



Экспериментально-математическое моделирование процесса удаления поверхностной влаги с семян после увлажнения

Федор Александрович Киприянов¹,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kipriyanovfa@bk.ru;
Алексей Владимирович Алешкин²,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: usr00008@vyatsu.ru;

Петр Алексеевич Савиных³,
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
e-mail: peter.savinyh@mail.ru

¹Вологодская государственная молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина, г. Вологда, Российская Федерация;

²Вятский государственный университет, г. Киров, Российская Федерация;

³Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, г. Киров, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что после предпосевного увлажнения избыточная поверхностная влажность семян затрудняет их посев механизированным способом. В результате экспериментально-поисковых исследований установлено, что избыточная поверхностная влага эффективно удаляется при контакте семян с влаговпитывающей поверхностью. *(Цель исследования)* Экспериментально-математическая оценка возможности удаления избыточной поверхностной влаги при контакте зерновки с влаговпитывающей поверхностью. *(Материалы и методы)* Прижимающее усилие зерновки к поверхности транспортера имитировали с помощью динамометра с плоским наконечником при дискретности создаваемого усилия 2,5 ньютона. Зерновка прижималась к фетровой ткани, пропитанной красящим раствором. Математическое моделирование процесса удаления поверхностной влаги заключалось в оценке возможности качения зерновки по поверхности. *(Результаты и обсуждение)* Установлено, что для произвольно взятой зерновки ячменя с размерами полуосей эллипса в поперечном сечении $a = 0,001845$ метра, $b = 0,00146$ метра полное качение отсутствует. Зерновка с данными размерами поворачивается на 58 градусов. В то же время создаваемое в плоскости продольного сечения минимальное усилие 2,5 ньютона на зерновку с полуосями $a = 0,001845$ метра и $c = 0,00396$ метра обеспечит прижимающее усилие 0,11 ньютона на один квадратный миллиметр. С учетом глубины погружения зерновки во влаговпитывающую поверхность и поворота зерновки на угол 58 градусов будет обеспечен необходимый контакт для удаления избыточной поверхностной влаги. Однако в частном случае, когда одна из плоскостей продольного сечения зерновки имеет форму, приближенную к ромбовидной, контакт будет неполным. Увеличение прижимающего усилия до 0,19 ньютона на один квадратный миллиметр не дает желаемого эффекта, поскольку зерновка, преодолевая сопротивление впитывающей влагу поверхности, упиралась в опорную пластину. Решением проблемы стало увеличение толщины впитывающей поверхности приблизительно до половины толщины зерновки. В этом случае обеспечивается наибольшая площадь контакта. *(Выводы)* Путем экспериментально-математической оценки установлено, что избыточная поверхностная влага может быть эффективно удалена с зерновок при контакте с влаговпитывающей поверхностью толщиной, близкой к половине толщины зерновки, и прижимающем усилии порядка 0,19 ньютона на один квадратный миллиметр.

Ключевые слова: зерновка, избыточная поверхностная влага, удаление, влаговпитывающая поверхность, угловое ускорение, глубина погружения, угол поворота зерновки.

■ **Для цитирования:** Киприянов Ф.А., Алешкин А.В., Савиных П.А. Экспериментально-математическое моделирование процесса удаления поверхностной влаги с семян после увлажнения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-4-12. EDN: ERGCDS.

Scientific article

Experimental-Mathematical Modeling of Surface Moisture Removal from Pre-Moistened Seeds

Fedor A. Kipriyanov¹,
Ph.Sc.(Eng.), associate professor,
e-mail: kipriyanovfa@bk.ru;

Aleksey V. Aleshkin²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: usr00008@vyatsu.ru;

Petr A. Savinykh³,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: peter.savinykh@mail.ru

¹Vologda State Dairy Farming Academy named after N.N. Vereshchagin, Vologda, Russian Federation;

²Vyatka State University, Kirov, Russian Federation;

³Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy, Kirov, Russian Federation

Abstract. The paper examines the issue of excess surface moisture on seeds following pre-sowing moistening, which complicates mechanical sowing. Experimental and exploratory studies indicate that this excess moisture can be effectively removed when seeds contact a moisture-absorbing surface. (*Research purpose*) The study aims to provide an experimental and mathematical evaluation of the potential for removing excess surface moisture from seeds upon contact with a moisture-absorbing surface. (*Material and methods*) The pressing force of the caryopsis against the conveyor surface was simulated using a flat-tipped dynamometer with a force application increment of 2.5 newtons. The caryopsis was pressed against a felt fabric soaked with a dye solution. The mathematical modeling of the surface moisture removal process involved evaluating the potential for the caryopsis to roll across the surface. (*Results and discussion*) It was found that a randomly selected barley caryopsis with semi-axis dimensions of $a = 0.001845$ meters and $b = 0.00146$ meters in the cross-section does not achieve complete rolling but rotates by 58 degrees. At the same time, a minimum applied force of 2.5 newtons in the plane of the longitudinal section on a caryopsis with semi-axes $a = 0.001845$ meters and $c = 0.00396$ meters produces a pressing force of 0.11 newtons per square millimeter. Considering the depth of the caryopsis's immersion in the moisture-absorbing surface and its 58-degree rotation, sufficient contact is established to remove excess surface moisture. However, in specific cases where one of the longitudinal section planes of the caryopsis has a shape approaching a diamond, the contact is incomplete. Increasing the pressing force to 0.19 newtons per square millimeter did not yield the desired effect, since the caryopsis, overcoming the resistance of the moisture-absorbing surface, made contact with the support plate. The solution was to increase the thickness of the moisture-absorbing surface to approximately half the thickness of the caryopsis. In this case, the largest contact area is ensured. (*Conclusions*) Experimental and mathematical evaluations established that excess surface moisture can be effectively removed from caryopses when they contact a moisture-absorbing surface with a thickness approximately half that of the caryopsis, under a pressing force of around 0.19 newtons per square millimeter.

Keywords: caryopsis, excess surface moisture, removal, moisture-absorbing surface, angular acceleration, immersion depth, grain rotation angle.

■ For citation: Kipriyanov F.A., Aleshkin A.V., Savinykh P.A. Experimental-mathematical modeling of surface moisture removal from pre-moistened seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-4-12. EDN: ERGCDS.

Повышение эффективности производственных процессов в растениеводстве как самостоятельной отрасли, так и отрасли, формирующей кормовую базу для животноводства, является важнейшей составляющей развития агропромышленного комплекса [1]

Совершенствование технологий возделывания сельскохозяйственных культур требует изменения способов предпосевной подготовки семян [2]. Предпосевная обработка способна обеспечить повышение урожайности сельскохозяйственных культур до 35-40% за счет стимуляции процессов жизнедеятельности растений [3]. Предпосевное увлажнение семян один из наиболее простых способов повышения урожайности семян, не требующий при этом высоких энергозатрат [4]. Ряд научных школ, как правило, созданных зарубежными учеными, при описании процесса предпосевого насыщения семян влагой использует термин «прайминг», имеющий более широкую трактовку за счет увеличения спектра увлажняющих растворов [5].

В России ряд ученых предпочитают трактовать предложенный иностранными учеными термин «прайминг» как контролируемую гидратацию (насыщение ограниченным количеством воды) семян [6]. Исследованию влияния предпосевого увлажнения посвящен целый ряд работ российских и иностранных ученых [7]. В частности, отмечается улучшение роста рассады и уменьшение солевого стресса при возделывании в сложных климатических условиях [8]. При этом ускоряется метаболизм процессов и повышается усвоение находящихся в зерновке питательных веществ [9]. Насыщение водой семян ячменя перед посевом позволяет увеличить массу корневой системы до 50% [10]. Положительное влияние оказывает предпосевное увлажнение как на интенсивность появления всходов, так и на дальнейшее развитие растений [11]. Увеличение урожайности при этом может быть достигнуто даже при использовании чистой воды, в частности, ряду исследователей путем замачивания в водные растворы удалось увеличить энергию прорастания

некоторых культур от 14% до 66% [12]. В то же время, применение защитных препаратов и стимуляторов роста повышают эффективность процесса [13]. Однако несмотря на всю привлекательность и простоту способа, широкого промышленного применения предпосевное увлажнение не нашло.

Одной из причин, препятствующих промышленному применению предпосевного увлажнения, является избыточная поверхностная влага, которая способствует слипанию семян, затрудняя их механизированный посев. В некоторых исследованиях подсушивание семян осуществлялось путем перемешивания слоя семян толщиной 1 см через каждые два часа. Однако такой способ увеличивал время подготовки семян к посеву, причем для подготовки набухших семян требовалось 10 ч, а проросших 14 ч [14]. Применение подогретого воздуха для удаления избыточной поверхностной влаги, предлагаемого в ряде других работ, позволяет несколько сократить время обработки [15].

Использование подогретого воздуха требует существенных энергозатрат и, как показали наши исследования, оказался неэффективным в подготовке семян непосредственно к посеву. В результате экспериментально-поисковых исследований установлено, что удаление избыточной поверхностной влаги наиболее эффективно при расположении семян между двумя впитывающими поверхностями [16].

Для реализации концепции по контактному удалению влаги предложена «Установка для удаления поверхностной влаги с семян после намачивания» (патент RU 2799265). Устройство представляет собой два подпружиненных ленточных транспортера, расположенные один над другим, с разными скоростями движения. Ленты выполнены из влаговпитывающего материала, системы отжимных валиков для удаления влаги из ленты и системы лотков для сбора жидкости (рис. 1). Семена, перемещаясь между лентами, перекачиваются в сторону выгрузного устройства, поверхности транспортерных лент при этом впитывают избыточную влагу.

Семена с избыточным количеством поверхностной влаги подаются на поверхность основного транспортера 1 и далее попадают под ленту вспомогательного транспортера 2. Лента вспомогательного транспортера прижимает семена к ленте основного транспортера, обеспечивая контакт для удаления с семян избыточной поверхностной влаги. За счет разницы линейных скоростей лент транспортеров семенам придается дополнительное вращательное движение, способствующее более полному контакту с влаговпитывающим материалом. Избыточная влага на лентах транспортера отжимается вальцами 3 и по лоткам 4 стекает в поддон 5. Использование фетровой ткани обеспечивает минимальный травматизм семян в процессе предпо-

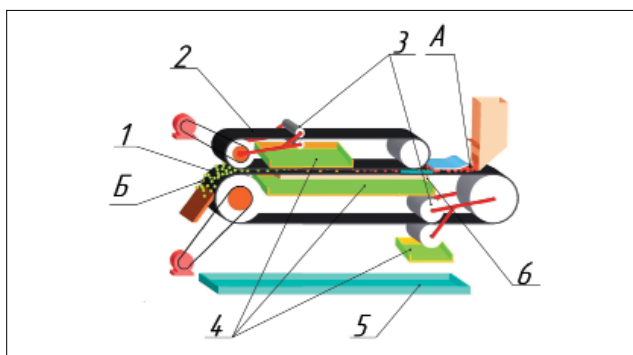


Рис. 1. Установка для удаления поверхностной влаги с семян: А – увлажненные семена с избыточным количеством поверхностной влаги, Б – семена после удаления избыточной поверхностной влаги

Fig. 1. Unit for removing surface moisture from seeds: А – seeds moistened, with excess surface moisture, Б – seeds after the removal of excess surface moisture

севной обработки [17] с уменьшением ударного воздействия на зерновку [18].

Цель исследований – выполнить математическое моделирование по определению характера движения зерновки между влаговпитывающими поверхностями; на основе экспериментально-поисковых исследований с применением программно-математического аппарата оценить возможность удаления избыточной влаги с поверхности зерновки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Исследования проводились в Вологодской ГМХА при научно-консультационной поддержке ФАНЦ Северо-Востока и Вятского государственного университета. Для имитации прижимающего усилия зерновки к поверхности транспортера использовался динамометр «Мегеон 04500» с плоским наконечником и дискретностью усилия 2,5 Н. Для получения отпечатка при прижатии зерновки к поверхности применялся раствор бриллиантовый зеленый спиртовой, фетровая ткань, имитирующая влаговпитывающую поверхность транспортера, размеры зерновки измеряли штангенциркулем ШЦЦБ-1-150 0.01.

Для теоретического определения угла поворота зерновки применялись методы классической механики и дифференциального исчисления [19], широко апробированные при моделировании процессов в сельскохозяйственном производстве [20]. При разработке программы для автоматизированных расчетов применялся язык программирования Visual C#.

Исследования включали в себя следующие этапы: составление математической модели вращения зерновки при движении между поверхностями; разработка программного обеспечения для автоматизации расчетов; оценка влияния усилия прижатия зерновки на площадь контакта; математическая оценка угла поворота реальной зерновки при отсутствии качения с оценкой совокупной площади кон-

такта; обоснование толщины транспортирующей поверхности.

При расчетах форму зерновки принимали как эллипсоид с полуосями a , b , c в соответствующих плоскостях (рис. 2).

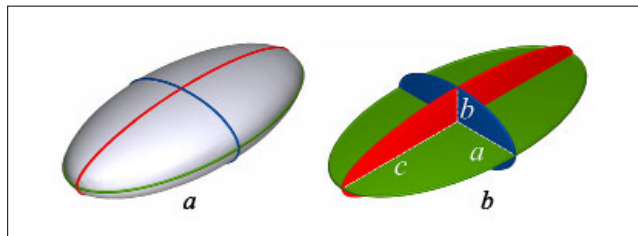


Рис. 2. Модель зерновки: a – объемная модель зерновки; b – сечущие плоскости

Fig. 2. Model of a caryopsis: a – solid model of a caryopsis; b – sectional planes

Моделирование качения зерновки осуществляли путем моделирования качения эллипса в сечении ab . Удельное усилие давления рассчитывали для площади поперечного сечения в плоскости ac .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Определим условия движения с качением тела с эллиптическим центральным сечением по горизонтальным опорным подпружиненным поверхностям (рис. 3).

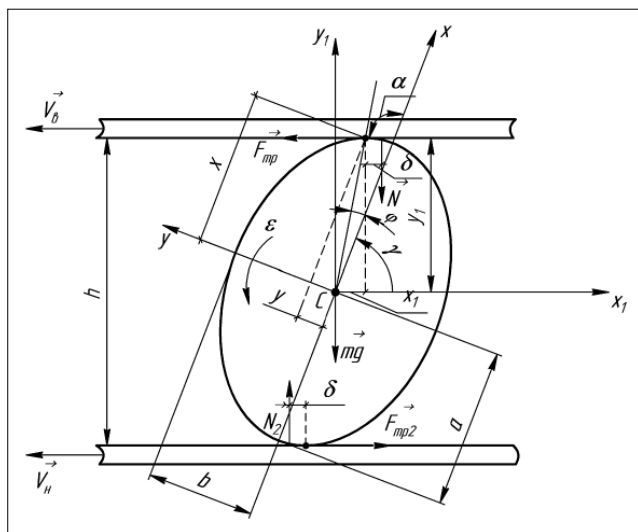


Рис. 3. Схема сил, приложенных к эллипсу
Fig. 3. Diagram of forces applied to an ellipse

Согласно теореме об изменении кинетического момента эллипса при вращении вокруг оси, проходящей через центр масс, перпендикулярно плоскости качения:

$$\frac{dK_c}{dt} = F_{TP}y_1 + F_{TP2}y_1 - N(x_1 + \delta) - N_2(x_1 + \delta), \quad (1)$$

где t – время, с; F_{TP} – сила трения со стороны верхней опорной поверхности (верхнего транспортера), Н; F_{TP2} – сила трения со стороны нижней опорной поверхности (нижнего транспортера), Н; y_1 – рас-

стояние по вертикальной оси от центра масс C до верхней точки контакта эллипса с поверхностью, такое же расстояние до нижней точки контакта, м; N , N_1 – нормальные реакции соответственно верхней и нижней опорных поверхностей, Н; x_1 – расстояние по горизонтальной оси x_1 от центра масс C до верхней точки контакта эллипса с поверхностью, м; δ – коэффициент сопротивления качению, м.

Производная по времени от кинетического момента равна произведению углового ускорения на I_c (кг·м²) момент инерции эллипса относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости качения.

Для качения необходимо, чтобы угловое ускорение было больше нуля $\varepsilon > 0$ во всех возможных точках контакта эллипса с поверхностями при предельных значениях силы трения $F_{TP} = Nf$, где f – коэффициент трения скольжения.

Для нахождения соотношения между нормальными реакциями запишем теорему о движении центра масс в проекции на оси:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 = -F_{TP} + F_{TP2}; \\ m\ddot{y}_1 = -N + N_2 - mg, \end{cases} \quad (2)$$

где m – масса тела.

Уравнение (1) в предельном случае начала скольжения примет вид

$$\varepsilon I_c = 2Nfy_1 - N(x_1 + \delta) - (N + mg)(x_1 + \delta). \quad (3)$$

Выразим координаты x_1 и y_1 через координаты x и y , которые совпадают с осями эллипса:

$$\begin{cases} x_1 = x \cos(\gamma) - y \sin(\gamma); \\ y_1 = x \sin(\gamma) + y \cos(\gamma), \end{cases} \quad (4)$$

где γ – угол поворота эллипса при качении.

$$tg(\alpha) = \frac{dy}{dx} = -\frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}}, \quad (5)$$

где a – большая полуось эллипса, b – малая полуось.

Отметим, что угол γ не равен углу φ , который определяет положение радиус-вектора точки касания.

Подставим в уравнение (3) выражения (4):

$$\begin{aligned} \varepsilon I_c = & 2Nf(x \sin(\gamma) + y \cos(\gamma)) - \\ & - 2N(x \cos(\gamma) - y \sin(\gamma) + \delta) - \\ & - mg(x \cos(\gamma) - y \sin(\gamma) + \delta). \end{aligned} \quad (6)$$

Зададим величину нормальной реакции N , зависящей от расстояния между транспортерами, так как верхняя контактная поверхность подпружинена:

$$N = N_0 + k \cdot (h - 2b), \quad (7)$$

где k – суммарная жесткость пружин и упругих опорных поверхностей, Н/м; h – расстояния между транспортерами, равное высоте эллипса при повороте на угол γ .

Таким образом, исследуя выражение (6) в первой координатной четверти для всех значений $x=0 \dots a$, установим возможность качения по знаку εI_C .

Если

$$\varepsilon I_C > 0, \quad (8)$$

то сила трения не достигнет предельного значения и эллипс катится без скольжения при постоянных скоростях лент транспортеров. Это условие снятия влаги со всех сторон обрабатываемых семян. В случае качения без скольжения, когда условие (8) выполняется во всех точках периметра эллипса, скорость центра масс определится через скорости лент транспортеров:

$$v_C = \frac{v_H + v_B}{2}; \quad (9)$$

где v_H – скорость ленты нижнего транспортера; v_B – скорость ленты верхнего транспортера.

Угловая скорость эллипса при этом будет переменной из-за изменения расстояния h и равна:

$$\omega = \frac{v_B - v_H}{h}. \quad (10)$$

Для автоматизации расчетов на языке C# разработана программа «Имитационное моделирование работы установки для удаления поверхностной влаги с семян».

Программа, составленная для всех значений x в первой координатной четверти, позволяет варьировать исходные величины, входящие в выражения (1)-(10), и оценивать их влияние на возможность качения эллипса без скольжения по табличным значениям и графикам.

Для расчетов необходимо ввести в поля диалогового окна интерфейса программы размеры полуосей поперечного сечения зерновки, коэффициент трения, массу зерновки, коэффициент сопротивления качения, скорость движения лент, ширину транспортирования и насыпную плотность зерна. Результатом расчета является графическое представление изменения углового ускорения от перемещения по оси x и угла φ , оценивается наличие качения зерновки между влаговпитывающими поверхностями и расчет пропускной способности установки.

Анализ результатов расчета при варьировании исходных данных показывает, что определяющим для возможности качения является отношение полуосей эллипса $a:b$ и его соотношение с коэффициентом трения скольжения f . Увеличение величины нормальной реакции приводит к повышению силы трения $F_{тр}$, которая имеет положительный момент, но при этом растет величина отрицательных моментов от самих нормальных реакций. Для эффективной работы устройства съема влаги с семян важно, чтобы опорные поверхности имели существенную шероховатость и форма сечения семян имела незначительный эксцентриситет.

На примере зерновки ячменя выполним экспериментально-математическое моделирование процесса удаления влаги. На первоначальном этапе с помощью разработанной программы проведем оценку наличия качения зерновки, при его отсутствии проведем серию экспериментов по оценке достаточности контакта зерновки с впитывающей поверхностью для удаления влаги.

Примем допущение о том, что зерновка ячменя имеет форму эллипсоида (рис. 2), средний размер полуосей задействованных в эксперименте зерновок $a = 0,0019025$ м, $b = 0,00148$ м. Согласно результатам математического моделирования в разработанной программе качение зерновки отсутствует, что требует оценки достаточности контакта зерновки с влаговпитывающей поверхностью. Для этого возьмем произвольно выбранную зерновку с размерами полуосей $a = 0,001845$ м, $b = 0,00146$ м, согласно расчетам качения зерновки нет.

Для имитации контакта зерновки с влаговпитывающей поверхностью (рис. 4) разместим пропитанную красителем фетровую ткань 1 с зерновкой 2 на опорной поверхности 4. Наконечником 3 динамометра будем создавать усилие дискретностью 2,5 Н. Для данной зерновки в плоскости продольного сечения с полуосями $a = 0,001845$ м и $c = 0,00396$ м усилие составит $0,11 \text{ Н/мм}^2$.

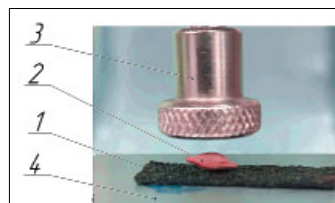


Рис. 4. Имитация контакта зерновки при удалении поверхностной влаги

Fig. 4. Simulation of caryopsis contact during surface moisture removal

В месте контакта зерновки с окрашенной поверхностью образовалось пятно, занимающее значительную долю поверхности (рис. 5).



Рис. 5. Пятно контакта зерновки с поверхностью

Fig. 5. Contact patch of the caryopsis with the surface

Найдем угол поворота зерновки γ при движении между влаговпитывающими поверхностями (рис. 6).

Для этого, смоделировав движение зерновки с помощью программы, получим зависимость изменения угла α и углового ускорения ε от полярного угла φ . При этом угол поворота зерновки $\gamma = 180 - \alpha$.

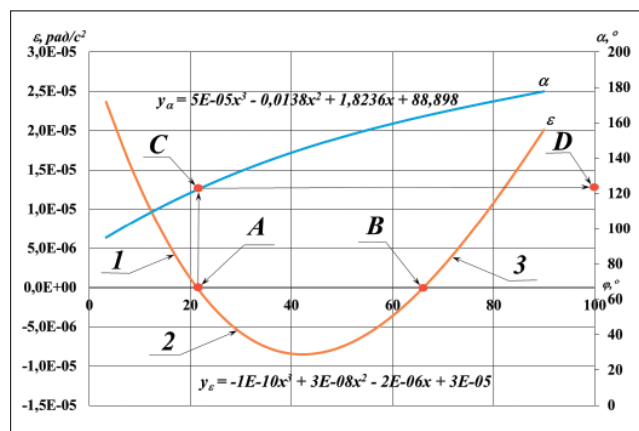


Рис. 6. Схема к определению угла поворота зерновки
Fig. 6. The scheme for determining the angle of rotation of the grain

Рассмотрим характер изменения углового ускорения. На графике видны три участка, показывающие характер движения и две опорные точки. Участок 1 (ниспадающая ветвь до точки A) представляет собой поворот зерновки, обусловленный воздействием сил трения. В точке A угловое ускорения равно нулю, что свидетельствует о прекращении и дальнейшем отсутствии качения. Точка B соответствует началу вращения, если повернуть эллипс (зерновку) до нее искусственно, участок 3 может соответствовать качению из положения, соответствующего точке B.

Полученные зависимости довольно точно описываются полиномами третьей степени. Задача по определению угла поворота зерновки γ будет заключаться в определении угла α , при котором угловое ускорение $\varepsilon = 0$, а в свою очередь $\gamma = 180 - \alpha$.

Математически задача сводится к решению кубического уравнения, описывающего изменение углового ускорения ε . Решением являются три корня: $x_1 = 21^\circ$, $x_2 = 213^\circ$, $x_3 = 66^\circ$, в точке A угловое ускорение равно нулю, что соответствует $\varphi = 21^\circ$. Подставив полученное значение (точка A) в уравнение угла α и спроецировав полученное решение (точка C) на ось y получим $\alpha = 122^\circ$ (точка D), угол поворота зерновки $\gamma = 58^\circ$. Таким образом, при движении между двумя поверхностями при отсутствии качения зерновка будет поворачиваться на 58° .

Проведем оценку достаточности контакта поперечного сечения зерновки с впитывающей фетровой поверхностью. Для этого на схеме контакта дополнительно отметим пятно контакта и глубину погружения зерновки в фетр с обеих сторон (рис. 7).

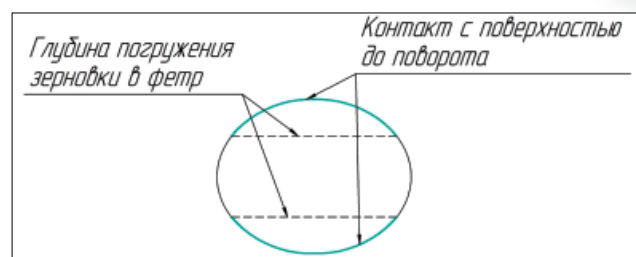


Рис. 7. Глубина погружения зерновки в фетр
Fig. 7. Depth of caryopsis immersion in felted cloth

Повернув зерновку на расчетный угол $\gamma = 58^\circ$ и перенеся глубину погружения зерновки в фетр на схему, получим область зерновки, контактирующую с впитывающей поверхностью, и область, не вступившую в контакт (рис. 8)

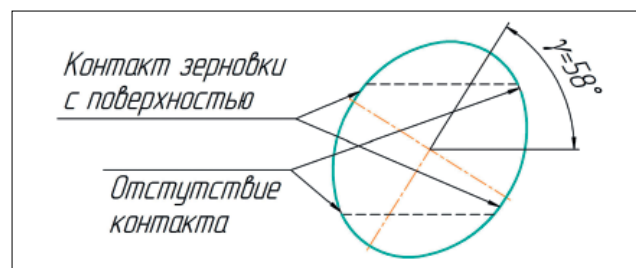


Рис. 8. Контакт зерновки с поверхностью при повороте
Fig. 8. Contact of caryopsis with the surface during rotation

Таким образом, при повороте площадь зерновки, не контактировавшей с поверхностью, незначительна. Следовательно, для удаления избыточной влаги с поверхности зерновки ее полное качение между впитывающими поверхностями не обязательно.

В результате дальнейших исследований установлено, что в частных случаях форма зерновки может отличаться от эллипсоидной и в плоскости bc иметь ромбовидное сечение (рис. 9).

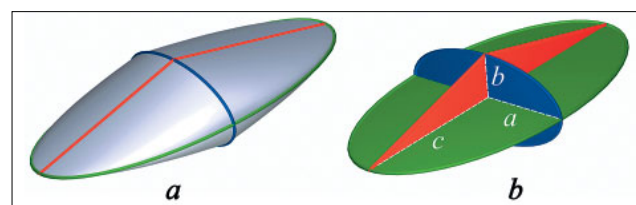


Рис. 9. Модель зерновки с ромбовидным сечением в продольной плоскости: а – объемная модель; б – секущие плоскости

Fig. 9. Model of a caryopsis with diamond section in the apical plane: a – solid model of the caryopsis; b – sectional planes

Такой характер зерновки приведет к неполному контакту с влаговпитывающей поверхностью и будет зависеть от положения зерновки на ленте. В случае уравновешенного расположения зерновки кон-

такт будет по центру (рис. 10а), а при нарушении равновесия зерновки контакт может сместиться в сторону по ромбовидной поверхности (рис. 10б).

Причем пятно контакта зерновки, показанной справа (рис. 10б), получено при увеличенном до 5 Н усилии, что с учетом средней площади сечения зерновок в эксперименте в плоскости ac составило $0,19 \text{ Н/мм}^2$.

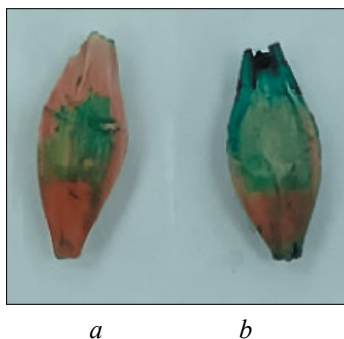


Рис. 10. Смещение пятна контакта
Fig. 10. Relocation of contact patch

Основной причиной сохранения неокрашенной поверхности зерновки является недостаточная толщина впитывающей поверхности. Из-за этого при увеличении давления до $0,19 \text{ Н/мм}^2$ зерновка, преодолев сопротивление фетра, уперлась в опорную пластину. Таким образом, при удалении избыточной поверхностной влаги с зерновок может иметь значение толщина ленты $S_{\text{пов}}$ из впитывающего материала. Для исследования этого предположения использовали фетр толщиной 1,1 мм, близкой половине толщины зерновки $S_{\text{зерн}}$.

При усилии $0,1 \text{ Н/мм}^2$ на поверхности зерновки остались незначительные непрокрашенные участки (рис. 11а). Полное окрашивание зерновки (рис. 11б) при усилии $0,19 \text{ Н/мм}^2$ свидетельствует о полноценном контакте с впитывающей поверхностью и удалении избыточной поверхностной влаги.

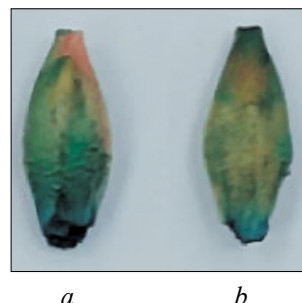


Рис. 11. Площадь контакта зерновки при условии $S_{\text{пов}} \approx 1/2 S_{\text{зерн}}$ и усилии давления: а – $0,1 \text{ Н/мм}^2$; б – $0,19 \text{ Н/мм}^2$
Fig. 11. Contact area of the caryopsis under the condition of $S_{\text{surf}} \approx 1/2 S_{\text{caryop}}$ and applied pressure force: а – 0.1 N/mm^2 ; б – 0.19 N/mm^2

Выводы

Разработанная математическая модель движения зерновки при удалении избыточной поверхностной влаги с семян позволяет сделать вывод, что даже при отсутствии качения зерновок влага будет удаляться эффективно. Экспериментальные исследования позволили сделать заключение, что для удаления поверхностной влаги с зерновки без качения необходимо обеспечить усилие давления $0,19 \text{ Н/мм}^2$ при толщине влаговпитывающей поверхности, равной половине толщины зерновки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арютов Б.А., Новожилов А.И., Пасин А.В., Соколов С.А. Повышение эффективности производственных процессов в растениеводстве // *Техника в сельском хозяйстве*. 2007. №6. С. 50-51. EDN: IISBEZ.
2. Бартенев И.И., Подвигина О.А., Гаврин Д.С., Подосинников И.В. Способы предпосевной подготовки семян и методика их моделирования // *Лесотехнический журнал*. 2018. Т. 8. №4(32). С. 199-207. DOI: 10.12737/article_5c1a3235d34735.47391674.
3. Волхонов М.С., Мамаева И.А., Беляков М.М. Классификация и определение эффективности известных способов предпосевной обработки семян // *Вестник НГИЭИ*. 2022. №8(135). С. 7-19. DOI: 10.24412/2227-9407-2022-8-7-19.
4. Касьяненко А.В., Краснов И.Н. Совершенствование технологии подготовки семян зерновых к озимому посеву в условиях аридизации климата // *Вестник аграрной науки Дона*. 2017. №3 (39). С. 42-47. EDN: ZVHYOD.
5. Chatterjee N., Sankar A., Singh R. K. et al. On-farm seed priming interventions in agronomic crops. *Acta Agriculturae Slovenica*. 2018. Vol. 111. N3. 715-735. DOI: 10.14720/aas.2018.111.3.19.
6. Янченко А.В., Бухаров А.Ф., Федосов А.Ю. Прайминг – инновационное развитие методологии подготовки семян к посеву (обзор) // *Овощи России*. 2023. № 5. С. 28-36. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-5-28-36.
7. Касьяненко А.В., Краснов И.Н., Кравченко И.А. и др. Подготовка семян к озимому посеву в засушливых условиях на агрегатах типа ЗАВ // *Сельский механизатор*. 2020. №5-6. С. 37-38. EDN: ORGBBT.
8. Shihab M.O., Hamza J.H. Seed priming of sorghum cultivars by gibberellic and salicylic acids to improve seedling growth under irrigation with saline water. *Journal of Plant Nutrition*. 2020. №43:13. 1951-1967. DOI: 10.1080/01904167.2020.1766066.
9. Sagvand M., Esfahani M.N., Hadi F. Pre-sowing enrichment of *Echinacea angustifolia* seeds with macronutrients improved germination performance and early seedling growth via stimulating the metabolism of reserves. *Industrial*

- Crops and Products*. 2022. Vol. 188. Part A. 115614. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115614.
10. Краснов И.Н., Кравченко И.А., Касьяненко А.В., Хронюк В.Б. Влияние влагозащитной обработки насыщенных водой семян на рост и развитие ячменя // *Вестник аграрной науки Дона*. 2023. Т. 16. N2(62). С. 17-26. DOI: 10.55618/20756704_2023_16_2_17-26.
 11. Киприянов Ф.А., Савиных П.А. Выявление особенностей предпосевного увлажнения семян кукурузы // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2022. N4(60). С. 61-67. DOI: 10.35694/YARCX.2022.60.4.007.
 12. Крючин, Н.П., Петров А.М., Артамонова О.А. Разработка технологии предпосевной подготовки семян бобовых трав // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018. N5(73). С. 99-102. EDN: YNDPID.
 13. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Miroshnikova V.V., Tolstoukhova T.N. The sowing of grain crops in dry conditions. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2017. Vol. 8. N4. 957-963. EDN: XMMEQX.
 14. Лящева Л.В. Влияние высушивания намоченных и проросших семян в воде и в регуляторах роста на посевные качества и урожайность моркови // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2007. N9(177). С. 35-40. EDN: ICAASV.
 15. Краснов И.Н., Касьяненко А.В., Аришин Ю.И. и др. Совершенствование процессов наружной сушки насыщенных водой семян и нанесения на них влагозащитного покрытия // *Вестник аграрной науки Дона*. 2022. Т. 15. N2(58). С. 53-61. DOI: 10.55618/20756704_2022_15_2_53-61.
 16. Киприянов Ф.А. Инженерно-технические решения для повышения эффективности предпосевного увлажнения семян // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2023. N12(230). С. 88-95. DOI: 10.53083/1996-4277-2023-230-12-88-95.
 17. Забродин В.П., Суханова М.В. Анализ процессов взаимодействия семян с рабочими органами машин предпосевной обработки циклического действия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N5. С. 63-68. DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-5-63-68.
 18. Суханова М.В., Забродин В.П. Сравнительный анализ воздействия поверхности различной жесткости рабочих органов сельскохозяйственной техники на твердую частицу сыпучего тела // *Вестник аграрной науки Дона*. 2017. N2(38). С. 19-22. EDN: ZVKCYR.
 19. Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 4-12. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
 20. Зубина В.А., Годжаев Т.З. Сравнительный анализ методов решений оптимизационных задач для сельскохозяйственного машиностроения // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N1. С. 11-16. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-11-16.

REFERENCES

1. Aryutov B.A., Novoshilov A.V., Sokolov S.A. Increasing effectiveness of production processes in the plant industry. *Machinery in Agriculture*. 2007. N7. 50-51 (In Russian). EDN: IISBEZ.
2. Bartenev O.A., Podvigina D.S., Gavrin D.S., Podosinikov I.V. Methods of pre-seeding preparation of seeds and method of their simulation. *Forestry Engineering Journal*. 2018. Vol. 8. N4(32). 199-207 (In Russian). DOI: 10.12737/article_5cla3235d34735.47391674.
3. Volkhonov M.S., Mamaeva I.A., Belyakov M.M. Classification and determination of the efficiency of known methods of seed pre-sowing treatment. *Bulletin NGIEI*. 2022. N8(135). 7-19 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2022-8-7-19.
4. Kasyanenko A.V., Krasnov I.N. Improvement of the technology to prepare grain seeds for autumn sowing in the conditions of climate aridization. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017. N3(39). 42-47 (In Russian). EDN: ZVHYOD.
5. Chatterjee N., Sankar A., Singh R. K. et al. On-farm seed priming interventions in agronomic crops. *Acta Agriculturae Slovenica*. 2018. Vol. 111. N3. 715-735 (In English). DOI: 10.14720/aas.2018.111.3.19.
6. Yanchenko A.V., Bukharov A.F., Fedosov A.Y. Priming – innovative development of methodology preparation of seeds for sowing (review). *Vegetable crops of Russia*. 2023. N5. 28-36 (In Russian). DOI: 10.18619/2072-9146-2023-5-28-36.
7. Kasyanenko A.V., Krasnov I.N., Kravchenko I.A. et al. Preparation of seeds for winter sowing in dry conditions on units of the ZAV type. *Sel'skiy mekhanizator*. 2020. N5-6. 37-38 (In Russian). EDN: ORGBBT.
8. Shihab M.O., Hamza J.H. Seed priming of sorghum cultivars by gibberellic and salicylic acids to improve seedling growth under irrigation with saline water. *Journal of Plant Nutrition*. 2020. 43:13. 1951-1967 (In English). DOI: 10.1080/01904167.2020.1766066
9. Sagvand M., Esfahani M.N., Hadi F. Pre-sowing enrichment of *Echinacea angustifolia* seeds with macronutrients improved germination performance and early seedling growth via stimulating the metabolism of reserves. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 188. Part A. 115614 (In English). DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115614.
10. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Kasyanenko A.V., Khronyuk V.B. Effect of waterproof treatment of water-saturated seeds on the growth and development of barley. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2023. Vol. 16. N2(62). 17-26 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2023_16_2_17-26.
11. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A. Identification of features of presowing moistening of corn seeds. *Herald of Agroindustrial Complex of Upper Volga Region*. 2022. N4(60). 61-67 (In Russian). DOI: 10.35694/YARCX.2022.60.4.007.

12. Kryuchin N.P., Petrov A.M., Artamonova O.A. Development of the technology of presowing preparation of legume-grass seeds. *Izvestia Orenburg state agrarian university*. 2018. 5(73). 99-102 (In Russian). EDN: YNDPID.
13. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Miroshnikova V.V., Tolstoukhova T.N.. The sowing of grain crops in dry conditions. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2017. Vol. 8. N4. 957-963 (In English). EDN: XMMEQX.
14. Lyashcheva L.V. Influence of drying seeds wetted with water and growth regulators and germinated on sowing qualities and yielding ability of carrot. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2007. N9(177). 35-40 (In Russian). EDN: ICAASV.
15. Krasnov I.N., Kasyanenko A.V., Arishin Yu.I. et al. Improving outdoor processes of drying seeds saturated with water and application on them waterproof coating. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2022. Vol. 15. N2 (58). 53-61 (In Russian). DOI: 10.55618/20756704_2022_15_2_53-61.
16. Kipriyanov F.A. Engineering and technical solutions to improve effectiveness of pre-sowing moistening of seeds. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2023. N12(230). 88-95 (In Russian). DOI: 10.53083/1996-4277-2023-230-12-88-95.
17. Zabrodin V.P., Sukhanova M.V. Analyzing interaction between seeds and pre-seeding treatment machines of cyclic action. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019. Vol. 13. N5. 63-68 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2019-13-5-63-68.
18. Sukhanova M.V., Zabrodin V.P. Comparative analysis of influence of surface of different rigidity of working parts of agricultural technics on a hard part of solid particle of free-flowing body. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017. N2(38). 19-22 (In Russian). EDN: ZVKCYR.
19. Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Mathematical modeling as an aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school). *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 4-12 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12.
20. Zubina V.A., Godzhayev T.Z. Comparative analysis of methods for solving optimization problems in agricultural engineering. *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N1. 11-16 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-11-16.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Киприянов Ф.А. – существенный вклад в замысел и дизайн исследования, сбор данных, их анализ и интерпретация;

Алешкин А.В. – анализ данных, критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания;

Савиных П.А. – критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания, окончательное одобрение варианта статьи для опубликования.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Kipriyanov F.A. – significant contribution to the conception and design of the research, data collection, analysis and interpretation;

Aleshkin A.V. – data analysis and critical revision for important intellectual content;

Savinykh P.A. – critical revision for important intellectual content and final approval of the manuscript for publication.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

01.10.2024

07.11.2024