

С. А. Дрозд

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ВАЛЬЦАМИ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ЗЕРНОФУРАЖА

В статье представлены теоретические и экспериментальные исследования по определению максимального и минимального значений передаточного отношения между вальцами вальцового измельчителя, применяемого в первой стадии при двухстадийном измельчении зернофуража.

Ключевые слова: двухстадийное измельчение, передаточное отношение вальцов, сдвиг рифли, измельчение зерна.

S. A. Drozd

*Educational establishment «Belarusian state agrarian technical university»
Minsk, Republic of Belarus*

EXPERIMENTAL-THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE TRANSFER RATIO BETWEEN ROLLS IN THE TWO-STAGE GRINDING OF GRAIN

The article presents theoretical and experimental studies to determine the maximum and minimum values of the ratio between the rollers of a roller shredder used as a first stage in a two-stage grinding of grain fodder.

Keywords: two-stage grinding, transfer ratio of rollers, shift of the ribbons, grinding of grain.

Введение

В сельском хозяйстве для измельчения фуражного зерна наиболее широко применяются молотковые дробилки различных конструкций. Основными недостатками данных машин являются относительно высокая энергоемкость измельчения, неоднородность конечного продукта и переизмельчение материала.

В последние годы в сельском хозяйстве находят применение дробилки с вальцовыми рабочими органами. Рабочий процесс вальцовой дробилки основан на разрушении зерна за счет разных скоростей вращения рабочих органов – измельчающих вальцов. В зоне измельчения зерно раздавливается вальцами и вследствие разности их скоростей разрывается под воздействием рифлей. Основным их недостатком является низкая степень измельчения [1, 2].

Для снижения энергоемкости процесса и повышения качества измельчения зерна целесообразно применять двухстадийное измельчение, в котором на первой стадии зерно будет подвергаться предварительному воздействию на вальцовом измельчителе, а окончательное измельчение будет проводиться молотковой дробилкой [3].

Определение оптимального режима отношения окружной скорости вальцов на первой стадии измельчения позволит повысить качество измельчения и при этом снизить энергоемкость процесса измельчения.

Основная часть

При измельчении зерна на вальцовом измельчителе с разной частотой вращения вальцов на деформируемое зерно, кроме силы сжатия, оказывает воздействие сила сдвига.

Рассмотрим влияние передаточного отношения вальцов вальцовой дробилки на скорость деформации зерна. Замечено, что использование различной окружной скорости вальцов меняет траекторию движения рифлей, воздействующих на зерно.

Векторная схема, описывающая траекторию движения при деформации зерна вальцами с различной окружной скоростью, представлена на рисунке 1.

При одинаковой скорости вращения валцов движение рифлей при деформации зерна производится по траектории, описываемой вектором \overline{ab} , который соответствует величине сжатия зерна вальцами. При разной окружной скорости валцов к траектории движения рифлей при деформации зерна добавляется вектор сдвига $\overline{b\delta}$, который корректирует траекторию движения рифлей и делает ее соответствующей вектору $\overline{a\delta}$ [4].

Поэтому значение траектории движения рифлей при деформации зерна вальцами и изменяющемся передаточном отношении валцов определяется по формуле:

$$l_{\text{деф}} = \sqrt{(l_{\text{сж}})^2 + (l_{\text{сд}})^2}, \quad (1)$$

где $l_{\text{сж}}$ и $l_{\text{сд}}$ – величины сжатия и сдвига зерна вальцами.

Величина сжатия зерна вальцами и средний зазор для рифлей треугольного сечения определяются по формуле:

$$l_{\text{сж}} = d_{\text{ср}} - b_c; \quad (2)$$

$$b_c = b + h \frac{n_{\text{вн}} c}{\pi(D - h)}, \quad (3)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр зерновки, m ;

b – зазор между вальцами, m ;

D – диаметр вальца, m ;

h – высота впадин рифлей, m ;

$n_{\text{вн}}$ – количество впадин рифлей, шт .

На рисунке 2 изображена схема, которая используется при расчете передаточного отношения валцов.

Сдвиг валцов оказывает разрушительное воздействие на зерно при условии проникновения в него рифлей, это осуществляется на длине дуги

$$L_{AB} = \frac{\pi \cdot D \cdot \alpha_2}{360}, \quad (4)$$

где α_2 – угол воздействия сдвига, град ;

D – диаметр вальца.

В данном выражении угол воздействия сдвига – это часть окружности вальца, в которой рифли внедряются в зерно до такого значения, при котором сдвиг валцов будет оказывать разрушающее воздействие на зерно, и величина его

$$\alpha_2 = \arccos \left(1 - \frac{d_{\text{ср}} - b_c}{D} \right). \quad (5)$$

А так как вальцы вращаются с неодинаковой скоростью, длина дуги, которую пройдет быстроходный валец, за время прохождения тихоходным вальцом расстояния L_{DK} определяется по формуле:

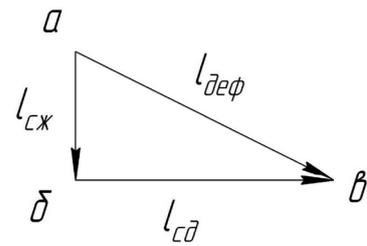


Рисунок 1. – Векторная схема, описывающая траекторию движения при деформации зерна вальцами с различной окружной скоростью

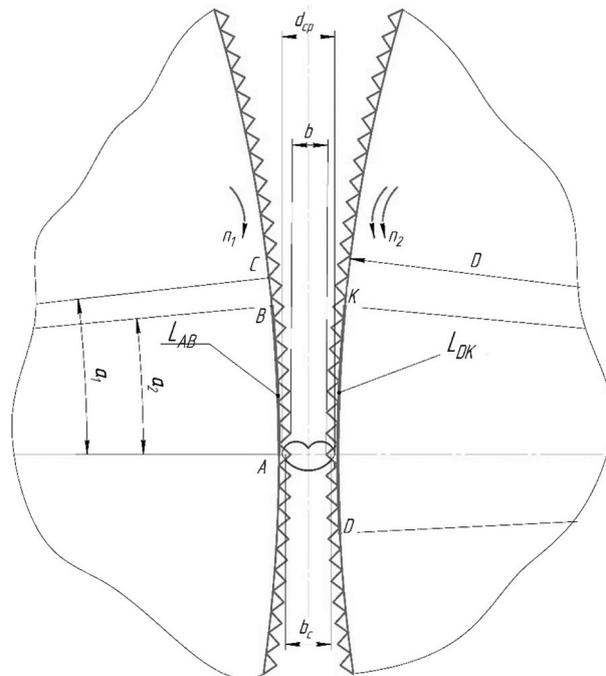


Рисунок 2. – Расчетная схема передаточного значения

$$L_{DK} = L_{AB} \cdot i, \quad (6)$$

где i – передаточное отношение зубчатого зацепления между вальцами, которое определяется через необходимые частоты вращения быстроходного $n_{\bar{o}}$ и тихоходного n_m валцов:

$$i = \frac{n_{\bar{o}}}{n_m}. \quad (7)$$

Величина сдвига в этом случае определяется как разность между длиной дуг быстроходного и тихоходного валцов:

$$l_{cd} = L_{DK} - L_{AB} = L_{AB} \cdot i - L_{AB} = L_{AB}(i - 1). \quad (8)$$

Подставив в условие (1) значения выражений (3), (4) и (7), получим формулу для определения длины сдвига:

$$l_{деф} = \sqrt{\left[d_{cp} - \left(b + h \frac{n_{en} c}{\pi(D-h)} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{\pi \cdot D \cdot \alpha_2}{360} (i - 1) \right) \right]^2}. \quad (9)$$

Изменение длины деформации зерновки будет изменять скорость ее деформации. Скорость деформации зерновки с учетом разной частоты вращения валцов будет равняться

$$v_{ИЗМ} = \frac{\sqrt{(l_{сжс})^2 + (l_{cd})^2}}{t}, \quad (10)$$

где t – время нахождения зерновки в зоне вальца, в которой оказывается разрушительное воздействие на зерно, c .

Подставив в выражение (10) формулы (2)–(8) и преобразовав его, получим уравнение для определения скорости деформации зерновки рифлеными вальцами с учетом передаточного отношения между вальцами:

$$v_{ИЗМ} = \frac{360 \cdot v_m \cdot \sqrt{\left(d_{cp} - \left(b + h \frac{n_e \cdot c}{\pi(D-h)} \right) \right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot D \cdot \arccos\left(1 - \frac{d_{cp} - b_c}{D}\right)}{360} \cdot i - \frac{\pi \cdot D \cdot \arccos\left(1 - \frac{d_{cp} - b_c}{D}\right)}{360} \right)^2}}{\pi \cdot D \cdot \arccos\left(1 - \frac{d_{cp} - b_c}{D}\right)}.$$

Путем подстановки в уравнения скорости деформации зерновки рифлеными вальцами с учетом передаточного отношения между ними ($v_{изм}$) различных числовых значений составляющих получим зависимость теоретических предпосылок (рисунок 3), которые показывают изменение скорости деформации зерновки в зависимости от окружной скорости медленно вращающегося вальца и передаточного отношения между вальцами.

Эта зависимость подтверждает теоретическую предпосылку того, что путем варьирования скоростью вращения валцов возможно значительно повысить скорость деформации зерна. Однако она не позволяет получить рациональное значение передаточного отношения валцового измельчителя.

Снижения удельной энергоемкости процесса измельчения зерна можно добиться путем снижения распорного усилия между вальцами, для этого необходимо применить сдвиг между вальцами, что приведет к снижению компрессионного сжатия зерна при его измельчении.

Для определения номинальных и конечных условий при деформации зерна сдвигом введем ограничение, по которому зерно при измельчении должно сохранить свою геометрическую целостность. Данное ограничение сделано с учетом исследований ряда авторов [5, 6, 7], показывающих, что большие частицы легче попадают под удар молотков и что частицы большей массы интенсивнее разрушаются ударом.

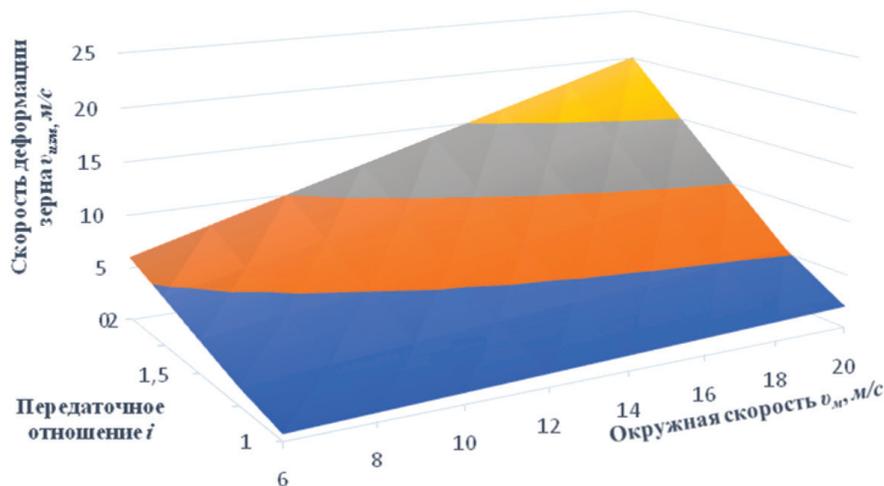


Рисунок 3. – Зависимость, описывающая изменение скорости деформации ($v_{изм}$) от окружной скорости медленно вращающегося вальца (v_m) и передаточного отношения между вальцами (i) при межвальцовом зазоре 1,0 мм

Также вводятся допущения, по которым зерно представляет собой шар средним диаметром d_{cp} ; сдвиг происходит по зерну; при сдвиге, не превышающем средний радиус зерна r_{cp} , сохраняется целостность зерна; при величине сдвига выше среднего радиуса r_{cp} до среднего диаметра d_{cp} сохраняется частичная целостность зерна; за средний диаметр зерна d_{cp} принимается среднее арифметическое значение толщины b_z и ширины h_z зерновки; за средний радиус зерна – половина его диаметра; сдвиг осуществляется с целью снятия распорного усилия зерновки путем снижения компрессионного сжатия в процессе измельчения зерна; существенное снижение компрессионного сжатия зерна наблюдается при значении сдвига, равном или превышающем значение среднего радиуса зерна. При сдвиге больше среднего диаметра зерна происходит полное разрушение зерна, при этом дальнейшее увеличение сдвига нецелесообразно.

Визуальная интерпретация допущений и ограничений представлена на рисунке 4.

В соответствии с ограничениями и схемой (рисунок 4) выразим условие, по которому величина сдвига должна находиться в диапазоне между средним радиусом и средним диаметром зерновки:

$$r_{CP} \leq l_{cd} \leq d_{CP}. \quad (11)$$

Подставим в условие (11) формулу (8), получим условие, ограничивающее величину передаточного отношения вальцов вальцового измельчителя:

$$\frac{r_{CP}}{L_{AB}} + 1 \leq i \leq \frac{d_{CP}}{L_{AB}} + 1, \quad (12)$$

где i – передаточное отношение между вальцами.

Из условия (12) получим выражения для определения максимального и минимального значений передаточного отношения между вальцами:

$$i_{MIN} = \frac{r_{CP}}{L_{AB}} + 1; \quad (13)$$

$$i_{MAX} = \frac{d_{CP}}{L_{AB}} + 1. \quad (14)$$

Подставив в выражения (13) и (14) формулы (3)–(5), получим уравнения для определения максимального и минимального значений передаточного отношения между вальцами:

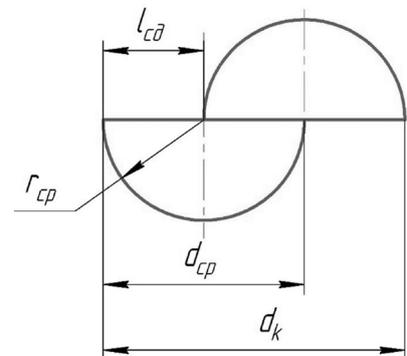


Рисунок 4. – Схема для определения рационального значения передаточного отношения вальцов

$$i_{MIN} = \frac{360(b_3 + h_3)}{2\pi D \arccos \left(1 - \frac{d_{cp} - \left(b + h \frac{n_{en} c}{\pi(D-h)} \right)}{D} \right)} + 1; \quad (15)$$

$$i_{MAX} = \frac{360(b_3 + h_3)}{\pi D \arccos \left(1 - \frac{d_{cp} - b_c}{D} \right)} + 1. \quad (16)$$

Подставим в формулы (15) и (16) числовые значения, получим графическую зависимость (рисунок 5), показывающую влияние межвальцового зазора на максимальное и минимальное значения передаточного отношения между вальцами.

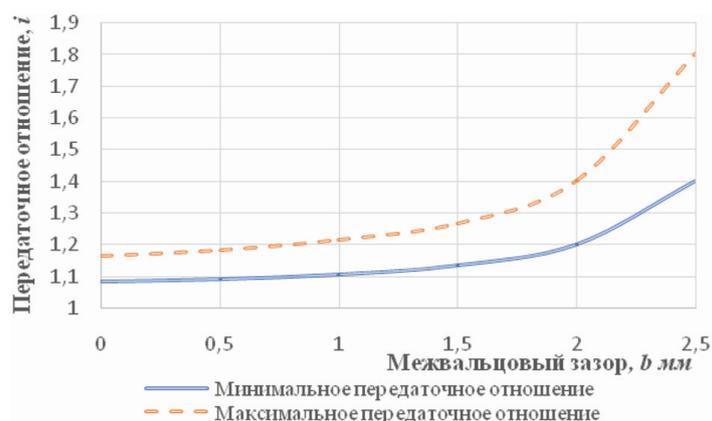


Рисунок 5. – Зависимость максимального и минимального значений передаточного отношения между вальцами от межвальцового зазора

Анализируя зависимости, представленные на рисунке 5, можно видеть, что на максимальное и минимальные значения передаточного отношения между вальцами влияет межвальцовый зазор, при его значении 0 мм передаточное отношение должно находиться в диапазоне 1,08–1,16; при межвальцовом зазоре 0,5 мм – 1,09–1,18; при 1,0 мм – 1,11–1,22; при 2,0 – 1,20–1,40.

Так как теоретические исследования по определению значения межвальцового зазора показали его значение 1,3–1,6 мм, можно сделать вывод, что теоретически рекомендуемое значение передаточного отношения между вальцами должно составить 1,12–1,28.

Для подтверждения полученных теоретических значений передаточного отношения между вальцами при двухстадийном измельчении были проведены экспериментальные исследования по изучению физического процесса деформации зерна при сдвиге вальцов.

Для данных целей была создана лабораторная установка для изучения влияния сдвига на разрушение зерна. Рабочая часть станда состоит из двух пластин (рисунок 6), на рабочих сторонах которых нарезаны рифли (рисунок 7), аналогичные применяемым при вальцовом измельче-

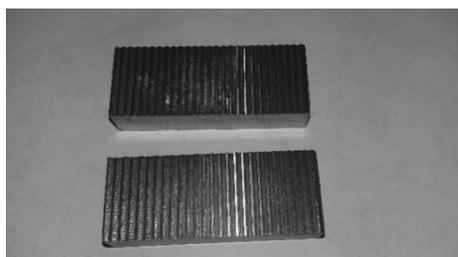


Рисунок 6. – Пластины

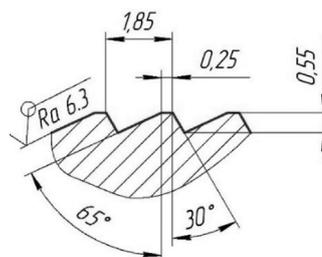
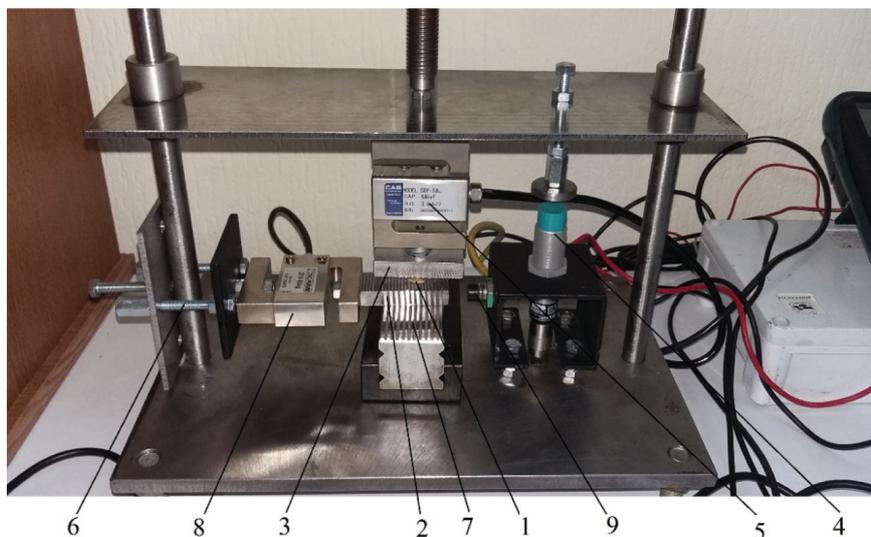


Рисунок 7. – Форма рифлей

нии. При этом верхняя пластина оказывает разрушающее воздействие на сжатие, а нижняя – на сдвиг.

На рисунке 8 представлен общий вид разработанного стенда для исследования сдвига.



- 1 – исследуемое зерно; 2 – нижняя пластина; 3 – верхняя пластина; 4 – датчик линейного перемещения (индуктивный);
5 – тензометрический датчик (фиксация сжатия); 6 – натяжной механизм; 7 – гладкая платформа;
8 – тензометрический датчик (фиксация сдвига); 9 – датчик линейного перемещения (датчик Холла)

Рисунок 8. – Общий вид стенда для исследования сдвига

Работа стенда (рисунок 8) заключается в следующем. Исследуемое зерно 1 кладется между нижней 2 и верхней 3 пластинами. Верхняя пластина 3 оказывает нагрузку сжатия перпендикулярно исследуемому зерну 1 при помощи винтового механизма стенда, до определенного расстояния между пластинами (1,0 и 1,5 мм), тем самым имитируя сжатие зерновки в вальцовом измельчителе. Расстояние между пластинами контролируется бесконтактным индуктивным датчиком 4. Сила, с которой воздействует верхняя пластина на зерно, определяется при помощи тензометрического датчика 5. Затем нижняя пластина приводится в параллельное движение относительно зерна при помощи натяжного устройства 6, тем самым имитируя сдвиг в вальцовом измельчителе. Для снижения силы трения нижняя пластина опирается на гладкую, отполированную платформу 7. Величина силы сдвига нижней пластины контролируется тензометрическим датчиком 8. Величина сдвига фиксировалась при помощи бесконтактного датчика линейного перемещения 9, работающего на эффекте Холла. Исследования проводились с одновременным параллельным замером как силы сдвига, так и силы, с которой давит верхняя пластина на зерно, а также расстояния между пластинами, тем самым фиксировались изменения силы сжатия и размера зерновки.

Данное исследование проведено на зернах ячменя кондиционной влажности с четырехкратной повторностью.

По результату проведенных исследований и полученным данным построены зависимости силы сжатия $F_{сж}$, силы сдвига $F_{сд}$ и степени деформации зерна Δl от величины сдвига $l_{сд}$, выраженного в расстоянии, которое прошла нижняя пластина относительно верхней.

На рисунке 9 и 10 представлены результаты исследуемых параметров от величины сдвига при расстоянии между пластинами 1,0 и 1,5 мм соответственно.

Анализируя полученные результаты, представленные на рисунках 9 и 10, следует отметить, что рациональная величина перемещения нижней пластины (длина сдвига), воздействующая на зерно, составляет 4 мм, последующее увеличение длины сдвига нецелесообразно, так как оно не приводит к дальнейшей деформации зерна и не оказывает на него воздействия. При перемещении пластин от 0 до 4 мм также наблюдается снижение величины силы сжатия и увеличение степени деформации. Сила, необходимая для образования сдвига, растет при сдвигании пластин

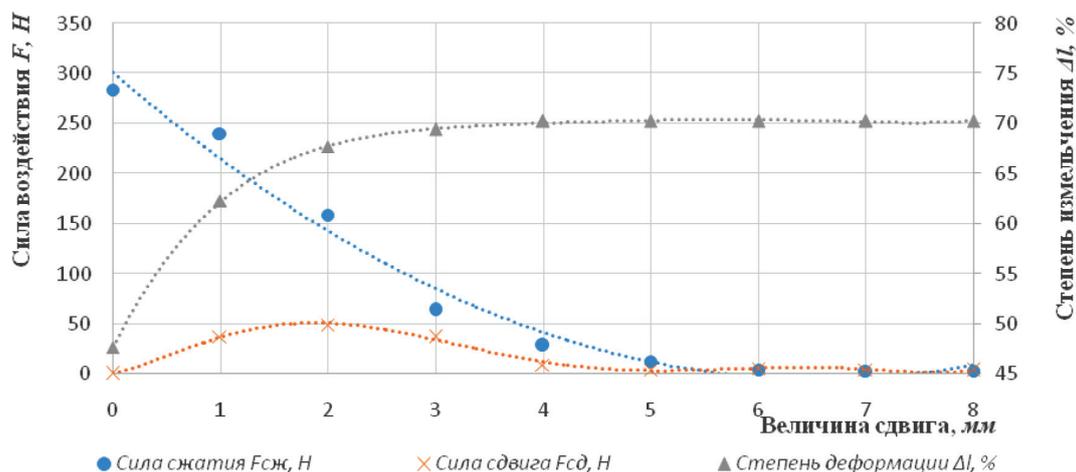


Рисунок 9. – Зависимость силы сжатия $F_{сж}$, силы сдвига $F_{сд}$ и степени деформации зерна Δl от величины сдвига пластин $l_{сд}$ при расстоянии между пластинами 1,0 мм (ячмень)

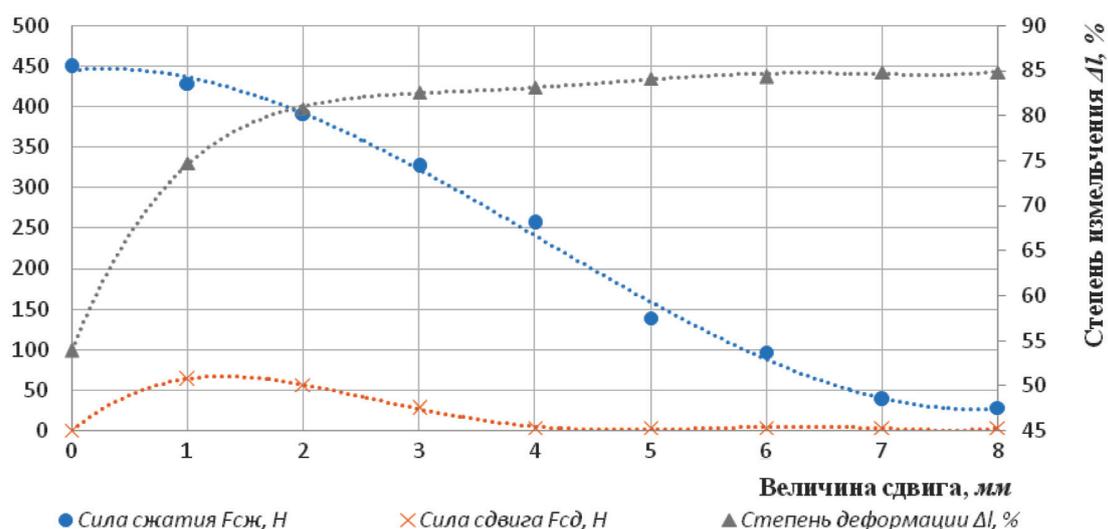


Рисунок 10. – Зависимость силы сжатия $F_{сж}$, силы сдвига $F_{сд}$ и степени деформации зерна Δl от величины сдвига пластин $l_{сд}$ при расстоянии между пластинами 1,5 мм (ячмень)

от 0 до 2 мм, затем снижается при сдвигании пластин от 2 до 4 мм до минимального значения, дальнейшее увеличение перемещения пластин происходит без существенного воздействия $F_{сд}$, что свидетельствует об отсутствии необходимости осуществления этого воздействия.

Сопоставление двух зависимостей с различным зазором между пластинами (рисунок 9 и 10) показывает, что его величина незначительно оказывает влияние на длину сдвига, при которой оказывается воздействие на зерно, при уменьшении зазора повышаются сила сжатия и сила, затрачиваемая на сдвиг, при этом увеличивается степень деформации зерна.

На основании экспериментально полученного интервала значения сдвига, которое составляет от 2 до 4 мм, рассчитано, что рациональное значение передаточного отношения между вальцами должно находиться в диапазоне 1,14–1,29, что практически соответствует значениям передаточного отношения, полученным теоретическим путем (рисунок 5) и составляющим 1,12–1,28.

Применение передаточного отношения в диапазоне 1,14–1,29 является рациональным с точки зрения энергоемкости и позволяет повысить степень воздействия вальцового измельчителя на зерно путем увеличения количества создаваемых в предварительно измельченном зерне микротрещин в результате воздействия сдвига, при этом, снижая прочность зерновки, максимально сохраняем целостность зерна, тем самым создавая благоприятные условия для последующего его разрушения на второй стадии измельчения (молотковой дробилке).

В процессе дальнейших исследований по выявлению рациональных режимов работы двухстадийного измельчения зернофуража определили оптимальное значение передаточного отношения между вальцами, которое составляет 1,24 [8].

Заключение

В результате теоретических исследований было получено уравнение для определения скорости деформации зерновки рифлеными вальцами с учетом передаточного отношения между вальцами.

Также получены уравнения для определения максимального и минимального значений передаточного отношения между вальцами, которые составили 1,14 и 1,29 соответственно.

В результате экспериментальных исследований передаточного отношения между вальцами были проверены и подтверждены полученные теоретические значения.

Применение передаточного отношения в диапазоне 1,14–1,29 позволяет повысить степень воздействия вальцового измельчителя на зерно путем увеличения количества создаваемых в предварительно измельченном зерне микротрещин в результате воздействия сдвига, при этом снижая прочность зерновки и максимально сохраняя целостность зерна, в результате чего образуются благоприятные условия для его последующего разрушения на второй стадии измельчения (молотковой дробилке).

Литература

1. Руководство по технологии комбикормов, белково-витаминно-минеральных концентратов и премиксов / В. А. Афанасьев [и др.]. – Воронеж: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности», 2008. – Т. 2. – 294 с.
2. Пунько, А. И. Разработка вальцового измельчителя зернофуража / А. И. Пунько, Д. И. Романчук // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 т. – Минск, 2011. – Т. 2. – С. 175–180.
3. Дашков, В. Н. Методика обоснования параметров двухстадийного измельчителя зерна / В. Н. Дашков, Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Вестник БГСХА. – 2014. – № 2. – С. 190–193.
4. Воробьев, Н. А. Теоретическое исследование передаточного отношения между вальцами при двухстадийном измельчении зернофуража / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд // Инновационная деятельность в модернизации АПК (материалы МНПК студентов, аспирантов и молодых ученых): в 3 т. – Курск, 2017. – Т. 1. – С. 215–218.
5. Елисеев, В. А. Исследование процесса измельчения зерна ударом: дис. ... канд. техн. наук / В. А. Елисеев. – Воронеж, 1962. – 189 с.
6. Соловьев, И. К. Исследование механики процесса дробления ингредиентов комбикормов в молотковых дробилках: дис. ... канд. техн. наук / И. К. Соловьев. – Ростов н/Д, 1961. – 225 с.
7. Шуб, Г. И. Исследование технологического процесса измельчения сырья комбикормового производства на молотковой дробилке: дис. ... канд. техн. наук / Г. И. Шуб. – Москва, 1966. – 218 с.
8. Исследование процесса двухстадийного измельчения зернофуража с целью создания энергоэффективных машин для переработки кормов / Н. А. Воробьев, С. А. Дрозд, Е. Ф. Турцевич // Итоговый отчет по договору с БРФФИ № 15М-106. – Минск: БГАТУ, 2017. – 100 с.