

УДК 635.655:664.8.039.4

UDC 635.655:664.8.039.4

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СОЕВЫХ БОБОВ НА КОРМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ЖИВОТНЫМ**

### **EXPERIMENTAL AND THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE PERFORMANCE OF A DEVICE FOR PROCESSING SOYBEANS INTO FEED FOR FARM ANIMALS**

Класнер Георгий Георгиевич  
кандидат технических наук, доцент

Klasner Georgy Georgievich  
Candidate of technical sciences, associate professor

Кузнецов Владимир Иванович  
кандидат технических наук, доцент

Kuznetsov Vladimir Ivanovich  
Candidate of technical sciences, associate professor

Алихаджиев Тимур Асламбекович  
студент  
3fedor\_zhigaylov\_sr\_3@mail.ru  
ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ им. И.Т. Трубилина»,  
Краснодар, Россия

Alikhadzhiev Timur Aslambekovich  
student  
3fedor\_zhigaylov\_sr\_3@mail.ru  
«Kuban State Agrarian University named after I.T.  
Trubilin», Krasnodar, Russia

Разработка технологии и оборудования для переработки сои является актуальным направлением агроинженерии, позволяющим рационально использовать растительные ресурсы и получать разнообразные продукты и корма. Целью данной статьи является создание подходящей технологии приготовления белковой суспензии, применяемой в условиях функционирования малого сельскохозяйственного предприятия или личного подсобного хозяйства. Был произведён расчёт и в качестве продуктов переработки соевых зёрен предусмотрено устройство, измельчающее данный материал в жидкую эмульсию для дальнейшего применения в хозяйствах. Данный измельчитель многофункционален и способен совмещать несколько операций одновременно: измельчение зёрен бобовых до мелкого помола; эмульгирование соевого белка и разделение белковой суспензии на части: соевое молоко и белковый осадок. Кинематическое поведение движения зёрен сои во влажном виде рассчитывается с помощью криволинейных бороздок, нанесённых на коническую абразивную поверхность, получается окончательная формула скорости движения зёрен. Размер и массовая производительность измельчителя определяются теоретически и экспериментально в зависимости от главных факторов, влияющих на процесс производства. Предложенная технология и оборудование несложны в эксплуатации и могут быть рекомендованы для использования в условиях небольшого производства.

The development of technology and equipment for soybean processing is an urgent direction of agroengineering, which allows rational use of plant resources and obtaining a variety of products and feeds. The purpose of this article is to create a suitable technology suspension used in the conditions of functioning of a small agricultural enterprise or a personal subsidiary farm. We made a calculation and provided a device working with soy grain processing products that grinds this material into a liquid emulsion for further use in farms. This shredder is multifunctional and capable of combining several operations simultaneously: grinding legume grains to fine grinding; emulsification of soy protein and separation of protein suspension into parts: soy milk and protein precipitate. The kinematic behavior of the movement of soybean grains in wet form is calculated using curved grooves applied to a conical abrasive surface, the final formula for the speed of grain movement is obtained. The size and mass productivity of the shredder are determined theoretically and experimentally depending on the main factors affecting the production process. The proposed technology and equipment is easy to operate and can be recommended for using in small production conditions.

Ключевые слова: СОЯ, ПРОДУКТЫ ИЗ СОИ, КИНЕМАТИКА ДВИЖЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, СОЕВОЕ МОЛОКО, ВЫСОКОБЕЛКОВЫЕ КОРМА

Keywords: SOY, SOY PRODUCTS, MOTION KINEMATICS, TECHNOLOGICAL EQUIPMENT, SOY MILK, HIGH-PROTEIN FEED

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-195-011>

<http://ej.kubagro.ru/2024/01/pdf/11.pdf>

### ***Введение***

Всё чаще кормление животных, птицы и рыбы в развитых странах не обходится без питания высокоэнергетическими, белковыми соевыми кормами и минеральными добавками, которые позволяют достичь высоких результатов в продуктивности сельскохозяйственных животных и птицы.

Выбор конкретной кормовой добавки хозяйства осуществляют на основе ее характеристик и свойств, требуемых в данном конкретном секторе производства [1-3].

Соевые бобы - важная культура, на протяжении многих лет, используется в качестве источника белка. Потребление соевых продуктов человеком и применение сои в кормах для животных во всем мире растет. В мире существует широкий спектр соевых продуктов [4].

Использование соевых бобов в качестве источников белка в различных формах (лущеный, шелушенный, мука, белковые концентраты) и в качестве источника жира (соевое масло) резко возросло благодаря увеличению производства сои, доступности, содержания важнейших аминокислот и жирных кислот [5-7].

По мнению ученых, одним из лучших способов приготовления соевых бобов для кормления сельскохозяйственных животных является приготовление жидкой белковой суспензии.

Так называемое соевое молоко, имеет высокую биологическую ценность, которая в свою очередь не уступает коровьему молоку. Кормовое соевое молоко содержит ценный растительный белок, по своему составу близким к белку животного происхождения, в котором присутствуют незаменимые аминокислоты, такие как, омега 3, лецитин, витамин В-12.

Однако на сегодняшний день не существует универсальных малогабаритных и маломощных устройств для переработки зерна сои,

которые используются в мелких предприятиях или для ведения небольшого количества скотоводства.

В данной статье целью является определение технологии производства продукта из соевого зерна. Для использования в естественных условиях функционирования малого сельскохозяйственного предприятия или личного подсобного хозяйства.

### *Методы и материалы*

Разработка универсального устройства, помогает перерабатывать соевые бобы для кормления сельскохозяйственных животных. Что позволяет предприятиям и даже личным подсобным хозяйствам иметь высокие показатели в продуктивности у животных.

Главной особенностью данного способа переработки соевых бобов, стало сочетание нескольких технологических операций.

В начале процесса зерно измельчается с последующим добавлением воды для получения белковой эмульсии. Результатом этих операций является разделение эмульсии по средством сита на молоко и окару.

Для осаждения и концентрирования соевого белка [8-10] рекомендовано добавлять соли кальция, что помогает в расщепление белка и воды на части в ускоренном темпе. (рисунок 1).

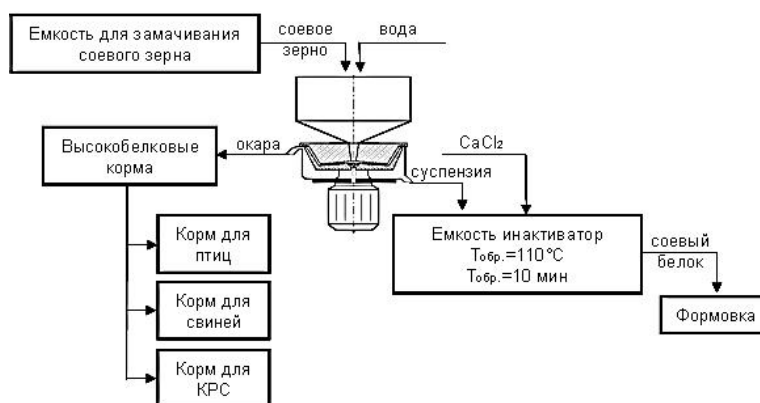


Рисунок 1 – Схема получения белковых кормов

Для приготовления продуктов и кормов богатых белком сои необходим измельчитель, который облегчает их готовку.

Главной функцией измельчителя является перетирание бобов сои в тонкодисперсное состояние.

Происходит это за счет прохождения сои между поверхностями бороздок усеченного конуса и абразивом. (Рис. 2).

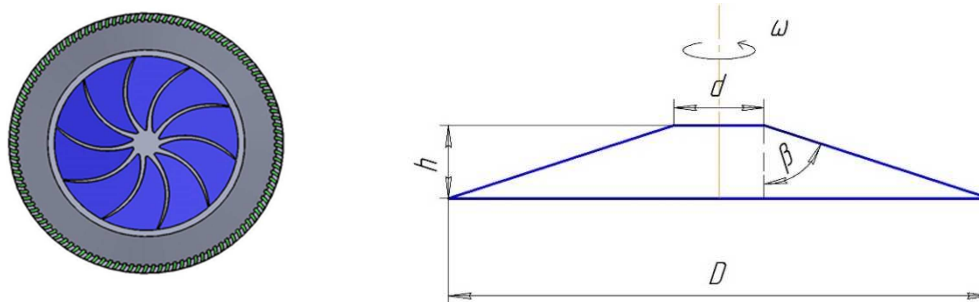


Рисунок 2 – Вид общий рабочего абразивного органа

При работе измельчающего аппарата, соевые бобы находятся на абразивной поверхности конуса.

Зерно сои имеет положение в двух координатах, которые описывают его дальнейшее движение.

Координата  $r$  показывает расстояние от верхней точки абразивного рабочего органа до положения зерна.  $\theta$  является углом поворота радиус – вектора, который описывает движение тени по поверхности конуса.

Для облегчения расчетов дальнейших размеров, полагаем, что конус не усечен.

Первым делом необходимо рассчитать уравнение движения, которое представляет собой [1, 4]:

$$r = r_0 \text{ch}((bt) - 1); \tag{1}$$

$$\varphi = \frac{q^2 t^2}{2}; \tag{2}$$

При неподвижной системе отсчета угол поворота необходимо находить как:

$$\theta = \omega t - \varphi;$$

углы  $\theta$  и  $\varphi$  будут направлены в противоположные стороны.

В дальнейшем необходимо приравнять формулы (1) и (2) для получения уравнения траектории движения:

$$r = r_0(\operatorname{ch}(\frac{b}{a}\sqrt{2\varphi}) - 1); \quad (3)$$

Если значения данных выражений  $f, \sin\beta, \cos\beta$  будут меньше единицы, то ими пренебрегают и график траектории движения примет вид:

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ (Рис. 3).}$$

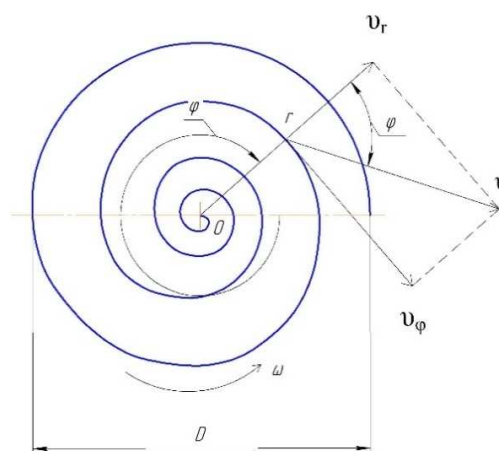


Рисунок 3 – Траектория движения отдельно взятого зерна:

$D$  – диаметр рабочего органа (абразивного диска),  $v_\varphi$  – радиальная и азимутальная компонента скорости  $v$ ,  $\psi$  – промежуток между вектором скорости  $v$  и образующей  $r$ .

Отсчет угла принимается по часовой стрелке. При увеличении величины  $r$  скорость  $v_r$  будет иметь вид:  $v_r = br$ .

Если значение  $r$  будет возрастать, то данное выражение  $\frac{gfr\sin\beta}{2v_r}$  останется постоянным.

Учитывая все данные, то наша зависимость примет вид:

$$v_\varphi = \omega r - \frac{r^2}{2v_r}(q^2 + f\omega^2 \sin\beta \cos\beta); \quad (4)$$

Проанализировав выражение (4) можно сказать, что значения  $f\omega^2 \sin\beta \cos\beta$  и  $q^2$  не учитывают, так как  $f < 1$ .

$v_\varphi$  рассчитывается как:

$$v_\varphi = -\frac{r^2 q^2}{2v_r} = -\frac{r^2 q^2}{2\sqrt{b^2 r^2 + 2ar}}; \quad (5)$$

Знак « - » показывает на направление отсчета угла  $\varphi$ .

Объемная производительность измельчителя  $Q$  [3] зависит от диаметра измельчающего диска и радиальной скорости зерна данного материала.

$$Q = \pi D Z v_r = \pi D Z \sqrt{b^2 r^2 + 2ar}; \quad (6)$$

где  $Z$  – величина зерна между конической поверхностью и крышкой устройства.

Для нахождения массовой производительности  $Q$  необходимо учитывать величины плотности зерна  $\rho$  и объемной производительности  $Q$ :

$$G = \rho \cdot Q; \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность зерна сои, кг/ м<sup>3</sup>

$Q$  – Объемная производительность м<sup>3</sup>/час;

Формула (6) применяется, если на поверхности абразивного конуса нет канавок, контролирующих работу инструмента.

Рисунок 2 показывает положение канавок, изогнутых под углом  $a$  для более интенсивного измельчения. В данном случае рассматривается, положение когда угол  $\psi$  больше угла наклона бороздок  $a$ , а также производятся замеры и вычисления необходимых параметров.

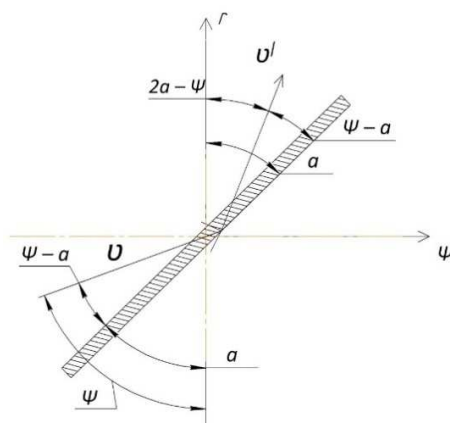


Рисунок 4 – Схема соударения зерна с бороздками (заштриховано)

На изображении данной схемы видно, что при угле  $\psi > \alpha$ ,  $v_1$  и  $v'$  являются скоростями зерен после соударения с бороздкой.

После этого можно утверждать, что угол между вектором скорости падающего зерна и бороздкой будут равны  $\psi = \alpha$ .

Исходя из вышеперечисленных утверждений, делаем вывод, что угол между радиальным направлением и направлением скорости отражающих бороздок будет иметь вид:  $\alpha - (\psi - \alpha) = 2\alpha - \psi$ .

Скорость движения зерна в результате отражения от бороздок будет выглядеть следующим образом:

$$v'_r = v' \cos(2\alpha - \psi) = v \cos(2\alpha - \psi); \quad (8)$$

Когда значение угла имеет вид  $\alpha = \frac{\psi}{2}$ , то будет наблюдаться зависимость скорости  $v_r^1$ , которая достигнет максимального значения.

В свою очередь после того как зерно отразится, составляющая скорость прекратит своё существование.

После этого можно сказать, что высокая производительность будет приходиться на угол наклона бороздок  $\alpha = \frac{\psi}{2}$ .

А вот при достижении равенства углов  $\alpha = \psi$ ; утверждается, что  $v'_r = v_r$  и зерна будут следовать параллельно бороздкам.

Производительность устройства останется неизменной, даже такой же как если бы не было лопаток.

Если соблюдается условие, когда угол наклона бороздок  $\alpha$  больше  $\psi$ , зерно способно падать на лопатки из внутренней части. Формула (8) остается неизменной.

А вот когда происходит увеличение угла  $\alpha$  от  $\psi$  до  $\frac{\psi}{2} + 45^\circ$ , то замечается уменьшение производительности устройства практически до нуля.

В случае когда происходит увеличение угла  $\alpha > \frac{\psi}{2} + 45^\circ$  зерно прекращает свой выход из измельчителя.

Поэтому максимальная производительность устройства достигается при  $\alpha = \frac{\psi}{2}$ . Отсутствия оказания какого-либо влияния на движение бороздок и зерна, характеризуется критическим углом наклона  $\alpha = \psi$ .

В случае когда  $\alpha$  будет превышать  $\psi$  будет наблюдаться резкий спад производительности и поэтому для нас он считается не выгодным.

Данная модель движения зерна сои является упрощенной и показывает виденье того как должны располагаться бороздки на диске измельчителя.

Однако вывод о том, что существует приемлемый угол падения производительность до нуля, подкрепляется практическими исследованиями измельчителя.

Учитывая требования к технологическим линиям изготовления соевого молока, цель данного исследования доказать на теории все полученные зависимости.

Экспериментально изучалось влияние рабочих параметров конструкции измельчающего станка на производительность.

Был создан прототип (Рис. 4), на основе которого производились эксперименты при различных условиях для обоснования конструктивных и рабочих параметров дробилки.



Рисунок 4 – Общий вид опытного образца

Для того, чтобы провести замеры энергетических свойств нам необходимо использовать прибор К-505, который обладает всеми нужными параметрами.



В случае когда необходимо провести замеры количественного выхода белка необходимо наличие таких вспомогательных приборов как лабораторные колбы, мерные стаканчики и электронные весы.

Основной параметр это регулирование частоты вращения электродвигателя, для этого использовался реостат, который в свою очередь был установлен на измельчителе с последующей настройкой его до нужных значений. Замеры температуры экстрагента проводились с помощью ртутного термометра со шкалой до 130 °С. Расстояние между абразивными дисками измеряли штангенциркулем, а полученный объем экстрагента получали объемным способом.

Для улучшения процесса измельчения замоченных соевых бобов выбираются главные и значимые критерии оценки: выход белка в экстрагент ( $G$ ), производительность установки ( $Q$ ) и затраты энергии на процесс ( $N$ ) (таблица 1).

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

Уровень	Факторы			
	Угловая скорость вращения нижнего диска $\omega$ , рад/с	Величина зерна абразива $R_a$ , мкм	Угол направления бороздок $\alpha$	Зазор между дисками $h$ , мм
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Верхний (+1)	172	50	$\alpha-120^\circ$	5
Основной (0)	169	250	$\alpha-90^\circ$	4
Нижний (-1)	141	450	$\alpha-60^\circ$	3

### ***Результаты***

План Кифера использовался при проведении экспериментальных исследований.

При проведении первичных экспериментальных исследованиях были выявлены наилучшие критерии для оптимизации процесса: выход белка в экстрагент -  $G$  (отклик  $Y_1$ ), производительность установки для измельчения зерна ( $Q$ ) и расход энергии на процесс -  $N$  кВт (отклик  $Y_2$ ).

Уравнение регрессии второго порядка (программа Statistica v. 5.5 фирмы StatSoft (USA), имеет вид:

$$Y_1 = 0,36357 - 0,00147 \cdot X_1 - 0,00497 \cdot X_2 - 0,0858 \cdot X_3 - 0,0658 \cdot X_4 \\ + 0,000021 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0000135 \cdot X_1^2 + 0,0000348 \cdot X_2^2 \\ + 0,00083 \cdot X_3^2 + 0,00063 \cdot X_4^2$$

$$N_1 = 1,5581 - 0,00019 \cdot \omega - 0,00011 \cdot R_a - 0,1076 \cdot \alpha_3 + 0,10863 \cdot h \\ - 0,00001 \cdot \omega \cdot h + 0,00001 \cdot R_a \cdot \alpha + 0,0006 \cdot \alpha \cdot h + 0,00897 \cdot \alpha^2 \\ + 0,013897 \cdot h^2$$

$$Y_2 = 10,27083 - 1,99227 \cdot X_1 + 2,36817 \cdot X_2 - 2,29653 \cdot X_3 - 5,04557 \cdot X_4 \\ + 0,00005 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,0002 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0004 \cdot X_1 \cdot X_4 \\ + 0,0002 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0002 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0003 \cdot X_3 \cdot X_4 \\ + 0,019 \cdot X_1^2 - 0,0229 \cdot X_2^2 + 0,02223 \cdot X_3^2 + 0,04897 \cdot X_4^2$$

$$T_2 = 70,5946 - 0,00513 \cdot \omega + 0,0343 \cdot R_a - 10,01193 \cdot \alpha - 21,30593 \cdot h \\ + 0,0008 \cdot \omega \cdot h + 0,0031 \cdot R_a \cdot h + 0,0134 \cdot \alpha \cdot h - 0,0001 \cdot R_a^2 + 1,0943 \cdot \alpha^2 \\ + 1,96527 \cdot h^2$$

$$Y_3 = 21,35202 + 3,9244 \cdot X_1 + 5,452133 \cdot X_2 + 4,831567 \cdot X_3 - 5,29423 \\ \cdot X_4 + 0,0009 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0005 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,000086 \cdot X_1 \cdot X_4 \\ + 0,0015 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,0007 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,000089 \cdot X_3 \cdot X_4 \\ - 0,0379 \cdot X_1^2 - 0,05217 \cdot X_2^2 - 0,04760 \cdot X_3^2 + 0,0514 \cdot X_4^2$$

$$g = -83,4565 + 0,0236 \cdot \omega + 0,017367 \cdot R_a - 8,61847 \cdot \alpha - 3,9973 \cdot h \\ + 0,000006 \cdot \omega \cdot R_a - 0,000032 \cdot \omega \cdot \alpha - 0,001 \cdot \omega \cdot h + 0,0007 \cdot R_a \cdot \alpha \\ - 0,016 \cdot R_a \cdot h - 0,0261 \cdot \alpha \cdot h - 0,00007 \cdot R_a^2 + 1,0806 \cdot \alpha^2 \\ + 1,11143 \cdot h^2$$

В результате полученных математических моделей, были выявлены оптимальные координаты и построены поверхности, соответствующие производительному эффекту, параметров режима проектирования измельчителя.

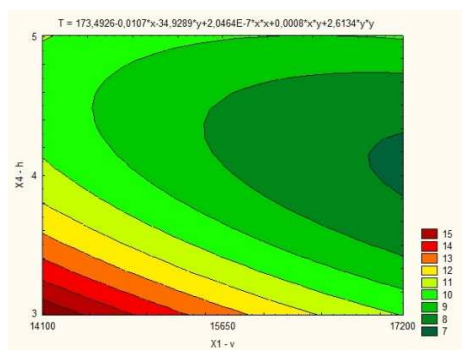


Рисунок 5 – Сечение поверхности производительности установки на плоскость  $X_1(\omega)$  от  $X_4(h)$ :

Ось абсцисс  $X_1(\omega)$  – скорость вращения абразивного диска; Ось ординат  $X_4(h)$  – зазор между двумя абразивными дисками.

Из рисунка 5 видим, что при росте скорости вращения ( $\omega$ ) диска и увеличения расстояния ( $h$ ), происходит сокращение времени ( $t$ ), используемое в процессе производства измельчения сои.

Были получены оптимальные значения необходимые для данного процесса: так время  $t = 7$  секунд достигается при использовании скорости вращения абразивного диска  $\omega = 168 \dots 172$  рад/с и при расстоянии между дисками  $h = 3.9 \dots 4.2$  мм.

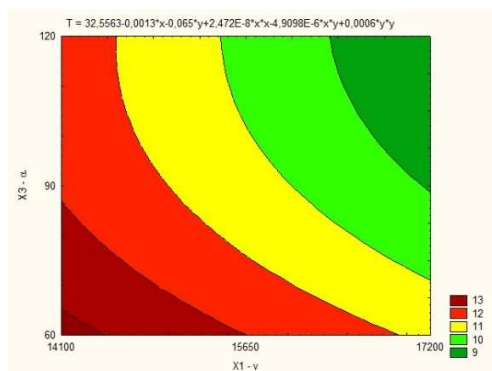


Рисунок 6 – Сечение поверхности производительности на плоскость  $X_1(\omega)$  от  $X_3(\alpha)$ :

Ось абсцисс  $X_1(\omega)$  – скорость вращения абразивного диска; Ось ординат  $X_3(\alpha)$  – угол кривизны нанесенных бороздок на поверхность нижнего абразивного диска

Основываясь на полученных данных, показанных на рисунке 6, можно сказать, что с увеличением значения угла изгиба бороздки ( $\alpha$ ) время ( $t$ ), используемое в процессе, уменьшается.

Это говорит о том, что направляющие бороздки, ориентированные более чем на  $90^\circ$ , действуют как направляющие канавки, соответствующие процессу вращения диска, что служит быстрому проникновению зерна в зону разделения.

Поэтому наилучший угол наклона бороздки должен иметь границы  $\alpha=90^\circ \dots 120^\circ$ .

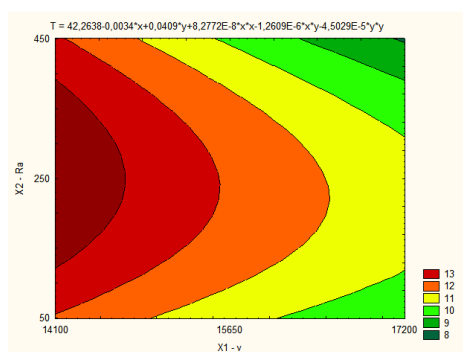


Рисунок 7 – Сечение поверхности производительности на плоскость  $X_1(\omega)$  от  $X_2(Ra)$ :

Ось абсцисс  $X_1(\omega)$  – скорость вращения абразивного диска; Ось ординат  $X_2(Ra)$  – шероховатость абразивного диска (размер зерна абразива)

На рисунке 7 показано, что время зависит от скорости вращения ( $\omega$ ) и значения приложенной шероховатости ( $R_a$ ) нижнего абразивного диска.

Так при вращении нижнего абразивного рабочего органа со скоростью  $\omega=170 \dots 172$  рад/с и при величине зерна абразива  $R_a = 440 \dots 450$  мкм время, используемое в процессе, составит  $t=8$  сек.

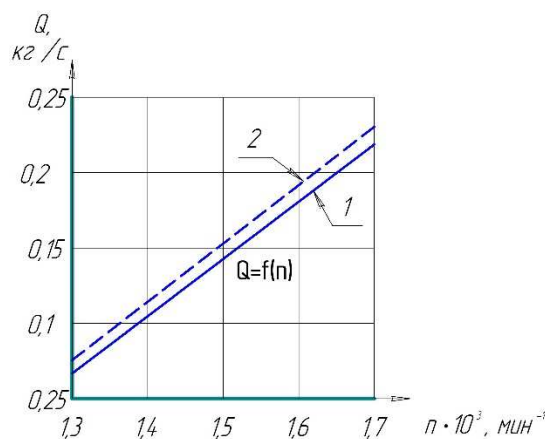


Рисунок 8 – Влияние частоты вращения абразивного рабочего органа на производительность установки:

1 – экспер.; 2 – теорет. ось абсцисс (n) – скорость вращения абразивного диска; ось ординат (Q) – производительность.

Графически представленное расхождение теоретических и экспериментальных исследований по критерию Фишера, по параметру влияния частоты вращения абразивного рабочего органа на производительность установки не превышает 5%.

### ***Заключение***

Исследование показало, что скорость вращения ( $\omega$ ), величина зерна абразива (зернистость) ( $R_a$ ) абразивного диска, а также расстояние (h) между дисками оказывают значительное влияние на процесс извлечения белка.

Теоретические исследования помогли выявить ряд значений данной установки: наиболее важные параметры измельчителя соевых зерен; уравнение движения зерна на поверхности усеченного конуса; формулы объемной и массовой производительности.

Исследования помогли определить наиболее значимые параметры процесса измельчения зерна в виде замачивания с дальнейшим извлечением белка, следовательно, при скорости вращения  $\omega = 170...172$  рад/с,

зернистость абразива  $R_a = 440...450$  мкм, зазор между абразивными рабочими органами  $h=3,9...4,2$  мм и при угле кривизны  $\alpha = 90^\circ...120^\circ$ .  
Время достигается за  $t = 7...8$  сек..

Чтобы доказать теоретические предположения были проведены экспериментальные опыты, в которых рассматривалось влияние скорости вращения диска ( $n$ ) на производительность ( $Q$ ). Разность между исследованиями не превышало, как правило, 5 %.

Все полученные расчеты, параметры и режимы измельчителя помогают развиваться конструкторским организациям в последующих разработках, а также при улучшении имеющегося кормоприготовительного оборудования в предприятиях.

Это способствует дальнейшему повышению качества изготавливаемого продукта и развитию идей в данной сфере деятельности, а также приведет к снижению затрат в приготовлении и получении качественного корма для сельхоз хозяйств и предприятий.

**Благодарности.** Теоретические и экспериментальные исследования проведены при государственной поддержки молодых российских ученых грант Президента РФ - договор № 075-15-2022-589 (№ МК-349.2022.5)

#### **Список литературы**

1. В. Ю. Фролов Оптимизация параметров измельчителя замоченного зерна сои / В. Ю. Фролов, Д. П. Сысоев, Г. Г. Класнер. // Сельский механизатор. – 2015. – № 3. – С. 24 – 27.
2. Soybeans in poultry feeding / Горб С.С., Класнер Г.Г. // Уральский научный вестник. – 2016. – Vol. 10. – No 2. – P. 238-239.

#### **References**

1. V. Ju. Frolov Optimizacija parametrov izmel'chitelja zamochennogo zerna soi / V. Ju. Frolov, D. P. Sysoev, G. G. Klasner. // Sel'skij mehanizator. – 2015. – № 3. – S. 24 – 27.
2. Soybeans in poultry feeding / Gorb S.S., Klasner G.G. // Ural'skij nauchnyj vestnik. – 2016. – Vol. 10. – No 2. – P. 238-239.