

С. А. Дрозд

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
г. Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗЕРНА ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПЕРВОЙ СТАДИИ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

Аннотация. В статье приведены теоретические и экспериментальные исследования по установлению зависимости коэффициента восстановления зерна от степени деформации на первой стадии, учитывающие степень деформации на первой стадии при двухстадийном измельчении. В результате выявлено снижение коэффициента восстановления при применении предварительного измельчения: для пшеницы – с 0,50 (для целого зерна) до 0,19 (для предварительно измельченного); для ржи – с 0,47 до 0,18; для тритикале – с 0,49 до 0,19; для ячменя – с 0,53 до 0,21; для овса – с 0,43 до 0,16. Полученные результаты показывают, что при двухстадийном измельчении предварительное измельчение на первой стадии позволяет снизить коэффициент восстановления зерна, что дает возможность увеличить количество энергии, идущей на деформацию, и тем самым повысить интенсивность измельчения на второй стадии.

Ключевые слова: двухстадийное измельчение, коэффициент восстановления, теоретические исследования, деформация на первой стадии, экспериментальные исследования.

S. A. Drozd

El “Belarusian State Agrarian Technical University”
Minsk, Republic of Belarus

RESEARCH OF THE COEFFICIENT OF GRAIN RESTORATION AFTER PRELIMINARY DEFORMATION AT THE FIRST STAGE DURING TWO-STAGE GRINDING

Abstract. The article presents theoretical and experimental studies to establish the dependence of the grain recovery coefficient on the degree of deformation at the first stage, taking into account the degree of deformation at the first stage during two-stage grinding. As a result, a decrease in the recovery coefficient was revealed when using preliminary grinding: for wheat from 0.50 (for whole grain) to 0.19 (for pre-crushed); for rye from 0.47 to 0.18; for triticale from 0.49 to 0.19; for barley from 0.53 to 0.21; for oats from 0.43 to 0.16. The obtained results show that with two-stage grinding, preliminary grinding at the first stage allows to reduce the grain recovery coefficient, which increases the amount of energy spent on deformation, thereby increasing the intensity of grinding at the second stage.

Keywords: two-stage grinding, recovery coefficient, theoretical studies, deformation at the first stage, experimental studies.

Введение

Устойчивым фактором развития животноводства является применение отечественных высокоэнергетических комбикормов, объем которых необходимо ежегодно увеличивать для обеспечения роста производства продукции животноводства. Одним из самых важных компонентов комбикорма является зернофураж. Ключевой технологической операцией производства комбикорма является измельчение зернофуража, необходимое для обеспечения усвояемости питательных веществ животными [1]. При этом для каждого вида и возрастной группы животного необходима определенная степень измельчения [2–4].

Вместе с тем в отечественном производстве комбикормов существует ряд проблем, одна из которых – это высокие энергетические затраты, связанные, в первую очередь, с процессом измельчения зернофуража, их удельный вес – до 70 % удельных энергозатрат [1].

Исследованием процессов измельчения зернофуража, воздействия рабочих органов и создания конструкций измельчителей занимались В. А. Афанасьев, В. Н. Дашков, Н. С. Дорофеев, В. А. Елисеев, В. О. Китиков, А. В. Китун, С. И. Козлов, П. Ю. Крупенин, В. А. Одегов, Ю. А. Пономаренко, В. И. Передня, А. И. Пунько, А. А. Романович, В. Н. Савиных, А. А. Сундеев, В. И. Сыроватка, А. В. Червяков, В. А. Шаршунов, И. Н. Шило и др.

Анализ исследований в данной области показал, что одним из путей совершенствования процесса измельчения зернофуража является применение комбинированного воздействия на зерно различными рабочими органами, т. е. применение метода двухстадийного измельчения, включающего в себя поэтапный пропуск зернового материала через два конструктивно различных измельчителя [5].

На первой стадии двухстадийного измельчения осуществляется предварительное воздействие на зерно, что способствует нарушению его целостности и образованию в нем микротрещин, тем самым снижается прочность зерна. На второй ступени измельчения зерно дробится до необходимого фракционного состава, соответствующего зоотехническим требованиям.

Комбинация двух измельчителей позволяет подбирать оптимальные режимы работы на каждой из стадий для обеспечения измельчения с необходимым фракционным составом и с наименьшими удельными энергозатратами.

Измельчение зерна на второй стадии происходит в результате удара молотков молоткового ротора, удара зерна о деку или сито, соударения зерна с другими частицами. Значение ударного импульса, проявляющегося при ударе молотка о зерно, зависит не только от массы зерна и скоростей зерна и молотка до удара, но и от их упругих свойств. Данные упругие свойства при ударе характеризуются коэффициентом восстановления, исследование которого позволит обосновать конструктивные и режимные параметры оборудования для двухстадийного измельчения зерна.

Цель данной работы – установление значения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии, учитывающее степень деформации зерна на первой стадии измельчения при двухстадийном измельчении.

Основная часть

Измельчение зерна на второй стадии происходит в результате удара молотков молоткового ротора, удара зерна о деку или сито, соударения зерна с другими частицами. Наши исследования показали, что для повышения эффективности разрушения зерна на второй стадии необходимо, чтобы зерно разрушалось именно в результате удара молотков [5].

В соответствии с исследованиями основного уравнения удара профессора В. П. Горячкина [6] процесс взаимодействия зерна с молотком разложим на два периода.

Первый период удара – встреча молотка с зерном, в результате которой зерно деформируется и когда деформация достигнет максимума, зерно приобретет скорость молотка v_m [6]. В данный период молоток передаст зерну определенное количество кинетической энергии, которая перейдет во внутреннюю потенциальную энергию зерна.

Второй период удара – увеличение скорости зерна под влиянием обратной его деформации [6], т. е. зерно под действием внутренних сил (сил упругости) начинает восстанавливать свою форму, при этом его внутренняя потенциальная энергия перейдет обратно в кинетическую, тем самым дополнительно увеличив скорость зерна. Однако при этом не вся потенциальная энергия зерна переходит в кинетическую, так как часть ее идет на пластическую деформацию зерна и его нагрев.

Количественное отношение внутренней потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую и идущей на пластическую деформацию зерна и его нагрев, устанавливает коэффициент восстановления.

В качестве предельных случаев рассмотрим случай абсолютно упругого удара ($k = 1$), при котором кинетическая энергия зерна, полученная при ударе молотком, полностью восстанавливается, т. е. деформация не происходит. И случай абсолютно неупругого удара ($k = 0$), при котором удар заканчивается в первом периоде, и вся кинетическая энергия зерна идет на его деформацию и нагрев.

Следовательно, чем меньше значение коэффициента восстановления k , тем больше энергии будет идти на деформацию зерна.

Коэффициент восстановления представляет собой отношение скорости зерна в конце удара (при прямом ударе о неподвижную пластину) к скорости зерна в начале удара, его величина зависит от физических свойств зерна и определяется по формуле [7]:

$$k = \frac{|v_3 - v_c|}{|v_m - v_0|}, \quad (1)$$

где v_3 – скорость зерна при расхождении с молотком после удара, м/с; v_m – скорость молотка до соударения с зерном (скорость молотка до удара и после удара примем одинаковыми), м/с; v_0 – начальная скорость зерна, м/с.

При неизвестной скорости расхождения зерна с молотком коэффициент восстановления можно найти только опытным путем. Анализ исследований коэффициента восстановления зерна показал, что его значение колеблется от 0,25 до 0,57 в зависимости от вида зерновой культуры и ее влажности. Для различных видов культур с влажностью 13 % коэффициент восстановления скорости зерна составляет: для пшеницы – 0,50; ржи – 0,47; тритикале – 0,49; ячменя – 0,53; овса – 0,43 [8].

Очевидно, что при двухстадийном измельчении значение коэффициента восстановления зависит не только от его вида и влажности, но и от степени деформации зерна на первой стадии измельчения. Выдвинем гипотезу, что с увеличением степени деформации на первой стадии будет пропорциональное снижение коэффициента восстановления. При степени деформации 0 (0 % измельчения – целое зерно) значение коэффициента восстановления будет равняться приведенным ранее значениям, при степени деформации 1 (100-процентная деформация – полностью измельченное зерно) коэффициент восстановления будет равняться нулю.

На основании выдвинутой гипотезы предложим формулу для нахождения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии [9]:

$$k_\varepsilon = k - k\varepsilon, \quad (2)$$

где k_ε – коэффициент восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии; k – коэффициент восстановления целого зерна (при влажности 13 % коэффициент восстановления целого зерна составляет для пшеницы – 0,50; для ржи – 0,47; тритикале – 0,49; ячменя – 0,53; овса – 0,43); ε – степень деформации зерна на первой стадии измельчения (находится в диапазоне от 0 до 1; при степе деформации 0 – целое зерно; при степени деформации 1 – полностью измельченное зерно).

На основании формулы (2) построим теоретические зависимости изменения коэффициента восстановления зерна от степени деформации на первой стадии измельчения для различных видов зерна (рисунок 1).

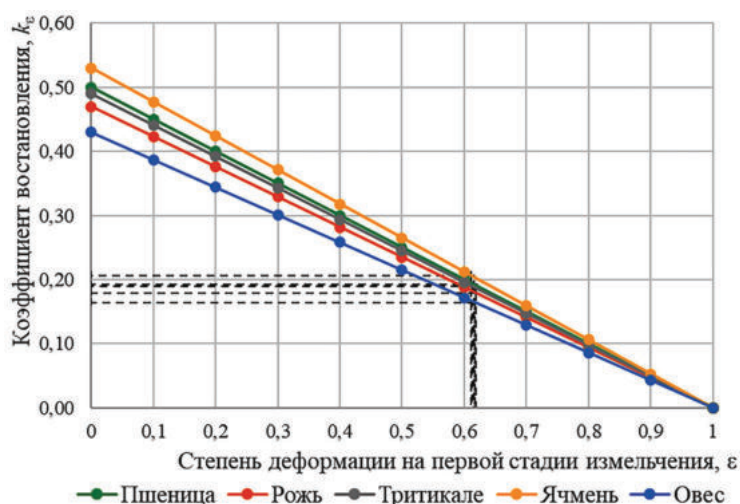


Рисунок 1 – Графики зависимости изменения коэффициента k_ε восстановления зерна от степени деформации ε на первой стадии измельчения

На основании наших исследований [5, 9] значения степени деформации на первой стадии должны составлять: $\varepsilon = 0,6163$ – для пшеницы; $\varepsilon = 0,6183$ мм – ржи; $\varepsilon = 0,6133$ мм – тритикале; $\varepsilon = 0,6114$ мм – ячменя; $\varepsilon = 0,6174$ – овса. Данные значения подставим в формулу (3) или графическую зависимость (рисунок 1). В результате получим значения коэффициента восстановления зерна после предварительного измельчения на первой стадии: для пшеницы $k_\varepsilon = 0,19$; для ржи $k_\varepsilon = 0,18$; тритикале $k_\varepsilon = 0,19$; ячменя $k_\varepsilon = 0,21$; овса $k_\varepsilon = 0,16$.

Для экспериментального подтверждения выдвинутой в теоретической части гипотезы, согласно которой с увеличением степени деформации, на первой стадии будет пропорциональное снижение коэффициента восстановления зерна, были разработаны лабораторные установки: для воссоздания условий воздействия на зерно на первой стадии измельчения и для исследования коэффициента восстановления зерна.

Лабораторная установка для воссоздания условий воздействия на зерно на первой стадии измельчения приведена на рисунке 2.

Процесс сжатия зерна осуществляется пластинами, на рабочих сторонах которых нарезаны рифли, аналогичные применяемым при вальцовом измельчении (рисунок 2, б). Сжатие пластин осуществляется при помощи винтового механизма.

Контролирование степени деформации осуществляется при помощи индикатора часового типа с диапазоном измерения 0–10 мм, обладающего погрешностью 0,015 мм при применяемом диапазоне 0–3 мм (рисунок 2, в).

Индикатором часового типа фиксируется начальный размер зерна d_n (размер зерна до деформации) и конечный размер зерна d_k (размер зерна после деформации).

Конечный размер зерна определяется в соответствии с формулой:

$$d_k = d_n - \varepsilon_{\max} d_n, \quad (3)$$

где d_n – начальный размер, м; d_k – конечный размер, м.

В формулу (3) подставлялось значение начального размера зерна d_n (индивидуальное для каждого исследуемого зерна) и задавалось значение необходимой степени деформации ε , таким образом получался конечный размер зерна, до значения которого сжимались пластины (рисунок 2, б).

Сжатие зерна осуществлялось в диапазоне степеней деформации 0–0,8 с шагом 0,1 по 4 повтора. Таким образом, имитировалось предварительное измельчение зерна на первой стадии измельчения. Результат деформирования представлен на рисунке 3.

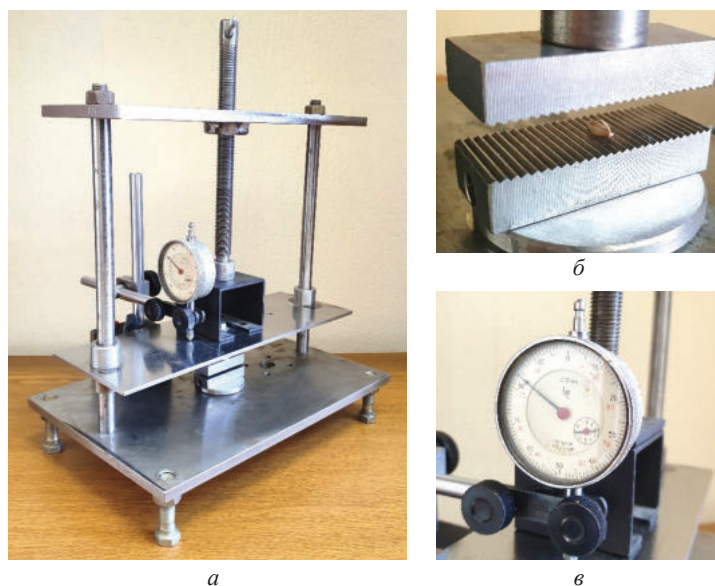


Рисунок 2 – Лабораторная установка для воссоздания условий воздействия на зерно первой стадии измельчения:

а – общий вид; б – пластины с рифлями для сжатия зерна;
в – индикатор для контролирования степени деформации зерна

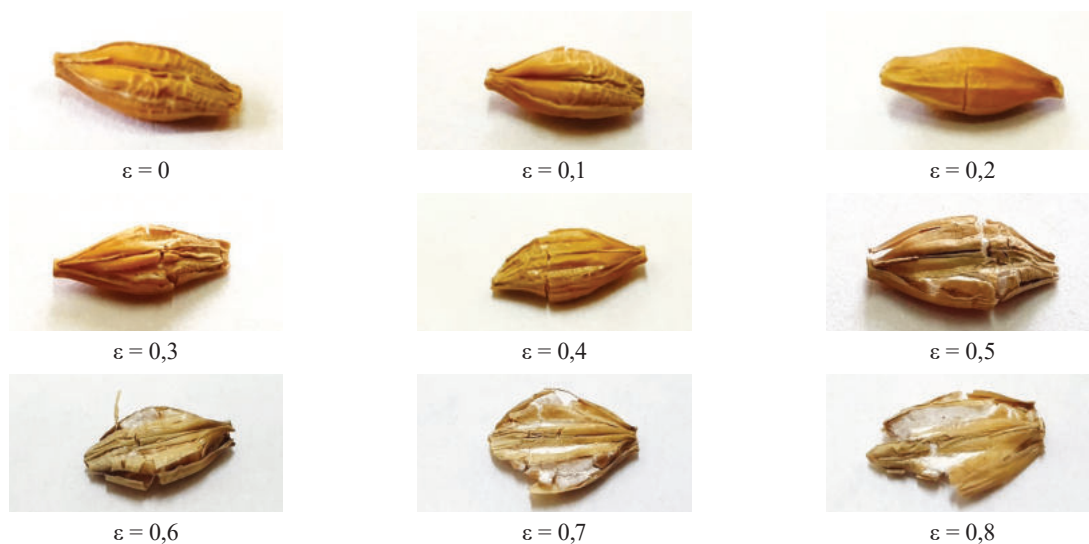


Рисунок 3 – Зерно при различной степени деформации ε на первой стадии измельчения



Рисунок 4 – Лабораторная установка для исследования коэффициента восстановления зерна:
a – общий вид лабораторной установки; *б* – изображение, получаемое фотофиксацией

После воссоздания условий воздействия на зерно первой стадии измельчения проводилось исследование по установлению значения коэффициента восстановления зерна на лабораторной установке (рисунок 4).

Процесс измерения коэффициента восстановления зерна заключается в сбрасывании зерна с предварительно измеренной высоты H (принимается 1 м). В результате сброса зерно ударяется о металлическую поверхность и поднимается на высоту h .

Для измерения высоты подъема зерна h использовалась шкала для измерения линейных величин с ценой деления 1 мм и погрешностью измерения 0,5 мм.

Фиксация высоты подъема осуществляется при помощи скоростной видеокамеры со скоростью съемки 240 кадров в секунду. При анализе полученных видео выбирается кадр, на котором зерно находится в наивысшей точке подъема (рисунок 4, *б*), и при помощи вышеупомянутой шкалы проводится измерение высоты подъема зерна h .

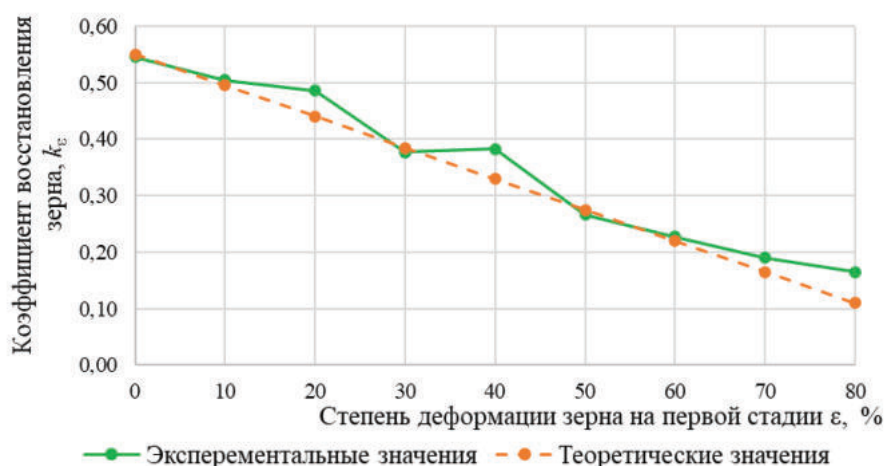


Рисунок 5 – Графики зависимости коэффициента k_{ϵ} восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии от степени деформации ϵ на первой стадии

Значение коэффициента восстановления зерна равно отношению модуля скорости v_k в конце удара к модулю скорости v_n в начале удара. В соответствии с формулами Галилея коэффициент восстановления зерна рассчитывается следующим образом [10]:

$$k = \frac{v_k}{v_n} = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}} = \sqrt{\frac{h}{H}}, \quad (4)$$

где H – высота, с которой сбрасывается зерно, м; h – высота подъема зерна, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Для измерения коэффициента восстановления зерна эксперимент проводится по 4 повтора. В каждом повторе берется новое зерно, тем самым минимизируется погрешность, связанная с физико-механическими свойствами отдельного зерна. При каждом повторе осуществляется по 10 сбрасываний зерна, тем самым минимизируется погрешность, связанная с отклонением траектории движения зерна от вертикали.

Согласно методике исследования коэффициента восстановления зерна, после предварительной деформации на первой стадии проведена серия опытов, позволивших получить зависимость коэффициента k_{ϵ} восстановления зерна, которым оно обладает после предварительной деформации на первой стадии от степени деформации ϵ на первой стадии (рисунок 5).

Исследование проводилось на зерне ячменя. Для этого отбиралось целое зерно без видимых дефектов и трещин. Влажность исследуемого зерна не превышала 13 %, что соответствует влажности зерна при его хранении.

Для проверки достоверности формулы (2) для нахождения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии рассчитаем теоретическое значение коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии. В качестве значения коэффициента восстановления целого зерна подставим значение, полученное экспериментальным путем при степени деформации 0 % (см. рисунок 5).

Для оценки достоверности описания экспериментальных данных предложенной теоретической зависимости рассчитаем коэффициент корреляции по следующей формуле [11]:

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

где r – коэффициент корреляции (находится в диапазоне от 0 до 1, где 0 – указывает на отсутствие корреляции; 1 – указывает на 100-процентную корреляцию между массивами данных); x – данные, полученные экспериментальным путем; y – данные, полученные теоретическим путем.

Подставив в формулу (5) теоретические и экспериментальные значения, получили коэффициент корреляции $r = 0,99$. Следовательно коэффициент детерминации составил $R^2 = r^2 = 0,99^2 = 0,98$. Из чего сделаем вывод, что предложенная теоретическая зависимость описывает экспериментальные данные на 98 %, что подтверждает ее достоверность. Следовательно, выдвинутая гипотеза, что с увеличением степени деформации на первой стадии будет пропорциональное снижение коэффициента восстановления, и формула (2) для нахождения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии экспериментально подтверждены.

Полученные результаты показывают, что при двухстадийном измельчении предварительное измельчение на первой стадии позволяет снизить коэффициент восстановления зерна, что дает возможность увеличить количество энергии, идущей на деформацию, и тем самым повысить интенсивность измельчения на второй стадии.

Заключение

Получена теоретическая зависимость для определения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии. В результате выявлено снижение коэффициента восстановления при применении предварительного измельчения: для пшеницы – с 0,50 (для целого зерна) до 0,19 (для предварительно измельченного); ржи – с 0,47 до 0,18; тритикале – с 0,49 до 0,19; ячменя – с 0,53 до 0,21; овса – с 0,43 до 0,16.

Разработаны и изготовлены лабораторные установки для воссоздания процесса воздействия на зерно первой стадии измельчения и изучения коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии, а также разработаны программа и методика исследования, позволяющие изучить зависимость коэффициента восстановления зерна от степени деформации на первой стадии.

Получена экспериментальная зависимость коэффициента восстановления зерна после предварительной деформации на первой стадии от степени деформации на первой стадии. Анализ зависимости позволил определить, что с увеличением степени деформации на первой стадии наблюдается пропорциональное снижение коэффициента восстановления, что подтверждает теоретическую зависимость с достоверностью 98 %. При двухстадийном измельчении предварительное измельчение на первой стадии позволяет снизить коэффициент восстановления зерна, что позволяет увеличить долю количества энергии, идущей на деформацию, тем самым повысить интенсивность измельчения на второй стадии.

Список использованных источников

1. Афанасьев, В. А. Руководство по технологии комбикормовой продукции с основами кормления животных / В. А. Афанасьев. – Воронеж : ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт», 2007. – 389 с.
2. Сельскохозяйственная техника. Машины и оборудование для приготовления кормов. Порядок определения функциональных показателей. – ТКП 273–2010. – Введ. 01.06.2011. – Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации. – Минск, 2011. – 48 с.
3. Слипец, Н. Шесть тезисов свиноводческого конгресса в Дании / Н. Слипец, А. Терешко // Белорусское сельское хозяйство. – 2020. – № 1 (213). – 108 с.
4. Терешко, А. Стратегия кормления в свиноводстве / А. Терешко // Белорусское сельское хозяйство. – 2019. – № 11 (211). – 108 с.
5. Дрозд, С. А. Снижение удельных энергозатрат двухстадийным измельчением зернофуража при производстве комбикормов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.20.01 / Дрозд Сергей Александрович. – Минск, 2023. – 25 с.
6. Горячкин, В. П. Собрание сочинений : в 3 т. / В. П. Горячкин. – М. : Колос, 1965. – Т. 1. – 720 с.
7. Кузнецов, С. И. Краткий курс физики : учеб. пособие / С. И. Кузнецов, К. И. Рогозин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск : Изд-во Томского политех. ун-та, 2013. – 215 с.
8. Глебов, Л. А. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия) / Л. А. Глебов. – М. : ДеЛи принт, 2006. – 815 с.
9. Дрозд, С. А. Обоснование параметров и режимов работы вальцового и вертикального молоткового измельчителя при двухстадийном способе измельчения зерна / С. А. Дрозд // Агропанорама. – 2022. – № 2. – С. 3–9.
10. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. – М. : Высш. шк., 1986. – 416 с.
11. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн. – М. : Наука, 1981. – 704 с.