

## РАЗДЕЛ II ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МЕХАНИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

УДК 631.363.2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДВУХСТАДИЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА И ОЦЕНКА ЕГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Н.А. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С.А. ДРОЗД<sup>1</sup>, А.И. ПУНЬКО<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Минск, Республика Беларусь

В статье приведены результаты экспериментальных исследований двухстадийного измельчения зерна, которое включает предварительное измельчение зерна вальцовой дробилкой на первой стадии и окончательное измельчение молотковой дробилкой на второй стадии. Результаты исследовательской работы позволили выявить, что в качестве рациональных значений межвальцового зазора и диаметра отверстий в решетке следует считать, соответственно, 1,0 мм и 4,0 мм. Использование двухстадийного измельчения с полученными рациональными значениями позволяет получить снижение энергоемкости процесса измельчения зерна в 1,88 раза по сравнению с одностадийным молотковым измельчением при получении одинакового модуля помола, равного 1,66 мм. Анализ гранулометрического состава измельченного зерна при двухстадийном измельчении показал повышение качества конечного продукта. Применение двухстадийного способа измельчения повышает процентное содержание мелкого и среднего помола до 39,0% и 54,0% соответственно, что в 1,62 и 1,16 раза выше, чем при одностадийном молотковом измельчении. При этом наблюдается сокращения процентного содержания грубого измельчения до 5,5% и неэффективного измельчения до 0,1%, что ниже в 4,55 и в 32 раза соответственно, по сравнению с одностадийным измельчением.

**Ключевые слова:** двухстадийное измельчение; экспериментальное исследование; энергоемкость измельчения; качество измельчения; рациональный параметр; гранулометрический состав.

### EXPERIMENTAL STUDY AND ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF TWO-STAGE GRAIN CRUSHING

N.A. VOROBIEV<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Engineering), S.A. DROZD<sup>1</sup>, A.I. PUNKO<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Engineering)

<sup>1</sup>Belarussian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Centre of National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization", Minsk, Republic of Belarus

The article presents experimental study results of two-stage grain crushing: preliminary crushing by a grain roller on the first stage and the final grinding by a beater grinder on the second stage. The rational values of the roll space and the sieve size were found to be 1.0 mm and 4.0 mm, correspondingly. The two-stage crushing with these values provided 1.88 lower energy intensity of the process against the one-stage beater grinding for the same fineness modulus of 1.66 mm. Analysis of the particle size distribution in the crushed grain under the two-stage crushing showed the quality improvement of the end product. The two-stage crushing increased the percentage of fine and medium ground grain up to 39.0% and 54.0%, respectively, that was 1.62 and 1.16 times higher than under the single-stage grinding by a beater grinder. In

addition, the reduction of the percentage of coarse ground grain to 5.5% and an inefficient crushing to 0.1% was observed, that was 4.55 and 32 times, respectively, lower compared to the one-stage grinding.

**Keywords:** two-stage crushing, experimental study, crushing energy intensity, crushing quality, rational parameter, particle size distribution.

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение сельскохозяйственных животных полноценными кормами, соответствующими зоотехническим требованиям, является важнейшим фактором высокоэффективного производства животноводческой продукции. В технологии приготовления кормов самым распространенным и важным процессом является измельчение, обусловленное требованиями физиологии кормления животных и птиц. В результате измельчения образуется множество частиц и значительно увеличивается общая поверхность корма, что способствует ускорению процессов пищеварения и повышению усвояемости питательных веществ. На технологическую операцию измельчения зерна при приготовлении комбикормов требуется 30 –70 % энергии, затрачиваемой на весь процесс комбикормового производства, что обуславливает необходимость поиска новых энергоэффективных приемов осуществления этой операции [1].

Одним из эффективных способов снижения энергоемкости процесса измельчения является двухстадийное измельчение, позволяющее не только уменьшить энергоемкость процесса, но и повысить качество и однородность измельченного зерна.

На первой стадии двухстадийного измельчения осуществляется предварительное воздействие на зерно, что способствует нарушению целостности зерна и образованию в нем микротрещин, тем самым снижается его прочность. На второй стадии зерно измельчается до надлежащего качества, соответствующего зоотехническим требованиям. Данный способ позволяет использовать наиболее энергоэффективные режимы работы оборудования на обеих стадиях измельчения, тем самым снизить его энергопотребление [2].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для исследования эффективности двухстадийного измельчения зернофуража была разработана методика экспериментальных исследований, которая включала предварительное измельчение зерна на первой стадии измельчения и окончательное доизмельчение на второй стадии. В качестве измельчителя на первой стадии применяется вальцовая дробилка, на второй стадии – молотковая дробилка с вертикальной осью вращения молоткового ротора [3].

Как определено при статических и динамических исследованиях предварительное воздействие на зерно вальцами способствует нарушению целостности зерновки, искусственному образованию трещин и снижению сопротивления зерна при дальнейшем измельчении молотковым ротором. Такое сочетание рабочих органов в целом способствует снижению энергопотребления, повышению производительности измельчителя и улучшению качества готового продукта. Оборудование, которое было использовано для исследования, представлено на рисунке 1.



а



б

Рис. 1. Общий вид лабораторной установки: а) для исследования первой стадии измельчения; б) для исследования второй стадии измельчения

В качестве критериев оценки эффективности двухстадийного измельчения служили энергоёмкость измельчения, модуль помола и равномерность измельчения.

Для определения энергоёмкости процесса измельчения во время опытов необходимо измерить потребляемую мощность на холостом ходу и при установившемся режиме работы машины и фиксировать показания при помощи цифрового измерительного модуля «Sonel MP 511» с погрешностью 0,1.

Энергоёмкость процесса измельчения рассчитывают по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{N_p}{Q} \quad (1)$$

где  $N_p$  – мощность, потребляемая измельчителем в процессе работы, кВт;

$Q$  – производительность, т/ч.

Модуль помола определяют ситовым анализом, для чего из разных мест навески отбираются пробы массой 100 г измельченного зерна. Затем проводится рассев проб на ситах с калиброванными отверстиями диаметром 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 мм. Сход с сит взвешивается на весах ВК-500 с точностью 0,01 г. Модуль помола зерна рассчитывают по формуле [4]:

$$M = \frac{0,5m_{0,5} + 1,0m_{1,0} + 1,5m_{1,5} + 2,0m_{2,0} + 2,5m_{2,5} + 3,0m_{3,0}}{100} \quad (2)$$

где  $m_i$  – сход с соответствующего сита, г.

Для животных различных видов и возрастных групп оптимальный размер измельченных частиц различается: для сельскохозяйственной птицы он составляет до 2...3 мм, для крупного рогатого скота – не выше 3 мм, для поросят-сосунов – 0,2...0,8 мм, для поросят – отъёмышей – 0,9...1,1 мм, для свиней беконного откорма – 1,2...1,6 [5].

Для оценки гранулометрического состава измельченного зерна введем пять условных степеней измельчения: пылевидное измельчение (менее 0,1 мм); мелкое измельчение

(0,1...1,0 мм); среднее измельчение (1,0...2,0 мм); грубое измельчение (2,0...3,0 мм); неэффективное измельчения (более 3,0 мм).

В качестве материала для исследования был задействован ячмень с влажностью 14,0%.

Реализация предложенной методики исследований позволят без значительных затрат времени и средств определить параметры и режимы работы двухстадийного измельчителя зерна, при которых будет обеспечено требуемое качество выполнения и минимизирована энергоёмкость технологического процесса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании обширных исследований, проведенных по одностадийному измельчению зернофуража, а также по данным [6] были проведены исследования последовательного влияния величины межвальцового зазора первой стадии измельчения (вальцового измельчителя), а затем диаметра отверстий в решетке второй стадии измельчения (молотковой дробилки) при двухстадийном измельчении.

На рис. 2 и 3 представлена графическая зависимость суммарной энергоёмкости и модуля помола двух стадий измельчения зерна: от зазора между вальцами первой установки с последующим измельчением молотковой машиной при различных диаметрах отверстий в решетках. В столбце «целое зерно» приводятся данные энергоёмкости и модуля помола при измельчении зерна в молотковой дробилке без предварительного разрушения в вальцовом измельчителе. Также на рисунках 2 и 3 приводятся данные энергоёмкости и модуля помола вальцового измельчителя, при использовании его в качестве самостоятельной машины для переработки зерна.

Полученные данные результатов исследований (см. рис. 2) позволяют сделать вывод, что суммарная энергоёмкость первой и второй стадии измельчения ниже, чем энергоёмкость молотковой дробилки при одностадийном измельчении (см. столбец «целое зерно»). Наиболее энергетически оптимальным межвальцовым зазором является размер в 1,0–1,5 мм. Несмотря на довольно низкие энергетические показатели вальцового измельчителя, он может дать только измельчение грубого помола, которое подходит только для КРС и птицы.

Полученные данные по модулю помола (см. рис. 3) свидетельствуют, что при двухстадийном измельчении в 1,5...2 раза он меньше, чем при одностадийном молотковом и вальцовом измельчении.

Графические зависимости, представленные на рис. 2 и 3 показывают, что при двухстадийном измельчении суммарная энергоёмкость вальцового измельчителя и молотковой дробилки меньше, чем энергоёмкость молотковой дробилки при одностадийном измельчении. Видно, что наибольшее снижение энергоёмкости с использованием двухстадийного измельчения получено при применении решет с диаметром отверстий 4 мм, а наибольшее увеличение степени измельчения было при диаметре отверстий в решетке 3,0 мм. Также стоит отметить большую эффективность двухстадийного измельчения с целью получения более тонкого помола.

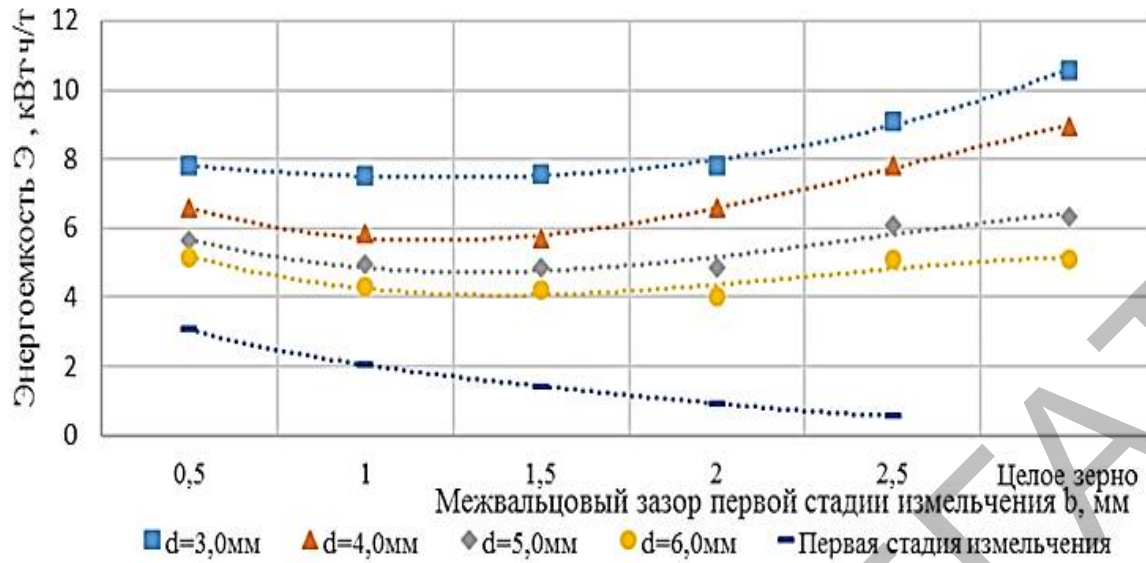


Рис. 2. Зависимость суммарной энергоёмкости от межвальцового зазора и диаметра отверстий в решете

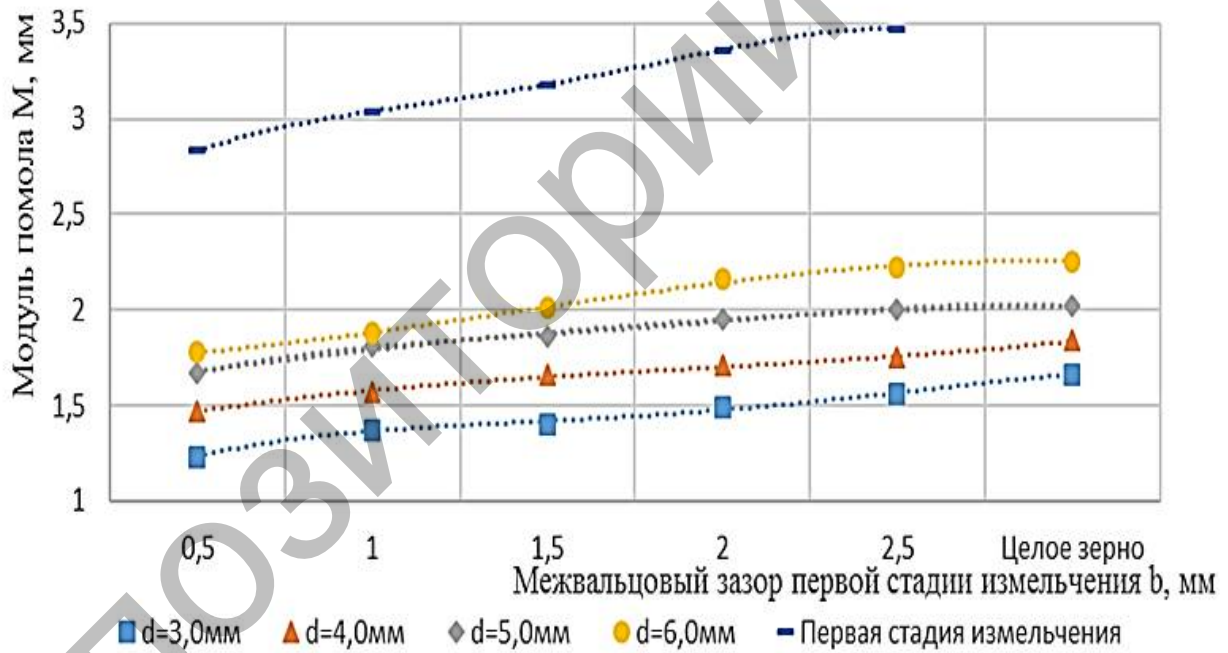


Рис. 3. Зависимость модуля помола от межвальцового зазора и диаметра отверстий в решете

Это подтверждают полученные зависимости энергоёмкости от модуля помола (см. рис. 4) при двухстадийном измельчении в сравнении с одностадийным вальцовым и одностадийным молотковым измельчением.

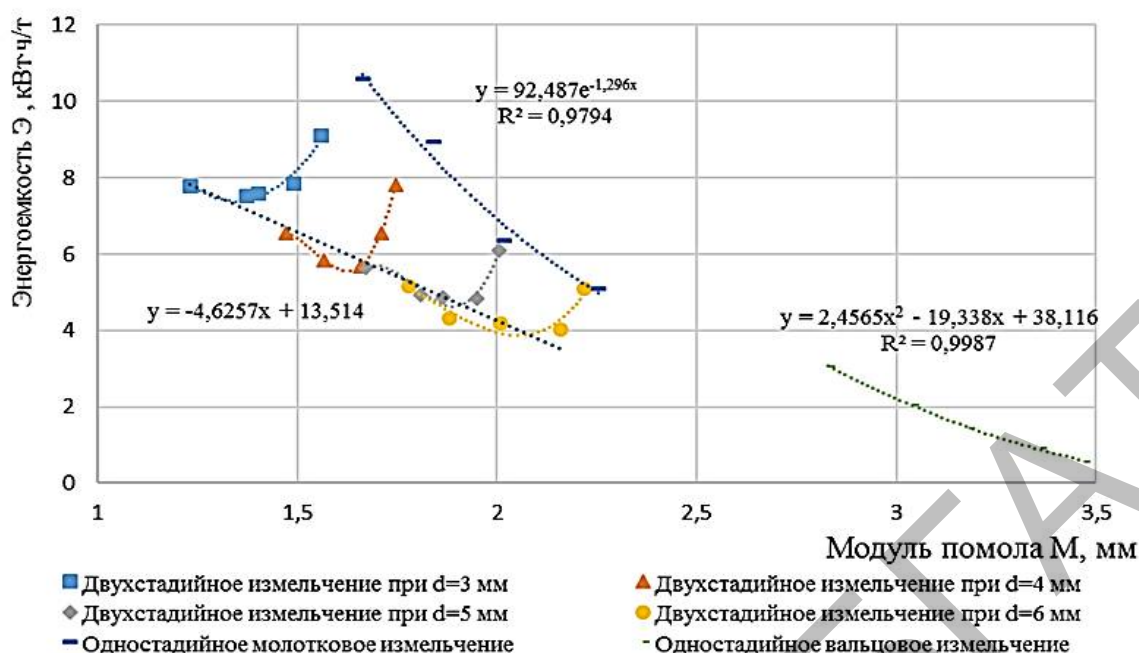


Рис. 4. Зависимости энергоемкости от модуля помола

Так, двухстадийное измельчение позволяет получить модуль помола в диапазоне 1,2 – 2,2 мм, одностадийное молотковое измельчение соответственно – 1,6 – 2,3 мм, одностадийное вальцовое позволяет получить в диапазоне 2,8 – 3,5 мм. Получить модуль помола величиной в 1,2 – 1,6 мм затруднительно для одностадийного метода измельчения. Для достижения модуля помола 1,66 мм при использовании одностадийного молоткового измельчителя затрачивается энергоемкость 10,6 кВт·ч/т, применяя решета с диаметром отверстий 3 мм, получение аналогичного модуля помола двухстадийным измельчением суммарная энергоемкость обеих стадий составляет 5,64 кВт·ч/т, при этом будут применены во второй ступени измельчения решета с диаметром отверстий 4,0 мм. То есть снижение энергоемкости в 1,88 раза при использовании двухстадийного метода измельчения. Также следует отметить, что получение данного модуля помола в вальцовом измельчителе невозможно.

Однако модуль помола является средним показателем и не характеризует равномерность гранулометрического состава измельченного зерна.

Оценка гранулометрического состава при двухстадийном измельчении зерна и сравнение его с одностадийным вальцовым и одностадийным молотковым представлены на рисунках 5-7. Диаграммное представление показывает процентное соотношение пяти условных степеней измельчения при различных режимах.

Анализ гранулометрического состава измельченного зерна при одностадийном вальцовом измельчении (рис. 5) показал наличие большого процента неэффективного помола, в котором встречаются целые зерна. Данный процент увеличивается с увеличением межвальцового зазора. При минимальном межвальцовом зазоре вальцовый измельчитель способен дать лишь грубое измельчение, которое подходит для откорма крупнорогатого скота и птицы.

Анализ гранулометрического состава измельченного зерна при одностадийном молотковым измельчением показал (рис. 6), что при увеличении диаметра отверстий в решетке снижается равномерность гранулометрического состава. При диаметре отверстий в решетке



3,0 мм наибольший процент занимает средний помол – 46,7%; мелкий и грубый помол – 24,1% и 25,0%; пылевидное измельчение – 1%; а неэффективное измельчение – 3,2%. С увеличением диаметра отверстий в решетке повышается процент грубого помола и неэффективного измельчения, так при диаметре отверстий 6 мм он составляет 40,2% и 13,5% соответственно.

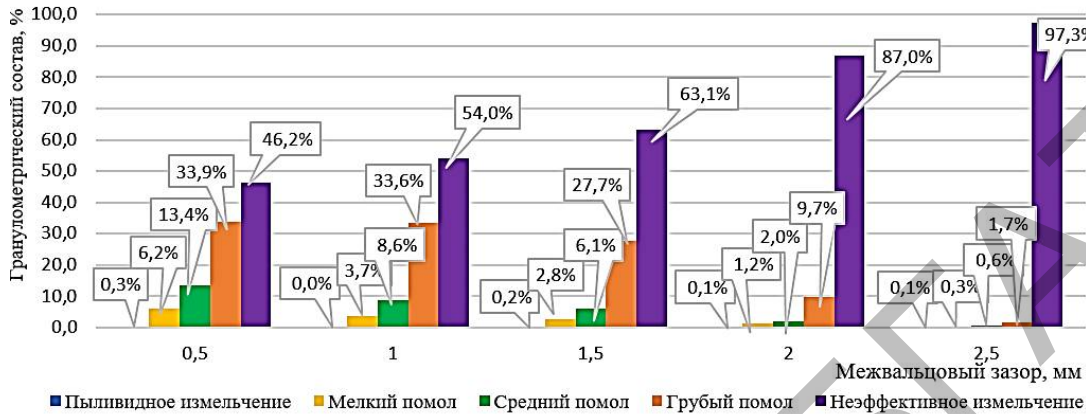


Рис. 5. Гранулометрический состав измельченного зерна при одностадийном вальцовом измельчении с различным межвальцовым зазором

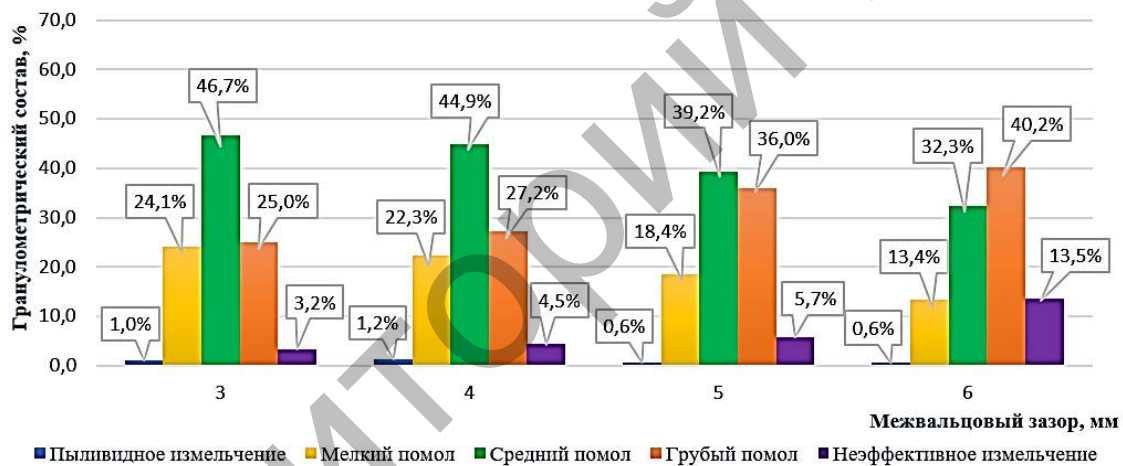


Рис. 6. Гранулометрический состав измельченного зерна при одностадийном измельчении с различным диаметром отверстий в решетке

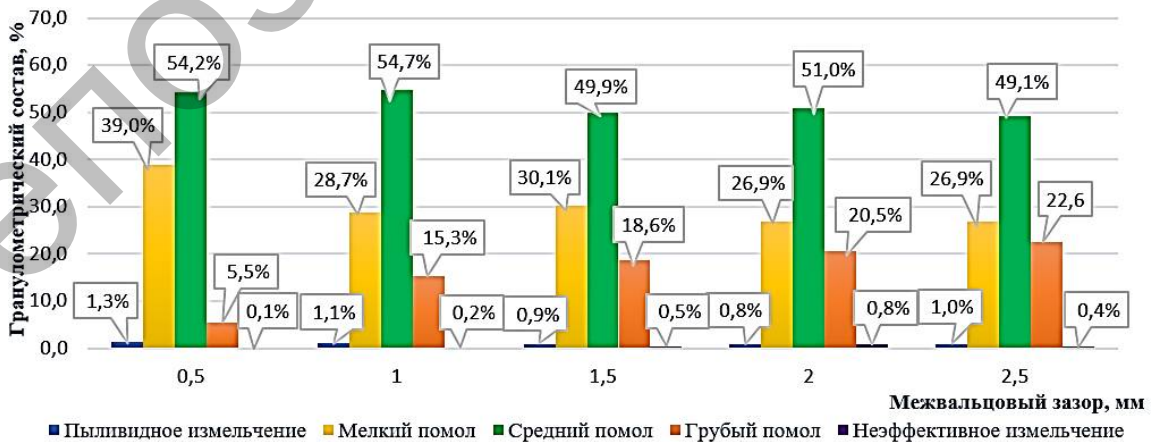


Рис. 7. Гранулометрический состав измельченного зерна при двухстадийном измельчении с различным межвальцовым зазором первой ступени и диаметром отверстий в решетке = 3 мм

Анализ гранулометрического состава измельченного зерна при двухстадийном измельчении показал (рисунок 7), что применение двухстадийного способа измельчения повышает процентное содержание мелкого помола до 39,0%, что в 1,62% раза выше, чем при одностадийном молотковом измельчении (см. рисунок 6), также наблюдается увеличение среднего помола до 54,2% что в 1,16 раза выше, чем при одностадийном молотковом измельчении. При этом наблюдается сокращение процентного содержания грубого измельчения до 5,5% и неэффективного измельчения до 0,1%, что ниже в 4,55 и в 32 раза соответственно, по сравнению с одностадийным измельчением. При этом, несмотря на значительное повышение степени измельчения, количество пылевидного измельчения увеличивается всего на 0,3% с 1,0% до 1,3%.

Из анализа можно сделать вывод, что с применением двухстадийного измельчения увеличивается качество конечного продукта.

Выше изложенный анализ соответствует режиму двухстадийного измельчения, с межвальцовым зазором первой стадии 0,5 мм и диаметре отверстий в решете второй стадии 3,0мм. С увеличением зазора между вальцами снижается степень измельчения, но при этом сохраняется улучшение гранулометрического состава и происходит снижение процентного содержания неэффективного измельчения по сравнению с одностадийным молотковым.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследовательской работы позволяют отметить следующее. Наибольшее снижение энергоемкости получено при двухстадийном измельчении с использованием решет диаметром отверстий 4 мм и максимальное увеличение степени измельчения достигнуто при диаметре отверстий в решете 3,0 мм.

Анализ гранулометрического состава измельченного зерна при двухстадийном измельчении характеризуется положительным результатом. Применение двухстадийного способа измельчения повышает процентное содержание мелкого и среднего помола до 39,0% 54,0% соответственно, что в 1,62 и 1,16 раза выше, чем при одностадийном молотковом измельчении. При этом наблюдается сокращение процентного содержания грубого измельчения до 5,5% и неэффективного измельчения до 0,1%, что ниже в 4,55 и в 32 раза соответственно, по сравнению с одностадийным измельчением. Также, несмотря на значительное повышение степени измельчения, количество пылевидного измельчения увеличивается всего на 0,3% с 1,0% до 1,3%. Из этого следует, что с применением двухстадийного измельчения повышается качество конечного продукта.

В качестве рациональных значений межвальцового зазора и диаметра отверстий в решете при двухстадийном измельчении следует считать соответственно 1,0 мм и 4,0 мм.

Использование двухстадийного измельчения с полученными рациональными режимами межвальцового зазора и диаметра отверстий в решете позволяет получить снижение энергоемкости процесса измельчения зерна в 1,88 раза по сравнению с одностадийным молотковым измельчением при получении одинакового модуля помола, равного 1,66 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Janiak, G. Metodyka okreslania cech wytrzymałosciowych ziarna dla potrzeb procesow przetworstwa / G. Janiak, J. Laskowski // Biul. Nauk. Przem. Pasz. XXXV. – 1996. N 1. – S. 45–58.



2. Методика обоснования параметров двухстадийного измельчителя зерна / В.Н. Дашков, Н.А. Воробьев, С.А. Дрозд // Вестник БГСХА . – 2014. – № 2. – С. 190–193.
3. Методика обоснования параметров двухстадийного измельчителя зерна / Дашков В.Н., Воробьев Н.А., Дрозд С.А. // Вестник БГСХА . – 2014. - №2. – С. 190-193
4. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений [Текст]; введ. 1972-27-06. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 2 с
5. Шаршунов, В.А. Технология и оборудование для производства комбикормов. В 2 ч. Ч.1 Технология комбикормов: пособие / В.А. Шаршунов В.А., Л.В. Рукшан, Ю.А. Пономаренко, А.В Червяков. – Мисанта, 2014. –978 с.
6. Экспериментальные исследования двухстадийного измельчения фуражного зерна / Воробьев Н.А., Дрозд С.А., Пунько А.И., Иванов М.В. // Межведомственный тематический сборник «Механизация и электрификация сельского хозяйства» (РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»). – Минск 2014. - Выпуск 48. Том 2. – С. 84-93.

УДК 631.36:62-52

## ОЦЕНКА РИСКОВ ПОТЕРЬ КОРМОВ ИЗ ТРАВ ПО ПОГОДНЫМ УСЛОВИЯМ

В.Д. ПОПОВ, д-р техн. наук, А.М. ВАЛГЕ, д-р техн. наук,  
А.И. СУХОПАРОВ, канд. техн. наук  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства» (ИАЭП), Санкт-Петербург, Россия

На основе теории цепей Маркова разработаны математические модели проявления скошенной травы при заготовке различных видов кормов, позволяющие оценивать возможность получения кормов и риск их потерь с учетом погодных условий, характерных для Ленинградской области, в период заготовки. Ряд показателей стационарного состояния Марковской цепи получается в результате перевода состояний системы методом декомпозиции в матричный вид и решением матрицы через уравнение Колмогорова-Чепмена.

**Ключевые слова:** корма из трав; заготовка кормов; оценка рисков; погодные условия; Марковские цепи.

## RISK ASSESSMENT OF GRASS FEED LOSS DUE TO WEATHER CONDITIONS

V.D. POPOV, DSc (Engineering), Full Member of Russian Academy of Sciences,  
A.M. VALGE, DSc (Engineering), A.I. SUKHOPAROV, Cand. Sc. (Engineering)  
Federal State Budget Scientific Institution “Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production» (IEEP), Saint Petersburg