

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.559.2:631.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-27-34>

## Установка для предпосевного увлажнения семян: обоснование угла поворота форсунки и времени распыления жидкости

*А.В. Алешкин<sup>1</sup>, Ф.А. Киприянов<sup>2</sup>, П.А. Савиных<sup>3</sup>*<sup>1</sup> Вятский государственный университет, г. Киров, Россия<sup>2</sup> Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, г. Вологда, с. Молочное, Россия<sup>3</sup> ФАНЦ Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, г. Киров, Россия<sup>1</sup> [usr00008@vyatsu.ru](mailto:usr00008@vyatsu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480><sup>2</sup> [kipriyanovfa@bk.ru](mailto:kipriyanovfa@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5974-4934><sup>3</sup> [peter.savinyh@mail.ru](mailto:peter.savinyh@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>

**Аннотация.** Предпосевное увлажнение семян – один из способов воздействия на всходы сельскохозяйственных культур и повышения их урожайности. В большинстве установок для предпосевного увлажнения семян циклического действия реализован принцип погружного увлажнения, установки же непрерывного увлажнения не подходят по причине недостаточной длительности процесса. Наиболее целесообразной является разработка установки циклического действия с обеспечением дыхательного режима путем распыления увлажняющей жидкости на поверхность семян в сочетании с процессом перемешивания. Предложена установка для предпосевного увлажнения семян барабанного типа. При реализации концепции установки на этапе проектировочно-технологических расчетов важную роль играет определение угла поворота форсунки, осуществляющей распыление увлажняющей жидкости, и времени распыления, необходимого для нанесения жидкости на поверхность семян. С целью решения поставленных задач выполнены математические расчеты, согласно которым для прототипа установки предпосевного увлажнения семян с барабаном диаметром 480 мм и глубиной 250 мм, при угловой скорости барабана 1,256 рад/с и высоте слоя семян, соответствующей углу 0,42 рад, расчетный угол поворота форсунки составил 0,39 рад. Время распыления жидкости при вероятности взаимодействия капли с зерновкой  $P = 0,95$  составило 126,9 с. Для автоматизации и упрощения расчетов при проектировании технологических линий предпосевного увлажнения семян на языке Visual C# разработана программа, позволяющая на основании характеристик зернового материала и геометрических параметров барабана рассчитать угол поворота форсунки и время распыления жидкости. Результаты расчетов по полученным моделям в дальнейшем планируется проверить экспериментальными исследованиями.

**Ключевые слова:** установка для предпосевного увлажнения семян, предпосевное увлажнение, угол поворота форсунки, угловая скорость барабана, время распыления жидкости, расчет времени распыления жидкости

**Для цитирования:** Алешкин А.В., Киприянов Ф.А., Савиных П.А. Установка для предпосевного увлажнения семян: обоснование угла поворота форсунки и времени распыления жидкости // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 4. С. 27-34. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-27-34>

ORIGINAL ARTICLE

## Unit for pre-sowing seed moistening: a rationale for the nozzle rotation angle and liquid spraying time

*A.V. Aleshkin<sup>1</sup>, F.A. Kipriyanov<sup>2</sup>, P.A. Savinykh<sup>3</sup>*<sup>1</sup> Vyatka State University, Kirov, Russia<sup>2</sup> Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, Vologda, Russia<sup>3</sup> Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy, Kirov, Russia<sup>1</sup> [usr00008@vyatsu.ru](mailto:usr00008@vyatsu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480><sup>2</sup> [kipriyanovfa@bk.ru](mailto:kipriyanovfa@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5974-4934><sup>3</sup> [peter.savinyh@mail.ru](mailto:peter.savinyh@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>

**Abstract.** Pre-sowing moistening of seeds is one of the ways to control the seedlings of agricultural crops and increase the yield. Most units of cyclical operation for pre-sowing moistening of seeds use the principle of immersed moistening. However, the units of continuous operation do not fit because of the insufficient duration of the process. The most appropriate way is to develop a unit of cyclical operation with the provision of a respiratory mode by spraying the moisturizing liquid on the surface of seeds combined with the mixing process. The authors suggest

a design of a drum-type unit for pre-sowing moistening of seeds. During the concept implementation at the stage of planning-technological calculations, it is very important to determine the angle of rotation of the spray nozzle, which sprays the moisturizing liquid, and the spraying time necessary for liquid application on the surface of seeds. To solve the assigned tasks, the authors carried out mathematical calculations, according to which the angle of spray nozzle rotation makes 0.39 rad for a pilot model of pre-sowing moistening with the drum diameter of 480 mm, the depth of 250 mm, the angular speed of 1.256 rad/s, and the height of seed layer corresponds to the angle of 0.42 rad. The spraying time by the interaction probability of a drop with a seed  $P = 0.95$  makes 126.9 s. To automate and simplify calculations by the projecting of technological lines of pre-sowing moistening of seeds, the authors used the Visual C# language to make a program for calculating the angle of spray nozzle rotation and time of spraying the moisturizing liquid in accordance with the characteristics of grain material and geometrical parameters of a drum.

**Keywords:** unit for pre-sowing seed moistening, pre-sowing moistening, nozzle rotation angle, drum angular speed, liquid spraying time, calculation of liquid spraying time

**For citation:** Aleshkin A.V., Kipriyanov F.A., Savinykh P.A. Unit for pre-sowing seed moistening: a rationale for the nozzle rotation angle and liquid spraying time. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2024;26(4):27-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-4-27-34>

### Введение

Увлажнение семян перед посевом – довольно известный способ влияния на всходы и урожайность сельскохозяйственных культур [1, 2]. Изменение климатических условий – в частности, аридизация климата в южных регионах нашей страны, требует поиска решений, способствующих активизации жизненных процессов в семенах [3-5]. Актуальным является поиск решений по повышению урожайности и более северных регионах России. На северо-западе Российской Федерации расширяются площади посевов кукурузы как источника сочного питательного силоса, необходимого для формирования кормового рациона крупного рогатого скота. Так, Вологодская область является одним из лидеров по уборке кукурузы на зеленый корм<sup>1</sup>. Кукуруза, обладая массивной зеленой массой, чувствительна к появлению возвратных заморозков, характерных для северо-запада России и способных погубить посевы. По мнению ряда ученых, предпосевное увлажнение способно компенсировать более поздний посев в уже прогретую почву с минимизацией риска потери урожая [3-5, 6-8].

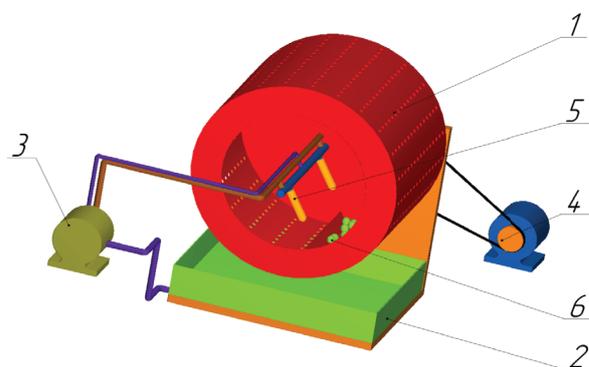
В результате экспериментально-поисковых исследований нами установлено, что предпосевное увлажнение позволяет увеличить урожайность зеленой массы кукурузы при уборке ее на силос до 15% [9]. В то же время в процессе предпосевного увлажнения важным является режим дыхания семян, обеспечение которого – один из необходимых условий при разработке установки для предпосевного увлажнения [10].

Установки для увлажнения зерна разработаны в основном для мукомольной промышленности и не могут применяться в технологических

<sup>1</sup>Урожайность кукурузы на корм – всего (вес зеленой массы) в 2016 году, ц/га // Агровестник: Росстат. URL: <https://agrovosti.net/lib/industries/forage/urozhajnost-kukuruzy-na-korm-vsego-ves-zelenoj-massy-v-2016-godu-ts-ga.html> (дата обращения: 14.01.2024).

процессах предпосевного увлажнения. Отличие процессов влагонасыщения при предпосевном увлажнении заключается в большей длительности и в том, что влага ввиду начала процессов жизнедеятельности начинает усваиваться семенами. Большинство же конструктивных решений для увлажнения зерна относится к установкам конвейерного типа и не может обеспечить необходимую продолжительность увлажнения [11]. В наибольшей степени для задач предпосевного увлажнения зерна подходит машина марки ЗЗМ-2, в конструктивно-технологическом решении которой реализовано погружное насыщение семян влагой. Однако погружное увлажнение семян может привести к угнетению процессов жизнедеятельности, снизив тем самым урожайность [9, 10, 12].

Распыление жидкости с обеспечением равномерного распределения по поверхности семян реализовано в установке для предпосевного увлажнения семян (патент RU2815106) (рис. 1).



**Рис. 1. Установка для предпосевного увлажнения семян:**  
1 – барабан; 2 – бак с увлажняющей жидкостью;  
3 – насос для подачи увлажняющей жидкости;  
4 – привод барабана; 5 – форсунки; 6 – семена

**Fig. 1. Unit for pre-sowing seed moistening:**  
1 – drum; 2 – tank with a moisturizing liquid;  
3 – pump for the moisturizing liquid supply;  
4 – drum drive; 5 – nozzles; 6 – seeds

Работает установка следующим образом. Бак 2 заполняется увлажняющей жидкостью, которая насосом 3 подается в форсунки 5 на семена 6, загруженные в барабан 1, который приводится во вращение посредством привода 4. Отверстия в поверхности барабана 1 способствуют удалению избыточной жидкости.

**Цель исследований:** выполнить расчеты по определению угла установки форсунки и времени распыления жидкости в установке для предпосевного увлажнения семян барабанного типа.

**Материалы и методы**

Исследования проводились в ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА при научно-консультационной поддержке ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» в период с 2020 по 2023 гг. При определении угла установки форсунки и обосновании времени распыления жидкости применялись методы классической механики и дифференциального исчисления. При разработке программы для автоматизированных расчетов применялся язык программирования Visual C#. Расчеты выполнялись для барабана диаметром 480 мм и глубиной 250 мм.

*Определение угла поворота форсунок.* Ось факела форсунки необходимо направить перпендикулярно поверхности, образованной зернами во вращающемся барабане. Рассмотрим движение совокупности зерен во вращающемся барабане, которая в вертикальном сечении представляет собой сегмент круга (рис. 2).

Объем всех зерен составит:

$$V = S \cdot d,$$

где  $S = \frac{R^2}{2}(\alpha - \sin(\alpha))$  – площадь сегмента,  $m^2$  (рис. 2);  $d$  – глубина барабана, м.

Масса порции обрабатываемого материала составляет:

$$M = V \cdot \rho,$$

где  $\rho$  – насыпная плотность сухого зерна,  $kg/m^3$ .

Рассмотрим два варианта движения зерна в барабане: при относительном покое сегмента (основная масса зерна вращается вместе с барабаном) и относительном движении сегмента (малая часть зерен скользит по наклонной плоскости с верхней части сегмента).

Вдоль наружной границы сегмента разобьем всю совокупность зерен на слои. Будем полагать, что на наклонную плоскость попадает только самый наружный слой, а также зерна, захваченные лопатками из некоторых внутренних слоев. Тогда в первом варианте (относительный покой) участвуют все зерна, кроме тех, что находятся на наклонной поверхности. В случае скольжения зерен по наклонной поверхности происходит их взаимодействие с каплями потока жидкости из форсунки. Для определения угла

расположения наклонной поверхности составим уравнение относительного покоя сегмента:

$$M\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{TR} + \vec{\Phi}_e = 0.$$

Предполагаем, что по мере вращения барабана сегмент осыпается, сохраняя свою форму в абсолютной системе отсчета, на которую спроецируем данное векторное равенство:

$$\begin{cases} -Mg \sin(\varphi) + F_{TR} = 0; \\ -Mg \cos(\varphi) - \Phi_e + N = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь не учитываем кориолисовы силы инерции пересыпающихся зерен, полагая их массу существенно меньшей остальной массы, находящейся в относительном покое.

Примем допущение, что сила трения  $\vec{F}_{TR}$  направлена перпендикулярно радиусу центра тяжести сегмента, и ее предельное значение определяется по закону Кулона для сухого трения с коэффициентом  $f$ :

$$F_{TR} = N \cdot f, \quad (2)$$

где  $N$  – сила нормальной реакции барабана, Н.

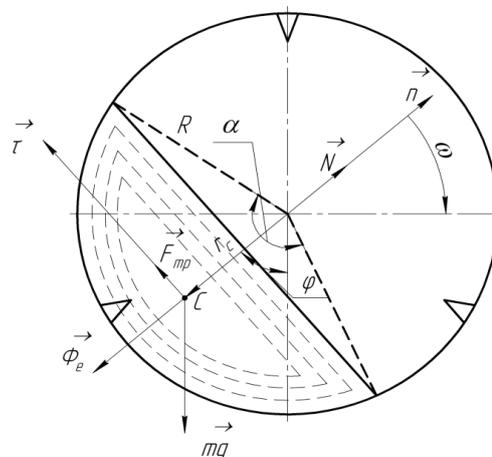
Для упрощения полагаем, что  $\vec{N}$  – вектор, направленный в центр барабана и проходящий через центр тяжести сегмента  $C$  (при этом вносимая погрешность обусловлена неравномерностью распределения нормальной реакции по окружности барабана).

Переносная центробежная сила инерции  $\Phi_e$  определяется по формуле:

$$\Phi_e = Mr_c \omega^2, \quad (3)$$

где  $r_c$  – радиус центра масс сегмента от оси вращения, м,  $\omega$  – угловая скорость барабана, рад/с.

$$r_c = \frac{2}{3} R \frac{\sin^3\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2} - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (4)$$



**Рис. 2. Относительное равновесие совокупности всех зерен в камере**

**Fig. 2. Relative balance of the total amount of all grains in a chamber**

Из второго уравнения системы (1) выразим нормальную реакцию  $N$  и на основании выражения (2) найдем силу трения:

$$\begin{aligned} F_{TR} &= (Mg \cos(\varphi) + \Phi_e) \cdot f; \\ F_{TR} &= (Mg \cos(\varphi) + Mr_c \omega^2) \cdot f. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставим силу трения в первое уравнение (1) и получим

$$-Mg \sin(\varphi) + (Mg \cos(\varphi) + Mr_c \omega^2) \cdot f = 0.$$

Откуда

$$\varphi = \arcsin \left( \frac{a + \sqrt{a^2 - 4g^2 b (r_c^2 \omega^4 \cdot f^2 - g^2 f^2)}}{2g^2 b} \right). \quad (6)$$

где  $a = 2gr_c \omega^2 \cdot f$ ,  $b = (1 + f^2)$ .

Уравнение (6) можно использовать для определения угла установки форсунки к вертикали, чтобы ось факела была перпендикулярной наклонной поверхности материала для обеспечения равномерного распределения капель по скользящим в верхнем слое частицам.

*Расчет времени распыления жидкости при циркуляции материала в камере орошения.* Поскольку при вращении барабана и повороте слоя зерновок на угол  $\varphi$  присутствует сила трения покоя, то не выполняется необходимое условие для вязкого трения, следовательно, оно отсутствует. К тому же через отверстия в барабане происходит удаление избыточной жидкости, в связи с чем полагаем, что насыщение влагой не достигло перехода в вязкое трение, и при определении силы трения скольжения принимаем трение по закону Кулона как для сухого трения. Для апробации математической модели в дальнейших расчетах зададимся коэффициентом трения  $f = 0,4$ , отражающим смешанное скольжение и перекатывание как сухих, так и увлажненных зерновок.

Зерна, прилегающие к барабану, при достижении верхней точки начинают скользить по наклонной плоскости в относительном движении. Составим дифференциальное уравнение относительного движения, рассматривая зерновку как материальную точку под действием сил тяжести, нормальной реакции и трения, а также переносной  $\vec{\Phi}_e$  и кориолисовой  $\vec{\Phi}_c$  сил инерции (рис. 3):

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c, \quad (7)$$

где  $m$  – масса зерновки, кг;  $\vec{r}$  – радиус вектор зерновки, отсчитываемый от оси вращения, м;  $\vec{N}$  – нормальная реакция плоскости, Н;  $\vec{F}$  – сила трения скольжения, которую определяем по закону Кулона, считая трение сухим, Н.

В момент распыления жидкости форсункой полагаем смачивание зерновки недостаточным для образования смазывающей пленки, ее формирование

происходит при дальнейшем перемешивании слоев во вращающемся барабане. В то же время смачивание каждой частицы, перемещаемой в наружном слое, способствует более равномерному распределению раствора между частицами. Дальнейшее перемешивание слоев, происходящее при циркуляции в барабане, сопровождается впитыванием раствора. Чем более равномерно форсункой распределяется раствор, тем более равномерным является поглощение зернами.

Сила трения скольжения:

$$F = N \cdot f.$$

Переносная центробежная сила инерции:

$$\vec{\Phi}_e = m\omega^2 \vec{r}.$$

Сила инерции Кориолиса равна массе, умноженной на кориолисово ускорение, но противоположно направлена:

$$\vec{\Phi}_c = -2m\vec{\omega} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Спроецируем уравнение (1) на вращающиеся оси координат с учетом того, что  $\Phi_{cx} = 0$ ;  $N_x = 0$ :

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg \sin(\omega t + \varphi) - F + \Phi_{ex}; \\ 0 = -mg \cos(\omega t + \varphi) + N + \Phi_{ey} + \Phi_{cy}. \end{cases} \quad (8)$$

Проекция переносной силы инерции на оси координат –

$$\begin{cases} \Phi_{ex} = m\omega^2 x; \\ \Phi_{ey} = -m\omega^2 h, \end{cases} \quad (9)$$

где  $h = R \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$  – расстояние от плоскости движения до оси вращения, м. Проекция кориолисовой силы на ось  $y$  –

$$\Phi_{cy} = 2m\omega \dot{x}. \quad (10)$$

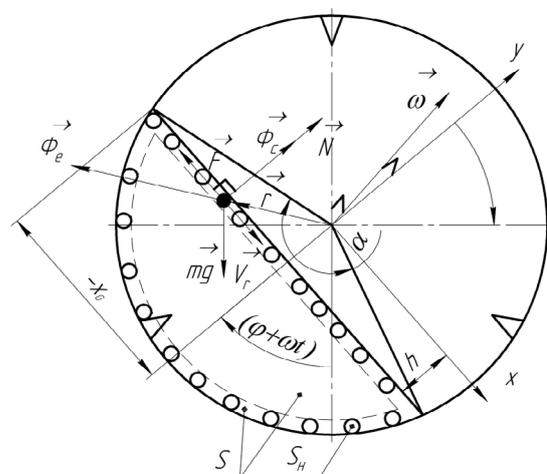


Рис. 3. Движение зерновки (как материальной точки M) по верхнему слою сегмента  
Fig. 3. Grain mass motion (as the material point M) on the upper layer of a segment

Подставим проекции сил инерции в уравнение (8):

$$\begin{cases} m\ddot{x} = mg\sin(\omega t + \varphi) - Nf + m\omega^2 x; \\ 0 = -mg\cos(\omega t + \varphi) + N - m\omega^2 h + 2m\omega\dot{x}. \end{cases} \quad (11)$$

Из второго уравнения системы (11) выразим величину нормальной реакции  $N$ :

$$N = mg\cos(\omega t + \varphi) + m\omega^2 h - 2m\omega\dot{x}$$

и подставим ее в первое уравнение системы (11), разделив на массу  $m$  все слагаемые. Запишем:

$$\ddot{x} = g\sin(\omega t + \varphi) - gf\cos(\omega t + \varphi) - f\omega^2 h + 2f\omega\dot{x} + \omega^2 x. \quad (12)$$

Приведем уравнение (12) к стандартному виду:

$$\ddot{x} - 2f\omega\dot{x} - \omega^2 x = g\sin(\omega t + \varphi) - gf\cos(\omega t + \varphi) - f\omega^2 h. \quad (13)$$

Решение дифференциального уравнения (13) складывается из общего решения однородного уравнения  $\tilde{x}$  и частного решения исходного неоднородного  $\tilde{x}$ :

$$x = \bar{x} + \tilde{x}. \quad (14)$$

Однородное уравнение имеет вид:

$$\ddot{x} - 2f\omega\dot{x} - \omega^2 x = 0.$$

Его характеристическое уравнение с корнями  $k$  запишем как

$$k^2 - 2f\omega k - \omega^2 = 0.$$

Два действительных корня характеристического уравнения

$$k_1 = f\omega + \omega\sqrt{(1+f^2)} \text{ и } k_2 = f\omega - \omega\sqrt{(1+f^2)}$$

дают общее решение однородного уравнения  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t}, \quad (15)$$

где  $C_1, C_2$  – произвольные постоянные интегрирования.

Частное решение исходного неоднородного  $\tilde{x}$  найдем в виде функции в правой части уравнения (13):

$$\tilde{x} = A\sin(\omega t + \varphi) + B\cos(\omega t + \varphi) + H, \quad (16)$$

где  $A, B, H$  – постоянные коэффициенты, подлежащие определению.

Подставим  $\tilde{x}$  в уравнение (13), для чего найдем его производные и получим алгебраическое уравнение:

$$\begin{aligned} & -\omega^2 A\sin(\omega t + \varphi) - \omega^2 B\cos(\omega t + \varphi) - \\ & -2f\omega^2 (A\cos(\omega t + \varphi) - B\sin(\omega t + \varphi)) - \\ & -\omega^2 (A\sin(\omega t + \varphi) + B\cos(\omega t + \varphi) + H) = \\ & = g\sin(\omega t + \varphi) - gf\cos(\omega t + \varphi) - f\omega^2 h. \end{aligned} \quad (17)$$

Приравниваем коэффициенты в левой и правой частях уравнения (17) при одинаковых функциях времени относительно

$$A = \frac{gf^2}{\omega^2(1+f^2)} - \frac{g}{2\omega^2}; \quad (18)$$

$$B = \frac{gf}{\omega^2(1+f^2)}; \quad (19)$$

$$H = fh. \quad (20)$$

Полученные математические модели являются феноменологическими, адекватность которых обусловлена законами классической механики. Результаты расчетов по полученным моделям будут проверены на следующем этапе – при проведении экспериментальных исследований.

### Результаты и их обсуждение

Выполним расчет угла установки форсунки к вертикали согласно уравнению (6).

При условиях  $R = 0,24$  м,  $d = 0,25$  м,  $\omega = 1,256 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ,  $\alpha = 2,44$  рад ( $140^\circ$ ),  $f = 0,4$  значения равны:

$$r_c = 0,167 \text{ м}, S = 0,052 \text{ м}^2; V = 0,013 \text{ м}^3, M = 9,71 \text{ кг}.$$

Коэффициенты в квадратном уравнении равны

$$a = 111,406; b = -2,067; c = -15,355.$$

$$\text{Угол } \varphi = 0,39 \text{ рад } (22,4^\circ).$$

При увеличении угловой скорости в 2 раза до  $\omega = 2,512 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  угол  $\varphi = 0,42$  рад ( $24,1^\circ$ ).

Для сравнения угол трения  $\text{arctg}(f) = 0,381$  рад ( $21,8^\circ$ ) будет соответствовать расчетам, если считать, что наружный слой зерна скользит по поверхности барабана (например, при отсутствии лопаток).

Определение времени распыления жидкости будет сводиться к итоговому решению дифференциального уравнения относительного движения (7). При этом общее решение уравнения (13) имеет вид:

$$x = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + A\sin(\omega t + \varphi) + B\cos(\omega t + \varphi) + H. \quad (21)$$

Определим начальные условия (движение из верхней точки сегмента из относительного покоя):

$$t = 0; \quad x(0) = -R\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right); \quad \dot{x}(0) = 0; \quad (22)$$

$$C_2 = \frac{-k_1 R\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - k_1 A\sin(\varphi) - k_1 B\cos(\varphi)}{(k_1 - k_2)} - \frac{k_1 H + \omega A\cos(\varphi) - B\omega\sin(\varphi)}{(k_1 - k_2)}; \quad (23)$$

$$C_1 = -R\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A\sin(\varphi) - B\cos(\varphi) - H - \frac{-k_1 R\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - k_1 A\sin(\varphi) - k_1 B\cos(\varphi)}{(k_1 - k_2)} - \frac{k_1 H + \omega A\cos(\varphi) - B\omega\sin(\varphi)}{(k_1 - k_2)}. \quad (24)$$

В выражении (21) определены постоянные (23), (24), определяющие частное решение дифференциального уравнения (13), соответствующего начальным условиям (22).

График, построенный по выражению (21) в среде «Mathcad» для исходных данных  $\alpha = 140^\circ$ ;  $f = 0,4$ , показывает время движения  $t_K = 0,6$  с. При этом скорость зерновки в относительном движении достигает  $v_K = 2,65 \frac{M}{c}$ . Скорость возрастает экспоненциально с задержкой в начале движения (рис. 4, 5).

Из наружного слоя в верхнюю точку сегмента наклонной поверхности попадают зерна, примыкающие к барабану. Время их подъема из крайнего правого положения в эту точку определяется выражением:

$$t_n = \frac{\alpha}{\omega}$$

Тогда время полного оборота зерновки в наружном слое составляет:

$$t_D = t_K + t_n = 1,94 + 0,6 = 2,54 \text{ с.}$$

Зерновки, прошедшие вниз по наклонной поверхности слоя, могут попасть в наружный слой с вероятностью  $P_H$  (средней относительной частотой). Предположим, что вероятность попадания в каждый слой пропорциональна его площади в вертикальном сечении:

$$P_H = \frac{S_H}{S},$$

где  $S_H$  – площадь сечения наружного слоя, м.

Определим  $S_H$  как периметр сегмента, умноженный на приведенный диаметр зерновки ( $q = 0,005$  м):

$$S_H = \left( \alpha R + 2R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) q;$$

$$P_H = \frac{S_H}{S} = \frac{0,0052}{0,052} = 0,1.$$

Зерновка попадает под факел форсунки за время  $t_D$  с вероятностью  $P_H$ . Вероятность того, что в сечении факела форсунки на уровне слоя зерна окажутся капли

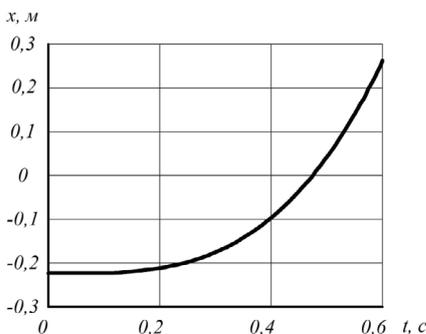


Рис. 4. Изменение координаты  $x(t)$  в пределах  $x \in [-0,225; 0,225]$  в зависимости от времени  
 Fig. 4. Change of coordinate  $x(t)$  within the limits  $x \in [-0.225; 0.225]$  depending on time

необходимого объема ( $P_F$ ), зависит от соотношения площади следа капель к общей площади сечения факела при распылении над слоем зерна за время  $t_K$ . Отношение этих площадей зависит от характеристики форсунки, подачи раствора и определяется экспериментально (например,  $P_F = 0,6$ ). Тогда вероятность  $P$  взаимодействия зерновки с раствором при распылении форсункой за время  $t_D$  равна произведению двух вероятностей:

$$P = P_H \cdot P_F = 0,1 \cdot 0,6 = 0,06.$$

Среднее число событий за 1 с –

$$\lambda = \frac{P}{t_D} = \frac{0,06}{2,54} = 0,024.$$

Вероятность неоявления одного события взаимодействия по Пуассоновскому закону за время  $t$  (рис. 6):

$$P_0 = e^{-\lambda t}.$$

Вероятность появления одного события за это же время  $t$ :

$$P_1 = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Тогда

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{1}{1 - P_1}\right). \tag{25}$$

Определим время распыления жидкости при обработке зерен. Зададимся вероятностью взаимодействия капли с зерновкой  $P_1 = 0,95$  и найдем время  $t_1$ , за которое вероятность достигнет этого значения:

$$t_1 = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{1}{1 - P_1}\right) = \frac{1}{0,024} \ln\left(\frac{1}{1 - 0,95}\right) = 126,9 \text{ с.}$$

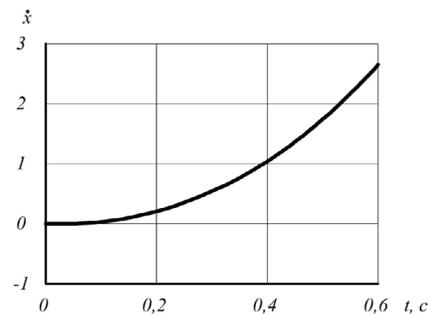


Рис. 5. Изменение во времени скорости  $\dot{x}(t)$ , когда координата  $x$  изменяется в пределах  $x \in [-0,225; 0,225]$

Fig. 5. Change of speed in time  $\dot{x}(t)$ , when coordinate  $x$  changes within the limits of  $x \in [-0.225; 0.225]$

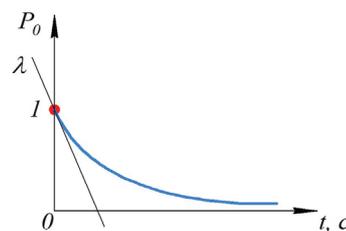


Рис. 6. Графическая иллюстрация потока Пуассона  
 Fig. 6. Graphic illustration of Poisson input

Дальнейшее перемешивание можно производить без добавления раствора с целью выравнивания насыщения его поглощения зерновками.

Для автоматизации расчетов и практической реализации полученных математических зависимостей на языке программирования Visual C# разработана программа «Моделирование траектории движения центра масс слоя частиц по цилиндрической вращающейся поверхности», позволяющая выполнять проективно-технологические расчеты по определению угла поворота форсунки и времени распыления

увлажняющей жидкости. Окно программы содержит несколько расчетных блоков (рис. 7).

Пользователь вводит исходные данные в таблицу (поз. 1). После активации кнопки «Решение» (поз. 5) пользователь получает значения искомых величин. На монитор выводятся промежуточные (поз. 3) и конечные результаты расчетов (поз. 4), определяющие положение центра масс зернового слоя в заданный момент. График (поз. 2) отражает изменение положения частицы на наклонной плоскости во времени.

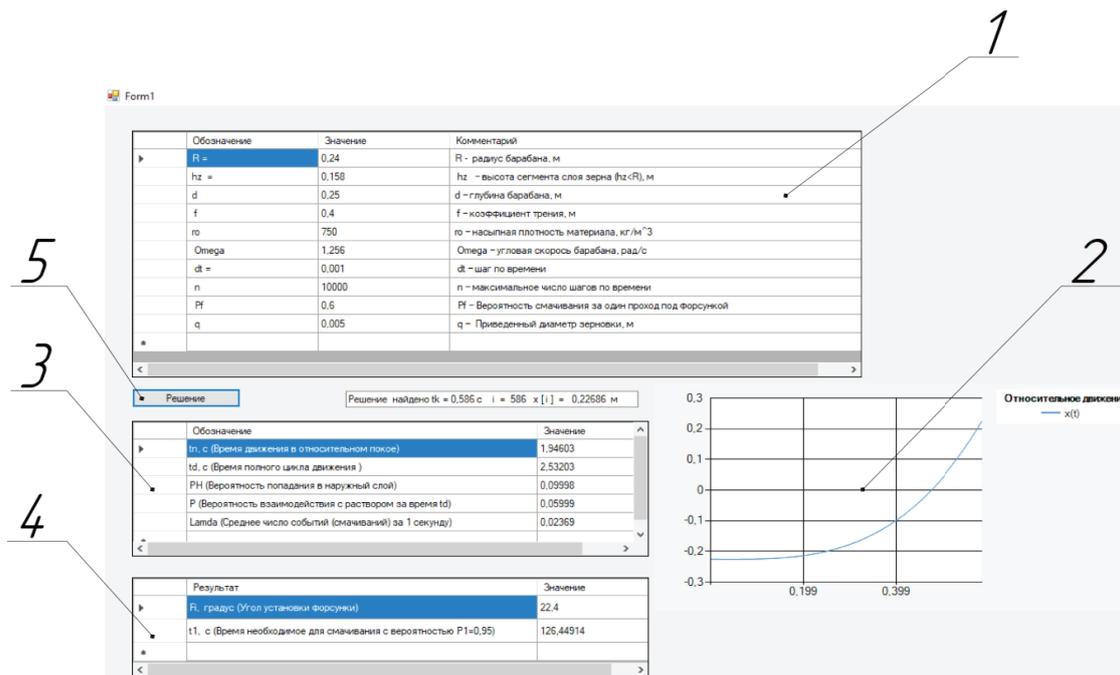


Рис. 7. Окно программы: 1 – таблица исходных данных; 2 – график; 3, 4 – промежуточные и конечные расчеты; 5 – решение

Fig. 7. Program window:

1 – table of initial data; 2 – graph; 3, 4 – intermediate and final calculations; 5 – solution

## Выводы

Выполненные расчеты и разработанная программа позволяют определить угол установки форсунок при распылении жидкости во время предпосевного увлажнения, что сможет повысить эффективность

обработки за счет обеспечения дыхательного режима семян. Для условий проведения расчетов угол поворота форсунки составил 0,39 рад. При этом время распыления жидкости составит 126,9 с при вероятности взаимодействия капли с зерновкой  $P = 0,95$ .

## Список источников

1. Волхонков 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. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-8-7-19>
2. Нечепуренко С.Б., Дорогина О.В. Воздействие различных факторов на прорастание семян *Hedysarum theinum Krasnob (Fabaceae)* // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 10 (72). С. 46-49. EDN: MVDSNR
3. Касьяненко А.В., Краснов И.Н., Кравченко И.А., Толстоухова Т.Н. О совершенствовании технологии подготовки семян зерновых перед посевом в условиях аридизации климата // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия «Естественные науки». 2017. № 4-1 (196-1). С. 70-74. EDN: YKUNZA

## References

1. Volkhonov M.S., Mamaeva I.A., Belyakov M.M. Classification and determination of the efficiency of known methods of seed pre-sowing treatment. *Vestnik NGIEI*. 2022;8:7-19. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2022-8-7-19>
2. Nechepurenko S.B., Dorogina O.V. Effect of different factors on *Hedysarum theinum Krasnob (Fabaceae)* seed germination. *Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2010;10(72):46-49. (In Russ.)
3. Kasyanenko A.V., Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Tolstoukhova T.N. On improving the technology of preparation of grain seeds before sowing in conditions of climate aridization. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2017;4-1:70-74. (In Russ.)

4. Краснов И.Н., Перекрест Ф.О. Интенсификация насыщения зерна влагой // Вестник аграрной науки Дона. 2012. № 1 (17). С. 4. EDN: REUYZT

5. Краснов И.Н., Кравченко И.А., Касьяненко А.В., Хроноук В.Б., Гапеева Т.В., Ставицкая О.Н. Результаты предпосевной подготовки и посева семян пшеницы в иссушенную почву // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 54. С. 22-28. EDN: FQYLKW

6. Imran M., Mahmood A., Römheld V., Neumann G. Nutrient seed priming improves seedling development of maize exposed to low root zone temperatures during early growth. *European Journal of Agronomy*. 2013;49:141-148. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.001>

7. Blunk S., de Heer M.I., Malik A.H., Fredlund K., Ekblad T., Sturrock C.J., Mooney S.J. Seed priming enhances early growth and improves area of soil exploration by roots. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;158:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.003>

8. Paparella S., Araújo S.S., Rossi G., Wijayasinghe M., Carbonera D., Balestrazzi A. Seed priming: state of the art and new perspectives. *Plant Cell Reports*. 2015;34(8):1281-1293. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>

9. Киприянов Ф.А., Савиных П.А. Выявление особенностей предпосевного увлажнения семян кукурузы // Вестник АПК Верхневолжья. 2022. № 4 (60). С. 61-67. <https://doi.org/10.35694/YARCX.2022.60.4.007>

10. Киприянов Ф.А., Савиных П.А., Устюжанин И.А. Влияние прайминга семян на всходы сельскохозяйственных культур // Вестник АПК Верхневолжья. 2022. № 1 (57). С. 5-10. <https://doi.org/10.35694/YARCX.2022.57.1.001>

11. 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

12. Киприянов Ф.А. Инженерно-технические решения для повышения эффективности предпосевного увлажнения семян // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 12 (230). С. 88-95. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-230-12-88-95>

### Информация об авторах

**Алексей Владимирович Алешкин**, д-р техн. наук, профессор, Вятский государственный университет; 610000, Российская Федерация, г. Киров, ул. Московская, 36; [usr00008@vyatsu.ru](mailto:usr00008@vyatsu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480>

**Федор Александрович Киприянов**, канд. техн. наук, доцент, Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина; 160555, Российская Федерация, г. Вологда, с. Молочное, ул. Шмидта, 2; [kipriyanovfa@bk.ru](mailto:kipriyanovfa@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5974-4934>

**Петр Алексеевич Савиных**, д-р техн. наук, профессор, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого; 610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, 166а; [peter.savinyh@mail.ru](mailto:peter.savinyh@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>

### Вклад авторов

А.В. Алешкин – создание математической модели, программирование;

Ф.А. Киприянов – концептуализация, создание черновика рукописи, обзор источников литературы, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;

П.А. Савиных – методология, научное руководство.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 27.02.2024, после рецензирования и доработки 06.06.2024; принята к публикации 06.06.2024

4. Krasnov I.N., Perekrest F.O. Intensification of grain moisture saturation. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2012;1(17):4. (In Russ.)

5. Krasnov I.N., Kravchenko I.A., Kasyanenko A.V., Khronyuk V.B., Gapeeva T.V., Stavitskaya O.N. Results of pre-sowing preparation and sowing of wheat seeds in dried soil. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2018; S4:22-28. (In Russ.)

6. Imran M., Mahmood A., Römheld V., Neumann G. Nutrient seed priming improves seedling development of maize exposed to low root zone temperatures during early growth. *European Journal of Agronomy*. 2013;49:141-148. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.001>

7. Blunk S., de Heer M.I., Malik A.H., Fredlund K., Ekblad T., Sturrock C.J., Mooney S.J. Seed priming enhances early growth and improves area of soil exploration by roots. *Environmental and Experimental Botany*. 2019;158:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.003>

8. Paparella S., Araújo S.S., Rossi G., Wijayasinghe M., Carbonera D., Balestrazzi A. Seed priming: state of the art and new perspectives. *Plant Cell Reports*. 2015;34(8):1281-1293. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>

9. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A. Identification of features of pre-sowing moistening of corn seeds. *Vestnik APK Verhnevolzhya*. 2022;4(60):61-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.35694/YARCX.2022.60.4.007>

10. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A., Ustyuzhanin I.A. Influence of seed priming on seedlings of crops. *Vestnik APK Verhnevolzhya*. 2022;1:5-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.35694/YARCX.2022.57.1.001>

11. Kasyanenko A.V., Krasnov I.N. Improving the technology of preparing grain seeds for winter sowing in arid climate conditions. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2017;3(39):42-47. (In Russ.)

12. Kipriyanov F.A. Engineering and technical solutions to improve effectiveness of pre-sowing moistening of seeds. *Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2023;12(230):88-95. (In Russ.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2023-230-12-88-95>

### Authors Information

**Aleksey V. Aleshkin**, DSc (Eng), Professor; Vyatka State University; Moskovskaya Str. 36, Kirov, 610000, Russia; [usr00008@vyatsu.ru](mailto:usr00008@vyatsu.ru); <https://orcid.org/0000-0002-6949-1480>

**Fedor A. Kipriyanov**, CSc (Eng), Associate Professor; Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin; Shmidta Str., 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russia; [kipriyanovfa@bk.ru](mailto:kipriyanovfa@bk.ru); <https://orcid.org/0000-0001-5974-4934>

**Petr A. Savinykh**, DSc (Eng), Professor; Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy; Lenina Str., 166a, Kirov, 610007, Russia; [peter.savinyh@mail.ru](mailto:peter.savinyh@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0524-9721>

### Author Contribution

A.V. Aleshkin – designing a mathematical model, programming; F.A. Kipriyanov – conceptualization, writing – original draft preparation, literature review, finalizing (revising and editing) of the manuscript;

P.A. Savinykh – methodology, research supervision.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 27.02.2024; Revised 06.06.2024; Accepted 06.06.2024