

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ОДИНОЧНОГО СЕМЕНИ ГАЛЕГИ ВОСТОЧНОЙ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СКАРИФИКАТОРА

Д. А. МИХЕЕВ, ВАН ЦЗЮНЬ

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407

(Поступила в редакцию 06.07.2026)

Галега восточная (*Galega orientalis* Lam.) – перспективная многолетняя кормовая культура, продуктивная до 10 лет. Она достигает укосной спелости значительно раньше клевера и люцерны, что расширяет возможности ранней заготовки кормов для КРС. Главная проблема при широком применении этой культуры – это наличие у семян твердокаменной оболочки, которая ухудшает всхожесть и приводит к потерям зеленой массы. В учреждении образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» изучено влияние механической скарификации семян на энергию прорастания и лабораторную всхожесть. Доказана эффективность этого метода предпосевной обработки. Для осуществления механизированной обработки семян в промышленных масштабах необходимо точно определить режимы работы оборудования – скарификатора семян. В статье теоретически обоснованы условия движения одиночного семени галеги восточной в рабочей камере центробежного скарификатора. Актуальность работы обусловлена тем, что качество механической скарификации определяется не только угловой скоростью рабочего органа, но и характером контакта семени с рабочей поверхностью. Одиночное семя рассматривали как материальную частицу, находящуюся под действием силы тяжести, нормальной реакции рабочей поверхности, силы трения и эквивалентного центробежного воздействия. В результате теоретических исследований установлено, что движение одиночного семени галеги восточной в рабочей камере центробежного скарификатора определяется совместным влиянием геометрии камеры, угловой скорости рабочего органа, радиального положения семени и условий контакта с рабочей поверхностью. Описание движения в цилиндрической системе координат позволило связать радиальное положение, угловое перемещение и вертикальное смещение семени.

Ключевые слова: галега восточная, скарификация семян, центробежный скарификатор, одиночное семя.

Galega orientalis Lam. is a promising perennial forage crop, productive for up to 10 years. It reaches harvest maturity significantly earlier than clover and alfalfa, expanding the possibilities for early forage harvesting for cattle. The main problem with the widespread use of this crop is the presence of a hard seed coat, which impairs germination and leads to loss of green mass. The effect of mechanical seed scarification on germination energy and laboratory germination was studied at the Belarusian State Order of the October Revolution and the Red Banner of Labor Agricultural Academy. The effectiveness of this pre-sowing treatment method was proven. To implement mechanized seed processing on an industrial scale, it is necessary to accurately determine the operating conditions of the equipment—the seed scarifier. This article provides a theoretical justification for the motion of a single *Galega orientalis* seed in the working chamber of a centrifugal scarifier. The relevance of this work lies in the fact that the quality of mechanical scarification is determined not only by the angular velocity of the working element but also by the nature of the seed's contact with the working surface. A single seed was considered as a material particle subject to the force of gravity, the normal reaction of the working surface, friction, and equivalent centrifugal force. Theoretical studies revealed that the motion of a single *Galega orientalis* seed in the working chamber of a centrifugal scarifier is determined by the combined influence of the chamber geometry, the angular velocity of the working element, the radial position of the seed, and the conditions of contact with the working surface. Describing the motion in a cylindrical coordinate system allowed us to relate the radial position, angular displacement, and vertical displacement of the seed.

Key words: eastern galega, seed scarification, centrifugal scarifier, single seed.

Введение

Галега восточная является многолетней бобовой культурой, используемой в кормопроизводстве и представляющей интерес для повышения устойчивости агроценозов. Значение бобовых культур в сельском хозяйстве определяется их кормовой ценностью и способностью участвовать в биологической фиксации азота. Graham и Vance отмечали, что бобовые занимают особое место среди культурных растений благодаря сочетанию кормового, пищевого и почвоулучшающего значения [1]. Для галеги восточной этот вопрос имеет практическое значение, поскольку качество посевного материала во многом определяет полноту и равномерность формирования травостоя. Khasanov et al. указывали, что у семян галеги восточной плотная оболочка может задерживать появление всходов и приводить к потерям части высеванных семян [2].

В современной агротехнике предпосевная скарификация бобовых культур считается важным способом устранения физического покоя семян, который обусловлен плотной и малопроницаемой оболочкой. При скарификации на поверхности семян появляются мелкие повреждения и трещины, обеспечивающие доступ воды и воздуха. Благодаря этому семена быстрее впитывают влагу и начинают прорастать. В результате повышаются их всхожесть и интенсивность прорастания, всходы появляются более равномерно и в дальнейшем могут обеспечить более высокий урожай.

Непроницаемая или слабопроницаемая оболочка семян остается одной из причин неравномерного прорастания у многих представителей семейства бобовых культур. De Souza и др. рассматривали физический покой семян как состояние, при котором поступление воды ограничивается структурами

семенной оболочки [3]. Такое состояние нельзя устранить только изменением условий проращивания. Необходимо воздействовать на оболочку. Bouteiller и др. показали, что механическое повреждение оболочки может быть использовано для более равномерного нарушения физического покоя семян у бобовых культур [4]. В то же время сама обработка должна быть управляемой. Mira и др. связывали эффективность разрушения физического покоя с механическими свойствами семенной оболочки и неоднородностью семенного материала [5].

Механическая скарификация рассматривается как доступный способ предпосевной подготовки твердых семян. Ее преимущество состоит в том, что воздействие направлено непосредственно на оболочку. Однако результат такой обработки зависит не только от выбранного рабочего органа. Для центробежного скарификатора существенное значение имеет движение отдельного семени в рабочей камере. Семя перемещается в радиальном направлении, вовлекается в окружное движение, контактирует с рабочей поверхностью и испытывает трение. Поэтому качество механического воздействия определяется не одним параметром, а совокупностью геометрии камеры, угловой скорости и условий контакта семени с поверхностью. В близкой по расчетной логике работе Chervyakov et al. движение семени по поверхности камеры рассматривалось в цилиндрической системе координат с учетом силы тяжести, нормальной реакции и сопротивления движению [6].

Несмотря на практическое значение механической скарификации семян галеги восточной, условия движения отдельного семени в рабочей камере центробежного скарификатора остаются недостаточно раскрытыми. В имеющихся исследованиях основное внимание чаще уделяется качеству обработки, конструктивным особенностям машин или движению частиц в других центробежных рабочих органах. Однако для обоснования параметров скарификатора необходимо предварительно определить, как изменяются положение семени, его скорость и контакт с рабочей поверхностью при вращательном движении рабочего органа.

Цель исследований – обоснование кинематических условий движения одиночного семени галеги восточной в рабочей камере центробежного скарификатора.

Основная часть

В качестве объекта исследования были выбраны семена галеги восточной. Предметом исследования являлись условия движения одиночного семени в рабочей камере центробежного скарификатора. Для характеристики исходной партии семян использовались физико-механические показатели: влажность семян – 7,8 %, коэффициент внешнего трения семян о рабочую поверхность – $f_d=0,4663$, коэффициент внутреннего трения – $f_b=0,5$, объемная масса семян $G=772,53 \text{ кг/м}^3$. Исследование выполняли аналитическим методом на основе расчетной схемы рабочей камеры центробежного скарификатора с параметрами рабочей камеры: диаметр рабочей камеры $D_k=500 \text{ мм}$, высота днища рабочей камеры $H_k=100 \text{ мм}$, угол между рабочей поверхностью днища камеры и вертикальной осью Oz $\theta=50^\circ$. При построении модели учитывали геометрические параметры рабочей камеры, положение оси вращения, угол наклона рабочей поверхности и диапазон угловой скорости рабочего органа. Семя рассматривали как одиночную материальную частицу, перемещающуюся по рабочей поверхности камеры. Форма семени, его собственное вращение, взаимные столкновения между семенами и массовое движение семенного слоя на данном этапе не учитывались. Движение одиночного семени описывали в цилиндрической системе координат, поскольку такая система соответствует форме рабочей камеры и характеру вращательного движения рабочего органа. В расчетной схеме учитывали силу тяжести, нормальную реакцию рабочей поверхности, силу трения и эквивалентное центробежное воздействие. Полученные данные рассматривались как предварительная теоретическая основа для последующего уточнения конструктивно-технологических параметров скарификатора.

Расчетная схема рабочей камеры центробежного скарификатора.

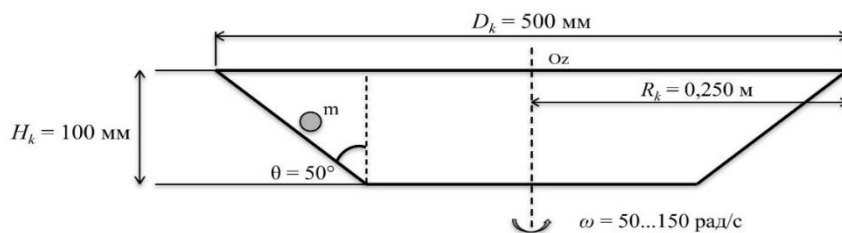


Рис. 1. Расчетная схема рабочей камеры центробежного скарификатора

Форма днища рабочей камеры центробежного скarifикатора определяет границы перемещения одиночного семени и задает условия его контакта с рабочей поверхностью. Для рабочих органов центробежного типа эта связь имеет принципиальное значение, поскольку радиальное положение частицы, геометрия рабочей зоны и угловая скорость входят в расчет кинематических параметров движения. В исследованиях центробежных рабочих органов показано, что движение семян и гранулированных частиц зависит от радиуса рабочей зоны, положения оси вращения, геометрии контактной поверхности и режима вращения рабочего органа [7, 8]. На рис. 1 представлена рабочая камера скarifикатора, где D_k обозначает диаметр рабочей камеры; R_k обозначает радиус рабочей камеры; H_k обозначает высоту днища рабочей камеры; θ обозначает угол между рабочей поверхностью днища камеры и вертикальной осью O_z ; ω обозначает угловую скорость днища; m обозначает одиночное семя галеги восточной.

Камера рассматривается в продольном сечении как рабочая зона с наклонными боковыми поверхностями. Ось O_z совпадает с осью вращения рабочего органа. Одиночное семя обозначено как материальная частица m , положение которой изменяется относительно этой оси. Угол θ , показанный на расчетной схеме, характеризует угол между рабочей поверхностью камеры, днищем и вертикальной осью O_z . Такое уточнение необходимо, поскольку при последующем анализе силового взаимодействия направление нормальной реакции и силы трения зависит от положения рабочей поверхности относительно вертикальной оси. $R_k = 0,25$ м используется как расчетная радиальная координата при анализе движения семени на периферийном участке рабочей камеры. При этом R_k не рассматривается как постоянное радиальное положение семени на всей траектории. На начальном участке движения радиальная координата семени может изменяться, однако при приближении к рабочей поверхности она становится близкой к радиусу периферийной зоны. Именно этот участок имеет основное значение для предварительной оценки окружной составляющей скорости и условий контакта семени с рабочей поверхностью.

Аналогичный подход используется при анализе движения частиц в центробежных устройствах, где радиус рабочей зоны и угловая скорость рассматриваются как основные параметры, определяющие скорость и траекторию частицы [9, 10]. При этом точность задания геометрии рабочей камеры и положения частицы относительно оси вращения влияет на последующую оценку кинематических параметров движения, что подтверждается результатами исследований по измерению траекторий частиц после схода с центробежных рабочих органов [11].

Таблица 1. Конструктивные и кинематические параметры рабочей камеры центробежного скarifикатора

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Диаметр рабочей камеры	D_k	0,5 м
Радиус рабочей камеры	R_k	0,25 м
Высота днища рабочей камеры	H_k	0,1 м
Угол между рабочей поверхностью камеры и вертикальной осью O_z	θ	50°

Данные табл. 1 задают исходную расчетную основу для дальнейшего анализа движения одиночного семени.

Радиус камеры определяет возможное радиальное положение частицы в периферийной рабочей зоне, высота днища камеры ограничивает перемещение семени по вертикали, а угол θ влияет на характер контакта с наклонной рабочей поверхностью. Диапазон угловой скорости рабочего органа используется далее при оценке эквивалентного центробежного воздействия и окружной составляющей скорости семени. Таким образом, расчетная схема рабочей камеры служит основой для последующего силового взаимодействия одиночного семени с рабочей поверхностью и описания его движения в цилиндрической системе координат.

Силовое взаимодействие одиночного семени с рабочей поверхностью.

При движении в рабочей камере центробежного скarifикатора одиночное семя галеги восточной рассматривается как материальная частица, находящаяся в контакте с наклонной рабочей поверхностью (рис. 2). В расчетной схеме учитываются сила тяжести P , нормальная реакция рабочей поверхности N , сила трения $F_{тр}$ и эквивалентное центробежное воздействие $F_{ц}$. Угол θ характеризует угол между рабочей поверхностью днища камеры и вертикальной осью O_z . Поэтому силы разложены на нормальное направление n и касательное направление t относительно рабочей поверхности. Такой подход соответствует анализу движения отдельных частиц в центробежных рабочих органах [12, 13]. В данной статье центробежное воздействие рассматривается как эквивалентная радиальная составляющая, используемая для предварительной оценки контакта семени с рабочей поверхностью.

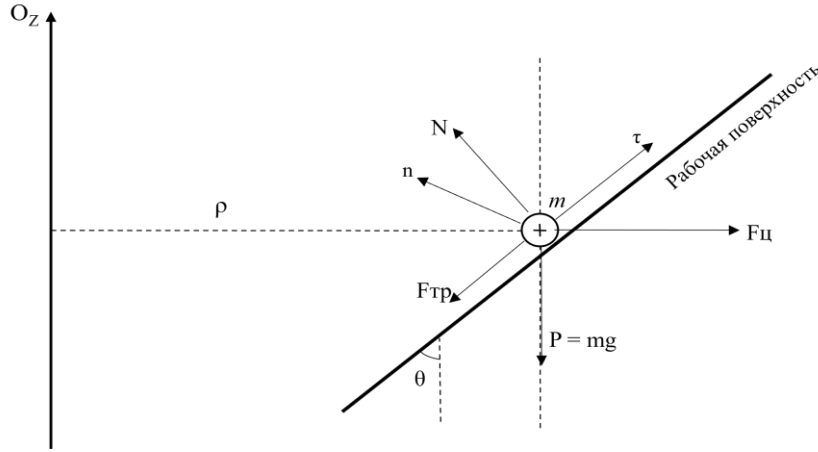


Рис. 2. Схема сил, действующих на одиночное семя в рабочей камере центробежного скарификатора

Такая постановка не является полным уравнением движения в инерциальной системе координат, а применяется для анализа условий прижатия семени к поверхности и возможности его относительного скольжения [14]. Основные расчетные соотношения имеют вид:

$$\begin{aligned} P &= mg, \\ F_{ц} &= m\dot{\phi}^2 \rho, \dot{\phi} \approx \omega, F_{ц} \approx m\omega^2 \rho, \\ N &\approx F_{ц} \cos \theta + P \sin \theta, \\ F_{тр} &= f_A N. \end{aligned}$$

где m обозначает массу одиночного семени, кг; g обозначает ускорение свободного падения, м/с²; ρ обозначает текущую радиальную координату семени, м; $\dot{\phi}$ обозначает угловую скорость движения семени, с⁻¹, ω обозначает угловую скорость рабочего органа, рад/с; f_A обозначает коэффициент внешнего трения семени о рабочую поверхность.

С учетом $P = mg$ и $F_{ц} \approx m\omega^2 \rho$ нормальная реакция рабочей поверхности может быть записана следующим образом:

$$N \approx m\omega^2 \rho \cos \theta + mg \sin \theta.$$

Касательная составляющая, определяющая возможность относительного перемещения семени вдоль рабочей поверхности, имеет вид:

$$F_t = F_{ц} \sin \theta - P \cos \theta - F_{тр}.$$

После подстановки расчетных выражений получаем:

$$F_t \approx m\omega^2 \rho (\sin \theta - f_A \cos \theta) - mg (\cos \theta + f_A \sin \theta).$$

Условие возможного относительного скольжения семени по рабочей поверхности записывается как:

$$F_t > 0.$$

Отсюда расчетная критическая угловая скорость может быть представлена следующим выражением:

$$\omega_{кр} > \sqrt{\frac{g(\cos \theta + f_A \sin \theta)}{\rho(\sin \theta - f_A \cos \theta)}}.$$

Для принятой расчетной схемы $\theta = 50^\circ$, $f_A = 0,4663$, $\rho \approx R_k = 0,25$ м. При этих параметрах $\omega_{кр}$ составляет 9,2 рад/с. Это значение является минимальным для движения семени вверх. Однако это условие не является критерием оптимального режима скарификации, поскольку оно не оценивает допустимую степень повреждения оболочки и риск травмирования зародыша. Значение трения и режима скольжения при движении частиц в центробежных системах также отмечалось в исследованиях динамического коэффициента трения и контактного перемещения гранулированных частиц [15, 16, 17].

Таким образом, силовое взаимодействие одиночного семени с рабочей поверхностью определяется совместным действием нормальной и касательной составляющих. Нормальная составляющая определяет прижатие семени к поверхности, а касательная составляющая определяет возможность его относительного скольжения. Полученные зависимости связывают угол рабочей поверхности, ко-

коэффициент внешнего трения, радиальное положение семени и угловую скорость рабочего органа с условиями контролируемого движения одиночного семени.

Описание движения одиночного семени в цилиндрической системе координат.

После определения расчетной схемы рабочей камеры и условий силового взаимодействия движение одиночного семени целесообразно описывать в цилиндрической системе координат (ρ, φ, z) . Такой выбор связан с тем, что рабочая камера имеет ось вращения O_z , а положение семени изменяется одновременно в радиальном, угловом и вертикальном направлениях. Координата ρ характеризует расстояние семени от оси вращения, координата φ описывает его угловое перемещение, а координата z отражает изменение положения семени по высоте камеры. Аналитическое описание движения частиц в центробежных рабочих органах также строится через связь радиального положения, углового перемещения и скорости частицы [18, 19].

Связь между декартовыми и цилиндрическими координатами положения семени записывается в виде:

$$x = \rho \cos \varphi, y = \rho \sin \varphi, z = z.$$

На начальном участке семя может смещаться по радиусу, вовлекаться во вращательное движение и изменять положение по высоте рабочей камеры. Поэтому полная скорость одиночного семени в цилиндрической системе координат определяется выражением:

$$v = \sqrt{\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \dot{z}^2},$$

где v обозначает модуль скорости семени, м/с; $\dot{\rho}$ обозначает радиальную составляющую скорости, м/с; $\rho \dot{\varphi}$ обозначает окружную составляющую скорости, м/с; $\dot{z}$ обозначает вертикальную составляющую скорости, м/с.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1), на периферийном участке рабочей камеры радиальная координата семени может быть принята близкой к радиусу рабочей зоны:

$$\rho \approx R_k.$$

При этом, угловая скорость движения семени не должна отождествляться с угловой скоростью рабочего органа. Поэтому сначала окружная составляющая скорости записывается в общем виде:

$$v_\varphi = \rho \dot{\varphi}.$$

Для предварительной расчетной оценки на периферийном участке принимается приближение:

$$\dot{\varphi} \approx \omega.$$

Тогда окружная составляющая скорости семени может быть представлена следующим образом:

$$v_\varphi \approx \omega R_k.$$

Данная зависимость используется только для оценки кинематических условий движения у рабочей поверхности. Она не описывает всю реальную траекторию семени и не является критерием оптимального режима скарификации. При расчетах параметров центробежных рабочих органов радиус рабочей зоны и угловая скорость также рассматриваются как основные величины, определяющие скорость частицы, однако фактическая траектория зависит от контакта, трения и режима скольжения [20, 21].

Расчет окружной составляющей скорости выполнен при $R_k = 0,25$ м и минимальном значении угловой скорости рабочего органа представлен в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения окружной составляющей скорости одиночного семени на периферии днища рабочей камеры

Расчетный случай	Угловая скорость рабочего органа ω , рад/с	Радиус рабочей камеры R_k , м	Окружная составляющая скорости v_φ , м/с
Минимальное значение	9,2	0,25	2,3

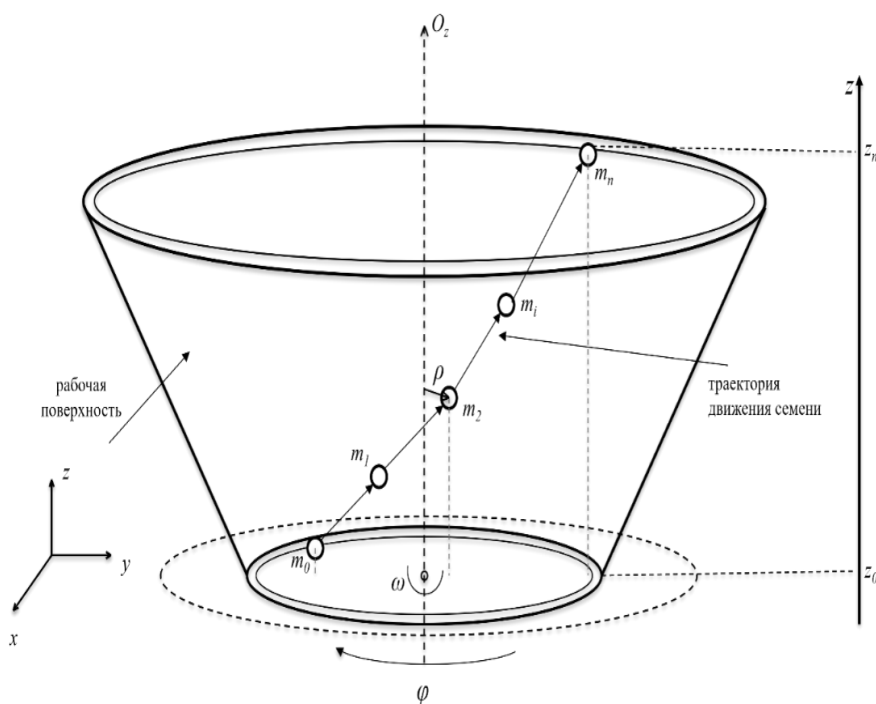


Рис. 3. Схематическое представление траектории движения одиночного семени в рабочей камере центробежного скарификатора: ρ обозначает радиальную координату семени; φ обозначает угловую координату; z обозначает вертикальную координату; O_z обозначает ось вращения рабочего органа; m_1, m_2, m_3 обозначают последовательные положения одиночного семени

Полученное значение окружной составляющей скорости характеризуют окружную составляющую скорости семени на периферийном участке рабочей камеры. Фактическая скорость может отличаться от расчетной, поскольку движение включает радиальную и вертикальную составляющие, а также зависит от характера контакта с рабочей поверхностью. Радиус рабочей камеры определяет периферийное положение семени, угловая скорость задает интенсивность вращательного движения, а условия контакта и трения определяют возможность относительного скольжения по рабочей поверхности. Следовательно, движение одиночного семени в рабочей камере должно рассматриваться как результат совместного действия геометрических, кинематических и контактных факторов. Такой подход соответствует современному направлению анализа движения семян и гранулированных частиц в рабочих органах сельскохозяйственных машин, где траектория и скорость частицы оцениваются с учетом ее положения, контакта и взаимодействия с рабочими поверхностями [21, 22, 23].

Заключение

В результате теоретического анализа установлено, что движение одиночного семени галеги восточной в рабочей камере центробежного скарификатора определяется совместным влиянием геометрии камеры, угловой скорости рабочего органа, радиального положения семени и условий контакта с рабочей поверхностью. Силовое взаимодействие семени с рабочей поверхностью рассмотрено через нормальную и касательную составляющие. Нормальная составляющая определяет прижатие семени к поверхности, а касательная составляющая характеризует возможность его относительного скольжения. Центробежное воздействие принято, как эквивалентная радиальная составляющая. Для принятой расчетной схемы скарификатора с диаметром рабочей камеры 0,5 м, высотой днища 0,1 м, углом между рабочей поверхностью днища и вертикальной осью O_z равным 50° , при $f_A = 0,4663$, $\rho \approx R_k = 0,25$ м и $\theta = 50^\circ$ расчетная критическая угловая скорость составляет 9,2 рад/с.

Описание движения в цилиндрической системе координат позволило связать радиальное положение, угловое перемещение и вертикальное смещение семени. На периферийном участке камеры при $\rho \approx R_k$ и приближении $\dot{\varphi} \approx \omega$ окружная составляющая скорости определяется зависимостью $v_\varphi \approx \omega R_k$. При радиусе камеры 0,25 м и угловой скорости 9,2 рад/с расчетное значение v_φ составляет 2,3 м/с. Полученные зависимости служат теоретической основой для последующего экспериментального уточнения фактической скорости семени, характера скольжения, степени повреждения оболочки и влияния режима обработки на посевные свойства семян.