

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ЛЕСОСЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА В РАБОЧЕМ КАНАЛЕ СЕПАРАТОРА

доктор технических наук, доцент **В.А. Зеликов**<sup>1</sup>  
доктор технических наук, профессор **В.Г. Козлов**<sup>2</sup>  
доктор технических наук, профессор **А.В. Скрыпников**<sup>3</sup>  
кандидат технических наук **Е.А. Извеков**<sup>2</sup>  
экстерн **Е.В. Козлова**<sup>2</sup>

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,  
г. Воронеж, Российская Федерация

Подготовка качественного семенного материала для нужд лесосеменных станций, направленных на воспроизводство лесов семенами с улучшенными наследственными свойствами, требует применения специальных семяочистительных машин. Использование таких семян с улучшенными наследственными свойствами обеспечит повышение продуктивности, качества и устойчивости насаждений. Семенной материал различных культур имеет особенности поверхности и формы, с учетом этих различий разработаны и широко используются различные машины и установки. Необходимость применения специальных машин магнитной очистки вызывается невозможностью качественного разделения семенного материала. Анализ современных технических средств подготовки семенного материала показал, что особого внимания заслуживает идея объединения воздушной и магнитной очистки. При пневмомагнитной сепарации на частицу семенной смеси действуют различные силы, величины и направление которых изменяются в зависимости от конструктивных параметров рабочего органа индуктора и положения частицы семенной смеси в магнитном поле индуктора. Исследовать движение частицы в рабочем канале, а также построить математическую модель возможно, приняв некоторые допущения, результат которых позволяет изучить в теории влияние конструктивно-технологических параметров на процесс сепарации лесосеменных культур, а также определить закономерности процесса пневмомагнитной сепарации. По результатам анализа траекторий движения семян семенной смеси построены кривые движения частиц при различных значениях магнитной силы в рабочем канале, а также представлен график, иллюстрирующий возможность осуществления процесса пневмомагнитной сепарации в зависимости от соотношения скорости воздушного потока и магнитной силы, действующей на частицу. Определено, что эффективно процесс пневмомагнитной очистки семян можно осуществить при скорости воздушного потока  $3.5 \div 5.2$  м/с и величине магнитной силы  $3.4 \cdot 10^{-6} \div 8 \cdot 10^{-6}$  Н. Для того чтобы магнитная сила имела такую величину в рабочем канале, необходимо создать индукцию магнитного поля в пределах  $0.115 \div 0.177$  Тл.

**Ключевые слова:** пневмомагнитный сепаратор, семенной материал, индуктор, траектория движения, засорители

## MATHEMATICAL MODEL OF MOTION OF A FOREST SEED MATERIAL PARTICLE IN THE OPERATING CHANNEL OF SEPARATOR

DSc (Engineering), Associate Professor **V.A. Zelikov**<sup>1</sup>

DSc (Engineering), Professor **V.G. Kozlov**<sup>2</sup>

DSc (Engineering), Professor **A.V. Skrypnikov**<sup>3</sup>

PhD (Engineering) **E.A. Izvekov**<sup>2</sup>

external student **E.V. Kozlova**<sup>2</sup>

1 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",  
Voronezh, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I", Voronezh, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation

### Abstract

Preparation of high-quality seed material for the needs of forest seed stations aimed at the reproduction of forests with seeds with improved hereditary properties requires the use of special seed cleaning machines. The use of such seeds with improved hereditary properties will provide an increase in the productivity, quality and sustainability of plantations. Seed material of different species has features of surface and shape, taking into account these differences, various machines and installations have been developed and widely used. The need to use special machines for magnetic cleaning is caused by the impossibility of high-quality separation of seed material. Analysis of modern technical means of seed preparation showed that the idea of combining air and magnetic cleaning deserves special attention. During pneumomagnetic separation, various forces act on a particle of the seed mixture, the magnitude and direction of which change depending on the design parameters of the working body of the inductor and the position of the particle of the seed mixture in the magnetic field of the inductor. It is possible to study the movement of a particle in the operating channel, as well as to construct a mathematical model, by making some assumptions, the result of which makes it possible to study in theory the influence of design and technological parameters on the separation process of forest seed, as well as to determine the regularities of the process of pneumomagnetic separation. Based on the results of the analysis of the movement trajectories of the seed mixture, curves of the movement of particles are plotted at various values of the magnetic force in the working channel, and graph is presented that illustrates the possibility of carrying out the process of pneumomagnetic separation depending on the ratio of the air flow rate and magnetic force acting on the particle. It has been determined that the process of pneumomagnetic seed cleaning can be effectively carried out at an air flow rate of  $3.5 \div 5.2$  m/s, and a magnetic force of  $3.4 \times 10^{-6} \div 8 \times 10^{-6}$  N. It is necessary to create a magnetic field induction in the range of  $0.115 \div 0.177$  T in order the magnetic force to have such a value in the working channel.

**Keywords:** pneumatic magnetic separator, seed material, inductor, trajectory, weeds

### Введение

Основными задачами, стоящими перед лесным хозяйством Российской Федерации, являются развитие лесного семеноводства, комплексное и неистощимое лесопользование, как базы лесовосстановления, а также повышение продуктивности лесов. Успешному решению поставленных задач будет способствовать усиление роли повышения продуктивности и устойчивости лесов за счет генетико-селекционной основы [9, 10].

Для подготовки семенного материала разрабатываются и широко используются различные установки, однако подготовка семенного материала предъявляет жесткие требования к качеству материала, что не может быть удовлетворено существующими методами очистки.

Необходимость применения магнитной очистки вызывается невозможностью качественного разделения семян различных культур. Применение других способов очистки от сорняков не дает нуж-

ного эффекта. Это связано с тем, что семена культурных растений и семена сорняков близки как по размерам, так и по аэродинамическим свойствам.

Анализ современных технических средств подготовки семенного материала показал, что особого внимания заслуживает идея объединения воздушной и магнитной очистки [1-5]. Очистка семян пневмомагнитным способом основана на способности семян оказывать сопротивление воздушной среде при их относительном движении, а также способности семян сорняков, покрытых магнитным порошком, взаимодействовать с магнитным полем индуктора сепаратора, вследствие чего на них действует магнитная сила, величина и направление которой определяется характером магнитного поля индуктора.

Результат объединения двух видов очистки позволит сконструировать пневмомагнитный сепаратор, который позволит увеличить производительность подготовки семенного материала за счет воздушных сил и вобрать в себя высокое качество магнитной очистки [15].

В 2007 году в Воронежском ГАУ под руководством профессора В.В. Кузнецова был разработан пневмомагнитный сепаратор [2, 6], позволяющий объединить в себе преимущества двух способов очистки: очистку восходящим воздушным потоком с ее большой производительностью и высококачественную очистку под действием силы электромагнитного поля.

Суть идеи заключалась в том, что семенной материал обрабатывался магнитным порошком и подавался в вертикальный аспирационный канал с воздушным потоком, скорость которого несколько меньше скорости витания семян основной культуры. Одновременно с этим создавалось электромагнитное поле, действующее в направлении воздушного потока. В результате семена, покрытые магнитным порошком (засорители), выносились в направлении воздушного потока, а гладкие (семена основной культуры) выпадали вниз под действием силы тяжести.

Однако основным недостатком разработанного пневмомагнитного сепаратора являлось затрудненное выведение засорителей из рабочей зоны сепаратора вследствие интенсивного роста ин-

дуктивности в приграничной зоне магнитопровода. Поэтому дальнейшее совершенствование предложенной идеи заслуживает высокого внимания, реализация чего позволит выделять трудноотделимый засоритель с чистотой до 99,9 %.

### Материалы и методы

Физический процесс работы сепаратора основан на идее объединения воздушной и магнитной очистки [5-8].

Для обоснования конструктивных особенностей пневмомагнитного сепаратора и изучения вопроса возможности сепарирования различных культур была разработана математическая модель движения частицы семенной смеси в рабочей зоне [4, 7].

Рабочая гипотеза заключалась в следующем: на все частицы семенной смеси будут действовать сила тяжести, которая будет направлена вниз, сила сопротивления воздушной среды, направленная в сторону, противоположную вектору относительной скорости частицы в воздушном потоке, однако на семена сорняков дополнительно действует ещё и магнитная сила, величина и направление которой изменяются в зависимости от конструктивных параметров индуктора и положения частицы в магнитном поле индуктора.

Учесть влияние на процесс сепарации всех факторов достаточно сложно, а иногда и не представляется возможным, поэтому необходимо ввести несколько допущений:

- частица представляет собой материальную точку;
- материальные точки (частицы) не будут взаимодействовать друг с другом;
- воздушный поток представляет собой ламинарный поток;
- семена засорителей покрываются равномерно магнитным порошком;
- сепарируемая смесь с начальной скоростью

$V_0$  перемещается в рабочий канал из питающего устройства не единично.

Построение математической модели движения для частицы сепарируемой семенной смеси с учетом принятых допущений позволяет определить скорость, ускорения и траектории движения частицы. Знание этих величин позволит получить пред-

ставление о процессе сепарации сыпучей семенной смеси и степени влияния различных факторов на его эффективность.

Отметим, что приведенные уравнения описывают движение только семян, поверхность которых покрыта магнитным порошком. Семена, не покрытые магнитным порошком, будут не подвержены воздействию магнитного поля, и их траектория движения будет описываться общеизвестными уравнениями теории воздушной очистки [2, 5].

Движение частицы в воздушном канале можно считать составленным из переносного движения её вместе с воздушным потоком и движения частицы относительно воздушного потока. Тогда вектор абсолютной скорости  $\bar{v}$  частицы будет равен [4]

$$\bar{v} = \bar{V} + \bar{u}, \quad (1)$$

где  $\bar{V}$  – вектор скорости воздушного потока, м/с;

$\bar{u}$  – вектор относительной скорости частицы, м/с.

Задавшись неподвижной прямоугольной системой координат X, Y и приняв за начало координат точку входа частицы в рабочий канал (рис. 1), можно записать дифференциальное уравнение движения частицы в принятой системе координат.

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{G} + \bar{F}_R + \bar{F}, \quad (2)$$

Спроецируем вектор абсолютной скорости на оси X и Y:

$$\bar{v} = (v_x, v_y). \quad (3)$$

$$v_x = v \cos \alpha, \quad v_y = v \sin \alpha. \quad (4)$$

$$v = |\bar{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (5)$$

$G$  – сила тяжести;  $F$  – магнитная сила;

$V$  – скорость воздушного потока;  $\alpha_0$  – угол ввода

частицы в канал;  $v_0$  – начальная скорость частицы;

$v$  – скорость частицы;  $F_y$  – проекция магнитной

силы,  $F_R$  – аэродинамическая сила;  $F_x$  – проекция

магнитной силы  $F$  на плоскость, нормальную к

вектору скорости воздушного потока  $F$  на ось,

параллельную вектору скорости воздушного потока.

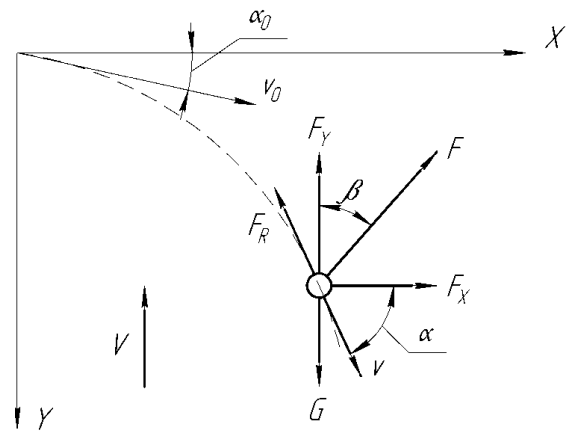


Рис. 1. Схема для определения сил, которые действуют на частицу в рабочем канале (собственные разработки)

Проекция векторного уравнения (2) на оси X и Y будут равны

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = -F_R \cdot \cos \alpha + F_x \\ m \frac{dv_y}{dt} = mg - F_R \cdot \sin \alpha - F_y \end{cases} \quad (6)$$

Известно, что наиболее эффективно процесс сепарации осуществляется при турбулентном режиме движения воздушного потока. В этом режиме сила сопротивления тела, находящегося в воздушном потоке, в большей степени зависит от динамического воздействия потока на тело. Для определения силы сопротивления воспользуемся формулой Ньютона [8]

$$F_R = m k_{II} u^2, \quad (7)$$

где  $k_{II}$  – коэффициент парусности частицы, зависящий от аэродинамических свойств частицы.

Подставляя в уравнения (6) выражение (7), получим

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = -m \cdot k_{II} \cdot u^2 \cdot \cos \alpha + F_x \\ m \frac{dv_y}{dt} = m \cdot g - m \cdot k_{II} \cdot u^2 \cdot \sin \alpha - F_y \end{cases} \quad (8)$$

Разделив обе части уравнения (3) на  $m$  и учитывая, что

$$u_x = u \cdot \cos \alpha, \quad u_y = u \cdot \sin \alpha, \quad (9)$$

$$u = |\bar{u}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}, \quad (10)$$

получим

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -k_{II} \cdot u_x \sqrt{u_x^2 + u_y^2} + \frac{F_x}{m} \\ \frac{dv_y}{dt} = g - k_{II} \cdot u_y \sqrt{u_x^2 + u_y^2} - \frac{F_y}{m} \end{cases} \quad (11)$$

Так, согласно допущению (скорость воздушного потока не изменяется по величине и направлению), выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_x &= v_x, \\ u_y &= V - v_y \end{aligned} \quad (12)$$

Представим систему уравнений (11) с учетом выражения (12) системой дифференциальных уравнений, которые будут описывать процесс движения частицы в рабочем канале:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -k_{II} \cdot v_x \sqrt{v_x^2 + (V - v_y)^2} + \frac{F_x}{m} \\ \frac{dv_y}{dt} = g - k_{II} \cdot (V - v_y) \sqrt{v_x^2 + (V - v_y)^2} - \frac{F_y}{m} \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \end{cases} \quad (13)$$

Сепарируемый семенной материал по условиям технологического процесса поступает в рабочий канал с определенной начальной скоростью, тогда уравнение (13) имеет одно-единственное решение. Это означает, что частица сепарируемой семенной смеси имеет одну возможную траекторию движения, которую можно определить, решив систему уравнений (13).

Использование численного метода Рунге-Кутты позволяет решить полученную квазилинейную систему дифференциальных уравнений в пакете математических программ MathCad. Решение системы дифференциальных уравнений при различном сочетании скорости и направления ввода частицы в канал, а также различном соотношении горизонтальной и вертикальной составляющей магнитной силы позволяет определять основные

закономерности процесса пневромагнитной сепарации, а также теоретически изучать влияние на процесс сепарации конструктивно-технологических параметров рабочего органа пневромагнитного сепаратора [11-14, 16, 17].

Определено, что существенное влияние на траекторию движения частицы оказывает соотношение горизонтальной и вертикальной составляющей магнитной силы

$$\frac{F_x}{F_y} = tg\beta \quad (15)$$

Траектории движения частицы при различной величине  $tg\beta$  представлены на рис. 2.

Горизонтальная составляющая магнитной силы  $F_x$  оказывает существенное положительное влияние на процесс ввода частицы в рабочий канал. Чем больше  $tg\beta$ , тем быстрее частица будет выходить из слоя материала. Наиболее оптимальным следует считать вариант, при котором на частицу будет действовать магнитная сила, направленная перпендикулярно движущемуся потоку, то есть когда  $\beta = \gamma$ . В этом случае сила  $F_x$  позволяет создать предварительное расслоение материала ещё до входа его в канал, перемещая сорняки в верхние слои потока ещё до входа в воздушный поток. На рис. 2, а показана расстановка сил при  $\beta = \gamma = 45^\circ$ .

При отсутствии составляющей  $F_x$ , то есть при  $tg\beta = 0$  магнитная сила будет действовать против потока и вталкивать частицы обратно в питатель, что приведет к затруднению с подачей материала в рабочий канал (рис. 2, б). Так как магнитные частицы ещё до выхода в зону сепарирования будут устремляться в направлении, противоположном движению основного потока, питающий канал будет забиваться.

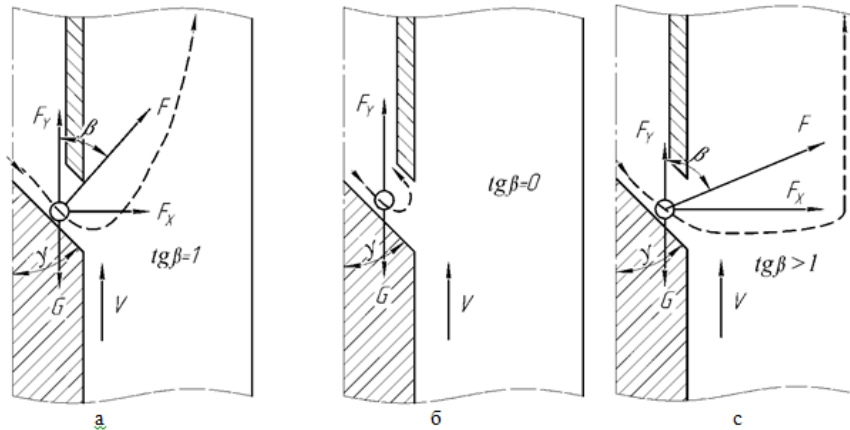


Рис. 2. Траектории движения частицы в рабочем канале (собственные разработки)

После выхода частицы в рабочий канал  $F_x$  начинает отрицательно влиять на процесс сепарации, так как она будет притягивать частицы к стенкам рабочего канала, тем самым нарушая равномерное распределение частиц по сечению. При значительной величине  $F_x$  частицы довольно быстро пересекают канал в поперечном направлении, что может привести к залипанию их на стенках канала и нарушению процесса сепарации (рис 2, с).

Таким образом, выявлено, что увеличение  $tg\beta$  положительно влияет на процесс при вводе в канал и отрицательно при последующем движении. Анализ показал, что оптимальное значение  $tg\beta$ , которое позволит провести процесс сепарации, составляет от 0,07 до 0,28.

При подъёме частицы на высоту, то есть при приближении к краю индуктора  $tg\beta$  увеличивается, а непосредственно в краевых зонах он становится больше 1, то есть  $F_x$  составляющая становится больше  $F_y$  и скорость частицы уменьшается до нуля. Чтобы вывести её из канала, необходимо увеличить скорость воздушного потока до скорости, большей скорости витания семян, например за счет уменьшения сечения канала в конфузоре, расположенном в краевой зоне индуктора.

Хотя  $F_x$  оказывает существенное влияние на процесс в момент ввода и в момент вывода частицы из рабочего канала, однако определяющее значение

на процесс сепарации оказывает составляющая  $F_y$ , необходимая для подъёма частицы вверх по каналу.

На рис. 3 представлен график, построенный по результатам обработки решений системы дифференциальных уравнений (13), иллюстрирующий возможность осуществления процесса пневмоманитной сепарации в зависимости от соотношения скорости воздушного потока и магнитной силы, действующей на частицу.

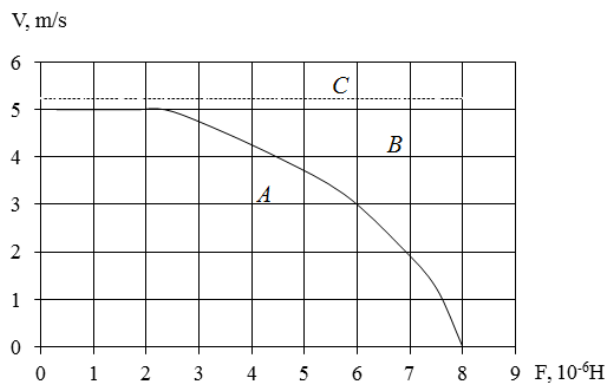


Рис. 3. Влияние на процесс сепарации соотношения скорости воздушного потока  $V$  и магнитной силы

$$F_y \text{ (собственные разработки)}$$

Из анализа графика, представленного на рис. 3, видно, что процесс сепарации возможен тогда, когда величины рассматриваемых параметров скорости воздушного потока  $V$  и магнитной силы  $F_y$  имеют точку пересечения в области В, то есть выше линии предельного соотношения значений этих параметров. Эффективность сепарации будет улучшаться как с увеличением скорости воздушно-

го потока, так и с увеличением величины магнитной силы. Если точка пересечения параметров  $V$  и  $F$  находится в области  $A$ , ниже линии предельного соотношения значений этих параметров, то сумма силы сопротивления частицы воздушному потоку и магнитной силы будет меньше силы тяжести частицы и процесс сепарации будет невозможен.

В области  $C$ , лежащей на графике выше пунктирной линии, качественный процесс сепарации невозможен, так как скорость воздушного потока будет больше скорости витания качественных семян основной культуры. При увеличении скорости воздушного потока выше предельного значения витания основной культуры семена будут выноситься из рабочего канала вместе с семенами сорняков, что недопустимо по условиям технологического процесса.

### Выводы

Таким образом, построена и проанализирована математическая модель движения частицы

лесосеменной смеси, полученная графическая зависимость показывает влияние таких конструктивно-технологических параметров рабочего органа пневмомагнитного сепаратора, как скорость воздушного потока и величина магнитной силы, что позволяет выявить возможность процесса сепарации и характер протекания процесса пневмомагнитной сепарации.

Определено, что эффективно процесс пневмомагнитной очистки семян можно осуществить при скорости воздушного потока  $3.5 \div 5.2$  м/с и величине магнитной силы  $3.4 \cdot 10^{-6} \div 8 \cdot 10^{-6}$  Н. Для того чтобы магнитная сила имела такую величину в рабочем канале, необходимо создать индукцию магнитного поля в пределах  $0.115 \div 0.177$  Тл.

Научная новизна пневмомагнитного процесса очистки семян лесосеменной смеси будет заключаться в разработке нового высококачественного пневмомагнитного сепаратора, позволяющего разделять различные культуры, близкие как по размерам, так и по аэродинамическим свойствам.

### Библиографический список

1. Деев, П. А. Новое направление очистки семян трав / П. А. Деев, Е. В. Козлова // Молодежный вектор развития аграрной науки : матер. 69-й студенческой научной конференции. – Воронеж, 2018. – Ч. I. – С. 75–86.
2. Кузнецов, В. В. Пневмомагнитная сепарация мелкосеменных культур / В. В. Кузнецов // Сельский механизатор. – 2007. – № 9. – С. 16–17.
3. Кузнецов, В. В. Магнитная сепарация семян трав / В. В. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 10. – С. 9–10.
4. Патент № 2275247 Российская Федерация МПК С1, В03С 1/24. Пневмомагнитный сепаратор: № 2004136471/03: заявл. 14.12.2004; опубл. 14.12.2004 / В. В. Кузнецов, В. Г. Козлов, Е. А. Извеков, О. С. Мальчикова, Е. В. Козлова; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Воронежский ГАУ». – 2 с.
5. Kozlov, V. G. Theoretical Justification of Optimal Design and Process Parameters of Pneumomagnetic Separation / V. G. Kozlov, E. A. Izvekov // International scientific and practical conference "Agro-SMART – Smart solutions for agriculture" (Agro-SMART 2018). – 2018. – Vol. 12. – P. 397–400. – DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.74>.
6. Dadak, V. O. Improving of pneumatic separator for small seed crops // Mechanization and Electrification of Agriculture. Inter-Department Collection of Works. – 2013. – No. 97. – P. 495–501.
7. Seeds of Vegetables, Melon Field, Fodder and Aroma Crops. Variety and sowing qualities. Technical specifications DSTU 7160. 2010.
8. Use of the electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds / S. J. Kovalyshyn, O. P. Shvets, S. Grundas, J. Tys // International Agrophysics. – 2013. – No. 27 (4). – P. 419–424.
9. Kovalyshyn, S. Y. Improving the efficiency of pneumatic separation of forage grass seeds / S. Y. Kovalyshyn // Technical Systems and Technologies in Livestock. – 2014. – Vol. 144. – P. 25–232.

10. Kovalyshyn, S. Y. Pneumatic electric separator for seeds // *Scientists Lviv. Agr. University : Catalogue of Innovations*. – 2013. – P. 13-48.
11. Zaika, P. M. Separation of Seed by Physics and Mechanical Properties / P. M. Zaika, G. E. Maznev. – Moscow : Kolos, 1978. – 287 p.
12. Tarushkyn, V. I. Dielectric Seeds Separation: DSc (engineering) thesis / V. I. Tarushkyn. – Moscow, 2007. – 401 p.
13. Zhuk, O. Y. Selection of vegetables / O. Y. Zhuk, Z. D. Sych // *Agrarian Science*. – 2012. – Vol. 324.
14. Kovalyshyn, S. Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures / S. Kovalyshyn, V. Dadak, S. Konyk // *De Gruyter Open Ltd*. – 2015. – No. 18. – P. 108–112.
15. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / A. I. Novikov, B. T. Ersson, V. V. Malyshev [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions"*. – 2020. – P. 012060. – DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012060.
16. Новиков, А. И. Влияние длины размерных секций дискового сепаратора на полноту выделения лесных семян / А. И. Новиков // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2008. – № 184. – С. 57–62.
17. Новиков, А. И. Аналитические зависимости для расчета основных параметров безрешетного сепаратора / А. И. Новиков // *Моделирование систем и процессов*. – 2013. – № 2. – С. 54–56.

### References

1. Deev P.A., Kozlova E.V. *Novoe napravlenie ochistki semyan trav. Molodezhnyj vektor razvitiya agrarnoj nauki: materialy 69-j studencheskoj nauchnoj konferencii*. Voronezh, 2018, Ch. I, pp. 75-86 (in Russian).
2. Kuznecov V. V. (2007) *Pnevmomagnitnaya separaciya melkosemennyh kul'tur. Sel'skij mekhanizator*, № 9, pp. 16-17 (in Russian).
3. Kuznecov V. V. (2008) *Magnitnaya separaciya semyan trav. Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozjajstva*, № 10, pp. 9-10 (in Russian).
4. Patent № 2275247 *Rossijskaya Federaciya* MPK S1, V03S 1/24. *Pnevmomagnitnyj separator: № 2004136471/03: zayavl. 14.12.2004; opubl. 14.12.2004 / V.V. Kuznecov, V.G. Kozlov, E.A. Izvekov, O.S. Mal'chikova, E.V. Kozlova zayavitel' i patentoobladatel' FGOU VPO «Voronezhskij GAU»*. 2 p. (in Russian).
5. Kozlov V.G., Izvekov E.A. (2018). Theoretical Justification of Optimal Design and Process Parameters of Pneumomagnetic Separation. *International scientific and practical conference "Agro-SMART - Smart solutions for agriculture" (Agro-SMART 2018)*, vol 12, pp. 397-400. DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.74>.
6. Dadak V. O. (2013) Improving of pneumatic separator for small seed crops. *Mechanization and Electrification of Agriculture. Inter-Department Collection of Works* 97 495-501.
7. Seeds of Vegetables, Melon Field, Fodder and Aroma Crops. Variety and sowing qualities. Technical specifications DSTU 7160. 2010.
8. Kovalyshyn S. J., Shvets O. P., Grundas S., Tys J. (2013) Use of the electro-separation method for improvement of the utility value of winter rapeseeds. *International Agrophysics* 27 (4): 419-424.
9. Kovalyshyn S. Y. (2014) Improving the efficiency of pneumatic separation of forage grass seeds. *Technical Systems and Technologies in Livestock* 144: 25-232.
10. Kovalyshyn S. Y. (2013) Pneumatic electric separator for seeds. *Scientists Lviv. Agr. University : Catalogue of Innovations* 13 48.
11. Zaika P. M, Maznev G. E. Separation of Seed by Physics and Mechanical Properties. Moscow : Kolos, 1978. 287 p.
12. Tarushkyn V. I. Dielectric Seeds Separation: DSc (Engineering) thesis. Moscow, 2007, 401 p.
13. Zhuk O. Y, Sych Z. D. (2012) Selection of vegetables. *Agrarian Science* 324.



14. Kovalyshyn S., Dadak V., Konyk S. (2015) Intensification of the process of preparing small seed crop mixtures. *De Gruyter Open Ltd* 18: 108-112.
15. Novikov A. I., Ersson B., Malyshev V. (et al.) (2020) *Mekhanizatsiya sortirovki semyan khvoynykh porod v Rossii: analiz izbrannoy literatury*. In: IOP Conference Series: *Nauka o Zemle i okruzhayushchey srede. Mezhdunarodnyy lesnoy forum «Lesnyye ekosistemy kak global'nyy resurs biosfery: vyzovy, ugrozy, resheniya»*, p. 012060. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012060 (in Russian).
16. Novikov A. I. (2008) *Vliyaniye dliny razmernykh seksiy diskovogo separatora na polnotu vydeleniya lesnykh semyan. Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, № 184, pp. 57-62 (in Russian).
17. Novikov A. I. (2013) *Analiticheskiye zavisimosti dlya rascheta osnovnykh parametrov bezreshetnogo separatora. Modelirovaniye sistem i protsessov*, № 2, pp. 54-56 (in Russian).

### Сведения об авторах

*Зеликов Владимир Анатольевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

*Козлов Вячеслав Геннадиевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации транспортных и технологических машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vya-kozlov@yandex.ru.

*Скряпников Алексей Васильевич* – доктор технических наук, профессор, декан факультета управления и информатики в технологических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: skrypnikovsafe@mail.ru.

*Извекоев Евгений Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: izvek@yandex.ru.

*Козлова Елена Владимировна* – экстерн ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: naselvl@mail.ru.

### Information about authors

*Zelikov Vladimir Anatolyevich* – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

*Kozlov Vyacheslav Gennadievich* – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of operation of transport and technological machines, FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great", Voronezh, Russian Federation; e-mail: vya-kozlov@yandex.ru.

*Skrypnikov Aleksey Vasilyevich* – DSc (Engineering), Professor, FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation; e-mail: skrypnikovsafe@mail.ru.

*Izvekov Evgeny Aleksandrovich* – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Automation, FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great", Voronezh, Russian Federation; e-mail: izvek@yandex.ru.

*Kozlova Elena Vladimirovna* – external student, FSBEI HE "Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great", Voronezh, Russian Federation; e-mail: naselvl@mail.ru.