

## ИНВЕРСИЯ СЕМЯН И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ПУНКТИРНОГО ПОСЕВА

---

Владимир Васильевич Василенко  
Сергей Владимирович Василенко

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Инверсия семян при пунктирном посеве проявляется в том, что в процессе падения в борозду, отскоков и перекатываний по борозде семена нарушают свою очередьность высева, то есть появляются отрицательные интервалы. Это явление свидетельствует о плохом качестве посева и наступает вследствие несовершенства конструкции высевающего аппарата и процесса закрытия семян почвой, а также при увеличении нормы высева. Для оценки точности распределения семян вдоль борозды применяется коэффициент вариации интервалов между ними, но он неудобен тем, что зависит от нормы высева и тем самым мешает оценке достоинств сеялки. Путем математического моделирования процесса пунктирного высева определен непосредственный показатель совершенства сеялки. Это среднее квадратичное отклонение каждого семени от расчетного места его фиксации в борозде. Этот показатель не изменяется от нормы высева, если она регулируется путем применения высевающих дисков с разным числом ячеек. Зная его численное значение и норму высева семян, можно определить все числовые характеристики случайной величины – интервала между семенами, аппроксимировать плотность распределения вероятности этой величины законом гамма-распределения и определить возможность наступления инверсии и появления отрицательных интервалов. Инверсия частично выравнивает интервалы, так как отрицательные интервалы для развития растений не отличаются от положительных, а для растений имеет значение только абсолютная величина интервалов. Но инверсия не может довести точность высева до закона нормальной плотности распределения интервалов. Для этого необходимо ограничивать норму высева. При высеве семян сахарной свеклы без инверсии с нормой 7 шт./м технические средства должны обеспечить точность высева, соответствующую среднему квадратичному отклонению каждого семени не более 5 см.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** коэффициент вариации, инверсия семян, норма высева, точность распределения, математическое ожидание интервалов, среднее квадратичное отклонение.

## INVERSION OF SEEDS AND ITS EFFECT ON THE QUALITY OF SINGLE-GRAIN SOWING

Vladimir V. Vasilenko  
Sergey V. Vasilenko

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The inversion of seeds occurs at single-grain sowing. In the process of falling into the furrow, bouncing and rolling along the furrow the seeding sequence can be disturbed, i. e. negative intervals appear. This phenomenon indicates poor quality of sowing, and comes around due to the imperfections in the design of the sowing apparatus and in the process of covering seeds with soil, as well as due to heavy seed application rate. To assess the accuracy of the distribution of seeds along the furrow, the coefficient of variation of the intervals between them is used, but it is rather inconvenient, because it depends on the seeding rate and therethrough gives an incorrect assessment of the advantages of the drill. By applying mathematical modeling of the single-grain sowing process a direct indicator of the drill efficiency was determined. This is a standard deviation of each seed from its calculated anchoring position in the furrow. This indicator does not vary according to the seeding rate, in case if the latter is regulated by seeding plates with different number of cells. Knowing its numerical value and seeding rate, it is possible to determine all numerical characteristics of such random variable as the interval between seeds, approximate the density of probability distribution of this value by gamma distribution law, and determine the possibility of inversion occurrence and negative intervals emerging. Inversion partially equalizes the intervals, since from the plant development point of view negative intervals do not differ from positive ones, and only absolute value of the intervals is essential to the plantings. But inversion cannot improve accuracy of seeding up to the law of the normal density of intervals distribution. For this it is necessary to limit the seed application rate. When sowing sugar beet seeds without inversion with a norm of 7 pcs/m, technical means should ensure seeding accuracy corresponding to the standard deviation of each seed not more than 5 cm.

**KEYWORDS:** coefficient of variation, seed inversion, seeding rate, distribution accuracy, mathematical expectation of intervals, standard deviation.

**И**звестно, что равномерное размещение семян вдоль посевного рядка является условием рационального использования площади питания каждым растением. Создание таких условий позволяет получать максимальные урожаи [6]. Для зерновых культур, которые высеваются с густотой около 70 семян на погонный метр рядка, требование равенства всех площадей питания практически невыполнимо.

В случае с пропашными культурами каждому растению необходимы гораздо большие площади питания, поэтому и нормы высева для них значительно ниже, например, подсолнечник можно высевать с нормами 5–7 семян на метр [13], сахарную свеклу – 7–9 шт./м [3, 7, 9]. При условии длинных интервалов между семенами погрешности в их размерах кажутся не такими существенными, и показатели равномерности улучшаются. Для пропашных культур применяется поштучный отбор семян высевающими аппаратами, и их совершенствование направлено на устранение повреждений [1, 10] и на выравнивание времени обслуживания каждого семени [2], чтобы выходящий из аппарата поток был регулярным [4, 8].

Математическую модель формирования пунктирного ряда семян можно представить начиная с гипотетического регулярного потока семян с одинаковыми интервалами во времени выхода из высевающего аппарата. Мы принимаем это допущение, хотя в действительности любой высевающий аппарат имеет хотя бы незначительные погрешности в этой регулярности. Но в процессе падения в борозду и успокоения в ней каждое семя отклоняется от расчетного места своей остановки на величину  $\delta$ . Эта величина случайная. Она соответствует закону нормального распределения [11, 12]. Ее математическое ожидание принято считать равным нулю, а среднее квадратичное отклонение тем больше, чем хуже конструкция высевающего аппарата и условия его эксплуатации. Важность этого среднего квадратичного отклонения каждого семени в оценке достоинств сеялки и качества посева послужила причиной многих исследований процесса высева с применением методов математического моделирования [5, 14].

Исходный поток семян принят регулярным виртуально, или гипотетически, потому, что все незначительные погрешности в работе высевающего аппарата можно перенести на увеличение отрицательных факторов, действующих после высевающего аппарата, все равно их влияние на качество посева будет одинаковым. У регулярного потока семян интервалы между ними имеют математическое ожидание  $m_0$  и среднее квадратичное отклонение  $\sigma_0 = 0$ . В борозде этот поток уже не будет регулярным, так как каждое семя отклонилось от своей расчетной точки фиксации на величину  $\delta$  (рис. 1). У этой величины нулевое математическое ожидание, а среднее квадратичное отклонение обозначим  $\sigma'$ .

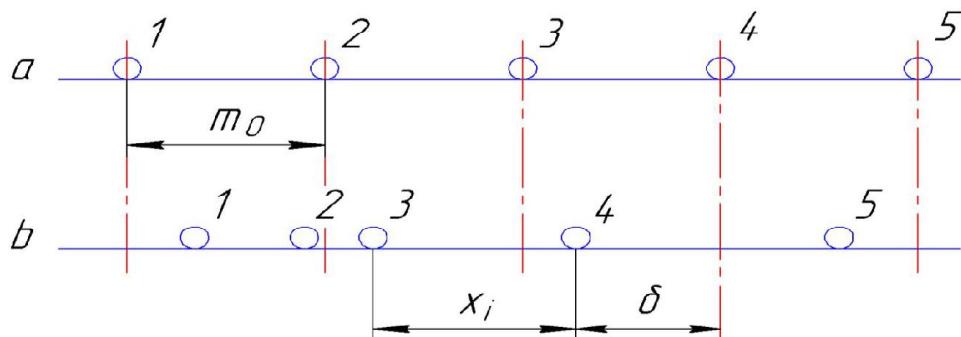
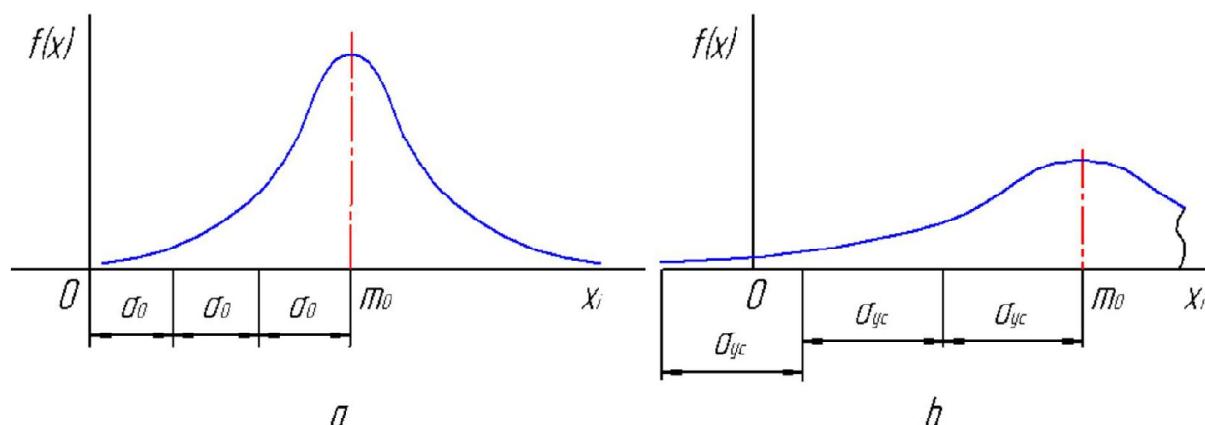


Рис. 1. Формирование посевного рядка семян без их инверсии:  
а – регулярный поток семян (исходное состояние); б – размещение семян в борозде по закону нормального распределения интервалов;  
1, ... 5 – порядковые номера семян

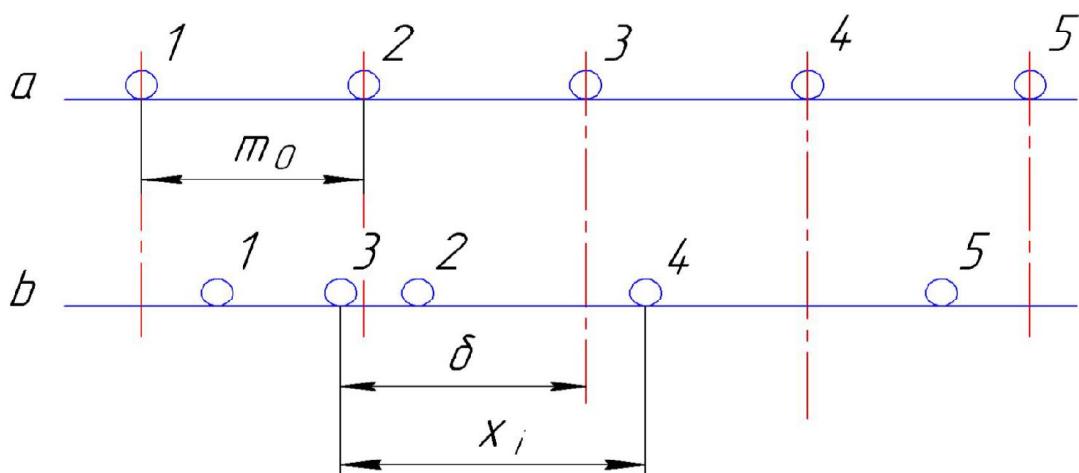
В борозде появились случайные интервалы  $x_i$  с тем же математическим ожиданием  $m_0$  (так как количество семян в рядке не изменилось) и средним квадратичным отклонением  $\sigma_0$ , которое зависит от  $\sigma'$ . Так как оба конца каждого интервала расположены случайно, то среднее квадратичное отклонение интервалов вычисляется по правилу сложения дисперсий, откуда  $\sigma_0 = 1,41\sigma'$ .

Хорошее качество посева характеризуется тем, что семена в посевном рядке не нарушают очередность выхода из аппарата. В математической модели это означает, что на графике плотности распределения вероятности случайной величины  $x_i$  кривая почти не доходит до нулевого значения аргумента и практически вся располагается в положительной зоне его значений (рис. 2, a). В этом случае  $3\sigma_0 < m_0$ , или  $4,23\sigma' < m_0$ , коэффициент вариации  $V \leq 0,33$ .



**Рис. 2. Графики плотности вероятности распределения интервалов между семенами:**  
а – закон нормального распределения интервалов;  
б – закон условно нормального распределения

Если качество посева ухудшилось, семена распределились по борозде более беспорядочно и частично потеряли очередьность своего высева, то появились отрицательные интервалы, например интервал между семенами 2 и 3 (рис. 3).



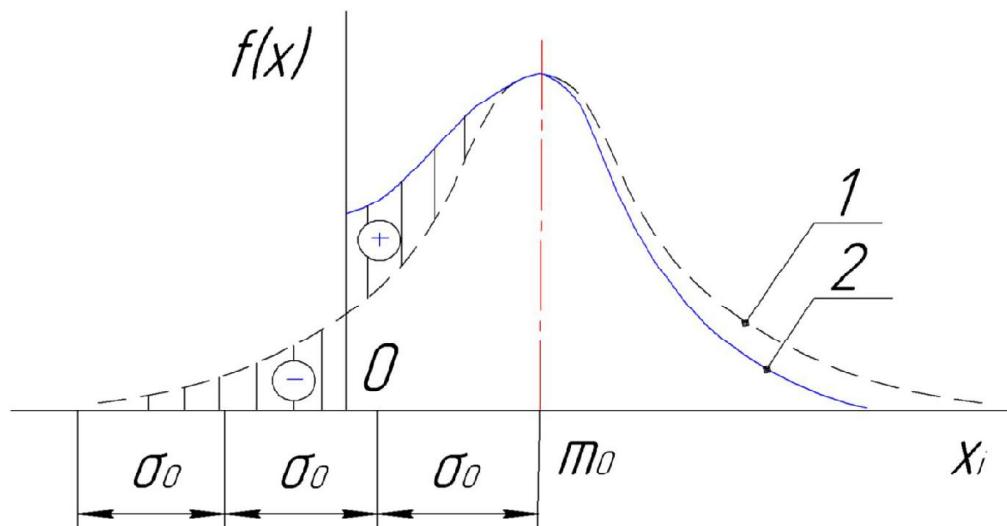
**Рис. 3. Формирование посевного рядка семян с появлением инверсии:**  
а – регулярный поток семян (исходное состояние); б – размещение семян в борозде по закону условно нормального распределения интервалов;  
1, ..., 5 – порядковые номера семян

Именно семена 2 и 3 нарушили очередность высева. Это явление называется инверсией семян. В этом случае  $4,23\sigma' > m_0$ , а  $V > 0,33$ . Закон плотности распределения интервалов мог бы остаться нормальным, если бы мы могли различать интервалы на положительные и отрицательные при контроле качества посева методом анатомирования борозды. Но мы вынуждены считать все интервалы положительными, и тогда закон нормального распределения становится условным, пригодным только для математической интерпретации (рис. 2, б). Математическое ожидание остается все тем же –  $m_0$ , а среднее квадратичное отклонение (то же условное) остается в той же зависимости от  $\sigma'$ , а именно:  $\sigma_{yc} = 1,41\sigma'$ . Оно условное потому, что его измерить невозможно, как и различить отрицательные интервалы.

При анализе графиков плотности вероятности на рисунке 2 становится очевидным, что инверсия семян может наступить не только от ухудшения точности укладки каждого семени в борозду. Оказывается, что даже при достаточно малом среднем квадратичном отклонении  $\sigma'$  инверсия может наступить, если увеличить норму высева, то есть уменьшить  $m_0$  так, чтобы оказалось  $m_0 < 3\sigma_0$ . Кривая частично распространится в отрицательную зону, то есть появятся отрицательные интервалы. Это означает, что сама по себе инверсия не является признаком несовершенства сейлки или ее высевающего аппарата, она может наступить и при технологической необходимости увеличения нормы высева семян.

Поскольку для каждого растения безразлично, находится ли оно на положительном или отрицательном удалении от соседнего растения, то в реальности мы должны оперировать только теми интервалами, которые поддаются измерениям при контроле качества посева. Все они находятся всегда в положительной зоне графика плотности вероятности, но это уже не закон нормального распределения плотности вероятности. Математическое ожидание интервалов осталось  $m_0$ , несколько уменьшились  $\sigma_{yc}$  и коэффициент вариации  $V_{yc}$  до показателей  $\sigma_0$  и  $V_0$ .

Для аппроксимации реального размещения семян в борозде каким-либо математическим выражением нами подобран закон гамма-распределения, который оказался настолько универсальным, что подходит для всего диапазона коэффициентов вариации от нуля до единицы, включая варианты применимости закона нормального распределения (рис. 4).



**Рис. 4. Графики плотности вероятности случайной величины – интервала между семенами в посевном рядке:**  
**1 – закон условного нормального распределения интервалов;**  
**2 – реальное размещение семян по закону гамма-распределения**

Плотность вероятности случайной величины по закону гамма-распределения выражается зависимостью

$$f_0(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – показатель точности гамма-распределения,  $\alpha = (m_0)^2 \cdot (\sigma_0)^{-2}$ ;

$\beta$  – показатель густоты потока,  $\beta = (m_0) \cdot (\sigma_0)^{-2}$ ;

$\Gamma(\alpha)$  – гамма-функция от  $\alpha$ .

Применение этого закона для компьютерных вычислений вероятностей тех или иных интервалов в посевном рядке весьма несложное. Достаточно лишь составить статистический ряд интервалов, полученный по результатам их измерений в борозде, вычислить показатели  $\alpha$  и  $\beta$  и подставить их в уравнение (1). По этому уравнению можно заключить, что количество, допустим, полезных или количество загущенных интервалов зависит от двух параметров. Один из них – технологический, это математическое ожидание, а другой – технический, характеризующий достоинство сейлки, это среднее квадратичное отклонение интервалов. Оно напрямую определяется точностью укладки в борозду каждого семени ( $\sigma'$ ) и выступает в роли показателя качества аппарата и технологического процесса. Чтобы можно было определять показатель  $\sigma'$  по результатам измерений интервалов с самой разной точностью распределения семян, были проведены лабораторные исследования взаимозависимости двух коэффициентов вариации – при аппроксимации размещения семян законами нормального и гамма-распределения. Полученная зависимость выражается эмпирическим уравнением

$$V_0 = 1 - \exp(-1,1V_{yc}). \quad (2)$$

Из этого выражения вытекает формула для определения показателя  $\sigma'$

$$\sigma' = 0,64 m_0 \ln \frac{1}{1 - V_0}. \quad (3)$$

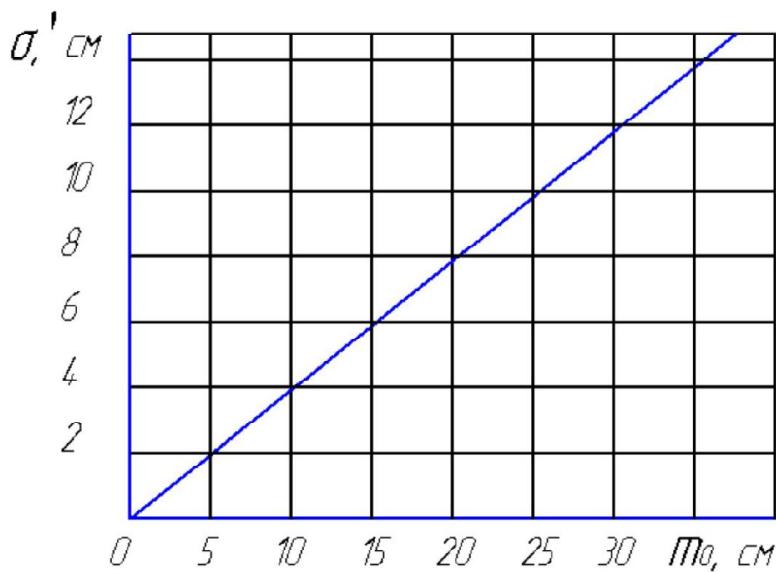
Таким образом, показатель  $\sigma'$  включает в себя весь набор отрицательных факторов, действующих на рассеивание семян вдоль борозды при пунктирном посеве. К ним относятся неравномерность скорости вращения высевающего диска, различие траекторий отскока от выталкивателя, разница поступательной скорости сейлки и скорости вращения высевающего диска, отскоки и перекатывания семян по дну борозды, смешения семян загортачами. Для уменьшения влияния этих факторов желательно выбирать скорость дозирования, максимально возможную по условию заполнения ячеек или по условию присасывания к дискам пневматических аппаратов. Эту скорость вращения надо поддерживать постоянной, а норму высева менять путем замены дисков с различным числом ячеек.

Анализ выражения (2) показывает, что до появления инверсии семян, то есть при достаточно точном посеве с коэффициентом вариации интервалов от нуля до 33%, реальное и условно нормальное распределения имеют примерно одинаковые значения (см. табл.).

**Взаимозависимость коэффициентов вариации интервалов условно нормального ( $V_{yc}$ ) и реального ( $V_0$ ) распределений плотности вероятности их появления**

$V_{yc}$	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$V_0$	0,10	0,20	0,28	0,36	0,42	0,48	0,54	0,59	0,63	0,67

С увеличением разброса семян инверсия частично компенсирует ухудшение качества посева, но все равно она не может выровнять все интервалы и довести равномерность распределения семян до агротехнического требования. Чтобы избежать инверсии, надо учитывать взаимосвязь между нормой высева (или математическим ожиданием  $m_0$ ), интервалом и средним квадратичным отклонением  $\sigma'$ , которая выражается в выражении (3). Эта взаимосвязь представлена в графической форме на рисунке 5.



**Рис. 5. Максимально допустимое значение среднего квадратичного отклонения места фиксации отдельного семени при заданном математическом ожидании интервала для посева без инверсии семян**

Пользуясь этим графиком, можно определить, например, что для качественного посева сахарной свеклы без инверсии семян с нормой высева 7 шт./м требуется, чтобы среднее квадратичное отклонение каждого семени от расчетного места своей фиксации не превышало 5 см.

### Выводы

В математической модели формирования пунктирного ряда семян вдоль посевной борозды ключевую роль играет среднее квадратичное отклонение каждого семени от расчетного места своей фиксации.

В отличие от коэффициента вариации интервалов при регулировании густоты насаждения путем изменения числа ячеек на высевающем диске это отклонение не зависит от нормы высева и поэтому может служить показателем совершенства конструкции аппарата и технологии посева.

Инверсия семян наступает при увеличении коэффициента вариации интервалов более 33% и проявляется в возникновении отрицательных интервалов.

Инверсия частично выравнивает интервалы, так как отрицательные интервалы для развития растений не отличаются от положительных, а для растений имеет значение только абсолютная величина интервалов. Но инверсия не может довести точность распределения растений до требуемой по агротехнике. Для этого необходимо ограничивать норму высева до появления инверсии в соответствии с возможностью сеялки по точности укладки каждого семени.

При высеве семян сахарной свеклы без инверсии с нормой 7 шт./м технические средства должны обеспечить точность высева, соответствующую среднему квадратичному отклонению каждого семени не более 5 см.

## Библиографический список

1. Астанин В.К. Стендовые испытания скоростного аппарата на высеве клещевины / В.К. Астанин, О.С. Егоров // Научные труды Воронежского СХИ. – Воронеж, 1976. – Т. 75. – С. 105–109.
2. Василенко В.В. Обоснование предела точности дозирования семян ячеисто-дисковыми аппаратами / В.В. Василенко, С.В. Василенко // Техника в сельском хозяйстве. – 2000. – № 1. – С. 34–35.
3. Василенко С.В. Совершенствование процесса высева семян сахарной свеклы ячеисто-дисковым аппаратом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / С.В. Василенко. – Воронеж, 2000. – 23 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – Москва : Наука, 1964. – 576 с.
5. Казаров К.Р. Моделирование инверсии семян при пунктирном посеве / К.Р. Казаров, В.В. Василенко, С.В. Василенко // Методы и средства научных исследований процессов механизации сельского хозяйства : сб. науч. тр. Воронежского СХИ. – Воронеж : ВСХИ, 1996. – С. 93–99.
6. Казаров К.Р. Совершенствование теории и методов точного размещения растений сахарной свеклы вдоль рядка / К.Р. Казаров. – Воронеж : ВГАУ, 1998. – 119 с.
7. Казаров К.Р. Механизированное прореживание всходов сахарной свеклы с повышенной точностью распределения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / К.Р. Казаров. – Воронеж, 1973. – 25 с.
8. Казаров К.Р. Разработка теории и методов выбора технологических параметров механизированного формирования густоты насаждения сахарной свеклы : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / К.Р. Казаров. – Воронеж, 1998. – 34 с.
9. Казаров К.Р. Обоснование густоты насаждения сахарной свеклы с использованием ЭВМ / К.Р. Казаров, С.Н. Пиляев // Комплексная технология возделывания и уборки сельскохозяйственных культур : сб. науч. тр. Воронежского СХИ. – Воронеж : ВСХИ, 1990. – С. 76–79.
10. Кардашевский С.В. Высевающие устройства посевных машин / С.В. Кардашевский. – Москва : Машиностроение, 1973. – 173 с.
11. Кардашевский С.В. Методика оценки качества распределения семян при однозерновом посеве с учетом отрицательных интервалов / С.В. Кардашевский. – Москва : ВИСХОМ, 1963. – 32 с.
12. Кардашевский С.В. О точном высеве семян кукурузы / С.В. Кардашевский // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1961. – № 2. – С. 16–19.
13. Труфанов В.В. Совершенствование процесса высева семян подсолнечника скоростными ячеисто-дисковыми высевающими аппаратами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / В.В. Труфанов. – Воронеж, 1981. – 19 с.
14. Хангильдин Э.В. Вероятностные модели расположения семян и растений в рядке / Э.В. Хангильдин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1978. – № 5. – С. 32–33.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Владимир Васильевич Василенко – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: vladva.vasilenko@yandex.ru.

Сергей Владимирович Василенко – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: tuli-fruli@mail.ru.

Дата поступления в редакцию 23.05.2019

Дата принятия к печати 20.06.2019

## AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vladimir V. Vasilenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: vladva.vasilenko@yandex.ru.

Sergey V. Vasilenko, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Applied Mechanics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: tuli-fruli@mail.ru.

Received May 23, 2019

Accepted June 20, 2019