

УДК 631.3-1/-9

4.3.1. Технологии, машины и оборудования для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

ДИНАМИКА ИГОЛЬЧАТОГО ДИСКА

Матушченко Алексей Евгеньевич
старший преподаватель
archangel24@mail.ru

Гайдук Андрей Вячеславович
Студент факультета Механизации
Operativnik581@mail.ru

В статье представлено исследование, посвящённое изучению динамики игольчатого диска и определению силы инерции, действующей на почву. Игольчатый диск - это рабочий орган, используемый для внесения жидких удобрений в почву через клапаны, встроенные в ступицу колеса, работающие по принципу форсунки. Динамика диска связана с движением в процессе работы. Актуальность темы обусловлена необходимостью изучения теории машин для внесения жидких удобрений с целью совершенствования их работы. На основе проведения полевых испытаний и компьютерного моделирования авторы проанализировали влияние различных параметров. Результаты исследования свидетельствуют о том, что можно теоретически определить значения силы реакции почвы и предположительное влияние параметров диска на силу реакции почвы. В заключении представлены рекомендации для агрономов и инженеров по применению полученных данных в практике сельского хозяйства.

Ключевые слова: ИГОЛЬЧАТЫЙ ДИСК, ПОЧВА, СИЛА ИНЕРЦИИ, ГЛУБИНА ПОГРУЖЕНИЯ, ДИНАМИКА, ПРИНЦИП ДАЛАМБЕРА, ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-214-014>

UDC 631.3-1/-9

4.3.1. Technologies machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

DYNAMICS OF THE NEEDLE DISC

Matushchenko Alexey Evgenievich
senior lecturer
archangel24@mail.ru

Gayduk Andrey Vyacheslavovich
student of the Faculty of Mechanization
Operativnik581@mail.ru

The article presents a study on the dynamics of a needle disc and the determination of the inertial force acting on the soil. A needle disc is a working tool used for applying liquid fertilizers to the soil through valves built into the wheel hub, which operate like a nozzle. The dynamics of the disc are related to its movement during operation. The relevance of this topic lies in the need to study the theory of liquid fertilizer application machines in order to improve their performance. Based on field tests and computer simulations, the authors analyzed the impact of various parameters. The results of the study indicate that it is possible to theoretically determine the values of the soil reaction force and the estimated influence of the disc parameters on the soil reaction force. In conclusion, recommendations are provided for agronomists and engineers on the application of the obtained data in agricultural practice

Keywords: NEEDLE DISK, SOIL, INERTIA FORCE, IMMERSION DEPTH, DYNAMICS, DALAMBRE'S PRINCIPLE, DIFFERENTIATION

Всё более широкое распространение жидких удобрений вызывает необходимость изучения теории машин для внесения таких удобрений с целью совершенствования их работы.

Одним из факторов повышения урожайности является внесение жидких удобрений в почву, с целью обеспечения защиты и питания растений в период вегетации, особенно в засушливое время. При помощи

<http://ej.kubagro.ru/2025/10/pdf/14.pdf>

точечного внесения удобрений повышается эффективность использования влаги в почве. В настоящее время существует множество машин для внесения таких удобрений в почву. Одним из элементов таких машин является игольчатый диск. Игольчатый диск – это рабочий орган, предназначенный для внесения жидких удобрений в почву. Под давлением, при помощи игл, равномерно расположенных по всей окружности диска, форсунка вносит определённую дозу в центр борозды. Изучение динамики диска позволяет нам решить ряд проблем, которые влияют на качество внесения удобрений в почву. Улучшая качество внесения удобрений в почву, мы повышаем плодородие и урожайность почвы. Игольчатые диски применяются в такой сельскохозяйственной технике как ликлайзерах.

Исследование динамики таких дисков включает в себя анализ механических свойств материалов, воздействия внешних сил и процессов, возникающих при работе. Понимание динамических характеристик крайне важно для повышения производительности, что в свою очередь, влияет на долговечность и качество

Основным показателем игольчатого диска – степень воздействия игл на почву. Благодаря этому показателю, мы можем определить насколько диск обеспечивает перемешивание почву с удобрениями на заданной глубине.

Нами была рассмотрена кинематика игольчатого диска для внесения жидких удобрений, построен график зависимости кинематического параметра λ от глубины вхождения иглы в почву и от радиуса игольчатого диска [2]. В дальнейшем встали задачи изучения динамики игольчатого диска, и в частности, определения силы инерции, действующей на почву при вхождении иглы в неё; рассмотрения общей картины сил, действующих на игольчатый диск.

Для того чтобы найти силу инерции, нам нужно знать такие параметры как: масса игольчатого диска, приведённая к концу иглы и ускорение точки приведения. Имея эти величины, сила инерции будет определяться выражением [4]:

$$F_u = W * m_n , \quad (1)$$

где m_n – масса игольчатого диска, приведённая к концу иглы;

W – ускорение точки приведения.

Так как нам неизвестна масса игольчатого диска, нам необходимо будет её найти для упрощения дальнейших расчётов. Приведённую массу системы можно определить по формуле [1]

$$m_n = \sum_1^k m_i \left(\frac{v_{si}}{v} \right)^2 + \sum_1^k J_{si} \left(\frac{\omega_i}{v} \right)^2 , \quad (2)$$

где m_i – масса i -того звена системы;

v_{si} – скорость центра i -того звена;

v – скорость точки приведения;

J_{si} – момент инерции i -того звена относительно оси вращения, проходящей через центр тяжести;

ω_i – угловая частота вращения.

Для упрощения решения задачи учтём массу только игольчатого диска. Тогда формула для нахождения приведённой массы запишется так:

$$m_n = m_\sigma \left(\frac{v_0}{v_k} \right)^2 + J_\sigma \left(\frac{\omega_\sigma}{v_k} \right)^2 , \quad (3)$$

где v_0 – скорость центра тяжести диска;

m_σ – масса игольчатого диска;

v_k – скорость конца иглы;

J_σ – момент инерции диска относительно оси вращения;

ω_σ – угловая частота вращения диска.

Для нахождения скорости центра игольчатого диска v_0 и скорости конца иглы v_k воспользуемся известным уравнением траектории движения центра диска [3]:

$$X_0 = v_{\pi}t + \frac{R}{2}(1 - \cos \alpha) \sin \frac{\pi}{\alpha} \omega t , \quad (4)$$

$$Y_0 = \frac{R}{2}(1 - \cos \alpha) \cos \frac{\pi}{2} \omega t \quad (5)$$

Помимо нахождения уравнения траектории движения центра диска, нам также нужно найти уравнение траектории движения конца иглы:

$$X = R \sin \omega t + v_{\pi}t + \frac{R}{2}(1 - \cos \alpha) \sin \frac{\pi}{2} \omega t, \quad (6)$$

$$Y = R \cos \omega t + \frac{R}{2}(1 - \cos \alpha) \left(\cos \frac{\pi}{2} \omega t - 1 \right), \quad (7)$$

где R – радиус игольчатого диска;

v_{π} – скорость поступательного движения диска;

α – половина угла между иглами;

ω – угловая частота вращения диска;

λ – кинематический параметр $= \frac{\omega R}{v_{\pi}}$;

t – время.

Дифференцирую уравнения траектории движения центра диска и траектории движения конца иглы (4), (5), (6), (7) и преобразовывая, найдём выражения абсолютных скоростей движения центра игольчатого диска и конца иглы, которые понадобятся для нахождения ускорения конца иглы диска:

$$v_0 = v_{\pi} \sqrt{1 + A \cos \frac{\pi}{2} \omega t + \frac{1}{4} A^2}, \quad (8)$$

$$v_k = v_{\pi} \sqrt{1 + \lambda^2 + \frac{1}{4} A^2 + 2\lambda \cos \omega t + A \cos \frac{\alpha - \pi}{\alpha} \omega t + A \cos \frac{\pi}{2} \omega t}, \quad (9)$$

где $A = \frac{\lambda \pi}{\alpha} (1 - \cos \alpha)$.

Дифференцируя уравнение абсолютной скорости движения конца иглы (9) и преобразовывая результат дифференцирования, найдём выражение ускорения конца иглы диска [5]:

$$W_r = \omega^2 R \sqrt{1 + B^2 + 2B \cos \frac{\alpha - \pi}{\alpha} \omega t}, \quad (10)$$

где $B = \frac{\pi^2}{2\alpha^2} (1 - \cos \alpha)$.

Подставив в формулу для нахождения силы инерции (1) выражения ускорения конца иглы диска W_r (10), абсолютных скоростей конца иглы v_k (9) и движения центра игольчатого диска v_0 (8), а также выражение приведённой массы m_n (3) и преобразовав, будем иметь:

$$F_u = - \frac{\omega^2 R \sqrt{1 + B^2 + 2B \cos \frac{\alpha - \pi}{\alpha} \omega t} * \left[m_k \left(1 + A \cos \frac{\pi}{\alpha} \omega t + \frac{1}{4} A^2 \right) + J_\theta \omega^2 \right]}{1 + \lambda^2 + \frac{1}{4} A^2 + 2\lambda \cos \omega t + A \cos \frac{\alpha - \pi}{\alpha} \omega t + A \cos \frac{\pi}{\alpha} \omega t}. \quad (11)$$

Анализ этой формулы показал, что при постоянной поступательной скорости v_p и постоянной глубине погружения в почву сила инерции зависит в основном от угловой скорости ω_θ и от изменения радиуса диска. Это даёт нам понять, что при изменении радиуса и угловой скорости ω_θ , сила инерции диска также будет изменяться [10].

Зависимость силы инерции, действующей со стороны иглы на почву, от радиуса игольчатого диска при различных параметрах λ мы можем увидеть на рис. 1.

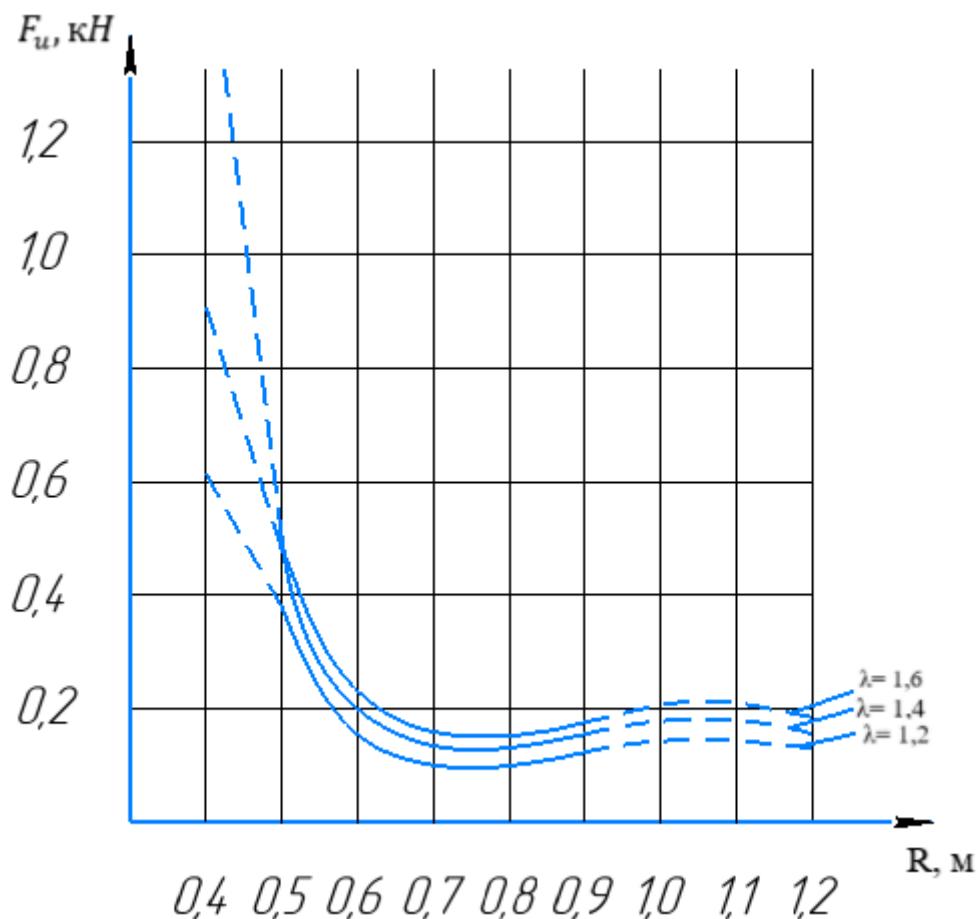


Рис. 1. Зависимость силы инерции от радиуса игольчатого диска

Из этой зависимости видно, что большой радиус диска (при $\lambda = \text{const}$) даст меньшую силу инерции, с которой игла действует на почву. Поэтому при постоянной λ радиус диска следует уменьшать, так как увеличенная сила инерции в этом случае облегчает вход иглы в почву и повышает давление, под которым жидкие удобрения впрыскиваются в почву. В следствии чего удобрения лучше заделываются в почву, что способствует высокой защите растений от вредителей, а также увеличения качества и урожайности.

Анализируя зависимость силы инерции от кинематического параметра λ при постоянном радиусе диска, можно сделать вывод о том, что λ должна быть возможно большей, чтобы увеличить силу инерции (рис. 2).

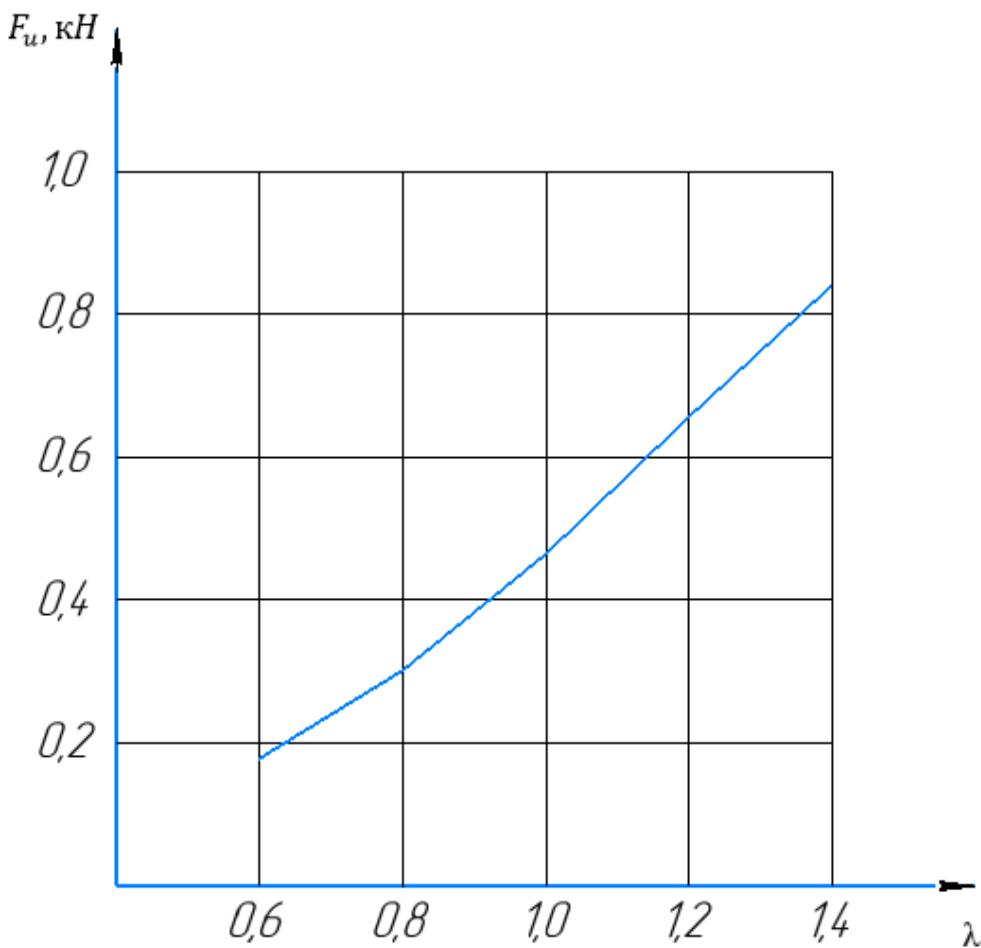


Рис. 2. Зависимость силы инерции от λ

Из этой зависимости видно, что при постоянном радиусе диска и увеличении кинематического параметра λ , сила инерции будет возрастать. Также будет работать и в обратную сторону при уменьшении значения кинематического параметра λ , сила инерции уменьшается.

При дальнейшем исследовании динамики игольчатого диска, впрыскивающего жидкое удобрение в почву, нам необходимо рассмотреть общую картину сил, которые действуют на игольчатый диск. При помощи которых, можно будет определить дальнейшие значения силы реакции почвы R_p и угла v и определить различное влияние параметров диска на силу реакции почвы (рис. 3).

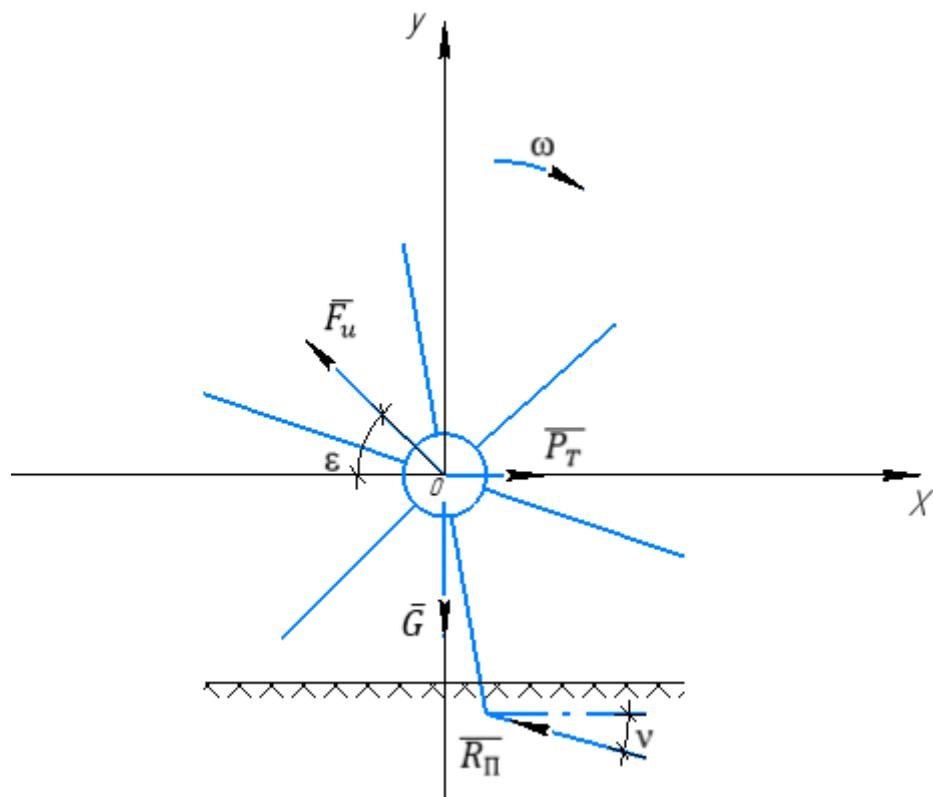


Рис. 3. Схема сил, действующих на игольчатый диск

Когда игольчатый диск движется в почве, на него действует множество сил, которые возникают в процессе его движения. На него действуют: сила тяги P_T , сила инерции F_u и сила реакции почвы R_{Π} , а также масса диска G . Наиболее трудноопределимой силой является реакция почвы, поэтому она и будет представлять для нас наибольший интерес, так как при помощи неё мы сможем определить оптимальную силы с которой игла диска под давлением будет вдавливаться в почву.

Пользуясь принципом Даламбера, можно рассмотреть положение игольчатого диска, как положение равновесия, если к активным силам и реакциям связей, действующих на каждую точку системы в этом положении добавить силу инерции точки. Таким образом, для данной системы сил, можно записать [7]:

$$\bar{F}_u + \bar{P}_T + \bar{G} + \bar{R}_{\Pi} = 0 . \quad (12)$$

Так как нам неизвестна сила реакции почвы, нужно будет её найти. Для нахождения суммарного значения силы реакции почвы нам нужно будет спроектировать силы на оси координат, получим:

$$R_{\Pi} = \sqrt{(P_T - F_u \cos \varepsilon)^2 + (G - F_u \sin \varepsilon)^2}. \quad (13)$$

Угол ν между направлением реакции почвы и осью абсцисс будет определён выражением:

$$\nu = \arctg \frac{G - F_u \sin \varepsilon}{P_T - F_u \cos \varepsilon}. \quad (14)$$

Для определения силы реакции почвы необходимо определить значение силы инерции F_u , а также направление её действия, т.е. найти угол ε .

Известно, что сила инерции определяется формулой:

$$F_u = -m_{\partial}W, \quad (15)$$

Где m_{∂} – масса игольчатого диска;

W – абсолютное ускорение центра диска.

Неизвестное ускорение можно найти, благодаря использованию уже известных нам уравнений траекторий движения центра диска (4) и траекторий движения конца иглы (5). Продифференцировав дважды эти уравнения и вычислив абсолютное значение ускорения центра игольчатого диска, получим:

$$W = \omega^2 R \frac{\pi(1 - \cos \alpha)}{2d^2}. \quad (16)$$

Так как нам известно выражение абсолютного ускорения центра игольчатого диска, мы можем через него определить направление действия ускорения, которое будет определяться [9]:

$$\varepsilon = \arctg \frac{dy'}{dx'} = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\alpha} \omega t. \quad (17)$$

Итак, подставив необходимые значение направления действия ускорения (13), (14), получим следующие выражения реакции почвы R_{Π} и угла v :

$$R_{\Pi} = \sqrt{\left[P_T + m_{\partial} \omega^2 R \frac{\pi^2}{2\alpha^2} (1 - \cos \alpha) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\alpha} \omega t \right) \right]^2 + \left[G + m_{\partial} \omega^2 R \frac{\pi^2}{2\alpha^2} (1 - \cos \alpha) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\alpha} \omega t \right) \right]^2}. \quad (18)$$

$$v = \arctg \frac{G + m_{\partial} \omega^2 R \frac{\pi^2}{2\alpha^2} (1 - \cos \alpha) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\alpha} \omega t \right)}{P_T + m_{\partial} \omega^2 R \frac{\pi^2}{2\alpha^2} (1 - \cos \alpha) \cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{\alpha} \omega t \right)}. \quad (19)$$

Пользуясь уравнениями (18) и (19), можно теоретически определить значения силы реакции почвы R_{Π} и угла v при различных углах поворота диска и определить предположительное влияние различных параметров диска на силу реакции почвы. Так же было выявлено, что для лучшего вхождения иглы диска в почву его радиус стоит уменьшать для увеличения силы инерции. Повышая силу инерции, вход иглы в почву облегчается, так как повышается давление, под которым жидкие удобрения впрыскиваются в почву, соответственно повышается точность и качество заделки удобрений.

Использование игольчатого диска для внесения жидких удобрений в сельском хозяйстве, позволяет увеличить защиту и качество внесения таких удобрений, что в свою очередь помогает повысить урожайность. Повышение урожайности является серьёзной проблемой на протяжении долгого времени. Решение данной проблемы способствуют к созданию новых методик расчётов, а также к созданию новых конструктивных решений, позволяющих выполнять операции на повышенном уровне.

Результаты исследования позволяют в дальнейшем облегчить работу агрономам и инженерам, путём применения полученных данных в

практике сельского хозяйства для улучшения условий, точности и качества внесения жидких удобрений в почву, что будет сказываться на повышении урожайности, и лучшей защищённости растений от вредителей и сорняков.

Таким образом, дальнейшее исследование динамики игольчатого диска не только способствует углублению теоретических знаний, но и имеют практическое значение для усовершенствования конструкций и технологий в различных сферах. Применение полученных данных, позволит разрабатывать более качественные и производительные механизмы, что в свою очередь повысит эффективность применения таких дисков.

Список литературы

1. Матущенко, А. Е. Классификация рабочих положений дисковых почвообрабатывающих органов / А. Е. Матущенко, Н. Д. Кантемиров // Политеаматический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2022. – № 184. – С. 44-56. – DOI 10.21515/1990-4665-184-006. – EDN UFEMLB.
2. Матущенко, А. Е. Обзор видов полива сельскохозяйственных культур / А. Е. Матущенко, М. С. Гарибян // Приднепровский научный вестник. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 51-54. – EDN NQAMGU.
3. Краткий анализ основных технологий и орудий для обработки почвы / А. А. Шварц, А. П. Башкирев, О. Ф. Таныгин, С. Г. Лукин // Наука в центральной России. – 2021. – № 3(51). – С. 31-39. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-3-31-39. – EDN BGHRHT.
4. Пономарев, А. В. Кинематика игольчатого диска / А. В. Пономарев // Политеаматический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 533-542. – EDN SDCDPN.
5. Характеристика работы игольчатых дисковых рабочих органов / А. Н. Шмидт, А. А. Лучинович, А. С. Союнов [и др.] // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3(31). – С. 95-102. – EDN YARSEP.
6. Бабицкий, Л. Ф. Обоснование оптимальной формы игл почвообрабатывающих игольчатых дисков / Л. Ф. Бабицкий, И. В. Соболевский, В. А. Кукин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2014. – № 43. – С. 85-88. – EDN ULUUWL.
7. Утенков, Г. Л. Обоснование режимов работы игольчатых дисков / Г. Л. Утенков // Механизация и автоматизация технологических процессов в агропромышленном комплексе : Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции, Новосибирск, 10–12 октября 1989 года. Том Часть I. – Новосибирск: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 1989. – С. 117-118. – EDN ZVRDQD.

8. Обоснование режимов работы игольчатого диска новой конструкции / А. Н. Шмидт, А. А. Кем, М. С. Чекусов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2020. – № 4. – С. 70-75. – DOI 10.31992/0321-4443-2020-4-70-75. – EDN YMDGYL.
9. Динамика ротационных почвообрабатывающих рабочих органов игольчатого типа / А. А. Шварц, С. А. Шварц, А. Г. Уварова [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 9. – С. 229-237. – EDN BPMAFJ.
10. Авторское свидетельство № 1123829 А1 СССР, МПК B23P 11/00, B21K 19/00. Способ изготовления игольчатого диска почвообрабатывающих машин : № 3613323 : заявл. 01.07.1983 : опубл. 15.11.1984 / В. Г. Павлик, А. Р. Преображенский, П. Д. Сущенко ; заявитель ЖДАНОВСКИЙ ФИЛИАЛ КИРОВОГРАДСКОГО ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА "ПОЧВОМАШ". – EDN AKMQKS.
11. Жук, А. Ф. Способ противоэррозионной обработки почвы / А. Ф. Жук // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 6. – С. 10-15. – DOI 10.22314/207375992016.6.1015. – EDN XGVRGL.

References

1. Matushhenko, A. E. Klassifikacija rabochih polozhenij diskovyh pochvoobrabatyvajushhih organov / A. E. Matushhenko, N. D. Kantemirov // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – № 184. – S. 44-56. – DOI 10.21515/1990-4665-184-006. – EDN UFEMLB.
2. Matushenko, A. E. Obzor vidov poliva sel'skohozjajstvennyh kul'tur / A. E. Matushenko, M. S. Garibjan // Pridneprovskij nauchnyj vestnik. – 2024. – T. 10, № 1. – S. 51-54. – EDN NQAMGU.
3. Kratkij analiz osnovnyh tehnologij i orudij dlja obrabotki pochvy / A. A. Shvarc, A. P. Bashkirev, O. F. Tanygin, S. G. Lukin // Nauka v central'noj Rossii. – 2021. – № 3(51). – S. 31-39. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-3-31-39. – EDN BGHRHT.
4. Ponomarev, A. V. Kinematika igol'chatogo diska / A. V. Ponomarev // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 97. – S. 533-542. – EDN SDCCDPN.
5. Harakteristika raboty igol'chatyh diskovyh rabochih organov / A. N. Shmidt, A. A. Luchinovich, A. S. Sojunov [i dr.] // Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – № 3(31). – S. 95-102. – EDN YARSEP.
6. Babickij, L. F. Obosnovanie optimal'noj formy igl pochvoobrabatyvajushhih igol'chatyh diskov / L. F. Babickij, I. V. Sobolevskij, V. A. Kuklin // Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. – 2014. – № 43. – S. 85-88. – EDN ULUUWL.
7. Utenkov, G. L. Obosnovanie rezhimov raboty igol'chatyh diskov / G. L. Utenkov // Mehanizacija i avtomatizacija tehnologicheskikh processov v agropromyshlennom komplekse : Tezisy dokladov Vsesojuznoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Novosibirsk, 10–12 oktyabrya 1989 goda. Tom Chast' I. – Novosibirsk: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut mehanizacii sel'skogo hozajstva, 1989. – S. 117-118. – EDN ZVRDQD.
8. Obosnovanie rezhimov raboty igol'chatogo diska novoj konstrukcii / A. N. Shmidt, A. A. Kem, M. S. Chekusov [i dr.] // Traktory i sel'hozmashiny. – 2020. – № 4. – S. 70-75. – DOI 10.31992/0321-4443-2020-4-70-75. – EDN YMDGYL.

9. Dinamika rotacionnyh pochvoobrabatyvajushhih rabochih organov igol'chatogo tipa / A. A. Shvarc, S. A. Shvarc, A. G. Uvarova [i dr.] // Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii. – 2021. – № 9. – S. 229-237. – EDN BPMAFJ.
10. Avtorskoe svidetel'stvo № 1123829 A1 SSSR, MPK B23P 11/00, B21K 19/00. Sposob izgotovlenija igol'chatogo diska pochvoobrabatyvajushhih mashin : № 3613323 : zjavl. 01.07.1983 : opubl. 15.11.1984 / V. G. Pavlik, A. R. Preobrazhenskij, P. D. Sushhenko ; zjavitel' ZhDANOVSKIY FILIAL KIROVOGRADSKOGO PROEKTNO-KONSTRUKTORSKO-TEHNOLOGICHESKOGO INSTITUTA "POChVOMASh". – EDN AKMQKS.
11. Zhuk, A. F. Sposob protivojerozionnoj obrabotki pochvy / A. F. Zhuk // Sel'skohozjajstvennye mashiny i tehnologii. – 2016. – № 6. – S. 10-15. – DOI 10.22314/207375992016.6.1015. – EDN XGVRGL.