

DOI

УДК 636.085.67

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПОИСКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ВЛИЯНИЮ МИКРОНИЗАЦИИ НА УСИЛИЕ РАЗРУШЕНИЯ ЗЕРНОВКИ****Ф. А. Киприянов, П. А. Савиных**

Реферат. В условиях возросшей продуктивности сельскохозяйственных животных актуально повышение энергоэффективности кормов. Микронизация фуражного зерна позволяет улучшить его усвояемость, обеззаразить и снизить количество антипитательных веществ. Один из критериев достаточности микронизации – усилие разрушения зерновки. Исследования с целью изучения влияния режимов микронизации на усилие разрушения зерновки клиновидным наконечником проведены на примере зерна ржи и ячменя. В серии однофакторных экспериментов определяли усилие разрушения зерновки при наступлении различных событий: начале потрескивания зерновок и начале подгорания. Усилие разрушения при начале потрескивания для зерна ржи снижалось в интервале от 9% до 20%, для зерна ячменя – от 10% до 44%, при начале подгорания – соответственно от 16% до 26% и от 44% до 50%. Измерение усилия разрушения зерновок, которые обрабатывали в течение среднего времени между временем начала потрескивания и временем начала подгорания, показало, что увеличение времени нагрева не приводит к существенному снижению усилия разрушения. Для получения наименьшего усилия разрушения зерновки при микронизации необходимо обеспечить высоту источника излучения над транспортирующей поверхностью от 10 мм до 15 мм с продолжительностью обработки от 33 до 41 с, не допуская подгорания и обугливания зерен. Полученные математические модели адекватно описывают изменение усилия разрушения в зависимости от условий обработки. Обработка в оптимальном режиме приводит к снижению усилия разрушения зерновки ржи в 1,8 раза с 66 до 37 Н, ячменя – в 2,3 раза со 101 до 44 Н.

Ключевые слова: усилие разрушения зерновки, инфракрасное излучение, проведение эксперимента, фуражное зерно, эксперимент, зерно.

Введение. Разработка технических решений в сфере обработки зернового материала с целью повышения его усвояемости сельскохозяйственными животными выступает одной из важнейших задач инженерно-технического развития агропромышленного комплекса России. Микронизация фуражного зерна – один из хорошо известных способов подготовки кормов к скармливанию [1, 2, 3]. Интенсивный нагрев инфракрасным излучением в течение 30...90 с, повышает доступность энергии, содержащейся в зерне, улучшает его вкусовые свойства, снижает количество антипитательных веществ, что положительным образом сказывается на привесах и развитии животных [4, 5, 6].

Однако, несмотря на очевидность преимуществ использования микронизированного зерна в рационе, этот прием не получил массового распространения в технологических линиях кормоприготовления сельскохозяйственных предприятий. Расширение использования микронизированного зерна потребует совершенствования как технологических линий в целом, так и разработки новых конструкций установок для его проведения [7, 8]. Наряду с совершенствованием конструкций установок для микронизации, способствующим расширению их распространения, остается открытым вопрос о критерии достаточности микронизации зерна.

По результатам исследований ряда ученых, критерием достаточности микронизации может служить усилие разрушения зерновки [9]. Однако в проведенных исследованиях оценивали усилие разрушения 30 зерновок при их сплющивании и не учитывали возможное сопротивление уже сплющенного зерна.

Совершенствование и расширение номенклатуры измерительных средств позволяет провести эксперименты по определению усилия разрушения зерновки в единичном экземпляре, что в итоге дает более полную картину влияния условий микронизации на усилие разрушения зерновки.

Цель исследований – определение усилия разрушения зерновки при различных условиях микронизации фуражного зерна и выявление оптимальных режимов обработки.

Условия, материалы и методы. Обработку зерна осуществляли в стационарном положении, в качестве источника инфракрасного излучения использовали коротковолновый излучатель QHL с потребляемой мощностью 1500 Вт. Длину волны инфракрасного излучения изменяли путем изменения напряжения на клеммах источника. Регулировку напряжения осуществляли с использованием лабораторного трансформатора SUNTEK 1000VA диапазон 0...300 вольт SK2.1_LTR1000. Зерно помещали под излучателем слоем толщиной в одну зерновку, для уменьшения неравномерности нагрева его ширина не превышала 15 мм. Микронизации подвергали зерно ржи сорта Графиня и ячменя сорта Дина. Усилие разрушения зерновки определяли с использованием динамометра Мегеон (1, рис. 1б) с клиновидным наконечником (2, рис. 1б). Для проведения эксперимента и фиксации динамометра был изготовлен специальный адаптер (рис. 1а), в котором его устанавливали с натягом, при этом было предусмотрено дополнительное крепление для фиксации динамометра (3, рис. 1б).

Соответствующие крепления адаптера позволяют устанавливать динамометр

на твердомер Роквелла ТК-2М (4, рис. 1а) либо на вертикально-сверлильный станок (5, рис. 1а). Определение усилия разрушения зерновки в ходе исследований проводили с установкой динамометра на твердомер

ТК-2М (6, рис. 1б). Использование адаптера позволило повысить точность полученных результатов, в то время как более свободное положение динамометра [10] давало значительную погрешность.

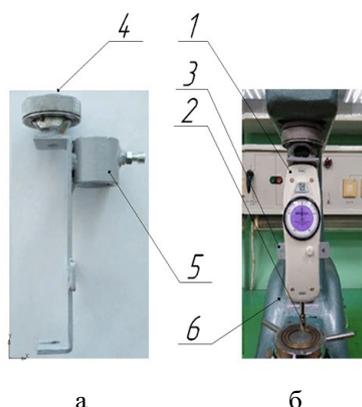


Рис. 1. – Установка для определения усилия разрушения: а – адаптер для крепления динамометра; б – установка для определения усилия разрушения

Для определению усилия использовали не менее 50 зерновок в каждом опыте. Их выкладывали на металлическую пластину, содержащую клеевой слой, способствующий

фиксации зерновки, после чего подвергали воздействию клиновидного наконечника динамометра. Разрушение осуществляли поперек зерновки (рис. 2).

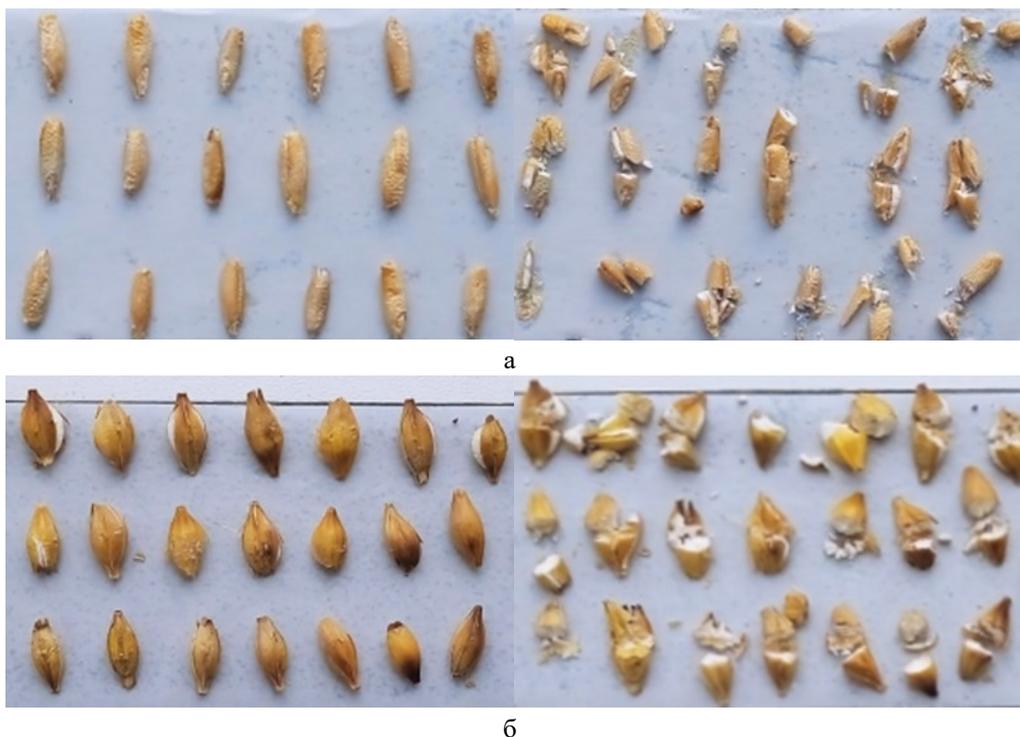


Рис. 2 – Фрагменты расположения зерновок до и после определения усилия разрушения: а – рожь; б – ячмень

Опыты, согласно основам планирования эксперимента, выполняли в два этапа, на первом этапе проводили однофакторные эксперименты для выявления особенностей воздействия инфракрасного излучения на зерно и определения уровней варьирования воздействующих факторов, на втором этапе – полнофакторный эксперимент для определения оптимальных режимов

при микронизации фуражного зерна [11].

Известно, что микронизация сопровождается характерным потрескиванием зерна, вызываемым его деструкцией в результате интенсивного парообразования находящейся в зерне влаги. Поэтому в ходе эксперимента измеряли время до начала потрескивания зерновки в зависимости от высоты источника облучения над поверхностью, на которой

расположены зерна. Одновременно измеряли время нагрева до появления нежелательного явления – подгорания зерен. После наступления этих событий на этапе экспериментально-поисковых однофакторных опытов оценивали усилие разрушения зерновки. Дополнительно была проведена серия экспериментов по определению усилия разрушения при среднем значении времени между временем начала потрескивания и временем начала подгорания.

Для проведения второго этапа эксперимента была составлена матрица плана 3×3 (см. табл.), в которой воздействующими факторами выступали время обработки,

высота источника инфракрасного излучения над поверхностью расположения зерновок и напряжение на клеммах источника, влияющее на длину волны и на сам процесс микронизации. При обработке экспериментальных данных определяли значения факторов, обеспечивающие минимальное усилие разрушения зерновок с использованием функции «Оптимизация» программы Statgraphics Centurion 18. Незначащие сочетания факторов при построении математической модели удаляли на основании графика Парето. Поверхность отклика строили при фиксации одного из факторов в оптимальном значении.

Таблица – Факторы и уровни варьирования при определении усилия разрушения зерновок

Фактор	Кодовое значение	Натуральное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
				-1	0	1
Время, с	x_1	t	8	25	33	41
Напряжение на клеммах, В	x_2	U	20	180	200	220
Расстояние до поверхности, мм	x_3	h	5	10	15	20

Достоверность различий между величинами полученных усилий разрушения зерновок, по сравнению с контролями, определяли по критерию Стьюдента. Обработку экспериментальных данных однофакторных экспериментов выполняли в MS Excel. Построение матрицы полнофакторного эксперимента, обработку полученных результатов, построение математической модели и поверхностей отклика осуществляли в программе Statgraphics Centurion 18. Проверку полученной математической

модели на адекватность проводили по критерию Фишера [12]

Результаты и обсуждение. Эффект потрескивания проявляется при расширении зерновки с характерным взрывоподобным паробразованием [5, 6]. Из этого следует, что при увеличении расстояния интенсивность нагрева снижается, некоторые зерновки расширяются более плавно, без потрескивания, и к моменту начала потрескивания у них уже происходит разрушение внутреннего строения.

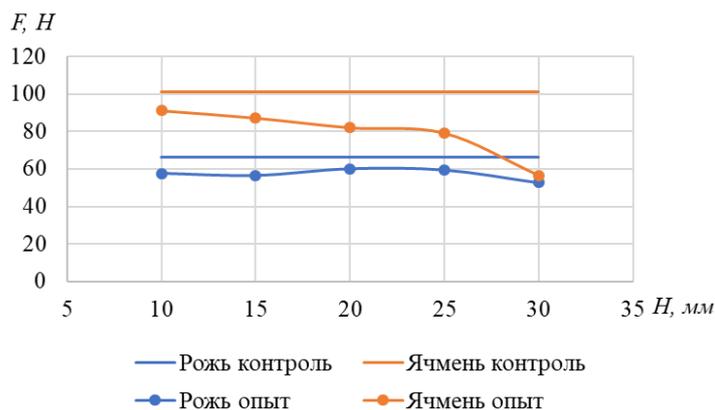


Рис. 3 – Зависимость среднего усилия разрушения зерновки при начале потрескивания от высоты источника излучения до поверхности расположения зерновок

Нагрев до появления потрескивания приводит к достоверному снижению усилия разрушения зерновок (рис. 3) ржи от 9% до 20%, ячменя – от 10% до 44%. Одновременно увеличение высоты расположения источника (рис. 4) инфракрасного излучения закономерно снижает интенсивность нагрева,

что приводит к возрастанию времени облучения до начала потрескивания. В свою очередь увеличение продолжительности нагрева приведет к росту энергоемкости процесса микронизации, что необходимо учитывать при проектировании установок для микронизации фуражного зерна.

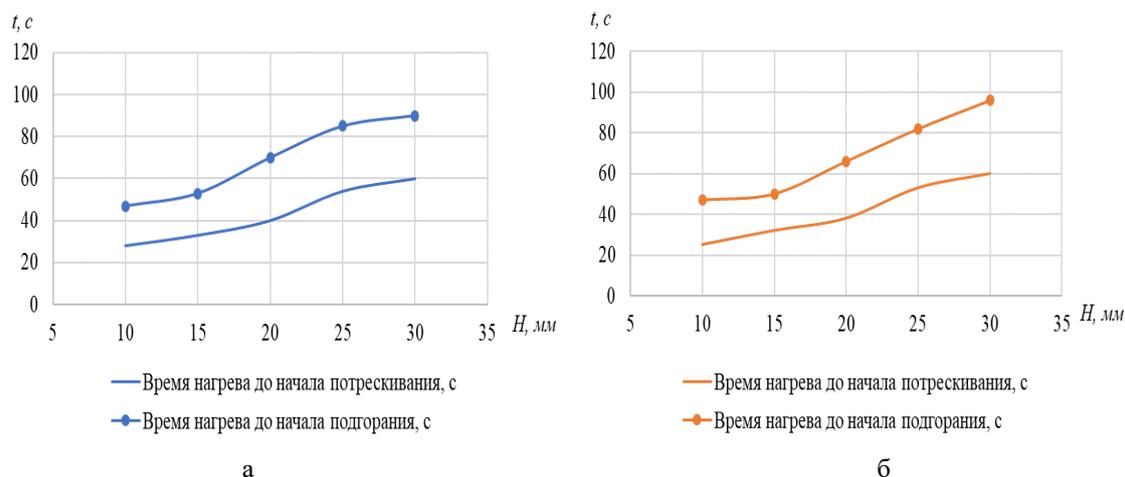


Рис. 4 – Зависимость времени нагрева до начала потрескивания и подгорания от высоты источника излучения до поверхности расположения зерновок: а – рожь, б – ячмень

Подгорание при микронизации происходит, как правило, при перегреве зерновок. Усилие разрушения зерновок, обработанных в течение среднего времени между началом потрескивания и началом подгорания (рис. 5) оказалось меньше усилия разрушения зерновок, облучаемых до начала потрескивания. Например, при высоте расположения источника инфракрасного излучения над поверхностью

зерновок ячменя 10 мм его снижение составило более 30 Н. Для зерновок ржи снижение усилия разрушения при увеличении времени нагрева при высоте источника 25 мм превысило 10 Н. Однако следует отметить, что чрезмерное увеличение времени микронизации не приводит к существенному снижению усилия разрушения, по сравнению со средним временем нагрева по условиям эксперимента.

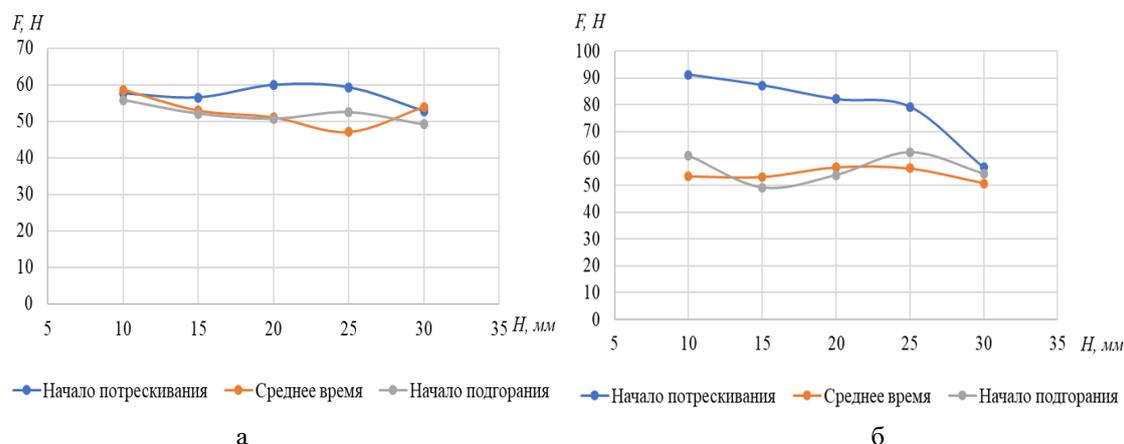


Рис. 5 – Усилие разрушения зерновки при различных режимах обработки: а – рожь; б – ячмень

Математическая модель влияния времени нагрева, напряжения на клеммах источника и расстояния источника инфракрасного излучения до поверхности на усилие разрушения зерновки ржи, построенная в результате обработки экспериментальных данных (рис. 6а) и удаления незначительных факторов и их сочетаний (ВВ и СС) имела следующий вид:

$$y = 61 - 3,4x_1 - 3,8x_2 + 2,5x_3 - 2,3x_1^2 - 2,9x_1x_2 + 2,9x_1x_3 + 2,8x_2x_3, \quad (1)$$

где x_1 – время микронизации, с;
 x_2 – напряжение на клеммах источника инфракрасного излучения, В;
 x_3 – расстояние источника излучения

до поверхности расположения зерновок, мм.

Полученная математическая модель (1) адекватно описывает изменение усилия разрушения зерна ржи, так как $F_{расч} > F_{табл}$ (30,89 > 2,54) [12].

В результате обработки экспериментальных данных с использованием функции «Оптимизация» программы Statgraphics Centurion 18 установлено, что минимальное значение усилия разрушения зерна ржи сорта Графиня достигается при следующих значениях факторов: $x_1=1, x_2=1, x_3=-1$, что в физическом выражении соответствует обработке в течение 41 с, напряжению на клеммах 220 В и расстоянию источника излучения над поверхностью 10 мм (см. табл.).

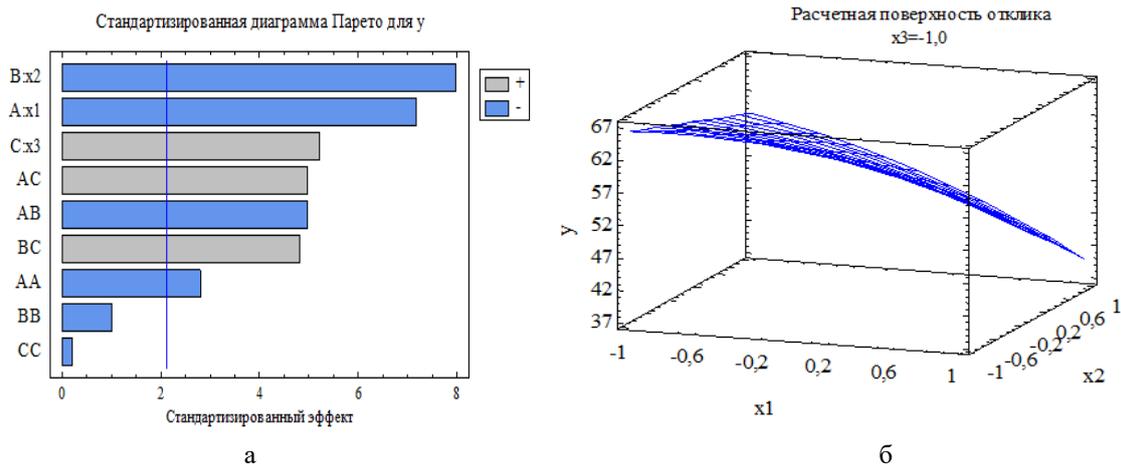


Рис. 6 – Графическое представление математической модели влияния факторов на усилие разрушения зерновки при микронизации ржи: а – график Парето; б – поверхность отклика

Зафиксировав расстояние (фактор x_3) в его оптимальном значении ($x_3=-1$), можно построить поверхность отклика, отражающую влияние времени нагрева (x_1) и напряжения на клеммах (x_2) на усилие разрушения зерновки (рис. 6б). Обработка ржи на оптимальных режимах достоверно снижает усилие разрушения зерновки с 66 до 37 Н.

Аналогичный результат получен при микронизации ячменя. После удаления незначимых факторов (АА и СС) (рис. 7а) построено уравнение математической модели, адекватно описывающее изменение усилия разрушения зерновки ячменя ($F_{расч} > F_{табл} (17,19 > 2,54)$):

$$y = 92,7 - 7,6x_1 - 7,3x_2 + 3,2x_3 - 5,9x_1x_2 + 4,4x_1x_3 - 4,8x_2^2 + 4,0x_2x_3, \quad (2)$$

где x_1 – время микронизации, с;
 x_2 – напряжение на клеммах источника инфракрасного излучения, В;
 x_3 – расстояние источника излучения до поверхности расположения зерновок, мм.

Оптимальные условия для обработки ячменя складываются при таких же значениях факторов, как и для зерна ржи. При этом достигается наибольшее снижение усилия разрушения зерновки ячменя со 101 до 44 Н.

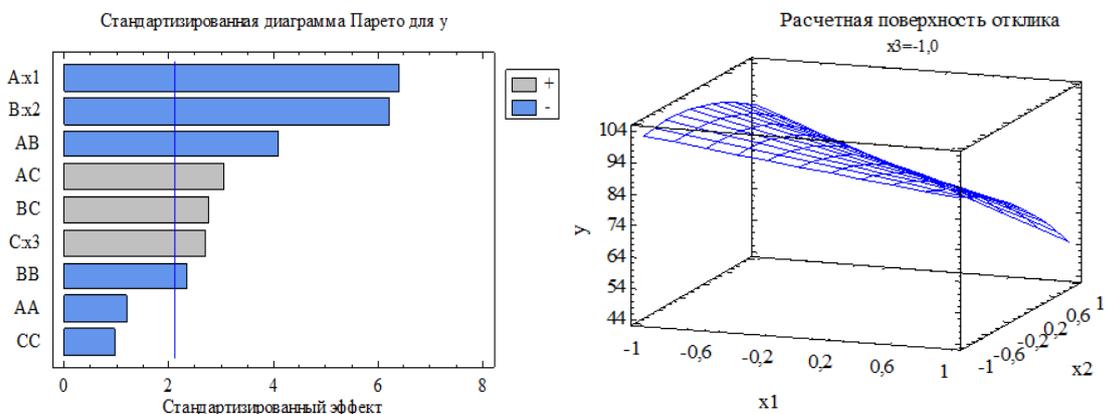


Рис. 7 – Графическое представление математической модели влияния факторов на усилие разрушения зерновки при микронизации ячменя: а – график Парето; б – поверхность отклика

Некоторые различия между поверхностями отклика усилия разрушения для зерновок ржи и ячменя (см. рис. 6б, рис. 7б) можно объяснить отличиями их внутреннего строения, так ячмень изначально характеризуется большим усилием разрушения, что отражается и на величина этого показателя при микронизации.

В то же время, рассмотрев уравнения математических моделей (1) и (2), можно отметить некоторое различия в степени воздействия факторов на усилие разрушения зерновки. Так, при микронизации ржи наибольшее влияние оказывает напряжение на клеммах источника (фактор x_2), а при микронизации ячменя

время обработки (фактор x_1). Это, наряду с меньшими размерами зерновок ржи, может свидетельствовать об их большей проницаемости для коротковолнового инфракрасного излучения, испускаемого QNL. Использование коротковолнового излучателя, в свою очередь, позволит, снизив напряжение на клеммах, оптимизировать температурный режим, для уменьшения энергозатрат и количества подгоревших зерен.

Выводы. Для достижения наименьшего усилия разрушения зерновки при микронизации необходимо обеспечить высоту источника излучения над транспортирующей

поверхностью от 10 мм (оптимально) до 15 мм (допустимо) с продолжительностью обработки от 33 до 41 с (не допуская подгорания и обугливания зерен). Построенные математические модели адекватно описывают изменение

усилия разрушения в зависимости от условий обработки. Обработка в оптимальном режиме ржи приводит к снижению усилия разрушения зерновки в 1,8 раза с 66 до 37 Н, ячменя – в 2,3 раза со 101 до 44 Н.

Литература

1. Ebrahimi S. H. Feeding complete concentrate pellets containing ground grains or blend of steam-flaked grains and other concentrate ingredients in ruminant nutrition – a review // *Annals of Animal Science*. 2020. Vol. 20. P. 11–28. doi: 10.2478/aoas-2019-0055.
2. S. Hanieh, H. E. Seyed, A. V. Seyed, et al. Operational conditions and potential benefits of grains micronization for ruminant: A review // *Animal Feed Science and Technology*. 2022. Vol. 287. P. 115285. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840122000839> (дата обращения: 10.02.2023).
3. S. A. Aboud, A. B. Altemimi, A. R S Al-Hilphy, et al. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing // *Molecules*. 2019. Vol. 24. P. 4125. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules24224125> (дата обращения: 10.02.2023).
4. Мамедов Н. Х. Тепловая обработка зерна // *Аграрная наука*. 2015. № 11. С. 28–30.
5. Zverev S., Sesikashvili O. Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply // *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 79–90. doi: 10.5219/840.
6. Мишуоров, Н. П. Инновационные способы тепловой обработки комбикормов / Н. П. Мишуоров, С. А. Давыдова, А. А. Давыдов // *Техника и оборудование для села*. 2019. № 3. С. 2–7.
7. Сыроватка В. И. Прогрессивные технологии производства комбикормов // *Техника и оборудование для села*. 2015. № 11. С. 2–6.
8. Сыроватка В. И. Перспективные технологии производства комбикормов // *Зоотехния*. 2016. № 10. С. 7–12.
9. Показатель для оценки достаточности микронизации зерна и определение его величины для пшеницы / В. Ф. Некрашевич, С. В. Корнилов, И. В. Воробьева и др. // *Вестник Рязанского государственного агро-технологического университета им. П.А. Костычева*. 2013. № 2 (18). С. 66–69.
10. Киприянов Ф. А., Савиных П. А. Влияние микронизации на свойства фуражного зерна // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2023. № 1. С. 16–23.
11. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и дополн. М.: Наука, 1976. 280 с.
12. Использование критерия Фишера для проверки значимости регрессионной модели // Сайт «Факультет пищевых и химических производств АлтГТУ». 2016. URL: <https://www.chem-astu.ru/science/reference/fischer.html> (дата обращения: 10.02.2023).

Сведения об авторах:

Киприянов Федор Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетические средства и технический сервис, e-mail: kipriyanovfa@bk.ru
 Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н. В. Верещагина, г. Вологда, Россия
 Савиных Петр Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией механизации животноводства, e-mail: peter.savinyh@mail.ru
 Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, г. Киров, Россия.

THE RESULTS OF EXPERIMENTAL – EXPLORING RESEARCH OF THE MICRONIZATION INFLUENCE ON THE FRACTURE STRAIN OF CARYOPSIS

F. A. Kipriyanov, P. A. Savinykh

Abstract. In conditions of increased productivity of farm animals, it is important to increase the energy efficiency of feed. The micronization of feed grains improves its digestibility, disinfects it, and reduces the amount of antinutrients. One of the criteria for the sufficiency of micronization is the fracture strain of caryopsis. Research to study the influence of micronization modes on the force of destruction of a grain with a wedge-shaped tip was carried out using the example of rye and barley grain. In a series of one-factor experiments, the fracture strain of caryopsis was determined upon the occurrence of various events: the beginning of cracking of the grain and the beginning of burning. The fracture strain at the beginning of cracking for rye grain decreased in the range from 9% to 20%, for barley grain - from 10% to 44%, at the beginning of burning - from 16% to 26% and from 44% to 50%, respectively. Measuring the breaking force of grains that were processed during the average time between the time of cracking and the start of burning showed that increasing the heating time did not lead to a significant decrease in the breaking force. To obtain the least force of grain destruction during micronization, it is necessary to ensure the height of the radiation source above the transporting surface from 10 mm to 15 mm with a processing duration of 33 to 41 s, preventing burning and charring of the grains. The resulting mathematical models adequately describe the change in the fracture force depending on the processing conditions. Processing in the optimal mode leads to a reduction in the force of destruction of the rye grain by 1.8 times from 66 to 37 N, of barley - by 2.3 times from 101 to 44 N.

Key words: force of destruction of the grain, infrared radiation, conducting an experiment, feed grain, experiment, grain.

References

1. Ebrahimi SH. Feeding complete concentrate pellets containing ground grains or blend of steam-flaked grains and other concentrate ingredients in ruminant nutrition – a review. *Annals of Animal Science*. 2020; Vol.20. 11-28 p. doi: 10.2478/aoas-2019-0055.
2. Hanieh S, Seyed HE, Seyed AV. Operational conditions and potential benefits of grains micronization for ruminant: a review. [Internet]. *Animal Feed Science and Technology*. 2022; Vol.287. 115285 p. [cited 2023, February 10]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840122000839>.
3. Aboud SA, Altemimi AB, Al-Hilphy ARS. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. [Internet]. *Molecules*. 2019; Vol.24. 4125 p. [cited 2023, February 10]. Available from: <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>.

4. Mamedov N. Kh. Thermal processing of grain Teplovaya obrabotka zerna // Agrarnaya nauka. 2015. № 11. S. 28–30.
5. Zverev S., Sesikashvili O. Heating and dehydration of grain and cereals at a combined energy supply // Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 2018. Vol. 12. No. 1. P. 79–90. doi: 10.5219/840.
6. Mishurov NP, Davydova SA, Davydov AA. [Innovative methods of thermal processing of compound feeds]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2019; 3. 2-7 p.
7. Syrovatka VI. [Progressive technologies for the compound feed production]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2015; 11. 2-6 p.
8. Syrovatka VI. [Promising technologies for the mixed feed production]. Zootekhniya. 2016; 10. 7-12 p.
9. Nekrashevich VF, Kornilov SV, Vorob'eva IV. [Indicator for assessing the adequacy of grain micronization and determining its value for wheat]. Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im.P.A. Kostycheva. 2013; 2 (18). 66-69 p.
10. Kipriyanov FA, Savinykh PA. [The influence of micronization on the properties of feed grain]. Vestnik APK Verkhnevolzh'ya. 2023; 1. 16-23 p.
11. Adler YuP, Markova EV, Granovskiy YuV. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii. 2-e izd., pererab. i dopoln. [Planning an experiment when searching for optimal conditions. 2nd ed., revised. and additional]. Moscow: Nauka. 1976; 280 p.
12. Using Fisher's criterion to test the significance of a regression model. [Internet]. Website "Faculty of Food and Chemical Production of Altai State Technical University". 2016; [cited 2023, February 10]. Available from: <https://www.chem-astu.ru/science/reference/fischer.html>.

Authors:

Kipriyanov Fedor Aleksandrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Energy Resources and Technical Services Department, e-mail: kipriyanovfa@bk.ru
 Vologda State Dairy Academy named after N.V. Vereshchagin, Vologda, Russia
 Savinykh Petr Alekseevich - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Head of Livestock Mechanization Laboratory, e-mail: peter.savinyh@mail.ru
 Federal Agrarian Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia.