

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА **MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING**

УДК 631.333–048.35
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-1-58-67>

Поступила в редакцию 27.08.2024
Received 27.08.2024

В. В. Азаренко¹, А. А. Жешко²

¹*Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь*

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Аннотация. В Республике Беларусь урожайность сельскохозяйственных культур за последние 60 лет увеличилась в 3,5–5 раз за счет совокупного результата работ в сфере селекции, механизации применения удобрений и химических средств защиты растений, что является значительным достижением науки и практики [1, с. 28]. Одним из основных критериев оценки эффективности применения минеральных удобрений принято считать окупаемость 1 кг НРК, которая должна составлять не менее 8 кг зерна или 10–12 к. ед. всеми культурами на пашне [2, с. 113; 3]. Для достижения таких результатов разбрасыватели должны выполнять качественное распределение минеральных удобрений в установленные агротехнические сроки. Критерием оценки качества распределения минеральных удобрений по площади поля выступает коэффициент вариации, который определяется как отношение стандартного отклонения к среднему значению дозы. Помимо равномерного распределения по площади поля существенное значение также имеет качественная заделка минеральных удобрений почвообрабатывающими орудиями. Что касается своевременности внесения заданных доз удобрений в установленные агротехнические сроки, то это зависит от наличия техники в хозяйствах в наиболее загруженный период, а также обеспеченности разбрасывателями удобрений высокой производительности. Необходимо учитывать, что машины химизации земледелия используются с ранней весны до поздней осени, а годовая их загрузка превышает аналогичный показатель для другой сельскохозяйственной техники. Кроме того, работа разбрасывателей удобрений сопряжена с взаимодействием с агрессивными средами, что возлагает соответствующие требования по обеспечению их надежности. Необходимо отметить, что в настоящее время для внесения средств химизации начинают активно использоваться беспилотные летательные аппараты [4, с. 2], в научной литературе все чаще появляются публикации о разработке и испытаниях наноудобрений [5, с. 319]. В этой связи для определения дальнейших тенденций совершенствования технических средств для внесения удобрений необходимо проанализировать основные стадии развития этих технических средств и выявить характерные этапы их совершенствования.

Ключевые слова: машины для внесения удобрений, разбрасыватель, распределение удобрений, коэффициент вариации, производительность, норма внесения, доза, ширина захвата, рабочая скорость движения

Для цитирования: Азаренко, В. В. Анализ основных этапов совершенствования технических средств для внесения минеральных удобрений / В. В. Азаренко, А. А. Жешко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – Т. 63, № 1. – С. 58–67. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-1-58-67>

Vladimir V. Azarenko¹, Aliaksandr A. Zheshka²

¹*Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization,
Minsk, Republic of Belarus*

ANALYSIS OF THE MAIN STAGES OF IMPROVEMENT OF TECHNICAL MEANS FOR THE APPLICATION OF MINERAL FERTILIZERS

Abstract. In the Republic of Belarus, crop yields have increased 3.5–5 times over the past 60 years due to the combined result of work in the field of breeding, mechanization of fertilizers and chemical plant protection products application, which is a significant achievement of science and practice [1, p. 28]. One of the main criteria for evaluating the effectiveness of min-

eral fertilizers is considered to be the payback of 1 kg of NPK, which should be at least 8 kg of grain or 10–12 feed units by all crops on arable land [2, p. 113; 3]. To achieve such results, spreaders must perform high-quality distribution of mineral fertilizers within the established agrotechnical deadlines. The criterion for assessing the quality of the distribution of mineral fertilizers over the field area is the coefficient of variation, which is defined as the ratio of the standard deviation to the average dose. In addition to uniform distribution over the field area, high-quality incorporation of mineral fertilizers with tillage tools is also essential. As for the timeliness of applying the specified doses of fertilizers within the established agrotechnical deadlines, the most important factors here are the availability of equipment at farms during the busiest period and provision of high-performance fertilizer spreaders. It should be considered, that agricultural chemicalization machines are used from early spring to late autumn, and their annual load exceeds the same indicator for other agricultural machinery. In addition, the operation of fertilizer spreaders involves interaction with aggressive media, which imposes appropriate requirements to ensure their reliability. It should be noted that currently unmanned aerial vehicles are beginning to be actively used to introduce chemicals [4, p. 2]; publications on the development and testing of nanofertilizers are increasingly appearing in the scientific literature [5, p. 319]. In this regard, in order to determine further trends in the improvement of technical means for fertilization, it is necessary to analyze the main stages of the development of these technical means and identify the distinctive stages of their improvement.

Keywords: fertilizer application machines, spreader, fertilizer distribution, coefficient of variation, productivity, application rate, dose, coverage, working speed

For citation: Azarenko V. V., Zheshka A. A. Analysis of the main stages of improvement of technical means for the application of mineral fertilizers. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2025, vol. 63, no. 1, pp. 58–67 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-1-58-67>

Введение. Теория минерального питания растений Ю. Либиха и Ж. Буссенго явилась причиной поиска производительных технических решений для внесения удобрений в почву. Производство минеральных удобрений начало развиваться с 1850 г. С 1905 г. в Россию завозились минеральные удобрения, а первые опытные поля появились еще 1885–1896 гг. Для механизированного внесения минеральных удобрений первоначально использовались туковые сеялки, которые характеризовались низкой производительностью из-за небольшой ширины захвата и малой вместимости бункера для туков, а также повышенной материалоемкости. Динамику развития технических средств для внесения минеральных удобрений можно проследить на основе анализа [1–5].

Цель работы – на основе анализа патентной информации и других источников выявить характерные этапы развития технических средств для внесения минеральных удобрений и определить динамику и перспективы их дальнейшего совершенствования.

Материалы и методы исследований. Параллельно с развитием производства и потребления минеральных удобрений велся поиск рациональных технических решений для механизированного их внесения. С данного момента (1860-е гг.) начинается I этап в развитии технических средств для внесения удобрений. Вначале появились ручные приспособления. Например, конструкция, предложенная в [6], представляла собой приспособление с приводом от опорных колес, предназначенное для сплошного внесения сыпучих удобрений с возможностью регулирования дозы внесения. Ручное приспособление для внесения извести и золы представлено в [7], известность также получило ручное приспособление для посева и внесения удобрений, разработанное Н. Е. Фрайс [8].

На смену ручным приспособлениям ввиду их низкой производительности пришли технические решения на конной тяге, что ознаменовало II этап. Например, У. Г. Бернетт предложил использовать для сплошного внесения удобрений четырехколесную платформу с подвижным дном – транспортером с приводом от опорных колес, для распределения удобрений по полю использовался щит с перегородками-делителями [9]. Для припосевного внесения удобрений К. У. Баррик предложил конструкцию сеялки с одновременным внесением удобрений [10].

Сплошное механизированное внесение минеральных удобрений в Европе начали применять в 1880 г. Позже была предложена конструкция сеялки с одновременным внутривспашечным внесением удобрений [11], а также конструкция пневматического разбрасывателя сыпучих материалов [12]. В 1898 г. популярность приобрела сеялка Hensch CG3 для посева с одновременным внесением удобрений.

Изобретательская деятельность 1890–1920 гг. преимущественно была направлена на совершенствование подающих рабочих органов, в качестве которых активно применялись шнековые и скребковые транспортеры, а также использовалась подача удобрений самотеком за счет на-

клонных поверхностей бункеров. Также стали появляться решения, направленные на совершенствование распределяющих рабочих органов машин для внесения минеральных удобрений [13].

В начале XX в. для привода сельскохозяйственных машин начали использоваться тракторы. Широкое их применение началось в 1910 г., что можно считать началом III этапа. До 1915 г. крупными фермерскими хозяйствами Германии активно использовались шнековые распределители удобрений на конной тяге. Преимуществом данных распределителей была надежность, однако недостатком являлась высокая масса и значительная стоимость. Для устранения недостатков существующих разбрасывателей Х. Дрейер в 1915 г. запатентовал и в 1920 г. разработал усовершенствованный шнековый распределитель удобрений Michel. Технической особенностью разбрасывателя являлось наклонное днище, наличие побудителя для подачи удобрений и шнекового распределяющего рабочего органа. Конструкция разбрасывателя позволяла вносить даже влажные удобрения, производить очистку рабочих органов в конце смены. Металлоемкость и стоимость распределителя уменьшились по сравнению с существующими в то время аналогами, что позволило использовать Michel даже на небольших фермерских хозяйствах. Ширина захвата разбрасывателя в зависимости от модификации Michel варьировалась от 1,5 до 4 м.

К 1925 г. появились модификации разбрасывателя Michel, оснащенные резиновыми шинами и дополнительной колесной опорой, что можно считать переходом от полуприцепного к прицепному способу агрегатирования.

В 1930 г. распределитель удобрений Michel получил огромную популярность, и его конструкцию начали копировать несколько производителей сельскохозяйственной техники. В 1936 г. был разработан разбрасыватель Amazone BM с двойным шнеком, что устраняло недостатки существующих конструкций. В 1936 г. популярность получили разбрасыватели компании Massey-Harris, которые представляли собой туковую сеялку с приводом от опорных колес.

Конструкция самоходного разбрасывателя удобрений предложена в [14]. Разбрасыватель монтировался на шасси грузового автомобиля и представлял собой воронкообразное дно с винтовым конвейером, в качестве распределяющего рабочего органа использовался центробежный метатель.

К 1945 г. появились разбрасыватели с двумя технологическими контурами, что позволило одновременно вносить удобрения различных видов. Шнековые разбрасыватели удобрений активно использовались вплоть до 1958 г., к тому времени конкурируя с появившимися однодисковыми и маятниковыми распределителями удобрений. Конструкция маятникового распределителя, предложенная Л. Стеффенино, демонстрировалась на выставке в Вероне в 1958 г. и получила широкое распространение. В качестве альтернативы зародилась концепция первого двухдискового разбрасывателя, каждый из дисков которого оснащен 4 лопатками. Таким образом, порция вносимых минеральных удобрений разделялась каждым диском на 4 части. В разбрасывателе имелась возможность отключать один из дисков, что позволяло обрабатывать участки на краю поля. В результате реализации данной концепции компанией Amazone был разработан разбрасыватель ZA, шириной захвата 9 м и объемом бункера вместимостью 330 л.

К 1970 г. у производителей сельскохозяйственной продукции возникла потребность в увеличении ширины захвата. Производители отреагировали на спрос, разработав линейку двухдисковых разбрасывателей. Объем технологических емкостей варьировался в зависимости от потребностей конкретных хозяйств: 200 л – для виноградников, 250 л – для малых ферм, 600 и 1000 л – для средних и крупных сельскохозяйственных предприятий соответственно.

В 1982 г. был представлен разбрасыватель Amazone ZA-U, диски с выступающими лопатками которого позволяли вносить минеральные удобрения на ширине захвата 24 м. Для внесения различных видов минеральных удобрений предлагались съемные диски с особенностями конструкции. Усовершенствованный разбрасыватель ZA-U выпускается с объемами технологических емкостей 1000 и 1800 л и вплоть до настоящего времени пользуется широкой популярностью.

В начале 1980-х компания Vicon начинает активно использовать контроллеры для управления процессом внесения удобрений. В 1985 г. данная компания стала пионером в использовании стандарта ISOBUS.

Таким образом, на основе анализа литературных источников и информационных ресурсов были выделены основные этапы становления и развития технических средств для внесения

минеральных удобрений. Основными качественными этапами можно считать переход от ручных приспособлений (этап I – 1860–1900-е гг.) к техническим средствам на конной тяге (этап II – 1880–1920-е гг.) и последующее развитие тягово-приводных и самоходных машин (этап III – 1910-е – 2023 г.).

Анализ патентной информации позволил определить динамику развития технических средств для внесения минеральных удобрений в каждом из выделенных этапов. Так, согласно анализу, в последние 150 лет наблюдался устойчивый рост количества охранных документов на изобретения, касающиеся разбрасывателей минеральных удобрений (англ. *fertilizer spreader*). Согласно графику, представленному на рис. 1, если разделить период патентования машин для внесения удобрений на 3 части, то за первые 50 лет был получен 101 охранный документ на изобретения, в последующие 50 лет – 796, а в последние 50 лет – 11 252 заявки. Однако количество охранных документов не дают целостного представления о динамике развития технических средств для внесения минеральных удобрений.

Принимая производительность в качестве критерия для последующего анализа, построены три кривые (рис. 2), которые отражают ключевые моменты совершенствования машин и средств для внесения удобрений [15]. В общем виде уравнение s -образной кривой можно представить в виде

$$s_i = a + \frac{b}{1 + e^{-c(t_y - d)}}, \quad (1)$$

где a , b , c , d – коэффициенты, характеризующие параметры s -образной кривой; t_y – номер рядов от 1 до 13, соответствующих интервалам времени, в течение которых проводились наблюдения за количеством охранных документов.

Нахождение производных уравнения (1) позволяет оценить стадию, на которой находится исследуемый объект или процесс [16], а также определить основные точки перегиба, которые соответствуют существенным качественным и количественным изменениям в развитии технических средств для внесения удобрений. Найдем первую, вторую и третью производные функции (1) в общем виде:

$$\frac{ds_i}{dt_y} = \frac{bce^{-c(-d+x)}}{1 + e^{-c(-d+x)^2}} = \frac{bce^{c(d+x)}}{(e^{cd} + e^{cx})^2}; \quad (2)$$

$$\frac{d^2s_i}{dt_y^2} = \frac{2bc^2e^{-2c(-d+x)}}{(1 + e^{-c(-d+x)})^3} - \frac{bc^2e^{-c(-d+x)}}{(1 + e^{-c(-d+x)})^2} = \frac{bc^2e^{c(d+x)}(e^{cd} - e^{cx})}{(e^{cd} + e^{cx})^3}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3s_i}{dt_y^3} &= \frac{6bc^3e^{-3c(-d+x)}}{(1 + e^{-c(-d+x)})^4} - \frac{6bc^3e^{-2c(-d+x)}}{(1 + e^{-c(-d+x)})^3} + \frac{bc^3e^{-c(-d+x)}}{(1 + e^{-c(-d+x)})^2} = \\ &= \frac{bc^3e^{c(d+x)}(e^{2cd} + e^{2cx} - 4e^{c(d+x)})}{(e^{cd} + e^{cx})^4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для нахождения коэффициентов, входящих в уравнения (1)–(4) воспользуемся инструментом Curve Fitting [17]. В итоге получим для этапа I следующие значения коэффициентов: $a = 7,44$; $b = 2,35$; $c = 4,58$; $d = 1,41$; для этапа II: $a = 0,11$; $b = 1,89$; $c = 3,21$; $d = 2,67$; для этапа III: $a = 6,26$; $b = 33,5$; $c = 1,34$; $d = 7,43$. Значение среднеквадратичных отклонений R^2 для всех полученных уравнений составляет $R^2 > 0,96$. После подстановки полученных коэффициентов в уравнение (1) получим для этапов I–III следующие зависимости:

$$s_I = 7,44 + \frac{2,35}{1 + e^{-4,58(t_y - 1,41)}}; \quad (5)$$

$$s_{II} = 0,11 + \frac{1,89}{1 + e^{-3,21(t_y - 2,67)}}; \quad (6)$$

$$s_{III} = 6,26 + \frac{33,5}{1 + e^{-1,34(t_y - 7,43)}}. \quad (7)$$

Из формул (1)–(3) видно, что с ростом аргумента t_y функция (7) стремится к асимптоте

$$\lim_{t_y \rightarrow \infty} s_i = a + b, \text{ при условии, что } (a | b | c) \in \mathbb{R} \text{ и } c > 0. \quad (8)$$

Тогда с учетом формулы (7) получим

$$\lim_{t_y \rightarrow \infty} s_{III} = \lim_{t_y \rightarrow \infty} \left(6,26 + \frac{33,5}{1 + e^{-1,34(t_y - 7,43)}} \right) = 39,75. \quad (9)$$

Соответственно, для нахождения нижней асимптоты в общем виде запишем

$$\lim_{t_y \rightarrow -\infty} s_i = a, \text{ при условии, что } (a | b | c) \in \mathbb{R} \text{ и } c > 0. \quad (10)$$

Тогда с учетом формулы (10) получим

$$\lim_{t_y \rightarrow -\infty} s_{III} = \lim_{t_y \rightarrow -\infty} \left(6,26 + \frac{33,5}{1 + e^{-1,34(t_y - 7,43)}} \right) = 6,26. \quad (11)$$

Прирост производительности за рассматриваемый период времени составил

$$\lim_{t_y \rightarrow \infty} s_{III} - \lim_{t_y \rightarrow -\infty} s_{III} = 33,49.$$

Как видно из рис. 2, этап III является наиболее протяженным и характеризуется наибольшим ростом производительности технических средств для внесения удобрений. В этой связи этап III

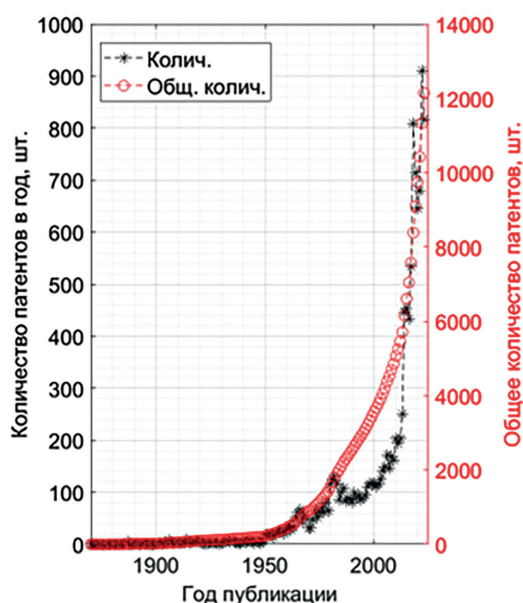


Рис. 1. Общее количество патентов по механизации внесения удобрений

Fig. 1. The total number of patents for mechanization of fertilizer application

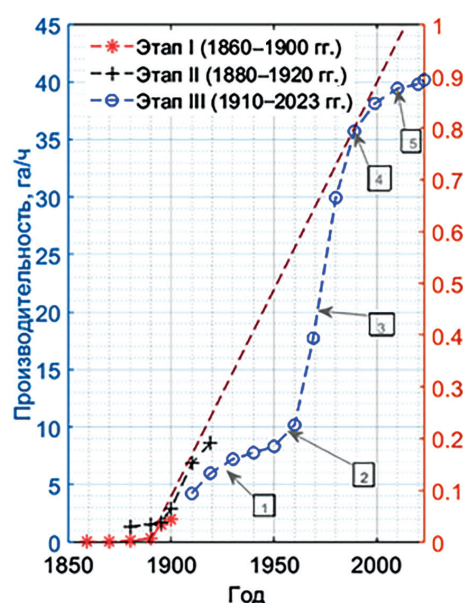


Рис. 2. Логистические кривые, характеризующие основные этапы развития машин химизации

Fig. 2. Logistic curves characterizing the main stages of chemicalization machines development

требуется детального рассмотрения. После подстановки коэффициентов в уравнения (2)–(4) получим на примере для этапа III:

$$\frac{ds_{III}}{dt_y} = \frac{33,5 \cdot 1,34 \cdot e^{1,34(7,43+t_y)}}{(e^{1,34 \cdot 7,43} + e^{1,34 t_y})^2} = \frac{94\,6395 e^{1,34 t_y}}{(21\,082 + e^{1,34 t_y})^2}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 s_{III}}{dt_y^2} &= \frac{33,5 \cdot 1,34^2 e^{1,34(7,43+t_y)} (e^{1,34 \cdot 7,43} - e^{1,34 t_y})}{(e^{1,34 \cdot 7,43} + e^{1,34 t_y})^3} = \\ &= -\frac{1,27 \cdot 10^6 e^{1,34 t_y} (-21\,082 + e^{1,34 t_y})}{(21\,082 + e^{1,34 t_y})^3}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^3 s_{III}}{dt_y^3} &= \frac{33,5 \cdot 1,34^3 e^{1,34(7,43+t_y)} (e^{2 \cdot 1,34 \cdot 7,43} + e^{2 \cdot 1,34 t_y} - 4e^{1,34(7,43+t_y)})}{(e^{1,34 \cdot 7,43} + e^{1,34 t_y})^4} = \\ &= \frac{7,55 \cdot 10^{14} e^{1,34 t_y} - 1,43 \cdot 10^{11} e^{2,68 t_y} + 1,7 \cdot 10^6 e^{4,02 t_y}}{(21\,082 + e^{1,34 t_y})^4}. \end{aligned} \quad (14)$$

Полученные зависимости используем для построения логистической кривой (7) и ее производных (12)–(14), которые представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, через точку максимума первой производной, заданной уравнением (12), проходит линия симметрии сигмоиды. В точке, соответствующей $d^2 s_i / dt_y^2 = 0$, находится точка перегиба s -образной кривой s_{III} . Для нахождения точки перегиба функции (7) приравняем вторую производную, заданную уравнением (13), к нулю и, решив относительно аргумента, получим тогда $t_y = 7,43$.

Таким образом, точка перегиба соответствует моменту времени, когда производительность машин для внесения удобрений достигла 23 га/ч. Изобретения, соответствующие точке перегиба, направлены на увеличение ширины захвата (маятниковый метатель [18], распределитель удобрений на автомобильном шасси с гидравлическим приводом дисковых рабочих органов [19]). Кроме того, точке перегиба также соответствует появление штанговых машин для внесения удобрений [20] и технические решения [21], направленные на равномерное распределение удобрений на полях с неровным рельефом.

На рис. 3 представлена оценка основных участков логистической кривой 3-го этапа, характеризующей совершенствование технических средств для внесения минеральных удобрений.

На участке 1 кривой (1920–1950 гг.) наблюдается развитие идей и накопление опыта в разработке тягово-приводных и самоходных технических средств для внесения минеральных удобрений. Появляется оборудование для измельчения и внутривспашечного внесения минеральных удобрений для колесного трактора [22], развиваются тяговые машины для агрегатирования с колесными тракторами с приводом от опорных колес [23], штанговое монтируемое оборудование для внесения удобрений [24]. В конце данного этапа имеются заявки на двухдисковые разбрасыватели известковых материалов и удобрений кузовного типа [25]. Производительность технических средств для внесения минеральных удобрений на данном этапе возрастала несущественно за счет увеличения объема накопительных емкостей и поступательной скорости движения агрегатов.

Переломной точкой является этап 2, когда наблюдается увеличение количества поданных заявок на центробежные разбрасыватели минеральных удобрений. Данная тенденция привела к началу этапа 3 – увеличению производительности машин для внесения удобрений. Разрабатываются приспособления послонного внесения минеральных удобрений [26] и высева гранулированных

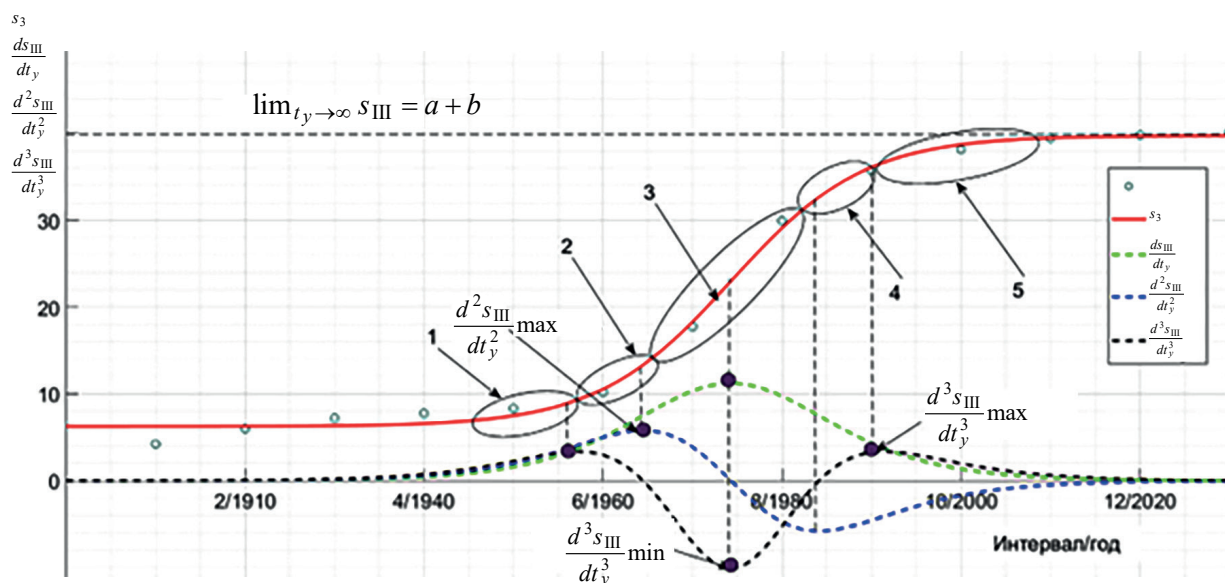


Рис. 3. Оценка участков логистической кривой, характеризующей основные этапы совершенствования машин химизации земледелия

Fig. 3. Assessment of the sections of logistic curve characterizing the main stages of chemicalization farming machines improvement

удобрений. Увеличивается ширина захвата шнековых распределителей минеральных удобрений [27–29]; патентуются усовершенствованные конструкции центробежных разбрасывателей удобрений [30, 31]. Этап 4 – замедление темпов увеличения производительности – начинается в 1980-х годах. На смену ему приходит этап 5, когда подаваемые заявки на изобретения направлены на повышение качества распределения удобрений. Совершенствуются центробежные метатели, разрабатываются под руководством профессора Л. Я. Степука новые высокоточные штанговые рабочие органы для внесения удобрений.

Для оценки средней скорости изменения производительности технических средств за рассматриваемый период запишем

$$\frac{\Delta s_{III}}{\Delta t_y} = \frac{s_{III}(t_{y0} + \Delta t_y) - s_{III}(t_{y0})}{\Delta t_y}. \quad (16)$$

С учетом формулы (1) получим в общем виде

$$s_{III}(t_{y0} + \Delta t_y) = a + \frac{b}{1 + e^{-c(-d+t_{y0}+\Delta t_y)}}; \quad (17)$$

$$s_{III}(t_{y0}) = a + \frac{b}{1 + e^{-c(-d+t_{y0})}}. \quad (18)$$

Тогда после подстановки и преобразований получим

$$\begin{aligned} \frac{\Delta s_{III}}{\Delta t_y} &= \frac{b \left(\frac{1}{e^{-c(-d+\Delta t_y+t_{y0})} + 1} - \frac{1}{e^{c(d-t_{y0})} + 1} \right)}{\Delta t_y} = \left[\begin{array}{l} a = 6,26 \\ b = 33,5 \\ c = 1,34 \\ d = 7,43 \end{array} \right] = \\ &= \frac{1}{\Delta t_y} \left(\frac{1}{-0,03 - 629,3e^{-1,34t_{y0}}} + \frac{1}{0,03 + 629,3e^{-1,34t_{y0}-1,34\Delta t_y}} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Полученная зависимость (19) позволяет оценить среднюю скорость возрастания функции (7) на различных отрезках временной шкалы.

Выводы. Наибольший рост производительности машин для внесения удобрений наблюдался в период с 1960-х по 1990 г. Дальнейшее увеличение производительности, которое ранее достигалось за счет увеличения ширины захвата машин химизации и рабочей скорости движения, является нецелесообразным по причине снижения качества распределения удобрений. В этой связи резервы повышения производительности следует искать в совершенствовании организации процессов и работ по внесению удобрений.

В настоящее время основными направлениями совершенствования машин для внесения удобрений является их интеграция с информационными системами, использование микроконтроллеров для управления рабочими процессами машин, компенсационное внесение удобрений согласно картограммам полей.

Список использованных источников

1. Бамбалов, Н. Н. Новое поколение комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия / Н. Н. Бамбалов, Г. А. Соколов // Земледелие и растениеводство. – 2020. – № 4 (131). – С. 28–33.
2. Цыбулько, Н. Н. Агрономическая и экономическая эффективность применения минеральных удобрений под многолетние злаковые травы на торфянисто-глеевой почве / Н. Н. Цыбулько, Е. Б. Евсеев, И. И. Жукова // Почвоведение и агрохимия. – 2021. – № 1 (66). – С. 113–119.
3. Степук, Л. Я. Доказательства необходимости разработки и реализации государственной научно-технической программы приоритетного сельхозмашиностроения / Л. Я. Степук // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 окт. 2022 г. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва; редкол.: П. П. Казакевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 27–33.
4. Particle deposition distribution of multi-rotor UAV-based fertilizer spreader under different height and speed parameters / C. Song, L. Liu, G. Wang [et al.] // Drones. – 2023. – Vol. 7, № 7. – Art. 425. <https://doi.org/10.3390/drones7070425>
5. Rai, V. Implications of nanobiosensors in agriculture / V. Rai, S. Acharya, N. Dey // Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology. – 2012. – № 3. – P. 315–324. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2012.322039>
6. Patent US 31409, CPC B65G65/44. Improvement in guano-spreaders: publ. date 12.02.1861 / Saunders I. J. – 2 p.
7. Patent US 46515, CPC B65D88/64. Apparatus for distributing fertilizers: publ. date 21.02.1865 / Wiltse J. M. – 2 p.
8. Patent US 337390, CPC A01C15/16. Hand planter and distributor: № 174244: filing date 13.08.1885: publ. date 09.03.1886 / Fries H. E. – 3 p.
9. Patent US 104694, CPC E01C19/203. Improvement in lime-spreader: publ. date 28.06.1870 / Burnett W. G. – 2 p.
10. Patent US 117369, CPC A01C7/08. Improvement in combined corn-planters and fertilizer-distributors: publ. date 25.07.1871 / Barrick C. W. – 3 p.
11. Patent US 372126, CPC A01C5/062. Grain-drill tube: № 247519: filing date 24.08.1887: publ. date 25.10.1887 / Crane T. R. – 3 p.
12. Patent US 425338, CPC B65G53/46. Distributer for flock, sand, tinsel, & c: № 329367: filing date 05.11.1889: publ. date 08.04.1890 / Muller G. – 3 p.
13. Patent CA 157303. Fertilizer distributor: filing date 22.01.1914: publ. date 11.08.1914 / Synck H. – URL: https://www.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/157303/summary.html?type=number_search&tabIndex=tabs1_1 (date of access: 10.09.2024).
14. Patent GB 577501, CPC A01C17/00. New or improved agricultural distributing machine or spreader: filing date 17.03.1944: publ. date 21.05.1946 / Russell C. – URL: <https://patents.google.com/patent/GB577501A> (date of access: 10.09.2024).
15. Swanson, D. Greenness phenology metrics / D. Swanson // Monitoring of greenness and snow phenology by remote automated cameras in the NPS Arctic inventory and monitoring network, 2013-14 / D. Swanson; Nat. Park Service U.S. Dep. of the Interior, Natural Resource Stewardship a. Science. – Fort Collins, 2015. – P. 4–6.
16. Яшин, С. Н. Применение S-образных логистических кривых при оценке и прогнозировании инновационного потенциала предприятия / С. Н. Яшин, С. В. Тихонов // Финансы и кредит. – 2015. – № 43 (667). – С. 37–52.
17. Chapman, S. J. The while loop / S. J. Chapman // MATLAB programming for engineers / S. J. Chapman; BAE Systems Australia. – 6th ed. – Boston, 2020. – P. 207–213.
18. Patent US 3777992, IPC A01c3/06, E01c19/20; CPC A01C15/002. Spreader: № 204445: filing date 03.12.1971: publ. date 11.12.1973 / Koning C. J. de. – 7 p.
19. Patent US 3776431, IPC E01c19/20; CPC E01C19/203. Material spreader system with hydraulic drive and speed control means: № 278680: filing date 07.08.1972: publ. date 04.12.1973 / Riley J. R. – 6 p.
20. Patent US 3780955, IPC A01c19/00, E01c19/20; CPC A01C15/00. Method and apparatus for spreading a fertilizing material: № 237162: filing date 22.03.1972: publ. date 25.12.1973 / Palmer H. S. – 9 p.
21. Патент SU 372964, МПК A01C 17/00 (2006.01). Разбрасыватель минеральных удобрений: № 1690194/30-15: заявлено 13.08.1971: опубл. 12.03.1973 / Бутенко Н. Т., Голуб В. И., Гордиенко С. М., Грабовский Г. Г., Грибник Н. Д., Евтуха А. А., Каплунов М. М., Минин С. Г., Федотов Н. М., Чумаченко Б. А. – 2 с.
22. Patent US 1292391, CPC A01C7/081. Agricultural implement: № 144086: filing date 23.01.1917: publ. date 21.01.1919 / Dougherty E. J. – 7 p.

23. Patent CA 212857, IPC A01C15/00 (2006.01). Fertilizer distributing machine: publ. date 09.08.1921 / Nirider F. A. – URL: https://www.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/212857/summary.html?type=number_search&tabIndex=tab1_1 (date of access: 10.09.2024).
24. Patent US 1486355, CPC A01B69/028. Agricultural precision device: № 305940: filing date 04.08.1923: publ. date 11.03.1924 / Murray H. J. – 13 p.
25. Patent US 2296909, CPC A01C15/005. Spreader: № 392329: filing date 07.05.1941: publ. date 29.09.1942 / Dake M. L. – 8 p.
26. Патент SU 95283, МПК A01C 7/06 (1995.01). Приспособление к сеялкам для высева гранулированных удобрений: № 445462: заявлено 12.05.1951: опубл. 30.11.1952 / В. М. Кузьмин. – 3 с.
27. Patent US 2657831, CPC A01C15/16. Fertilizer distributor: № 205340: filing date 10.01.1951: publ. date 03.11.1953 / Pierce B. E. – 5 p.
28. Patent US 2673741, CPC A01C15/16. Fertilizer spreader: № 128170: filing date 18.11.1949: publ. date 30.03.1954 / Durand E. M. – 5 p.
29. Patent US 3180525, CPC A01C15/16. Fertilizer feeding and metering mechanism: № 268614: filing date 28.03.1963: publ. date 27.04.1965 / Zdenek F., Brandt R. G. – 6 p.
30. Patent US 2676695, CPC A01C17/006. Broadcast seeder: № 225448: filing date 09.05.1951: publ. date 27.04.1954 / Walter S. – 6 p.
31. Patent GB 722564, CPC A01C17/00. Improvements in apparatus for spreading seed, fertilizer and like: publ. date 02.09.1952 / Hipwell G.A. – URL: <https://patents.google.com/patent/GB722564A/en?q=Patent+GB+722564+A> (date of access: 10.09.2024).

References

1. Bambalov N. N., Sokolov G. A. New coating of complex granular organomineral improvements of prolonged action. *Zemledelie i rastenievodstvo* [Crop Farming and Plant Growing], 2020, no. 4 (131), pp. 28–33 (in Russian).
2. Tsybulka N. N., Evseev E. B., Zhukova I. I. Agronomic and economic efficiency of the application mineral fertilizers for perennial grasses on peat-gley soil. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2021, no. 1 (66), pp. 113–119 (in Russian).
3. Stepuk L. Ya. Proof of the need for development and implementation of state-of-the-art scientific and technical program. *Nauchno-tehnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, Minsk, 20–21 oktyabrya 2022 g.* [Scientific and technological progress in agricultural production: proceedings of the International scientific and technical conference, Minsk, October 20–21, 2022]. Minsk, 2022, pp. 27–33 (in Russian).
4. Song C., Liu L., Wang G., Han J., Zhang T., Lan Y. Particle deposition distribution of multi-rotor UAV-based fertilizer spreader under different height and speed parameters. *Drones*, 2023, vol. 7, no. 7, art. 425. <https://doi.org/10.3390/drones7070425>
5. Rai V., Acharya S., Dey N. Implications of nanobiosensors in agriculture. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 2012, no. 3, pp. 315–324. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2012.322039>
6. Siunder I. J. *Improvement in guano-spreaders*. Patent US 31409, 1861.
7. Wiltsie J. M. *Apparatus for distributing fertilizers*. Patent US 46515, 1865.
8. Fries H. E. *Hand planter and distributor*. Patent US 337390, 1886.
9. Burnett W. G. *Improvement in lime-spreader*. Patent US 104694, 1870.
10. Barrick C. W. *Improvement in combined corn-planters and fertilizer-distributors*. Patent US 117369, 1871.
11. Crane T. R. *Grain-drill tube*. Patent US 372126, 1887.
12. Muller G. *Distributor for flock, sand, tinsel, & c.* Patent US 425338, 1890.
13. Synck H. *Fertilizer distributor*. Patent CA 157303, 1914. Available at: https://www.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/157303/summary.html?type=number_search&tabIndex=tab1_1 (accessed 10.09.2024).
14. Russell C. *New or improved agricultural distributing machine or spreader*. Patent GB 577501, 1946. Available at: <https://patents.google.com/patent/GB577501A> (accessed 10.09.2024).
15. Swanson D. Greenness phenology metrics. *Monitoring of greenness and snow phenology by remote automated cameras in the NPS Arctic inventory and monitoring network, 2013–14*. Fort Collins, 2015, pp. 4–6.
16. Yashin S. N., Tikhonov S. V. Application of S-shape logistic curves when assessing and forecasting the innovation potential of the enterprise. *Finansy i kredit = Finance and Credit*, 2015, no. 43 (667), pp. 37–50 (in Russian).
17. Chapman S. J. The while loop. *MATLAB programming for engineers*. 6th ed. Boston, 2020, pp. 207–213.
18. Koning C. J. de. *Spreader*. Patent US 3777992, 1973.
19. Riley J. R. *Material spreader system with hydraulic drive and speed control means*. Patent US 3776431, 1973.
20. Palmer H. S. *Method and apparatus for spreading a fertilizing material*. Patent US 3780955, 1973.
21. Butenko N. T., Golub V. I., Gordienko S. M., Grabovskii G. G., Gribnik N. D., Evtukha A. A., Kaplunov M. M., Minin S. G., Fedotov N. M., Chumachenko B. A. *Mineral fertilizer spreader*. Patent SU 372964, 1973. (in Russian).
22. Dougherty E. J. *Agricultural implement*. Patent US 1292391, 1919.
23. Nirider F. A. *Fertilizer distributing machine*. Patent CA 212857, 1921. Available at: https://www.ic.gc.ca/opic-cipo/cpd/eng/patent/212857/summary.html?type=number_search&tabIndex=tab1_1 (accessed 10.09.2024).
24. Murray H. J. *Agricultural precision device*. Patent US 1486355, 1924 p.
25. Dake M. L. *Spreader*. Patent US 2296909, 1942.
26. Kuz'min V. M. *Adaptation to seeders for sowing mineral fertilizers*. Patent SU 95283, 1952. (in Russian).

27. Pierce B. E. *Fertilizer distributor*. Patent US 2657831, 1953.
28. Durand E. M. *Fertilizer spreader*. Patent US 2673741, 1954.
29. Zdenek F., Brandt R. G. *Fertilizer feeding and metering mechanism*. Patent US 3180525, 1965.
30. Walter S. *Broadcast seeder*. Patent US 2676695, 1954.
31. Hipwell G. A. *Improvements in apparatus for spreading seed, fertilizer and like*. Patent GB 722564, 1952. Available at: <https://patents.google.com/patent/GB722564A/en?qoq=Patent+GB+722564+A> (accessed 10.09.2024).

Информация об авторах

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, доцент, академик-секретарь Отделения аграрных наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.basnet.by

Жешко Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). E-mail: azeshko@gmail.com

Information about the authors

Vladimir V. Azarenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Academic Secretary of the Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.bas-net.by

Alexander A. Zheshko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin Str., 220049, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: azeshko@gmail.com