волокна выводит из строя измельчающие устройства, а минеральные примеси существенно сокращают срок службы основных рабочих органов прессы (матрицы и роликов).

В статье обоснована необходимость определения компонентного состава вороха льнокостры. Определено процентное содержание каждого отдельного компонента в общей массе вороха. Определен дисперсный состав компонентов, входящих в его состав. Описана методика проведения исследований по определению компонентов вороха льнокостры и их размерных характеристик. Приведены графики счетного распределения и размерно-массовых характеристик компонентов, содержащихся в ворохе льнокостры.

Установлено, что в общей структуре вороха распределение компонентов варьируется в пределах: семена льна и сорных растений – 1,4...2,9 %, пучки пакли – 4...19,6 %, разрушенные коробочки льна – 2,3...5,4 %, минеральные примеси – 3,2...16 %, льняная костра – 68...84 %, остатки стеблей льна и сорных растений – 3,1...11 %.

**Ключевые слова:** лен-долгунец, ворох льнокостры, компоненты вороха льнокостры, минеральные примеси.

Modern global trends in the development of energy sources are directed towards alternative technologies, for example, the use of biomass. A potentially important type of biomass for agriculture in the Republic of Belarus is the waste of fiber flax processing (heap of flax). This type of biomass in the Republic of Belarus for energy purposes is used insignificantly, mainly by boiler houses of the flax factories themselves. Excess flax heap is often simply burned. Meanwhile, the mass of flax heap is increasing from year to year. In this regard, there is a prospect of processing flax heap by pressing it into briquettes or pellets, which involves grinding and pressing the flax heap, while the presence of flax fiber in it disables the grinding devices, and mineral impurities significantly reduce the service life of the main working bodies of the press (matrix and rollers).

The article substantiates the need to determine the component composition of flax heap. The percentage of each individual component in the total mass of the heap has been determined. The dispersed composition of components included in its composition has been determined. The paper describes the research methodology for determining the components of flax heap and their dimensional characteristics. The graphs of the counting distribution and size-mass characteristics of the components contained in the flax heap are presented.

It was found that in the general structure of the heap the distribution of components varies within the following limits: flax seeds and weeds – 1.4 ... 2.9 %, tow bundles – 4 ... 19.6 %, destroyed flax capsules – 2.3 ... 5.4 %, mineral impurities – 3.2 ... 16 %, linseed fire – 68 ... 84 %, remnants of flax stems and weeds – 3.1 ... 11 %.

**Key words:** long-fiber flax, flax straw heap, components of flax straw heap, mineral impurities.

#### Введение

Проблема роста дефицита энергоресурсов выходит сегодня на мировой уровень из-за проблемы изменения климата. Существует достойный способ решения этой проблемы – альтернативные источники энергии. В Беларуси этот вопрос является актуальным также, как и во всем мире.

К источникам возобновляемой энергии отнесены солнце, воздушные массы, вода, тепло земных недр, биомасса, древесина, торф. Так как Беларусь обеспечена собственными традиционными энергоносителями менее чем на 20 %, целесообразно использовать возобновляемые энергоресурсы, которые в нашей республике представлены значительными запасами растительной биомассы. Однако растительная биомасса имеет много влаги и невысокую тепловую способность, поэтому нуждается в определенной обработке. Наиболее эффективным способом устранения указанных недостатков является гранулирование или брикетирование предварительно измельченного и высушенного сырья [1, 2].

Одним из видов сырья выступает ворох льнокостры, так как она содержит большой процент лигнина, являющийся связующим элементом при брикетировании или гранулировании.

В Беларуси в настоящее время возделыванием льна-долгунца занимаются 60 льносеющих организаций страны, в том числе механизированные отряды 22 льнозаводов и их 4 производственных участка [3]. Ежегодно льнозаводами Республики Беларусь производится от 77,6 до 94,3 тыс. тонн вороха льнокостры (табл. 1).

Таблица 1. Динамика изменения посевных площадей, урожайности и валовых сборов льнопродукции в Республике Беларусь

Показатели	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	В 2019 г. в % к 2015 г.
Площадь посева, тыс. га	45,3	46,3	47	50	54,1	19,43
Валовой сбор волокна, тыс. т	40,5	41,3	42	40	47	16,05
Урожайность волокна, ц/га	10,3	9,4	9,2	8,7	9,9	-3,88
Урожайность льнотресты, ц/га	31,5	30,5	30	29,8	31,7	0,63
Ворох льнокостры, тыс. тонн	78,5	77,7	77,6	82,0	94,3	20,18

За последние 5 лет в Республике Беларусь увеличились посевные площади льна-долгунца на 19,43 %, что при росте урожайности льнотресты на 0,63 % обеспечило прирост выхода вороха льнокостры на 20,18 %.

Технологический процесс производства топливных пеллет включает следующие стадии: складирование, измельчение, сушка, водоподготовка, прессование, охлаждение, фасовка и упаковка [4]. Измельчение вороха льнокостры усложняется наличием в ней волокнистых примесей, которые приводят к намоткам на рабочие органы измельчающего устройства. Содержащиеся в ворохе льнокостры минеральные примеси, приводят к быстрому износу основных рабочих органов пресса (матрицы и роликов), одних из самых дорогостоящих узлов агрегата прессования. Поэтому в линию производства пеллет из льнокостры следует устанавливать устройство по их удалению из исходного сырья, что обеспечит увеличение срока службы основных узлов гранулятора. Однако для решения задачи по фракционированию и созданию такого устройства на первом этапе следует провести исследования фракционного состава компонентов вороха льнокостры, результаты которых позволят обосновать технические и технологические параметры сепаратора льнокостры.

#### Основная часть

Для определения состава вороха льнокостры были взяты пробы на льнозаводах ОАО «Горкилен» и ОАО «Ореховский льнозавод». Определение состава вороха льнокостры осуществлялось следующим образом. Площадь отвала вороха льнокостры разбивалась на 10 равных секторов. Затем из этих 10-ти секторов случайным образом выбиралось пять [5, 6, 7], из которых отбирались навески вороха льнокостры массой не менее пяти килограмм, на глубину всей насыпи. Такой объем вороха соответствует требованиям обеспечения достаточной для сельскохозяйственной механики точности экспериментов.

Исследования проводились в студенческой научно-исследовательской лаборатории «Ресурсосберегающие технологии переработки льна» кафедры безопасности жизнедеятельности и в научно-исследовательской лаборатории кафедры ботаники и физиологии растений в УО БГСХА.

После отбора образцов производилась их разделение на компоненты: целые и дробленые семена льна и сорных растений (рис. 1, а), пучки пакли (рис. 1, б), разрушенные семенные коробочки (рис. 1, в), минеральные примеси (рис. 1, г), льняная костра (рис. 1, д), остатки стеблей льна и сорных растений (рис. 1, е). Полученные таким образом компоненты разделялись на фракции, взвешивались по отдельности на электронных весах ВК-600 с точностью 0,01 г и определялось процентное массовое содержание их в общем объеме компонента и общей массы вороха льнокостры.

При разделении компонентов на фракции определялись их размерные характеристики. Размерные характеристики льняной костры, разрушенных семенных коробочек, целых и дробленых семян льна и сорных растений, остатки стеблей льна и сорных растений определяли с помощью лупы измерительной ЛИ-3-10<sup>х</sup>, соответствующей требованиям ТУ РБ-14541426.020-99 с точностью до 0,1 мм, и с помощью электронного штангенциркуля с точностью до 0,01 мм. Размерные характеристики минеральных примесей определяли методом микроскопического анализа по известной методике [8]. Для этого на предметное стекло, предварительно смазанное тонким слоем вазелинового масла, с помощью пинцета помещались частицы минеральных примесей. Затем предметное стекло устанавливали в микроскоп марки Nikon eclipse 50i. С помощью установленной на нем камеры Nikon DIGITAL SIGHT и с использованием программы NIS-Elements F (Life-Fast) увеличенное в диапазоне от 10 до 100 раз изображение передавалось на монитор компьютера. Размер частиц минеральных примесей и их количество определялся в программе PhotoM 1.21.

Частицы минеральных примесей обычно имеют неправильную форму, свойственную обломкам твердых тел. Некоторые частицы имеют пластинчатую или волокнистую форму. Поэтому на этапе

цифровой обработки фотографий с помощью компьютерной программы допущены некоторые предположения: так как размер частицы выражается диаметром шарообразной частицы, а на практике встречаются в основном частицы неправильной геометрической формы, то для выражения размера частицы часто пользуются понятием эквивалентный диаметр.

Эквивалентный диаметр частицы неправильной формы – диаметр шара, объем которого равен объему частицы, или диаметр круга, площадь которого одинакова с площадью проекции частицы. Способы определения эквивалентного диаметра различны [9].



Рис. 1. Состав вороха льнокостры: а) целые и дробленые семена льна и сорных растений; б) пучки пакли; в) разрушенные коробочки льна; г) минеральные примеси; д) льняная костра; е) остатков стеблей льна и сорных растений

Площадь пятна определяется как совокупность всех пикселей пятна. Алгоритм сканирования изображения представлен на рис. 2.

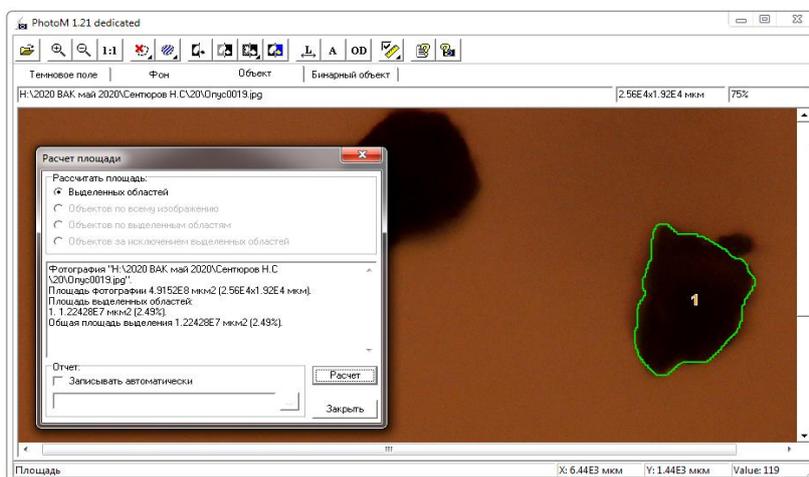


Рис. 2. Расчетные параметры частиц минеральных примесей, полученные при помощи программы PhotoM 1.21  
Расчет эквивалентного диаметра производился на основе формулы:

$$d_{\text{эКВ}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь проекции,  $\text{мкм}^2$ .

Повторность опытов трехкратная, каждую повторность выполняли по вышеизложенной методике. При этом вероятность охвата генеральной средней в исчисленных пределах равна 0,95. Значение относительной величины предельной ошибки при исследовании сельскохозяйственных сред, материалов и растений рекомендуется выбирать в пределах 3...5 % [6, 10, 11].

Определение статистических характеристик вариационного ряда производилось по классическому способу [5, 6, 7], где основными его характеристиками являются:

– среднее арифметическое,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где  $n$  - число выборки;

– среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}; \quad (3)$$

– ошибка средней арифметической

$$m_M = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (4)$$

– показатель точности опыта

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100, \%; \quad (5)$$

– коэффициент вариации по среднему квадратическому отклонению,

$$p = \frac{C_V}{\sqrt{n}}, \%. \quad (6)$$

Компоненты, входящие в состав вороха льнокостры, представлены на рисунке 3, *а*. Основным компонентом вороха льнокостры является непосредственно льняная костра (68...84 %), а содержание остальных компонентов составляет: остатки стеблей льна и сорных растений (3,1...11 %), минеральные примеси (3,2...11 %), разрушенные коробочки льна (2,3...5,4 %), пучки пакли (1,6...4 %), целых и дробленых семян льна и сорных растений (1,4...2,9 %).

При разделении вороха льнокостры были выделены такие компоненты как:

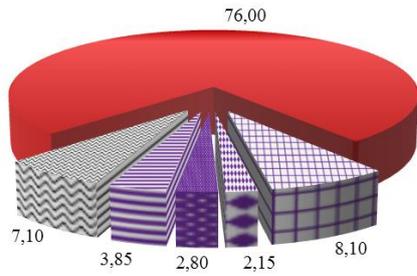
– целые и дробленые семена льна и сорных растений – это в основной своей массе дробленые семена льна, попадающие в ворох льнокостры в большей степени при переработке на льнозаводах тресты полученной по раздельной технологии и в меньшей степени при получении льнокостры по комбайновой технологии. При оценке размерных характеристик определялись длина  $l$ , ширина  $b$  и толщина  $h$ . Распределение размерных характеристик компонента по фракциям, представлен на рисунке 3, *б*. По результатам проведенных исследований определено, что преобладают частицы компонента (77,8 %) в интервале по длине 1,7...3,8 мм, со средними значениями ширины 0,71...1,16 мм, толщины 0,62...0,72 мм;

– льняная костра – это одревесневшие части стебля льна, в виде мелкой соломки, остающейся после трепания льна. Форма частиц близка к призме и при оценке размерных характеристик определялись ее длина  $l$ , ширина  $b$  и толщина  $h$ . Размерные характеристики льняной костры, находящихся в ворохе льнокостры представлены на рис. 3, *в*. Результаты проведенных исследований показали, что наибольший удельный вес имеют частицы компонента (76,6 %) в интервале по длине 8,01...22,0 мм, со средними значениями ширины 1,1...1,5 мм, толщины 0,33...0,42 мм;

– разрушенные семенные коробочки – элементы семенных коробочек льна, представляющие собой секторы (формой усеченного у основания дольки апельсина). При оценке размерных характеристик определялись длина  $l$ , ширина  $b$  и толщина  $h$ . При этом, минимальный размер принимали в качестве толщины, средний размер – ширины, а максимальный – длины. Размерные характеристики разрушенных коробочек льна, находящихся в ворохе льнокостры представлены на рис. 3, *г*. По результатам проведенных исследований установлено, что основная масса частиц компонента (69 %) находится в интервале по длине 1,01...5,0 мм со средними значениями ширины 1,68 мм, толщины 1,33 мм;

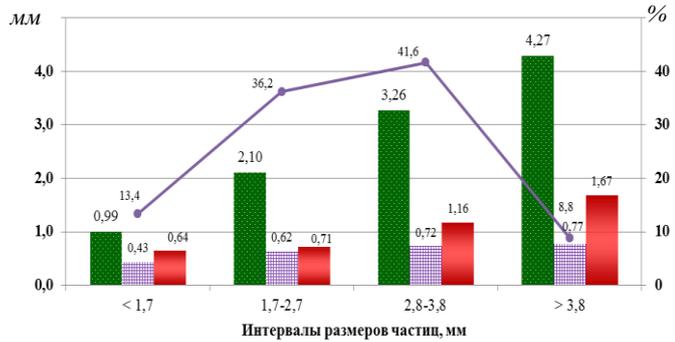
– минеральные примеси – это разного размера частицы разрушившихся каменных горных пород, представляющие собой смесь продуктов химического и физического выветривания, т.е. смесь первичных и вторичных минералов. При оценке размерных характеристик определялся эквивалентный диаметр  $d_{\text{экв}}$ . Размерные характеристики минеральных примесей, находящихся в ворохе льнокостры представлены на рис. 3, *д*. Полученные данные позволяют сделать вывод, что преобладают частицы компонента (83,9 %) в интервале по эквивалентному диаметру 100,1...750 мкм;

– остатки стеблей льна и сорных растений – в основном включают в себя сухие обрывки верхней и нижней прикорневой части стеблей льна. Также присутствуют части стеблей сорных растений. Частицы данного компонента имеют форму, близкую к цилиндрической и при оценке размерных характеристик определялись ее длина  $l$  и диаметр  $d$ .



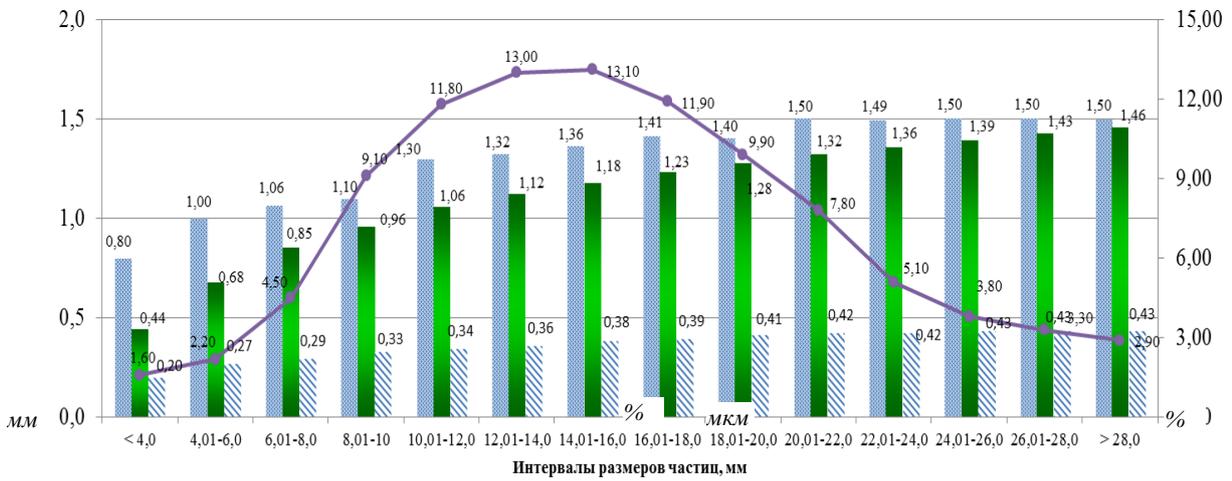
- ☛ Целые и дробленые семена льна и сорных растений
- Пучки пакли
- ▨ Разрушенные коробочки льна
- ※ Минеральные примеси
- Льняная костра
- ▮ Остатки стеблей льна и сорных растений

мм а)



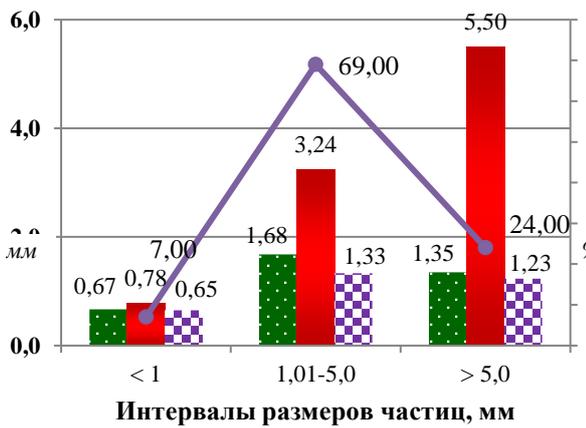
- Среднее значение длины
- ▨ Среднее значение толщины
- Среднее значение ширины
- % содержания от общей массы компонента

б) %



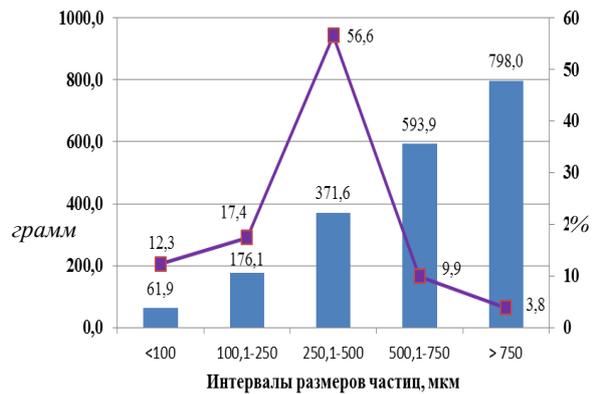
- ▨ Среднее значение ширины
- Логарифм 10 от среднего значения длины,  $\log_{10}(Lp)$
- ▨ Среднее значение толщины
- % содержания от общей массы компонента

в)



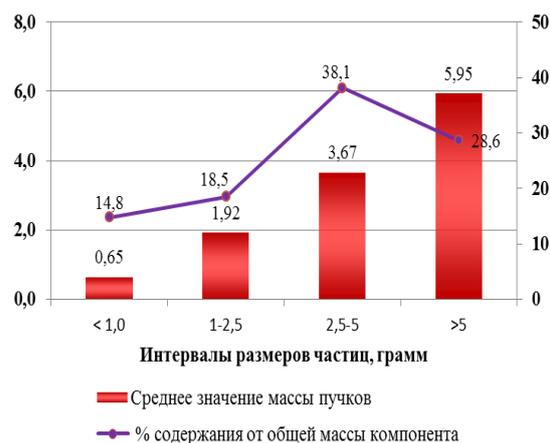
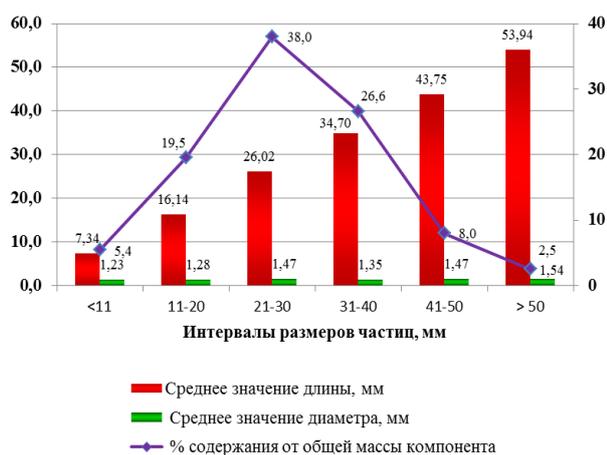
- Средние значения ширины
- Средние значения длины
- ▨ Средние значения толщины

з)



- Среднее значение эквивалентных диаметров
- % содержания от общей массы компонента

д)



е)

ж)

Рис. 3. Фракционный состав вороха льнокостры: а) структура вороха льнокостры; б) целые и дробленые семена льна и сорных растений, находящиеся в ворохе льнокостры; в) льняная костра, находящаяся в ворохе льнокостры; г) разрушенные коробочки льна, находящиеся в ворохе льнокостры; д) минеральные примеси, находящиеся в ворохе льнокостры; е) остатки стеблей льна и сорных растений, находящиеся в ворохе льнокостры; ж) пучки пакли, находящиеся в ворохе льнокостры

Размерные характеристики остатков стеблей льна и сорных растений, находящихся в ворохе льнокостры представлены на рис. 3, е. При анализе полученных данных установлено, что основная масса частиц компонента (84,1 %) находится в интервале по длине 11,0...40,0 мм, со средними значениями диаметра 1,28...1,35 мм.

Пучки пакли – это грубое льноволокно от 5 до 60 мм длиной, включающее в себя и имеющее устойчивые связи с льняной кострой. Примерное соотношение массы волокна и костры в пучке пакли составляет 25...30: 75...70. При оценке размерных характеристик определялись массы  $m$  отдельных пучков. Распределение размерных характеристик пучков пакли, находящихся в ворохе льнокостры, представлены на рис. 3, ж. Анализ полученных данных показал, что наибольший удельный вес пучков пакли (56,6 %) находится в диапазоне 1...7 г, а пучки массой от 7 до 10 г встречаются редко.

### Закключение

В общей структуре вороха льнокостры распределение компонентов варьируется в пределах: льняная костра – 68...84 %, целые и дробленые семена льна и сорных растений – 1,4...2,9 %, пучки пакли – 4...19,6 %, разрушенные коробочки льна – 2,3...5,4 %, минеральные примеси – 3,2...16 %, остатки стеблей льна и сорных растений – 3,1...11 %.

В результате определения фракционного состава компонентов вороха льнокостры было установлено, что: основная масса льняной костры имеет средние размеры частиц по длине 9,08...20,92 мм, по ширине 1,1...1,5 мм и толщине 0,33...0,42 мм, основная масса целых и дробленых семян льна и сорных растений имеет средние размеры частиц по длине 2,1...3,26 мм, по ширине 0,71...1,16 мм и толщине 0,62...0,72 мм, основная масса разрушенных коробочек льна имеет средние размеры частиц по длине 3,24 мм, по ширине 1,68 мм и толщине 1,33 мм, основная масса остатков стеблей льна и сорных растений имеет средние размеры частиц по длине 16,14...34,7 мм, по диаметру 1,28...1,35 мм, наибольший удельный вес пучков пакли имеет средние размеры пучков 1,92...5,95 г, основная масса минеральных примесей имеет средние размеры частиц по эквивалентному диаметру 176,1...593,9 мкм.

Следует отметить, что наиболее вредными в процессе переработки вороха льнокостры являются пучки пакли и минеральные примеси. Для увеличения срока службы рабочих органов в стадиях технологического процесса «измельчение» и «прессование», необходимо минимизировать их содержание в ворохе льнокостры, а для этого следует разработать устройство для их выделения. Остальные компоненты состава вороха льнокостры являются хорошим сырьем для производства топливных пеллет.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Альтернативные источники энергии в Беларуси. Топливно-энергетические ресурсы Беларуси [Электронный ресурс]: ФБ.ru – 2020. Режим доступа: <https://fb.ru/article/253973/alternativnyie-istochniki-energii-v-belarusi-toplivno-energeticheskie-resursyi-belarusi>. Дата доступа: 16.05.2020.

2. Определение засоренности льнокостры минеральными примесями и способы их выделения / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестник БГСХА. – 2013. – № 2. – С. 120–124.
3. О сроках сева льна-долгунца [Электронный ресурс]: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь – 2007–2020. Режим доступа: <https://mshp.gov.by/information/materials/zem/linen-insitute/f4df7a311136c374.html>. – Дата доступа: 16.05.2020.
4. Шаршунов, В. А. Технологический процесс производства топливных гранул / В. А. Шаршунов, В. Е. Кругленя, Н. С. Сентюров // Актуальные проблемы механизации мелиоративного и водохозяйственного строительства: материалы Междунар. научно-практической конф., г. Горки, 27-29 сентября 2012 г. – Горки: БГСХА, 2013. – 128 с.
5. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М.: Колос, 1967. – 159 с.
6. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. – Введ. 01.07.90. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.
7. Техника сельскохозяйственная. Комплексная система обеспечения надежности: СТБ 1917-2008. – Введ. 01.06.09. – Минск: БелГисС, 2009. – 120 с.
8. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О. В. Яровая. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.
9. Градус, Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии / Л. Я. Градус. – М.: Химия, 1979. – 232 с.
10. Никонов, М. В. Совершенствование технологического процесса предварительной очистки семян люцерны / М. В. Никонов // Безотходная технология производства семян люцерны: сб. науч. тр. / ВСХИ. – Воронеж, 1989. – С. 122–132.
11. Чура, А. Е. Проблемы развития льноводства / А. Е. Чура // Земляробства і ахова раслін. – 2003. – № 4. – С. 9–10.