

## МЕХАНИЗАЦИЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.333:519.711.3(476.6)

### АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

**А. И. ФИЛИППОВ**

*УО «Гродненский государственный аграрный университет»,  
г. Гродно, Республика Беларусь, e-mail: a.fil107@mail.ru*

**С. Д. ЛЕЩИК**

*УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,  
г. Гродно, Республика Беларусь, e-mail: s.lesh@grsu.by*

**К. Л. ПУЗЕВИЧ**

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции  
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: baa\_mgishp@mail.ru*

*(Поступила в редакцию 17.08.2023)*

*В статье приводится анализ рабочего процесса разбрасывателя минеральных удобрений. Выявлено, что параметры процесса разбрасывания (направление, скорость, дальность полета) зависят от многих управляемых факторов, в частности, от параметров диска, а также неуправляемых (случайных возмущений). Основным критерием качества работы дискового разбрасывателя является равномерность разбрасывания удобрения, которая, в частности, зависит от характеристик дискового разбрасывателя (размер, конфигурация, наличие и расположение лопастей и пр.). По данным научных исследований, неравномерность распределения различных доз минеральных удобрений по-разному влияет на потери урожая. Для улучшения качества (равномерности) разбрасывания и, как следствие, повышения урожайности, можно использовать рассеивающие диски различных конструкций (форма диска, диаметр диска, количество ребер, форма ребер, высота расположения над землей). В связи с этим возникает проблема разработки моделей и технологий их реализации, позволяющих исследовать и оптимизировать процесс разбрасывания удобрения в зависимости от различных характеристик дискового разбрасывателя, в частности, по критерию равномерности. Предложена технология компьютерного моделирования и процесса оптимизации результатов разбрасывания удобрения дисковым разбрасывателем в зависимости от параметров процесса и конструктивно-технологических параметров дискового разбрасывателя, основанная на имитационных алгоритмах, реализующих процесс разбрасывания удобрений, а также аналитической модели оптимизации процесса по критерию минимизации неравномерности разбрасывания удобрений. Выполнен анализ результатов разбрасывания в зависимости от параметров процесса. Предложенный программный модуль дает возможность моделировать движение частицы по диску, свободное падение после схода частицы с диска, строить теоретические кривые и картины местоположения точек падения частиц с дисков при поступательном движении машины как с одним диском, так и с двумя, визуализировать плотность посева удобрений с учетом случайных возмущений, а также подсчитывать интегральный показатель качества посева. Результаты данных исследований можно использовать для оптимизации и выбора оптимальных конструктивных параметров дискового разбрасывателя твердых минеральных удобрений.*

**Ключевые слова:** *дисковый разбрасыватель, оптимизация процесса, компьютерное моделирование, удобрения, конструктивно-технологические параметры, имитационно-статистическая модель.*

*The article provides an analysis of the working process of a mineral fertilizer spreader. It was revealed that the parameters of the spreading process (direction, speed, flight range) depend on many controllable factors, in particular, on the parameters of the disk, as well as uncontrollable ones (random disturbances). The main criterion for the quality of operation of a disc spreader is the uniformity of fertilizer spreading, which, in particular, depends on the characteristics of the disc spreader (size, configuration, presence and location of blades, etc.). According to scientific research, uneven distribution of different doses of mineral fertilizers has different effects on crop losses. To improve the quality (uniformity) of spreading and, as a result, increase productivity, you can use scattering disks of various designs (disc shape, disk diameter, number of ribs, ribs shape, height above the ground). In this regard, the problem arises of developing models and technologies for their implementation that make it possible to study and optimize the*

*process of spreading fertilizer depending on the various characteristics of the disc spreader, in particular, according to the uniformity criterion. A technology has been proposed for computer modeling and the process of optimizing the results of spreading fertilizer with a disc spreader depending on the process parameters and design and technological parameters of the disc spreader, based on simulation algorithms that implement the process of spreading fertilizers, as well as an analytical model for optimizing the process according to the criterion of minimizing the unevenness of spreading fertilizers. An analysis of the spreading results depending on the process parameters was carried out. The proposed software module makes it possible to simulate the movement of a particle on a disk, free fall after the particle leaves the disk, construct theoretical curves and pictures of the location of points of falling particles from disks during the forward movement of a machine with both one disk and two, visualize the density of fertilizer sifting taking into account random disturbances, and also calculate the integral indicator of the quality of dispersion. The results of these studies can be used to optimize and select the optimal design parameters of a disk spreader of solid mineral fertilizers.*

**Key words:** *disc spreader, process optimization, computer modeling, fertilizers, design and technological parameters, statistical simulation model.*

## **Введение**

В республике основная машина (более 90 %) для внесения твердых минеральных удобрений состоит из центробежного дискового разбрасывателя, представляющего собой бункер для хранения удобрений, медленно вращающегося пальца-смесителя, задачей которого является перемешивание удобрений без застоя и обеспечение падения на диск, разбрасывающие диски (обычно один или два) и привод, приводящий диски во вращение. Диски также могут иметь разную конструкцию: они могут быть плоскими, сферическими или иметь разное количество лопастей.

Одной из наиболее важных особенностей центробежного дискового разбрасывателя удобрений является то, что ширина разбрасывания намного превышает ширину машины. Это приводит к необходимости перекрывать соседние проходы на определенную величину, отклонения от которой повысят неравномерность внесения удобрений на поле.

Основным критерием качества работы дискового разбрасывателя является равномерность внесения удобрений, которая зависит, в частности, от характеристик дискового разбрасывателя (размеров, конфигурации, наличия и положения лопастей и т. д.). По данным научных исследований, разные дозы минеральных удобрений распределяются неравномерно и по-разному влияют на потери урожая. Для улучшения качества разбрасывания (равномерности) и, следовательно, производительности можно использовать разбрасывающие диски различной конструкции (форма диска, диаметр диска, количество ребер, форма ребер, высота от земли).

В связи с этим стоит задача разработать модели и технологии их реализации, позволяющие изучить и оптимизировать процесс внесения удобрений исходя из различных характеристик дискового разбрасывателя, в частности по критерию равномерности.

Рабочий процесс разбрасывателя характеризуется наличием двух этапов. Первый этап относится к той части процесса, когда частицы удобрения оказываются на рабочей поверхности диска. Второй этап состоит из участка, на котором частицы материала покидают диск после достижения необходимой скорости и свободно летят до момента соприкосновения с поверхностью почвы. Параметры процесса разбрасывания (направление, скорость, дальность полета) зависят от многих управляемых факторов, особенно конструктивных параметров диска, а также неуправляемых факторов (случайных возмущений).

В данной работе предложена и реализована программная методика компьютерного моделирования и оптимизации с учетом как обоих этапов, так и результатов внесения удобрений в зависимости от параметров процесса разбрасывания (без и с учетом случайных возмущений). Результаты распределения были проанализированы на основе параметров процесса.

В основе моделирования лежат имитационные алгоритмы и аналитические модели, разработанные для оптимизации процесса внесения удобрений по критерию минимизации неравномерности разбрасывания согласно конструкции и техническим параметрам дискового разбрасывателя.

Основным критерием качества работы дискового разбрасывателя является равномерность разбрасывания удобрения, которая существенно влияет на урожайность и зависит, в частности, от характеристик дискового разбрасывателя (размер, конфигурация, наличие и расположение лопастей и пр.). В связи с этим возникает проблема разработки моделей, позволяющих исследовать характер равномерности разбрасывания удобрения в зависимости от различных характеристик дискового разбрасывателя, а также выбирать оптимальные параметры разбрасывателя.

Объектом исследования является процесс разбрасывания удобрений дисковым разбрасывателем. Предметом исследования является имитационное и аналитическое моделирование процесса разбрасывания удобрений дисковым разбрасывателем.

Цель работы: разработка и реализация в пакете компьютерной алгебры Maple системы моделей для анализа и оптимизации параметров процесса рассеивания удобрений дисковым разбрасывателем удобрений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ математической модели работы дискового разбрасывателя удобрений;
- компьютерная визуализация места падения удобрений на землю при поступательном движении машины и подсчет интегрального показателя неравномерности разбрасывания;
- разработка аналитической и компьютерной модели для оптимизации параметров дискового разбрасывателя.

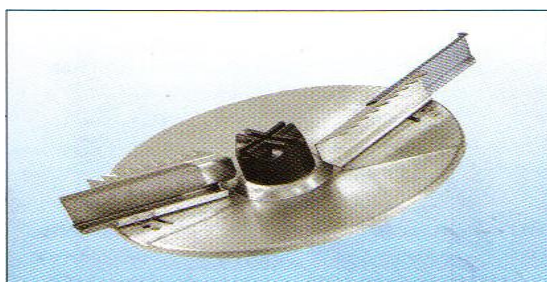
В работе использовались методы оптимизации, а также методы математического моделирования, дифференциального исчисления, имитационного моделирования и компьютерного моделирования.

#### Основная часть

Основу моделирования составляют разработанные имитационные алгоритмы и аналитическая модель оптимизации процесса разбрасывания удобрения по критерию минимизации неравномерности разбрасывания удобрения в зависимости от конструктивно-технологических параметров дискового разбрасывателя.

Дисковый разбрасыватель удобрений состоит из следующих основных частей: непосредственно разбрасывающий диск (рис. 1) с приводом (рис. 2) и бункер, предназначенный для хранения удобрений во время подкормки почвы [1].

Процесс работы дискового разбрасывателя заключается в следующем. Медленно вращающийся палец-ворошитель (180 об/мин) полностью перекрывает выгрузные отверстия бункера, дно которого изготовлено из высококачественной нержавеющей стали, препятствует забиванию дозирующих окон, обеспечивает свободный без разрушений гранул выход удобрений из бункера. Быстро вращающиеся рассеивающие диски (980 об/мин) сообщают с помощью лопаток гранулам удобрений оптимальную скорость рассеивания. Установка дозы внесения удобрений устанавливает определенный расход удобрений [4, 5, 6, 7].



а) вид сверху



б) вид сбоку

Рис. 1. Разбрасывающие диски дискового разбрасывателя удобрений

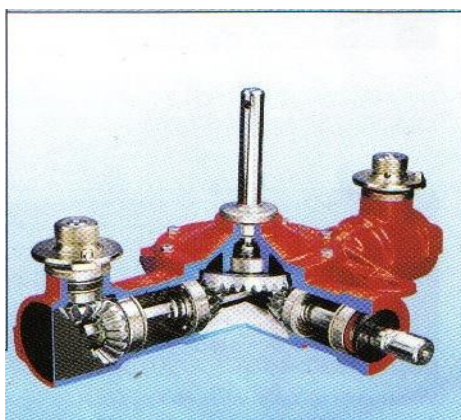


Рис. 2. Привод дискового разбрасывателя удобрений

Характер движения удобрений по разбрасывающему диску зависит не только от выбранного режима работы диска, но и от его конструкции. Разбрасывающие диски могут быть плоскими или коническими, гладкими или с лопастями. Лопастни могут быть прямыми, радиальными или наклонен-

ными относительно радиуса, иногда встречаются изогнутые лопасти. Наиболее широкое распространение получили диски, оборудованные прямолинейными лопастями или ребрами [6, 7, 8].

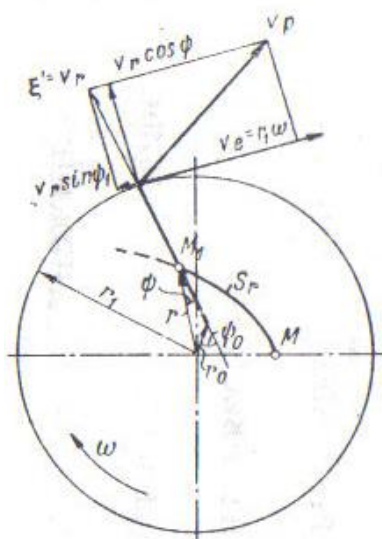


Рис. 3. Характер движения частицы по поверхности вращающегося диска с лопастями

Далее рассмотрим технологический процесс диска с прямолинейными лопастями, расположенными под углом  $\phi_0$  к радиусу (рис. 3). В таком случае частица материала удобрений подается на диск в точке  $M$  с малой скоростью и сначала в относительном движении будет перемещаться по поверхности диска по спиралевидной кривой  $S_r$  до встречи с лопастью в точке  $M_1$ . Затем возможны или движение частицы вдоль лопасти, как по направляющей, или упругий удар. В конечном итоге характер движения удобрений зависит от величины угловой скорости диска и от физико-механических свойств материала удобрений.

Порошкообразные удобрения перемещаются по лопастям основного потока, а кристаллические (песок), гранулированные и торфяная крошка часто перемещаются при соударении. Влияние этих эффектов на конечный результат распределения удобрений усиливается при малых скоростях подачи, когда материал достигает лопастей непрерывным потоком и основное взаимодействие частиц осуществляется не с лопастями, а с частицами одного и того же материала.

Теперь рассмотрим свободный полет частиц. Второй этап процесса дискового разбрасывателя начинается, когда частицы покидают конец лопасти или край диска, и продолжается до тех пор, пока частицы не упадут на поверхность почвы. Этот этап технологического процесса находится в непосредственной связи с конечными результатами работы разбрасывателя – качеством распределения удобрений по ширине захвата и его производительностью (рис. 4) [9, 10, 11].

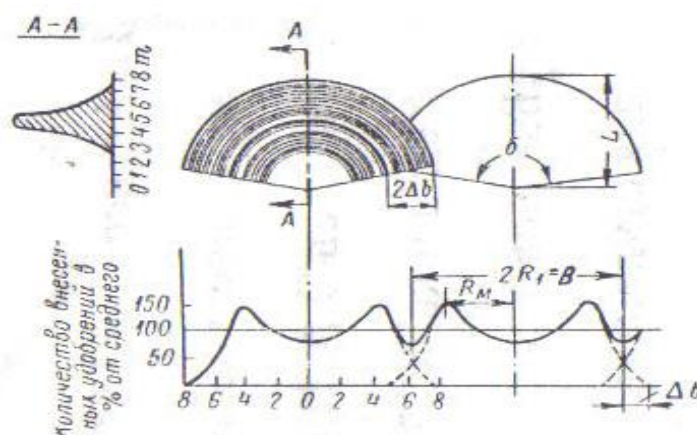


Рис. 4. График распределения удобрений центробежным аппаратом

Рабочий процесс дисков, оснащенных лопастями, характеризуется неравномерным распределением материала по поверхности почвы, поскольку частицы покидают диск не по всему его периметру, а только в тех точках, где расположены концы лопастей. Удобрения разбрасываются отдельными стру-

ями с помощью лопастей и распределяются концентрическими кругами по поверхности почвы. Поскольку лопасти на диске расположены через определенные промежутки и машина постоянно движется вперед, образующиеся круги разброса будут находиться на определенном расстоянии друг от друга. Это указывает на наличие пульсирующей подачи. Чем выше угловая скорость диска, больше количество лопастей и ниже скорость машины, тем меньше влияние пульсации.

Основным критерием качества работы дискового разбрасывателя является равномерность разбрасывания удобрений, которая зависит, в частности, от его характеристик (размеров, конфигурации, наличия и расположения лопастей и т. д.). Согласно научным исследованиям, равномерное внесение разных доз минеральных удобрений по-разному влияет на урожайность сельскохозяйственных культур. Для улучшения качества (равномерности) разбрасывания и, как следствие, повышения производительности могут применяться разбрасывающие диски различной конструкции (форма диска, диаметр диска, количество ребер, форма ребер, высота над землей и т. д.) [8, 9, 10, 11].

В связи с этим возникает задача разработки моделей и технологий их реализации, позволяющих изучить и оптимизировать процесс внесения удобрений в зависимости от различных характеристик дискового разбрасывателя, в частности, по критерию равномерности.

В данной статье рассматривается моделирование плотности рассеивания удобрений без учета случайных возмущений и моделирование расположения удобрений на грунте с учетом угла вылета частицы из диска.

Уравнение движения точки на краю диска радиуса  $R$ , вращающегося со скоростью  $\omega$  выглядит следующим образом (уравнения 1–2):

$$X = R \cos f = R \cos \omega t; \quad (1)$$

$$Y = R \sin f = R \sin \omega t. \quad (2)$$

Построим теоретическую кривую движения точки на краю диска. При  $R = 0,4$  м,  $\omega = 10bt_e [0..10]$ , имеем (рис. 5, 6).

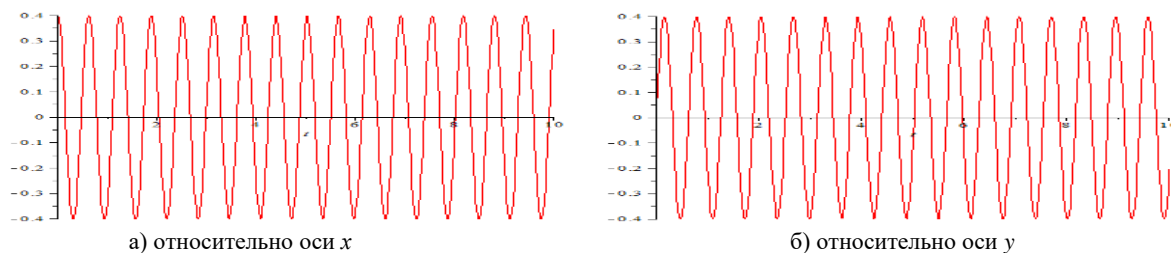


Рис. 5. Теоретическая кривая движения точки на краю диска

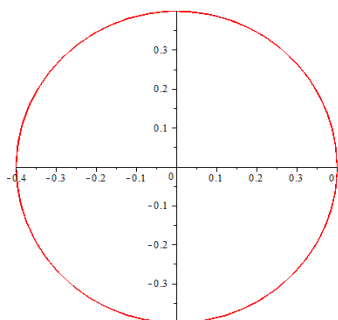


Рис. 6. Теоретическая кривая движения точки на краю диска относительно осей  $x$  и  $y$

Построим уравнение движения разбрасываемых частиц после отрыва от края диска радиуса  $R$ , вращающегося со скоростью  $\omega$ , расположенного на машине, которая движется поступательно со скоростью  $V$  (от 1,5 до 4 м/сек) в направлении оси  $y$ . После отрыва от диска частица летит перпендикулярно касательной к краю диска на расстояние  $L$ . Имеем следующие переменные (уравнения 3–4) и выражение (уравнение 5), описывающее процесс:

$$g = 9,8; H = 1; kn = 0,3; vp = 40; \quad (3)$$

$$T = \sqrt{\frac{2H}{g}} T = \sqrt{2} \sqrt{\frac{H}{g}}; \quad (4)$$

$$L = \frac{\log \left[ kn \times T + \frac{1}{vp} \right] \log \left[ \frac{1}{vp} \right]}{kn} \quad (5)$$

Решая уравнение 5 при начальных  $R = 0,4$  м,  $\omega = 10bt_\epsilon$  [0..10], получим результат (рис. 7).

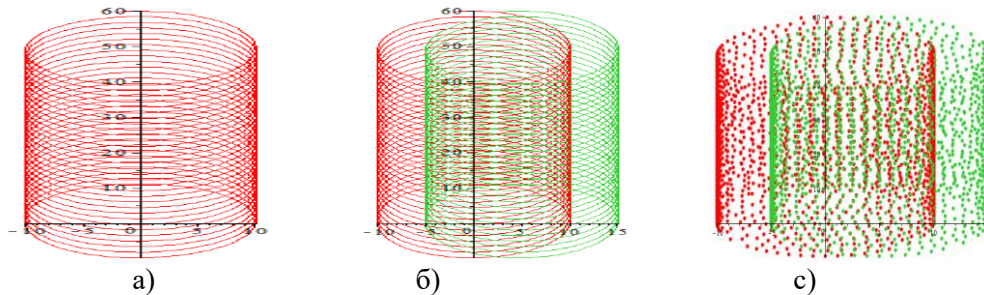


Рис. 7. Теоретическая кривая движения точки на краю диска относительно осей  $x$  и  $y$ :

а) расположенного на машине, которая движется поступательно с постоянной скоростью, б) без учета погрешности рассева, расположенного на машине с двумя дисками, которая движется поступательно с постоянной скоростью, в) без учета погрешности рассева, расположенного на машине с двумя дисками, которая движется поступательно с переменной скоростью

### Заключение

Предложенная и программно реализованная технология компьютерного моделирования оптимизации технологического процесса и результатов внесения удобрений дисковым разбрасывателем в зависимости от параметров процесса внесения удобрений и конструктивно-технологических параметров дискового разбрасывателя, как без, так и с учетом случайных возмущений, основана на имитационных алгоритмах, реализующих процесс разбрасывания удобрений, а также аналитической модели оптимизации процесса разбрасывания по критерию минимизации неравномерности разбрасывания в зависимости от конструктивных и технологических параметров разбрасывания дисковым рабочим органом [17, 18, 19, 20].

Предлагаемый программный модуль позволяет моделировать движение частицы по диску, свободное падение после выхода частицы за пределы диска, строить теоретические кривые и картины расположения точек падения частиц с дисков при поступательном движении машины как с одним диском, так и с двумя, визуализировать плотность рассеивания удобрений с учетом случайных возмущений, а также рассчитать интегральный показатель качества рассеивания.

Результаты этих исследований могут быть использованы для оптимизации и выбора оптимальных конструктивных параметров дискового разбрасывателя твердых минеральных удобрений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сельскохозяйственные машины. Практикум: учеб. пособие / Э. В. Заяц [и др.]; под ред. Э. В. Зайца. – 3-е изд., доп. и испр. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. – 494 с.
2. Филиппов, А. И. Дисковый рабочий орган рассеивателя сыпучих материалов / А. И. Филиппов, П. Н. Бычек, В. Н. Салей, С. В. Стуканов // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XVII междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 14 марта 2014 г. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2014. – С. 158–160.
3. Цехан, О. Б. Моделирование в системе компьютерной алгебры Mathematica движения частиц удобрения по дисковому разбрасывателю // Современные информационные компьютерные технологии mcIT-2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elib.grsu.by/doc/5534> – Дата доступа: 25.05.2015.
4. Филиппов, А. И. Распределитель сыпучих материалов / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько, В. Н. Салей // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XIV междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2011. – Ч. 1. – С.
5. Филиппов, А. И. Двухдисковый рабочий орган разбрасывателя сыпучих материалов / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, П. Н. Бычек // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XVI междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 17 мая, 7 июня 2013 г. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2013. – С. 159–161.
6. Лепешкин, Н. Д. Моделирование разбрасывания твердых минеральных удобрений на дисковом разбрасывателе / Н. Д. Лепешкин, А. И. Филиппов, Э. В. Заяц // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (Минск, 18-20 окт. 2017 г.) / редкол. П. П. Казакевич (гл. ред.), Л. Ж. Кострома. – Минск: Беларуская навука, 2017. – С. 122–125.
7. Ладутько, С. Н. Машина для внесения минеральных удобрений / С. Н. Ладутько, А. И. Филиппов, Э. В. Заяц // Современные технологии сельскохозяйственного производства : материалы XIV междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2011. – Ч. 1. – С. 98–100.
8. Филиппов, А. И. Разбрасыватель сыпучих материалов для сельскохозяйственных машин / А. И. Филиппов, В. Н. Салей, Н. А. Филатова // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2010. – С. 211–212.

9. Филиппов, А. И. К исследованию центробежных рабочих органов для внесения удобрений / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2010. – Т. 1. – С. 208.
10. Филиппов, А. И. К анализу работы разбрасывателя удобрений РДУ-1,5 / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько, Г. С. Цыбульский // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2010. – Т. 1. – С. 209–210.
11. Ладутько, С. Н. Рассеивающий диск для внесения гранулированных минеральных удобрений / С. Н. Ладутько, Э. В. Заяц, А. И. Филиппов // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2010. – Т. 1. – С. 124–126.
12. Добышев, А. С. К анализу работы разбрасывателя удобрений РДУ-1,5 / А. С. Добышев, С. Н. Ладутько, А. И. Филиппов // Научно-практический журнал «Вестник БГСХА», №1, Горки, УО БГСХА, 2010. – С. 189–193.
13. Филиппов, А. И. К анализу работы центробежного разбрасывателя удобрений / А. И. Филиппов, С. Н. Ладутько // Современные технологии сельскохозяйственного производства: материалы XI междунар. науч.- практич. конф. / Гродненский гос. аграрный ун-т. – Гродно, 2008. – С. 39–40.
14. Филиппов, А. И. Модернизация туковывсевающего аппарата для ленточного внесения удобрений / А. И. Филиппов, А. А. Аутко, Э. В. Заяц, С. В. Стуканов, Н. Ю. Занемонская // Сборник научных статей по материалам XXIII Международной научно-практической конференции. – Гродно: ГГАУ, 2020. – С. 172–175.
15. Филиппов, А. И. Оборудование для дозирования и ленточного внесения удобрений к универсальному агрегату АУ-М1 / А. И. Филиппов, А. А. Аутко, Э. В. Заяц, В. П. Чеботарёв, И. В. Дубень // Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» выпуск 8 (технический раздел), Барановичи, 2020. – С. 119 – 127.
16. Филиппов, А. И. Математическое моделирование разбрасывания твердых минеральных удобрений / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, Н. Д. Лепешкин // Современные технологии сельскохозяйственного производства: сборник научных статей по материалам XXI Международной научно-практической конференции, Гродно, 31 мая, 30 марта, 20 марта 2018 г. / ГГАУ, ст. корректор Е. Н. Гайса, ответственный за выпуск В. В. Пешко. – Гродно, 2018 г. – С. 251–254.
17. Филиппов, А. И. Обзор рабочих органов пропашных культиваторов и разработка новых в концепции экологического земледелия / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, С. В. Стуканов, В. П. Чеботарев, К. Л. Пузевич // Вестник Белорус. гос. с.-х. акад. № 4. г. Горки, 2020. – С. 118–123.
18. Лепешкин, Н. Д. Перспективный плуг ПО-(8+4)-40 для тракторов мощностью 450 л.с. / Н. Д. Лепешкин, В. В. Мижурин, Д. В. Заяц, А. И. Филиппов, К. Л. Пузевич // Вестник Белорус. гос. с.-х. акад. № 1. г. Горки, 2021. – С. 167–171.
19. Филиппов, А. И. Схема расположения разработанных рабочих органов для ленточного внесения гранулированных удобрений при формировании узкопрофильных гряд / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, А. А. Аутко, С. В. Стуканов, Н. Ю. Занемонская // Материалы международной научно-практической конференции 11.02.2020 «Актуальные проблемы повышения качества и безопасности производства переработки продукции животноводства». – Днепр, 2020. – С. 301–303.
20. Филиппов, А. И. Обоснование технических и конструктивных параметров опрыскивателя телескопического комбинированного в составе агрегата для междурядной обработки почвы / А. И. Филиппов, Э. В. Заяц, А. А. Аутко, В. П. Чеботарев, К. Л. Пузевич // Вестник Белорус. гос. с.-х. акад. № 1. г. Горки, 2021. – С. 178–183.