



Результаты теоретического определения конструктивных и кинематических параметров рабочих органов шелушительной машины

А. В. Анисимов*, Ф. Я. Рудик

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (г. Саратов, Российская Федерация)

*anisimovaleksan@mail.ru

Введение. Шелушение перед помолом увлажненного зерна позволяет удалить с поверхности большую часть внешних оболочек с находящимися на них загрязнениями. Наиболее распространенными в настоящее время машинами для шелушения являются устройства, работающие по принципу «сжатие и трение», в которых зерновки перемещаются по фрикционным поверхностям рабочих органов. Целью данного исследования является установление и выбор конструктивных и кинематических параметров рабочих органов машины, при которых наиболее эффективно выполнялся бы процесс шелушения; проведение энергетической оценки процесса шелушения зерна.

Материалы и методы. Для определения зависимости конструктивных и режимных параметров машины от угла наклона и угла выштамповки ситового цилиндра была составлена схема движения зерновки по наклонному цилиндру с использованием элементов теории движения точки по шероховатым поверхностям. Движение зерновки по поверхности цилиндра рассмотрено методами аналитической динамики.

Результаты исследования. Выражены значения геометрических параметров положения частицы в точке A в функции от угла наклона цилиндра α и угла, характеризующего форму наклонной линии выштамповки цилиндра β . Проведена энергетическая оценка процесса шелушения зерна. При радиусе ситового цилиндра $R_0 = 0,135$ м, ширине рабочего кольцевого зазора $k = 0,01$ м, длине цилиндра $L = 0,4$ м, горизонтальном расположении цилиндра, угловой скорости вала $\omega = 90$ рад/с, угле наклона выштамповки $\beta = 22^\circ$ расчетная мощность составила $P = 4,5$ кВт.

Обсуждение и заключение. В результате проведенного анализа траектории движения зерна, находящегося на поверхности цилиндра, были получены выражения, связывающие форму наклонной линии выштамповки цилиндра, характеризующую углом β , с углом наклона α и радиусом R_0 цилиндра, угловой скоростью вала и фрикционными свойствами зерна. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для приближенного определения конструктивных и кинематических параметров шелушительной машины.

Ключевые слова: очистка поверхности зерна, шелушение, фрикционная поверхность, ситовой цилиндр, энергетическая оценка процесса

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Анисимов, А. В. Результаты теоретического определения конструктивных и кинематических параметров рабочих органов шелушительной машины / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202004.594-608 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 594–608.

© Анисимов А. В., Рудик Ф. Я., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Results of Theoretical Definition of Structural and Kinematic Parameters of Peeling Machine Working Elements

A. V. Anisimov*, F. Ya. Rudik

Saratov State Agrarian University (Saratov, Russian Federation)

**anisimovaleksan@mail.ru*

Introduction. Peeling the moistened grains before grinding allows removing most of the outer shells with impurities on them from the grain surface. At the present time, the most commonly used machines for peeling are devices operating on the principle of “compression and friction”, in which the grains move along the friction surfaces of the working bodies. The aim of this study is to define and select structural and kinematic parameters of the machine working bodies, which would most effectively perform the process of peeling, and to make energy assessment of grain peeling.

Materials and Methods. To identify the dependence of the machine design and operating parameters on the inclination angle and punching angle of the sieve cylinder, a diagram of the movement of the grain along the inclined cylinder was drawn up using elements of the theory of the motion of material point on rough surfaces. The motion of grains on the cylinder surface is analyzed by the methods of analytical dynamics.

Results. The values of the geometric parameters of the particle position at point A are expressed as a function of the cylinder inclination angle α and the angle characterizing the shape of the inclined line of stamping of the cylinder β . Energy assessment of grain peeling process was made. With the radius of the sieve cylinder $R_0 = 0.135$ m, the width of the working annular gap $\kappa = 0.01$ m, the length of the cylinder $L = 0.4$ m, the horizontal arrangement of the cylinder, the angular velocity of the shaft $\omega = 90$ rad/s, the angle of inclination of the stamping $\beta = 22^\circ$, the calculated power was $P = 4.5$ kW.

Discussion and Conclusion. As a result of analyzing the motion trajectory of the grain located on the cylinder surface, there have been proposed the formulas relating the shape of the inclined punching line of the cylinder, characterized by the angle β , to the inclination angle α , the radius R_0 of the cylinder, the shaft angular velocity and the grain frictional properties. The obtained analytical dependencies can be used for the approximate definition of the peeling machine design and kinematic parameters.

Keywords: grain surface cleaning, peeling, friction surface, sieve cylinder, process energy evaluation

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Anisimov A.V., Rudik F.Ya. Results of Theoretical Definition of Structural and Kinematic Parameters of Peeling Machine Working Elements. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):594-608. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.594-608>

Введение

Основной задачей сортового помола пшеницы является максимальное разделение на отдельные фракции частей внешних оболочек, зародыша и эндосперма. На разрезе зерновки пшеницы четко отслеживается углубление, проходящее по всей его продольной оси, где внешние оболочки заворачиваются внутрь и образуют так называемую бороздку, имеющую различную фор-

му у разных сортов и типов пшеницы. Присутствие такого сложного по форме и труднодоступного для рабочих органов обрабатывающих машин объекта значительно усложняет технологический процесс отделения эндосперма от внешних оболочек зерновки и существенно затрудняет процесс предварительного шелушения зерна перед помолом. Возможность полного удаления внешних оболочек зерна (вместе с при-

сутствующими на них загрязнениями) перед помолом позволила бы значительно упростить технологию переработки зерна в муку. Наличие семенных оболочек, сросшихся с пигментной полосой и плотно соединенных с эндоспермом в зоне бороздки, делает практически невозможным полное удаление оболочек с поверхности зерновки, а следовательно, нельзя направить на размол полностью очищенные от оболочек зерновки¹. Многочисленные исследования в области очистки поверхности зерна перед помолом как важной технологической операции подготовки зерна к переработке не привели к однозначному решению проблемы удаления внешних оболочек [1–4].

Операция шелушения увлажненного зерна в шелушительной машине с подвижными абразивными дисками осуществляется за счет факторов внешнего и преобладающего внутреннего трения при его транспортировании в ограниченном кольцевом объеме рабочей зоны [5–8]. Интенсивность взаимодействия зерновок в стесненных условиях обуславливается значением коэффициента заполнения рабочей зоны машины, определяющего плотность укладки зерновой массы, временем нахождения зерна в рабочей зоне и непрерывным интенсивным перемешиванием зерновой смеси, что создает предпосылки для эффективного и равномерного удаления внешних оболочек зерновок [9–11]. Значительно повысить эффективность шелушения за счет лучшего перемешивания зерна, движущегося в кольцевом рабочем зазоре между ситовым цилиндром и абразивными дисками, можно, сделав направляющие выштамповки на ситовом цилиндре [12].

Одним из составных элементов технологического процесса шелушения зерна в машинах такого типа (работающих по принципу «сжатие и трение»)

является перемещение обрабатываемого зерна по фрикционным поверхностям рабочих органов этих машин. При этом количественные и качественные показатели этого технологического процесса в значительной степени обуславливаются конструктивными параметрами и кинематическими элементами движения самих рабочих органов и кинематическими элементами движения зерновок по ним. Эти конструктивные параметры и кинематические элементы являются объектом данного исследования.

Обзор литературы

Научной проблемой отделения оболочек зерна пшеницы перед помолом в разное время занимались Г. А. Глобенко, И. Р. Дударев, И. В. Настагуни, Э. Г. Нуруллин и др. Зерно, обработанное в обоечной машине, подвергалось гидротермическому воздействию в течение получаса с дальнейшим шелушением в машине типа ЗШН с абразивными дисками. В процессе обработки были удалены наружные оболочки в количестве 2–4 % от массы зерновки, при этом зольность обработанного зерна снижалась на 0,015–0,065 %. Зольность сортовой муки из шелушенного зерна на 0,010–0,035 % ниже, чем из зерна, обработанного по обычной технологии. В исследованиях И. Р. Дударева и И. В. Настагунина рассмотрена эффективность применения для шелушения роторно-лопастной фрикционной шелушительной машины. Полученные результаты показали, что для максимального удаления внешних оболочек, зерно необходимо подвергнуть гидротермической обработке с отволаживанием в течение 3–6 часов. При обойном помолу шелушение зерна позволяет получить микробиологически чистую муку [13–15]. Минимальные энергозатраты на шелушение наблюдаются у максимально увлажненного зерна, но

¹ Галимзянов Д. А. Интенсификация подготовки зерна для мельниц малой производительности: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 146 с.

это происходит лишь до определенного значения влажности. При влажности выше 17 % зерновка становится пластичной, при этом энергоемкость процесса отделения оболочек растет, в том числе и за счет залипания рабочих поверхностей машин (абразивных дисков, ситового цилиндра). Уменьшается производительность шелушильной машины, а следовательно, и всей поточно-технологической линии. Кроме того, конечная продукция повышенной влажности хуже хранится [16].

Анализируя исследования по данной тематике, можно сделать вывод, что достичь практически полного удаления внешних оболочек зерна в настоящее время никому из исследователей не удалось [17–20]. Сложное анатомическое строение зерновки не позволяет этого достичь, используя существующее оборудование. Поэтому современные исследования направлены в первую очередь на поиск оптимальной степени шелушения зерна перед переработкой в муку и определение оптимальных конструктивных и режимных параметров существующих машин для шелушения.

Анализ процесса движения зерна в шелушильных машинах с подвижными абразивными дисками и неподвижным цилиндром позволил установить, что на зерновую массу, транспортируемую в ограниченном кольцевом объеме рабочей зоны шелушильной машины, действует целый комплекс сил, которые можно разделить на следующие группы: 1) диссипативные силы между движущимися зёрнами, включающие касательные и нормальные движущиеся и тормозящие силы внутреннего сопротивления зерна; 2) силы внешнего механического воздействия рабочих органов на контактирующие с ними зерна: нормальная реакция ситового

цилиндра, касательная к цилиндру сила сопротивления сдвигу зерен по его перфорированной поверхности (сила внешнего трения), перпендикулярная сила воздействия на зерновку со стороны рабочих фрикционных поверхностей вращающихся абразивных дисков при их относительном перемещении в зерновой массе, касательная сила сопротивления сдвигу зерновок по рабочим фрикционным поверхностям подвижных абразивных дисков; 3) силы, обусловленные инерциальностью системы координат, в которой рассматривается траектория перемещения зерен: сила тяжести, радиально направленная центробежная сила, обуславливающая появление нормальных ускорений зерновок и перемещение их по развёртывающейся траектории, касательно направленная сила инерции, вызывающая появление тангенциальных ускорений зерновок, кориолисова сила, возникающая в результате наложения относительных перемещений зерновок, движущихся по прямолинейным и круговым траекториям².

Для большинства рассматриваемых сил оказывается неизвестным ни направление вектора, ни величина. Однако однородность условий, вызывающих появление отдельных групп сил, позволяет комплексно рассматривать каждую из них, заменяя равнодействующей, приложенной к центру масс элементарного зернового объема.

Материалы и методы

Анализ сил позволил установить, что их совместное действие создает условия для направленного радиально-осевого перемещения зерен. Известно, что если частица в установившемся движении будет вращаться вокруг некоторой оси и одновременно совершать поступательное движение вокруг нее, то траектория такой частицы будет

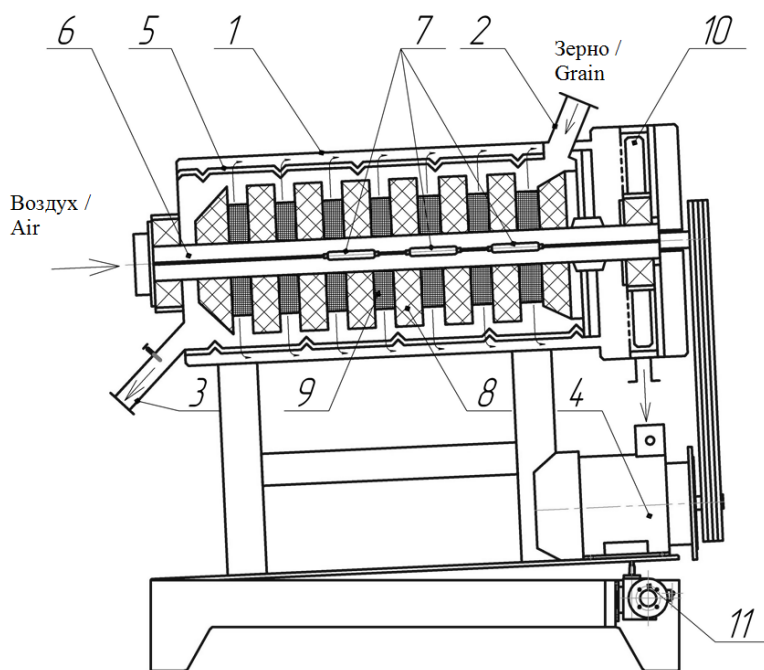
² Левенсон Л. Б. Барабанные грохота, их теория, расчет и проектирование. М.: Науч. технич. упр-ние В.С.Н.Х., 1927. 49 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009211509> (дата обращения: 22.10.2020).

винтовой линией [13]. Виды траекторий определяются конструктивными особенностями рабочей зоны, коэффициентом ее заполнения, а также фрикционными свойствами зерновой массы. В разрабатываемой шелушильно-сушильной машине (рис. 1) удаление наружных поверхностных слоев зерновок пшеницы происходит в результате их контакта с фрикционными поверхностями рабочих органов: вращающихся абразивных дисков и ситового перфорированного цилиндра, по всей длине которого выполнена направляющая высштамповка (рис. 2) [12; 21].

Степень шелушения, количество битых зерен и удельный расход энергии на процесс шелушения напрямую зависят от конструктивных параметров

ситового цилиндра: размеров и угла наклона выполненной на нем высштамповки. Обрабатываемый материал через впускной патрубок 2 самотеком поступает в рабочую зону машины (кольцевой зазор между абразивными дисками 8 и ситовым перфорированным цилиндром 5), где, двигаясь по высштамповкам цилиндра, меняет траекторию движения на направление внутрь машины, в результате чего зерно активно перемешивается, а отделенные оболочки эффективнее удаляются из рабочей зоны машины в аспирационную систему [12].

Изменение траекторий, скоростей, модулей движущих сил и сил сопротивления, развиваемых в рабочей зоне при радиально-осевом перемещении

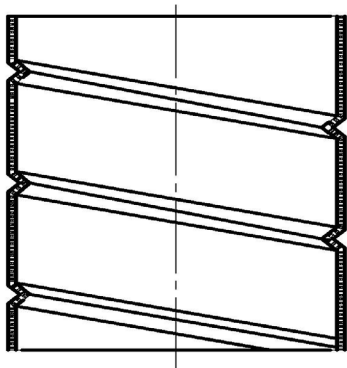


Р и с. 1. Горизонтальная шелушильно-сушильная машина: 1 – корпус; 2 – впускной патрубок; 3 – выпускной патрубок; 4 – привод; 5 – ситовый перфорированный цилиндр; 6 – полый вал; 7 – ИК-излучатели; 8 – абразивные круги; 9 – сетчатые обечайки; 10 – аспирационная система; 11 – механизм регулирования угла наклона машины

Fig. 1. Horizontal peeling-drying machine: 1 – case; 2 – inlet; 3 – final branch pipe; 4 – drive; 5 – sieve perforated cylinder; 6 – hollow shaft; 7 – IR radiators; 8 – abrasive wheels; 9 – mesh feedwells; 10 – aspiration system; 11 – machine tilt adjustment mechanism

зерна и обеспечивающих различную интенсивность и продолжительность обработки зерна, достигается путем варьирования угловой скорости вращения вала с абразивными дисками ω , величиной межзернового давления σ , регулируемого заслонками на входе и на выходе из машины.

Отклонение траектории движения зерна от первоначальной напрямую зависит от геометрических размеров выштамповки и угла ее наклона к нормали поверхности цилиндра [12]. Продолжительность нахождения зерновок в рабочей зоне машины будет также зависеть от угла ее наклона к оси цилиндра и формы, обосновать которую можно, проанализировав траекторию движения зерна в рабочей зоне машины.



Р и с. 2. Ситовый цилиндр с выштамповками

F i g. 2. Sieve cylinder with stamping

Результаты исследования

Для определения зависимости конструктивных и режимных параметров машины от угла наклона машины и угла выштамповки рассмотрим зерновку, находящуюся на поверхности наклонного ситового цилиндра (рис. 3).

Введем обозначения: AB – линия, проходящая через точку A положения частицы на выштамповке ситового цилиндра, определяемая углом наклона выштамповки β ; BCE – горизонтальная плоскость; $AD \perp BE$, ABE – вертикальная плоскость; $AOVV$ – плоскость

вращения цилиндра; AC – касательная к окружности цилиндра; AE – перпендикуляр к линии AB ; BC – след касательной плоскости на основание; δ – угол следа касательной плоскости со следом BE вертикальной плоскости; γ – угол наибольшего ската в точке, то есть двухгранный угол между касательной плоскостью ABC и плоскостью основания BCE ; AD – перпендикуляр, опущенный из точки A на линию BE ; GA – проекция линии наибольшего ската на вертикальную плоскость; L – длина цилиндра от его начала до плоскости сечения, мм; α – угол наклона цилиндра.

В соответствии со схемой (рис. 3) можно записать:

$$AB = OO' = L, \quad (1)$$

$$BD = L \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

$$BE = \frac{L}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

$$AE = L \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

$$EC = BE \cdot \operatorname{tg} \delta = L \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos \alpha}, \quad (5)$$

$$EC = \frac{AE}{\operatorname{tg} \beta} = L \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (6)$$

$$FD = BD \cdot \sin \delta = L \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta, \quad (7)$$

$$FD = \frac{AD}{\operatorname{tg} \gamma} = \frac{L \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \gamma}. \quad (8)$$

Из формул (5) и (6) получим:

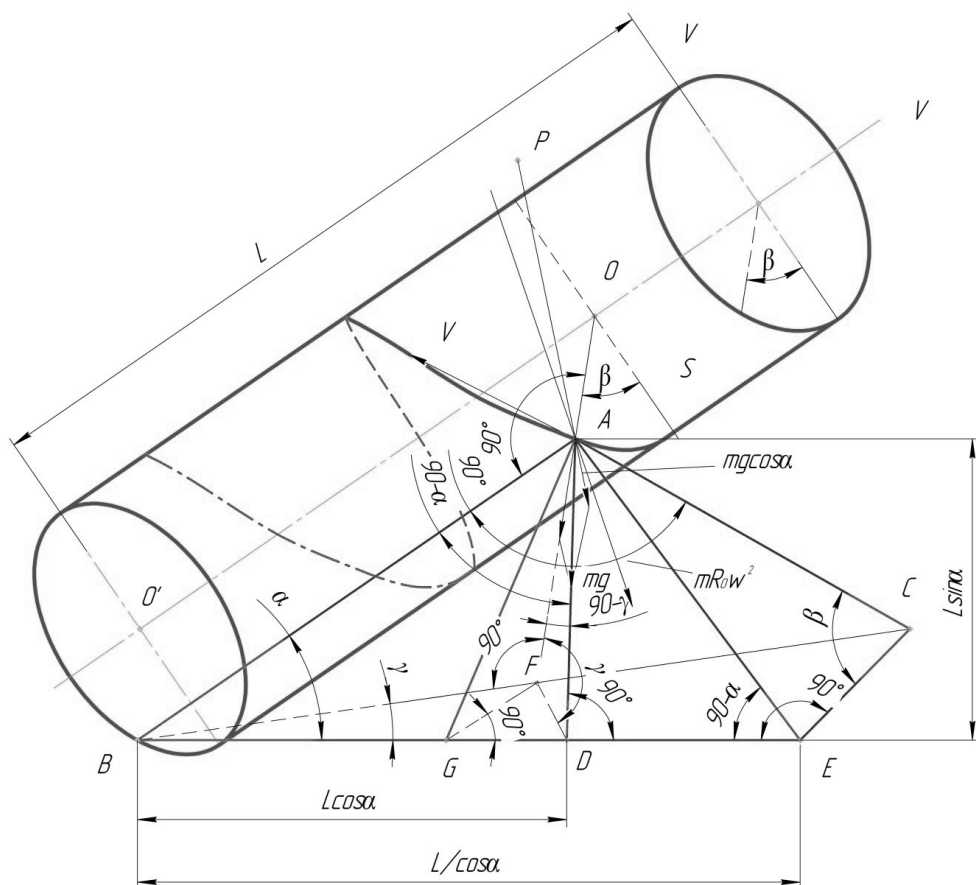
$$EC = L \frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos \alpha} = L \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta},$$

откуда:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (9)$$

Из формул (7) и (8) получим:

$$FD = L \cdot \cos \alpha \cdot \sin \delta = \frac{L \cdot \sin \alpha}{\operatorname{tg} \gamma},$$



Р и с. 3. Схема к определению зависимости конструктивных и режимных параметров машины от угла наклона цилиндра и угла выштамповки

F i g. 3. Scheme to determine the dependence of machine design and mode parameters on cylinder inclination angle and stamping angle

откуда:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha \cdot \sin \delta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \delta}. \quad (10)$$

или

$$\sin \delta = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + \sin^2 \alpha}}. \quad (11)$$

На основании уравнения (9) можем записать:

$$\sin \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} = \frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\sin \alpha}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2}},$$

Согласно уравнению (10) получим:

$$\cos \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \delta} \right)^2}},$$

откуда на основании выражения (11) получим³:

$$\cos \gamma = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \alpha (\operatorname{tg}^2 \beta + \sin^2 \alpha)}} = \cos \alpha \cdot \cos \beta. \quad (12)$$

Далее имеем:

$$DG = FD \cdot \sin \delta = \frac{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta}{\operatorname{tg} \gamma},$$

или на основании выражения (7):

$$DG = \frac{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \cdot \sin \delta}{\operatorname{tg} \alpha} = L \cdot \cos \alpha \cdot \sin^2 \delta. \quad (13)$$

С другой стороны:

$$DG = AD \cdot \operatorname{tg} \varepsilon = L \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varepsilon, \quad (14)$$

где ε – угол между линиями AD и AG .

Учитывая последние два выражения, получим:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\cos \alpha \cdot \sin^2 \delta}{\sin \alpha},$$

или согласно уравнению (11) [22]:

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{\sin 2\alpha}{2(\operatorname{tg}^2 \beta + \sin^2 \alpha)}. \quad (15)$$

Таким образом, значения геометрических параметров положения зерновки в точке A выражены в функции от угла наклона перфорированного цилиндра α и угла, характеризующего форму наклонной линии высштамповки цилиндра β .

Для определения зависимости режущих и конструктивных параметров

машины от угла наклона высштамповки ситового цилиндра, рассмотрим силы, действующие на зерновку:

1) сила тяжести mg направлена вертикально вниз и совпадает с линией AD ;

2) центробежная сила $m \cdot R_0 \cdot \omega^2$, где R_0 – радиус ситового барабана, м; ω – угловая скорость вала с абразивными кругами, рад/с; m – масса элементарного зернового объема, кг;

3) нормальная реакция поверхности ситового цилиндра N , величина которой определяется как алгебраическая сумма составляющих силы тяжести, действующей на частицу, $mg \cos \gamma$ и центробежной силы:

$$m \cdot R_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(n^{\wedge} \chi), \quad (16)$$

где $n^{\wedge} \chi$ – угол между направлением нормали к поверхности и нормали к траектории;

4) сила трения fN , где f – коэффициент трения зерновки о ситовый цилиндр, направлена противоположно относительно скорости движения зерновки по поверхности ситового цилиндра.

В начальный момент времени можно сказать, что зерновка не имеет относительной скорости, а вращается вместе с абразивными дисками.

Начало движения зерновки по поверхности ситового цилиндра определится из условия равенства нулю проекций всех сил на касательную к траектории ее движения. В начальный момент движения такая касательная будет совпадать с направлением составляющей силы тяжести, действующей на зерновку, направленной по линии высштамповки ситового цилиндра:

$$f \cdot N - m \cdot g \cdot \sin \gamma = 0, \quad (17)$$

или

$$f \cdot g \cdot \cos \gamma + f \cdot R_0 \cdot \omega^2 - g \cdot \sin \gamma = 0, \quad (18)$$

³ Прошкин С. С. Математика для решения физических задач: учебное пособие. СПб: Лань, 2014. 384 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/53689> (дата обращения: 22.10.2020).

откуда, учитывая, что $f = \operatorname{tg} \varphi$, где φ – угол трения, и выполняя тригонометрические преобразования, получим:

$$\frac{\sin(\gamma - \phi)}{\sin \phi} = \frac{R_0}{g} \omega^2.$$

Принимая во внимание уравнение (12), получим:

$$\beta = \arccos \left(\frac{1}{\cos \alpha} \cos \left(\phi + \arcsin \left(\frac{R_0 \cdot \omega^2}{g} \right) \cdot \sin \phi \right) \right). \quad (19)$$

При $\alpha = 0$ (горизонтальное положение цилиндра) уравнение (19) примет вид:

$$\beta = \phi + \arcsin \left(\frac{R_0 \cdot \omega^2}{g} \sin \phi \right). \quad (20)$$

Второе конечное значение угла β – угол отрыва зерновки от поверхности перфорированного цилиндра – определится, как и раньше, из равенства 0 нормальной реакции N .

В этом случае имеет место относительное движение зерновки по поверхности цилиндра (относительно абразивных дисков), поэтому второй составляющей нормальной реакции будет выражение (16).

Поэтому для момента отрыва можно записать:

$$N = m \cdot g \cdot \cos \gamma + m \cdot R_0 \cdot \omega^2 \cos(n^\wedge \lambda) = 0, \quad (21)$$

откуда:

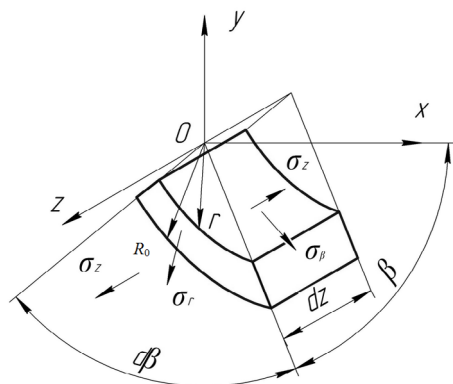
$$\cos \gamma = - \frac{R_0 \cdot \omega^2}{g} \cos(n^\wedge \lambda),$$

или, принимая во внимание выражение (12):

$$\beta = \pi - \arccos \left(\frac{R_0 \cdot \omega^2}{g \cdot \cos \alpha} \cos(n^\wedge \lambda) \right). \quad (22)$$

Для установившегося режима действующей шелушительно-сушильной машины угол наклона машины α и выштамповки ситового цилиндра β существенно влияют на расход электрической энергии на процесс обработки зерна. Интенсивность шелушения зерна в рабочем кольцевом зазоре машины зависит в большей степени от модулей нормальных и касательных сил, приложенных к зерновкам в результате их трения о рабочие органы машины (абразивные диски и ситовый цилиндр), при этом зерновки подвергаются действию тангенциальных σ_β , радиальных σ_r и осевых напряжений σ_z , обеспечивающих эффективное шелушение зерна (рис 4). При этом следует также иметь в виду, что существуют факторы, влияющие на эффективность шелушения, учитывая которые создает затруднения для комплексного описания исследуемого процесса. К ним относятся такие факторы, как увеличивающееся в функции времени количество отделенных оболочек, создающих условия для изменения коэффициентов внутреннего и внешнего трения смеси зерна с продуктами шелушения; коэффициент заполнения рабочей зоны машины, определяющий плотность укладки зерновой массы; количество аспирируемого воздуха и его относительная влажность и т. д.

Аналитическое обоснование траекторий и скоростей зерновок внутри машины, находящихся под действием комплекса сил (движения и сопротивления), представляют значительную сложность в связи со стесненным перемещением зерновок в рабочей зоне машины. Поэтому энергетическую оценку процесса шелушения зерна необходимо рассматривать с упрощающими допущениями применительно к зонам его непосредственного контакта с абразивными дисками и ситовым цилиндром: размеры частиц исследуемой зерновой массы незначительны, по сравнению с рассматриваемой об-



Р и с. 4. Схема элементарного зернового объема к определению мощности для преодоления сил трения зернового слоя о поверхность ситового цилиндра

F i g. 4. Elementary grain volume scheme to determine power to overcome grain layer friction forces against sieve cylinder surface

ластью, и ее можно представить как сплошное тело с плотностью ρ ; коэффициент сопротивления внутреннему сдвигу слоев постоянен (при осредненном коэффициенте плотности укладки).

Для достижения равномерного съема оболочек с поверхности всех обрабатываемых зерен важным является установление закономерности статистически преобладающей ориентации их продольных осей относительно рабочих органов, что позволяет обоснованно выбирать размеры элементов рабочей зоны машины, в частности радиального кольцевого зазора между абразивными дисками и ситовым барабаном, в котором происходит интенсивный сдвиговый процесс.

Для принятой осесимметричной естественной цилиндрической системы координат r ; z ; β выражение для определения мощности для преодоления сил трения зернового слоя о поверхность ситового барабана площадью S представим в виде:

$$P = \iint_S \left| \vec{\tau}_0 \left(\vec{g}_{\beta_{R_0}} + \vec{g}_{z_{R_0}} \right) \right| dS =$$

$$= f \iint_S \left| \vec{\sigma}_{r_{R_0}} \left(\vec{g}_{\beta_{R_0}} + \vec{g}_{z_{R_0}} \right) \right| dS, \quad (23)$$

где $\vec{\tau}_0$ – касательное напряжение, Па; $\left(\vec{g}_{\beta_{R_0}} + \vec{g}_{z_{R_0}} \right)$ – вектор результирующей скорости зерен в плоскости, касательной к ситовому барабану; $\sigma_{r_{R_0}}$ – радиальное давление зерна на поверхность ситового барабана, Па.

Так как касательное напряжение $\vec{\tau}_0$ противоположно скорости сдвига зерна по винтовой траектории, можно записать:

$$\left| \vec{\tau}_0 \left(\vec{g}_{\beta_{R_0}} + \vec{g}_{z_{R_0}} \right) \right| =$$

$$= \left| f \sigma_{r_{R_0}} \sqrt{g_{\beta_{R_0}}^2 + g_{z_{R_0}}^2} \cos \pi \right| =$$

$$= f \sigma_{r_{R_0}} \sqrt{g_{\beta_{R_0}}^2 + g_{z_{R_0}}^2}. \quad (24)$$

Подставив выражение (24) в (23) и учитывая, что $dS = 2\pi R_0 dz$, получим:

$$P = 2\pi R_0 dz f \int_0^L \sigma_{r_{R_0}} \sqrt{g_{\beta_{R_0}}^2 + g_{z_{R_0}}^2}, \quad (25)$$

где

$$g_{z_{R_0}} = \omega \cdot l \cdot \left(2 \cdot \frac{\sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \beta \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)}{\cos \phi} - \cos \beta \right). \quad (26)$$

Анализ выражения (26) показывает, что осевая скорость зерна является функцией нескольких переменных и зависит от геометрических параметров фрикционных рабочих органов: угла наклона высштамповки ситового цилиндра β и ее длины l , коэффициента внутреннего трения зерновой массы $f = \operatorname{tg} \varphi$ и угловой скорости вала ω .

В выражение (26) не входят размеры кольцевого сечения рабочей зоны, однако его влияние определяется угловой скоростью вала, а вследствие малой величины радиального зазора между ситовым цилиндром и поверхностью абразивного диска оно обусловлено и угловой скоростью зерновой массы, вычисляемой по формуле:

$$\omega = \frac{\vartheta_{\beta R_0}}{r + k},$$

где $\vartheta_{\beta R_0}$ – окружная скорость зерновой массы, описывающей окружность радиуса $r + k$; r – радиус абразивных дисков, м; k – ширина кольцевого зазора между абразивными дисками и ситовым цилиндром, м.

Обсуждение и заключение

Проанализировав траекторию движения зерна, находящегося на поверхности наклонного ситового цилиндра, получили выражения (20), (22), связывающие форму наклонной линии высштамповки цилиндра, характеризующую углом β , с углом наклона цилиндра α , его радиусом R_0 , угловой скоростью вала с абразивными дисками, фрикционными свойствами зер-

на. При радиусе ситового цилиндра $R_0 = 0,135$ м, горизонтальном расположении цилиндра $\alpha = 0$ и угловой скорости вала $\omega = 90$ рад/с минимальный угол наклона высштамповки цилиндра составляет $\beta = 22^\circ$.

Получено аналитическое выражение для расчета мощности (25), необходимой для преодоления сил внешнего трения зернового слоя о элементы поверхности ситового цилиндра, в зависимости от угловой скорости вала с абразивными дисками и связанного с ней угла наклона машины α и угла наклона высштамповки ситового цилиндра β (22). При радиусе ситового цилиндра $R_0 = 0,135$ м, ширине рабочего кольцевого зазора $k = 0,01$ м, длине цилиндра $L = 0,4$ м, горизонтальном расположении цилиндра ($\alpha = 0$), угловой скорости вала $\omega = 90$ рад/с, $\beta = 22^\circ$ расчетная мощность составила $P = 4,5$ кВт.

Необходимо отметить, что поскольку реальные зерновки пшеницы значительно отличаются от материальных точек и значений сил трений, и сопротивления среды, являющихся членами уравнений движения, во многих случаях изменяющих свой характер во время движения, то и значения кинематических элементов движения, полученные в результате аналитического решения этих уравнений, также будут отличаться от реальных значений. Поэтому полученные параметры следует считать приближенными и требующими уточнения на основании экспериментальных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анисимов, А. В. Усовершенствованная система для автоматического управления температурой и влажностью зерна при подготовке к помолу / А. В. Анисимов // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 6. – С. 53–56. – URL: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6 (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
2. Кондрок, Р. Х. Роль шелушения зерна в технологии переработки твердой пшеницы / Р. Х. Кондрок, Г. Н. Панкратов // Хлебопродукты. – 2013. – № 3. – С. 44–45. – URL: <https://khlebpod.ru/74-texts/журналы-13-года/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.



3. **Журба, О. С.** Влияние шелушения зерна на параметры процесса его измельчения / О. С. Журба, А. В. Карамзин, Л. Н. Крикунова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2012. – № 8. – С. 18–23. – URL: <http://www.foodprom.ru/journals/khranenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khraneniei-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
4. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues / M. R. Martelli, C. Barron, F. Mabilie [et al.]. – DOI 10.1016/j.jcs.2010.03.007 // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 52, Issue 1. – Pp. 83–89. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521010000561?via%3Dihub> (дата обращения: 22.10.2020).
5. **Анисимов, А. В.** Экспериментальное определение оптимальных параметров оборудования для обработки зерна при подготовке к помолу / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201904.594-613 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 4. – С. 594–613. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/86-19-4/743-10-15507-0236-2910-029-201904-8> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
6. Опыт подготовки зерна пшеницы к помолу с предварительным отделением оболочек / Ж. С. Алимкулов, Г. А. Егоров, Б. М. Максимчук [и др.] // Экспресс-информация. – 1979. – Т. 1, Вып. 7. – С. 22.
7. **Анисимов, А. В.** Совершенствование технологии подготовки зерна к помолу на малых предприятиях / А. В. Анисимов, Ф. Я. Рудик, Б. П. Загородских. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201804.603-623 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 603–623. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/75-18-4/577-10-15507-0236-2910-028-201804-9> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
8. **Верещинский, А.** Подготовка зерна шелушением на мельницах сортовых помолов пшеницы большой производительности / А. Верещинский // Хлебопродукты. – 2010. – № 1. – С. 32–33. – Рез. англ.
9. Влияние способов увлажнения зерна овса при гидротермической обработке на эффективность его шелушения / В. В. Беляев, Д. Е. Овчаров, Л. В. Анисимова, О. И. А. Ахмед // Горизонты образования. – 2017. – № 19. – С. 1–4. – URL: <https://docplayer.ru/79223470-Vliyanie-sposobov-uvlazhneniya-zerna-ovsa-pri-gidrotermicheskoy-obrabotke-na-effektivnost-ego-shelusheniya-im-i-i-polzuvaya-g.html> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
10. **Перов, А. А.** Способы шелушения зерна / А. А. Перов // Комбикорма. – 2010. – № 3. – С. 45–46. – Рез. англ.
11. **Верещинский, А. П.** Эффективность шелушильно-шлифовальных машин «Каскад» при подготовке зерна пшеницы в сортовых помолах / А. П. Верещинский // Хлебопродукты. – 2012. – № 11. – С. 40–41. – Рез. англ.
12. **Анисимов, А. В.** Моделирование основных конструктивно-технологических параметров шелушильно-сушильной машины / А. В. Анисимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2014. – № 4. – С. 40–43. – URL: http://agroj.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4 (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.
13. **Дударев, И. Р.** Шелушение увлажненной пшеницы / И. Р. Дударев // Хранение и переработка зерна. – 1973. – № 2. – С. 34–35.
14. Энергетическая оценка процесса шелушения увлажненного зерна в роторно-лопастной машине / Г. А. Глобенко, Б. Отмани, И. В. Настагуни, И. Р. Дударев // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 1991. – № 1–3. – С. 106–108. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskaya-otsenka-protssessa-shelusheniya-uvlazhennogo-zerna-v-rotorno-lopastnoy-mashine> (дата обращения: 22.10.2020).
15. **Маланичев, И. В.** Компьютерная модель процесса пневмомеханического шелушения зерна гречихи / И. В. Маланичев // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2008. – Т. 1, № 7. – С. 169–171.
16. **Анисимов, А. В.** Пути повышения эффективности процесса переработки зерна на малых предприятиях / А. В. Анисимов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2012. – № 8. – С. 38–42. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10035-005-0211-4> (дата обращения: 22.10.2020). – Рез. англ.

17. Effects of End Wall Friction in Rotating Cylinder Granular Flow Experiments / J. E. Maneval, K. M. Hill, B. E. Smith [et al.]. – DOI [10.1007/s10035-005-0211-4](https://doi.org/10.1007/s10035-005-0211-4) // Granular Matter. – 2005. – Vol. 7, Issue 4. – Pp. 199–202. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10035-005-0211-4> (дата обращения: 22.10.2020).

18. Lu, G. The Parameters Governing the Coefficient of Dispersion of Cubes in Rotating Cylinders / G. Lu, J. R. Third, C. R. Müller. – DOI [10.1007/s10035-016-0693-2](https://doi.org/10.1007/s10035-016-0693-2) // Journal of Granular Matter. – 2017. – Vol. 19, Issue 12. – Pp. 1–6. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10035-016-0693-2> (дата обращения: 22.10.2020).

19. Radial Mixing and Segregation of Granular Bed Bi-Dispersed Both in Particle Size and Density within Horizontal Rotating Drum / H. Chen, X. Zhao, Y. Xiao [et al.]. – DOI [10.1016/S1003-6326\(16\)64110-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64110-9) // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26, Issue 2. – Pp. 527–535. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632616641109?via%3Dihub> (дата обращения: 22.10.2020).

20. Forced Axial Segregation in Axially Inhomogeneous Rotating Systems / S. González, C. R. K. Windows-Yule, S. Luding [et al.]. – DOI [10.1103/PhysRevE.92.022202](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.022202) // Physical Review E. – 2015. – Vol. 92, Issue 2. – URL: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.92.022202> (дата обращения: 22.10.2020).

21. Патент № 147608 Российская Федерация, МПК В02В 3/02. Горизонтальная шелушильно-сушильная машина : № 2014123561/13 : заявл. 09.06.2014 : опубл. 10.11.2014 / Анисимов А. В., Анисимова М. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – 7 с.

Поступила 01.06.2020; принята к публикации 10.08.2020; опубликована онлайн 30.12.2020

Об авторах:

Анисимов Александр Владимирович, доцент кафедры технологии производства и переработки продукции животноводства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: [E-7817-2018](https://orcid.org/0000-0002-5313-6329), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimovaleksan@mail.ru

Рудик Феликс Яковлевич, профессор кафедры технологий продуктов питания ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова» (410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., д. 1), доктор технических наук, Researcher ID: [E-8546-2018](https://orcid.org/0000-0001-8444-0115), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Анисимов – подготовка начального текста с последующей доработкой, проведение исследований, анализ исследований, визуализация; Ф. Я. Рудик – научное руководство, анализ и доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Anisimov A. V. An Improved System for Automatic Control of Grain Temperature and Moisture Content in Preparation for Grinding. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = Agrarian Scientific Journal. 2015; (6):53-56. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/37/2015_6 (accessed 22.10.2020). (In Russ.)

2. Kondrokov R. Kh., Pankratov G. N. The Role of Grain Peeling in Durum Wheat Processing. *Khlebo-produkty* = Bakery Products. 2013; (3):44-45. Available at: <https://khlebpod.ru/74-texts/журналы-13-года/03-13/657-2013-04-01-08-45-51> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)



3. Zhurba O.S., Karamzin A.V., Krikunova L.N., et al. Influence of a Peeling of Grain on Parameters of Process of Its Crushing. *Khramenie i pererabotka selkhozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2012; (8):18-23. Available at: <http://www.foodprom.ru/journals/khramenie-i-pererabotka-selkhozsyrya/131-khrameniei-pererabotka-selkhozsyrya-8-2012> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
4. Martelli M.R., Barron C., Mabile F., et al. Adherence within Biological Multilayered Systems: Development and Application of a Peel Test on Wheat Grain Peripheral Tissues. *Journal of Cereal Science*. 2010; 52(1):83-89. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.03.007>
5. Anisimov A.V., Rudik F.Ya. The Experimental Determination of Optimum Parameters of the Equipment for Processing Grain in Preparation for Grinding. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):594-613. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.594-613>
6. Alimkulov Zh.S., Egorov G.A., Maksimchuk B.M., et al. [Experience of Preparation of Seed of Wheat for a Grinding with Preliminary Office of Envelopes]. *Ekspress-informatsiya* = Express Information. 1979; 1(7):22. (In Russ.)
7. Anisimov A.V., Rudik F.Ya., Zagorodskih B.P. Technological Improvements of Grain Preparation for Milling in Small Enterprises. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(4):603-623. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201804.603-623>
8. Vereshchinsky A. Grain Preparation by Peeling on Mills High-Quality Grindings of Wheat of Big Efficiency. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2010; (1):32-33. (In Russ.)
9. Belyaev V.V., Ovcharov D.E., Anisimova L.V., et al. Influence of Methods of Oat Grain Moistening at Hydrothermal Treatment on Its Peeling Efficiency. *Gorizonty obrazovaniya* = Horizons of Education. 2017; 19:1-4 Available at: <https://docplayer.ru/79223470-Vliyanie-sposobov-uvlazhneniya-zerna-ovsa-pri-gidrotermicheskoy-obrabotke-na-effektivnost-ego-shelusheniya-im-i-i-polzunova-g.html> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
10. Perov A.A. Ways of Peeling Grain. *Kombikorma* = Compound Feeds. 2010; (3):45-46. (In Russ.)
11. Vereshchinsky A.P. Effectiveness Peeling-Rubbing Machines “Cascade” by Wheat Seed Preparation in High-Quality Grindings. *Khleboпродукты* = Bakery Products. 2012; (11):40-41. (In Russ.)
12. Anisimov A.V. Modeling of the Main Constructive and Technological Parameters for Peeling and Drying Machine. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2014; (4):40-43. Available at: http://agrojr.ru/index.php/asj/issue/view/23/2014_4 (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
13. Dudarev I.R. [Pilling of Moistened Wheat]. *Khramenie i pererabotka zerna* = Storage and Processing of Grain. 1973; (2):34-35. (In Russ.)
14. Globenko G.A., Otmani B., Nastagunin I.V., et al. [Energy Assessment of Wetted Grain Peeling Process in Rotary Blade Machine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* = News of Higher Education Institutions Food Technology. 1991; 1(3):106-108. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/energeticheskaya-otsenka-protsesta-shelusheniya-uvlazhennogo-zerna-v-rotornoy-lopastnoy-mashine> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
15. Malanichev I.V. [Computer Model of Pneumatic-Mechanical Buckwheat Grain Peeling Process]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Kazan State Agrarian University Bulletin. 2008; 1(7):169-171. (In Russ.)
16. Anisimov A.V. Ways of Improving the Efficiency of Grain Processing at Small-Scale Enterprises. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* = Vavilov Saratov State Agrarian University Bulletin. 2012; (8):38-42. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10035-005-0211-4> (accessed 22.10.2020). (In Russ.)
17. Maneval J.E., Hill K.M., Smith B.E., et al. Effects of End Wall Friction in Rotating Cylinder Granular Flow Experiments. *Granular Matter*. 2005; 7(4):199-202. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-005-0211-4>
18. Lu G., Third J.R., Müller C.R. The Parameters Governing the Coefficient of Dispersion of Cubes in Rotating Cylinders. *Journal of Granular Matter*. 2017; 19(12):1-6. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0693-2>

19. Chen H., Zhao X., Xiao Y., et al. Radial Mixing and Segregation of Granular Bed Bi-Dispersed Both in Particle Size and Density within Horizontal Rotating Drum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2016; 26(2):527-535. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64110-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64110-9)
20. González S., Windows-Yule C.R.K., Luding S., et al. Forced Axial Segregation in Axially Inhomogeneous Rotating Systems. *Physical Review E*. 2015; 92(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.022202>
21. [Horizontal Flaking Dryer]: Patent 147608 Russian Federation. No. 2014123561/13; appl. 09.06.2014; publ. 10.11.2014. 7 p. (accessed 22.10.2020). (In Russ.)

Received 01.06.2020; revised 10.08.2020; published online 30.12.2020

About the authors:

Alexander V. Anisimov, Associate Professor of Chair of Technology of Production and Processing of Livestock Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: [E-7817-2018](https://orcid.org/0000-0002-5313-6329), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-6329>, anisimovaleksan@mail.ru

Feliks Ya. Rudik, Professor of Chair of Technologies of Food Products, Saratov State Agrarian University (1 Theatre Sq., Saratov 410012, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: [E-8546-2018](https://orcid.org/0000-0001-8444-0115), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8444-0115>, k-pappsgau@rambler.ru

Contribution of the authors:

A. V. Anisimov – preparation of the initial text with further refinement, conducting research, analysis of research, visualization; F. Ya. Rudik – scientific guidance, analysis and text refinement.

All authors have read and approved the final manuscript.