

УДК 631.313.6

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИСКОВОГО РАБОЧЕГО ОРГАНА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАДИУСОМ КРИВИЗНЫ

Коновалов Владимир Иванович
доцент кафедры «Процессы и машины в агробизнесе»
SPIN-код 4413-4190, ABH-7546-2020, Scopus Author ID: 57190000996, ORCID 0000-0003-2740-2010
konovalov.v.i@mail.ru

Коновалов Сергей Иванович
инженер
SPIN-код 5475-7500

Коновалов Алексей Геннадьевич
студент факультета механизации
ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», Краснодар, Россия

В последнее время совершенствование технологического процесса обработки почвы основывается на использовании рабочих органов с криволинейной формой рабочей поверхности, которые позволяют повысить агротехнические показатели обработки почвы и снизить ее энергоемкость. Сельскохозяйственные орудия с дисковыми рабочими органами являются одними из наиболее распространенных машин в сельском хозяйстве. В статье представлен кинематический анализ дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны. Получены выражения для определения координат, скорости и ускорения произвольной точки рабочей поверхности

Ключевые слова: ОБРАБОТКА ПОЧВЫ, ДИСК, КРИВИЗНА, ТРАЕКТОРИЯ, АБСОЛЮТНАЯ СКОРОСТЬ, ДЕФОРМАЦИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-185-003>

UDC 631.358

05.20.01 - Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

KINEMATIC ANALYSIS OF A DISK WORKING BODY WITH A VARYING RADIUS OF CURVATURE

Konovalov Vladimir Ivanovich
Associate Professor, Department of Processes and Machines in Agribusiness
RSCI SPIN-code 4413-4190, ABH-7546-2020, Scopus Author ID: 57190000996, ORCID 0000-0003-2740-2010
konovalov.vi@mail.ru

Konovalov Sergey Ivanovich
engineer
RSCI SPIN-code 5475-7500

Konovalov Aleksey Gennadievich
student of the Faculty of Mechanization
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Recently, the improvement of the technological process of soil cultivation is based on the use of working bodies with a curvilinear shape of the working surface, which can increase the agrotechnical indicators of soil cultivation and reduce its energy intensity. Agricultural implements with disc working bodies are one of the most common machines in agriculture. The article presents a kinematic analysis of a disk working body with a variable radius of curvature. Expressions are obtained for determining the coordinates, speed and acceleration of an arbitrary point of the working surface

Keywords: TILLAGE, DISC, CURVATURE, TRAJECTORY, ABSOLUTE SPEED, DEFORMATION

Актуальность исследования

За последние десятилетия технологии производства продукции растениеводства совершили переход от экстенсивного к высокоинтенсивному и берегающему производству. Это находит свое отражение в появлении новых энерго- и ресурсосберегающих технологий, а также технических средств для их реализации. По мере развития совокупности последовательных агротехнических операций, используемых при выращивании сельскохозяйственных растений, дисковые рабочие органы все больше находят свое применение как базовый рабочий орган почвообрабатывающего орудия. Параллельно с ростом интенсивности использования дисковых рабочих органов происходит и их совершенствование [2]. Если на рубеже XX века в основном использовали плоские и сферические диски в качестве универсальных рабочих органов, подходящих для любых условий эксплуатации, то в последние годы конструкции дисковых рабочих органов значительно расширили свою номенклатуру и сузили область своего назначения. Это привело не только к повышению эффективности их работы, но к росту экономических показателей отрасли растениеводства в целом. Например, появились колтурные диски, предназначенные для интенсивного измельчения пожнивных остатков, дисковые ножи или «флео» диски для работы на почвах с большим количеством пожнивных остатков, конусные диски и т.д. Одной из перспективных конструкций является дисковый рабочий орган с образующей рабочей поверхности, выполненной по спирали, что позволяет изменять ее кривизну, а, следовательно, и степень ее воздействия на почву.

Постановка задачи

Основной технологической особенностью взаимодействия дискового рабочего органа с почвой является придание ей во время перемещения по рабочей поверхности вращающего момента. За счет этого момента в обрабатываемом пласте возникают дополнительные напряжения и деформации,

которые приводят к его крошению. Степень крошения обрабатываемого пласта в результате такого взаимодействия зависит от множества управляемых и независимых или неуправляемых факторов. К числу неуправляемых факторов, прежде всего, относятся почвенно-климатические условия работы, которые в некоторой степени можно прогнозировать и ожидать их соответствия рекомендуемым параметрам. К числу управляемых факторов относятся конструктивно-технологические и режимные параметры рабочего органа. Указанные факторы определяют степень взаимодействия дискового рабочего органа с почвой [4, 5]. Одним из наиболее характерных и показательных результатов их взаимодействия является кинематика движения почвенного пласта [1]. Поскольку на кинематические параметры движения почвенного пласта оказывает большое влияние неуправляемых факторов, например, коэффициент трения, гранулометрический состав, влажность и др., то для их исследования необходимо ввести ряд допущений. К таким допущениям будем относить отсутствие скольжения почвенного пласта вдоль внутренней рабочей поверхности диска во время их совместного движения. Кроме того, обрабатываемую почву будем представлять изотропной сплошной средой с одинаковыми параметрами в любой произвольной точки ее объеме, а при ее движении вместе с внутренней рабочей частью диска ее центр тяжести остается неизменным.

Исследовательская часть

Для кинематического анализа дискового рабочего органа с изменяющимся радиусом кривизны будем использовать систему координат (рисунок 1), в которой плоскость, образованная всем множеством точек режущей части кромки диска и представляющая в виде окружность с зафиксированным радиусом R , лежит в I октанте. Тогда радиус AF_1 этой окружности будет касаться плоскости XOZ и составлять с ней угол α , равный углу атаки диска. В тоже время радиус AF_4 будет составлять с этой же плоскостью угол β , который равен углу наклона диска к вертикали.

Из всех точек образующей рабочей поверхности дискового рабочего органа строго определено положение точки F на режущей части диска, зависящие от величины ее радиуса и максимального радиуса кривизны ρ_{max} его рабочей поверхности, а также положение точки A , фиксируемое минимальным радиусом ρ_{min} и углом ψ_4 .

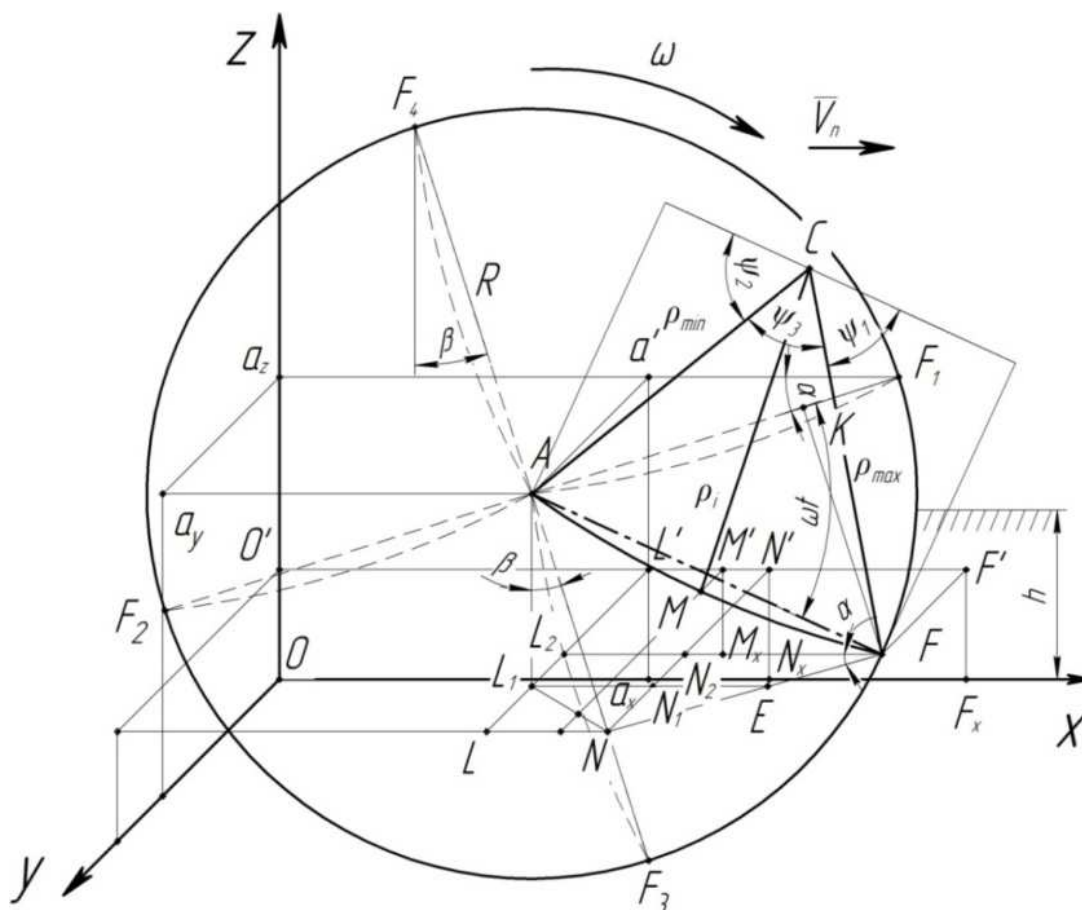


Рисунок 1 – К определению траектории

За центр отсчета будем использовать точку A на внутренней рабочей поверхности дискового рабочего органа, что позволит при исследованиях получать проекции произвольной точки M лежащих в одной октанте [3]. Тогда, в указанной системе координат, движение диска будет осуществляться по направлению оси OX , а центр отчета A сперва будет находится в плоскости YOZ , а через некоторый малый момент времени t совершит движение на расстояние равно произведению $V_n t$.

В таком случае, траектория произвольной точки F будет описываться системой уравнений [1]:

$$\begin{cases} x = V_n t + R \sin \alpha \sin \beta \sin \omega t + R \cos \alpha \cos \omega t; \\ y = R \sin \alpha + R \cos \alpha \sin \beta \sin \omega t - R \sin \alpha \cos \omega t; \\ z = R \cos \beta - R \cos \beta \sin \omega t; \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z – текущие значения координат точки F ;

V_n – поступательная линейная скорость диска;

α – угол между плоскостью вращения диска и направлением его линейного поступательного движения;

β – угол наклона перпендикуляра к плоскости вращения диска к горизонтальной поверхности;

ω – угловая скорость вращения произвольной точки F .

Система уравнений (1) будет описывать траекторию движения режущей кромки рабочего органа. Однако почва перемещается вдоль рабочей поверхности диска под углом к радиусу, а режущая кромка в указанной процессе не участвует. Исходя из вышесказанного, требуется добиться строго определенного размещения свободной точки M на внутренней рабочей поверхности диска. Учитывая, что точка M является частью дуги спирали, которая имеет свою фиксированную максимальную ρ_{max} и минимальную ρ_{min} кривизну и интенсивность ее изменения, то фиксацию ее положения удобней выполнять используя угол поворота φ_i (рисунок 2) и соответствующий радиус-вектор ρ_i , характеризующий кривизну. Тогда, учитывая изменения кривизны от максимальной ρ_{max} до минимальной ρ_{min} величины, также будет изменять и угол поворота φ_i – от φ_{min} до φ_{max} .

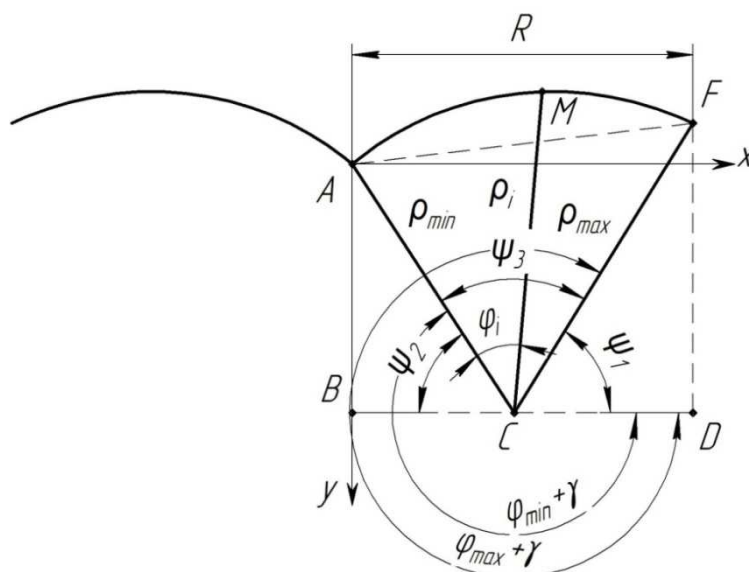


Рисунок 2 – К определению положения точки M

Тогда, для строго определенного размещения свободной точки M на внутренней рабочей поверхности диска с переменной кривизной необходимо использовать следующие соотношения:

$$\rho_{\min} \sin \psi_2 - k \varphi_i \sin(\psi_2 + \varphi_i - \varphi_{\min}) = A_1, \quad (2)$$

$$\rho_{\min} \cos \psi_2 - k \varphi_i \cos(\psi_2 + \varphi_i - \varphi_{\min}) = B_1. \quad (3)$$

где φ_i – угол поворота радиуса-вектора спирали до точки M ,

φ_{\min} – угол поворота радиуса-вектора спирали до момента формирования наименьшего радиуса кривизны, рад;

ρ_{\max} и ρ_{\min} – соответственно максимальный и минимальный радиус-вектор, формирующий кривизну рабочей поверхности, мм;

ψ_2 – острый угол между горизонтальной осью OX и минимальным радиусом кривизны.

Тогда координаты свободной точки M будут:

$$x = V_n t + B_1 \cos \alpha \cos \omega t + B_1 \sin \alpha \sin \beta \sin \omega t + A_1 \sin \alpha \cos \beta, \quad (4)$$

$$y = B_1 \cos \alpha \sin \beta \sin \omega t - B_1 \sin \alpha \cos \omega t + A_1 \cos \alpha \cos \beta + \frac{R \sin(\alpha + \psi_4)}{\cos \psi_4}, \quad (5)$$

$$z = A_1 \sin \beta - B_1 \cos \beta \sin \omega t + R \cos \beta. \quad (6)$$

Проведя дифференцирование одноименных координат по времени t получим соответствующим им величины проекций скорости и ускорения на координатные оси, которые будут описываться выражениями:

$$V_x = \frac{dx}{dt} = V_n - B_1\omega \cos \alpha \sin \omega t + B_1\omega \sin \alpha \sin \beta \cos \omega t, \quad (7)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt} = B_1\omega \cos \alpha \sin \beta \cos \omega t + B_1\omega \sin \alpha \sin \omega t, \quad (8)$$

$$V_z = \frac{dz}{dt} = -B_1\omega \cos \beta \cos \omega t. \quad (9)$$

$$a_x = \frac{d^2x}{dt^2} = -B_1\omega^2 \cos \alpha \cos \omega t - B_1\omega^2 \sin \alpha \sin \beta \sin \omega t, \quad (10)$$

$$a_y = \frac{d^2y}{dt^2} = -B_1\omega^2 \cos \alpha \sin \beta \sin \omega t + B_1\omega^2 \sin \alpha \cos \omega t, \quad (11)$$

$$a_z = \frac{d^2z}{dt^2} = B_1\omega^2 \cos \beta \sin \omega t. \quad (12)$$

где V_x , V_y и V_z – проекционные составляющие абсолютной скорости свободной точки на координатные оси;

a_x , a_y и a_z – проекции абсолютного ускорения свободной точки M на соответствующие ось абсцисс, ординат и аппликат.

Используя основные положения векторной алгебры, абсолютные значения скорости и ускорения свободной точки M внутренней поверхности диска с переменным радиусом кривизны будут описываться выражениями [6, 23]:

$$V_M = \sqrt{V_n^2 + B_1^2\omega^2 + 2V_n B_1\omega(\sin \alpha \sin \beta \cos \omega t - \cos \alpha \sin \omega t)}. \quad (13)$$

$$a_M = B_1\omega^2. \quad (14)$$

где V_M – абсолютное значение скорости свободной точки M диска;

a_M – абсолютное значение ускорения свободной точки M диска;

Апробация полученных результатов

Характеристика интенсивности трансформации значений абсолютных значений скорости и ускорения свободной точки M будет интерпретировать процесс отбрасывания почвы в целом, а также за счет описания трансформаций ее составляющих (проекций) возникающие внутри нее усилия, что найдет отражение в ее крошении.

Для анализа процесса взаимодействия обрабатываемого пласта с рабочей поверхностью дискового рабочего органа необходимо подставить в полученные выражения числовые значения конструктивных и режимных параметров, и по полученным данным построить графические интерпретации. Для наглядности и краткости интерпретации исследуемых параметров можно использовать разделенную на 12 частей аксонометрическую проекцию диска (рисунки 3-6), а направления координатных и перемещения диска осей оставить без изменения. При этом построения всех проекций необходимо выполнять в одном масштабе.

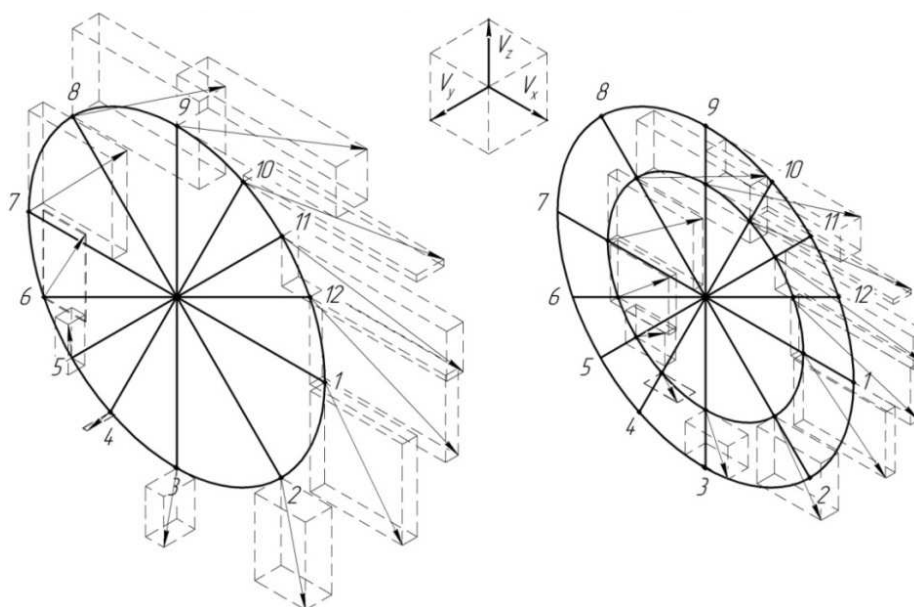


Рисунок 3 – Схема изменения абсолютного значения скорости точки M рабочей поверхности диска при $V_n = 3$ м/сек, $\alpha = 18^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $R = 0,28$ м,
 $k = 0,095$ м, $\psi_4 = 0^\circ$

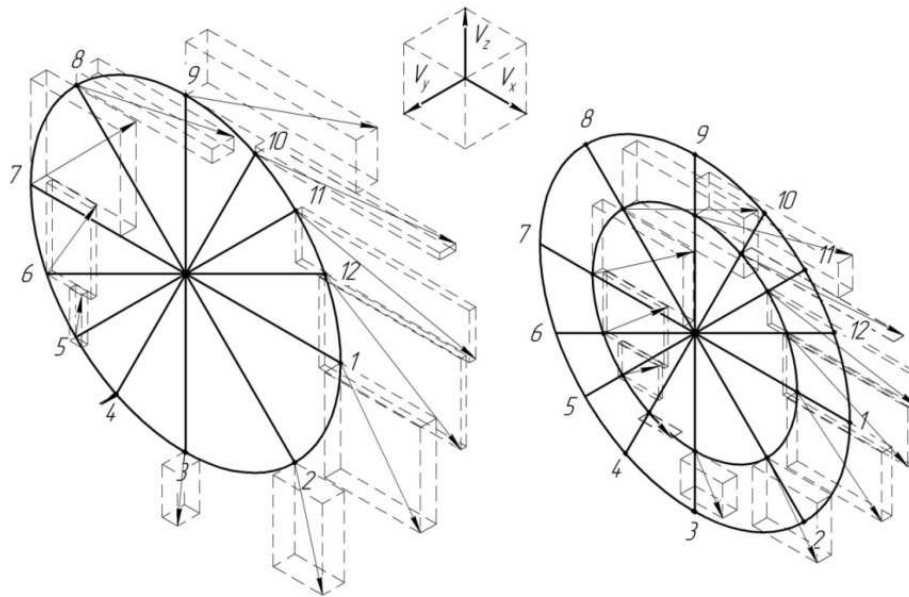


Рисунок 4 – Схема изменения абсолютного значения скорости точки M рабочей поверхности диска при $V_n = 3$ м/сек, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $R = 0,28$ м, $k = 0,095$ м, $\psi_4 = 0^\circ$

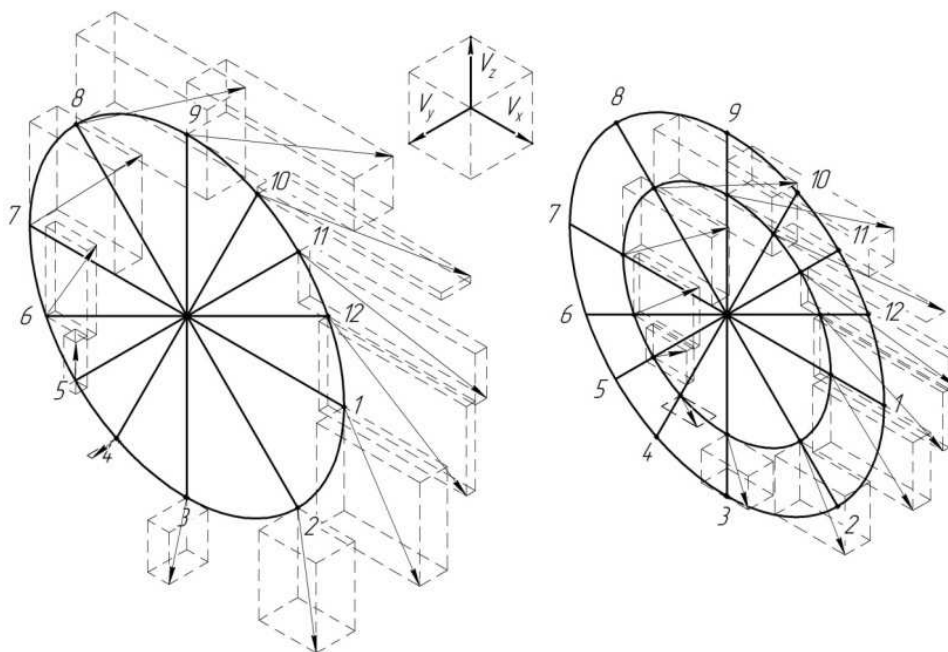


Рисунок 5 – Схема изменения абсолютного значения скорости точки M рабочей поверхности диска при $V_n = 3$ м/сек, $\alpha = 18^\circ$, $\beta = 18^\circ$, $R = 0,28$ м, $k = 0,095$ м, $\psi_4 = 0^\circ$

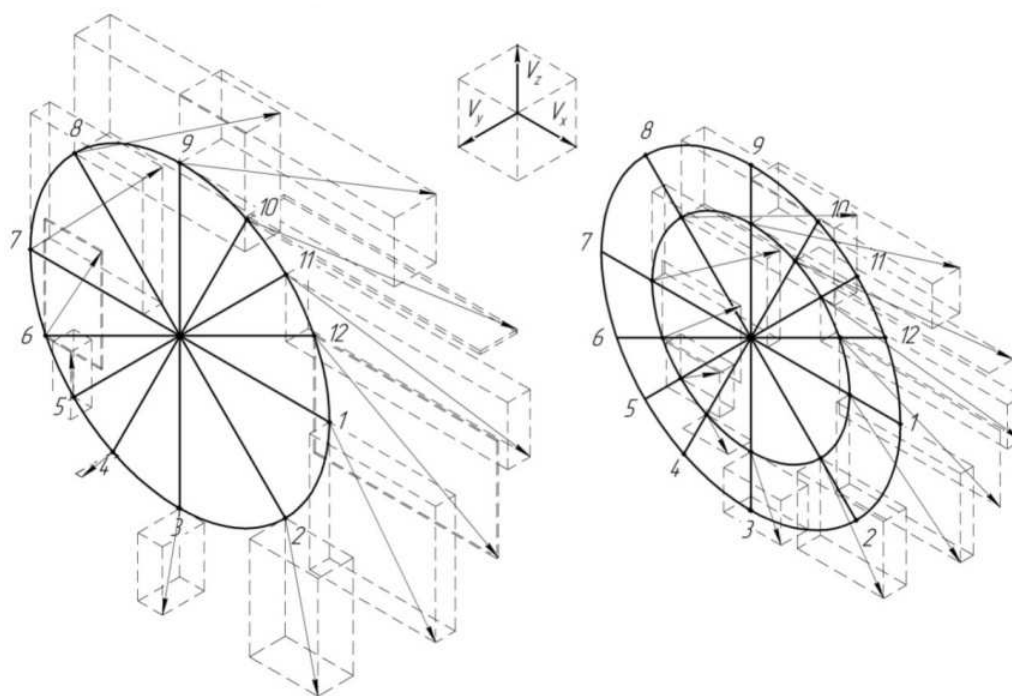


Рисунок 6 – Схема изменения абсолютного значения скорости точки M рабочей поверхности диска при $V_n = 4$ м/сек, $\alpha = 18^\circ$, $\beta = 10^\circ$, $R = 0,28$ м, $k = 0,095$ м, $\psi_4 = 0^\circ$

Из графиков (рисунок 3-6) видно, что абсолютное значение скорости свободной точки M будет в больших пределах изменяться как по своей ориентации в пространстве, так и по величине, а наименьшее ее значение будет при повороте диска на $\pi/3 - 2\pi/3$. Направление вектора абсолютной скорости свободной точки M при угле поворота от 0 до π будет ориентировано в сторону почвенного монолита, а при повороте диска от π до 2π наоборот. При повороте больше чем $\pi/2$ вектор абсолютной скорости резко растет в своей величине и ориентируется вертикально, что говорит о том, что после этого угла, произойдет отделение отрывом почвы от монолита, а именно дна борозды, и пойдет ее дальнейшее перемещение вдоль внутренней рабочей поверхности диска.

При анализе абсолютного значения скорости свободной точки M , расположенной на удалении в $1/3R$ от края лезвия диска, можно утверждать, что при изменении диапазона угла поворота от 0 до $\pi/3$ вектора аб-

соллютной скорости не претерпевает существенных изменений по тенденции своего направления, уменьшается угол между поступательной линейной скоростью диска и вектором абсолютного значения скорости свободной точки, а также уменьшается ее величина. После поворота дискового рабочего органа на угол более $\pi/3$ происходит рост составляющей V_x и уменьшение составляющей V_z абсолютной скорости свободной точки относительно характерной свободной точки на его лезвии. На основании это можно сделать заключение, что в почве при этом будут действовать разные по направлению силы, стремящиеся разрушить ее.

Анализ полученных результатов показывает, что увеличение вектора абсолютной скорости свободной точки можно достичь за счет увеличения угла между плоскостью вращения диска и направлением его линейного поступательного движения. При этом увеличение вектора абсолютной скорости свободной точки наиболее быстро протекает при углах от $\pi/3 - 2\pi/3$, при котором также наблюдается увеличение составляющих проекций V_x и V_y . Также одновременно с ростом этих составляющих происходит рост угла между вектором абсолютной скорости свободной точки и плоскостью ее вращения, что может свидетельствовать об большей величине отброса почвы. Снижение угла наклона перпендикуляра к плоскости вращения диска к горизонтальной поверхности приводит к росту вектора абсолютной скорости свободной точки при угле поворота диска от $\pi/2$ до 2π , т.е. в зоне где будет происходит отброс почвы. На основе этого факта можно сделать заключение о том, что для уменьшения дальности отброса почвы после ее схода с диска необходимо увеличивать угол наклона перпендикуляра к плоскости вращения диска к горизонтальной поверхности и также приведет к снижению динамического составляющей сопротивления пласта его перемещению.

Увеличение поступательной линейной скорости диска V_n создает эффект роста вектора абсолютной скорости свободной точки при любом

угле его поворота, а наиболее выражено роста наблюдается при повороте от $\pi/2$ до $2\pi/3$, т.е. в той же зоне схода почвы с внутренней рабочей поверхности. Также можно утверждать, что будет наблюдаться рост степени сжатия почвенного пласта при повороте на угол от 0 до $\pi/3$, а это к росту энергоемкости технологического процесса и большей дальности ее полета. Таким образом для повышения степени крошения почвенного пласта необходимо внутри него создать разнонаправленные силы, а, следовательно, и напряжения, что можно достичь путем увеличения поступательной скорости диска.

Выводы

Проведя кинематический анализ технологического процесса работы диска с переменной кривизной его внутренней рабочей поверхности можно сделать общий вывод, что на величину и направление абсолютного значения скорости свободной точки большее влияние оказывают поступательная V_n скорость диска и угол атаки α . Кроме того, в процессе своего перемещения вдоль рабочей поверхности диска, в пласте возникают разнонаправленные напряжения, которые будут повышать степень его крошения.

Список литературы

1. Канарев Ф. М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия [Текст] / Ф. М. Канарев. – М.: Машиностроение, 1983. – 142 с.
2. Несмиян А. Ю. Технические характеристики и агротехнические показатели работы почвообрабатывающих агрегатов [Текст] / А. Ю. Несмиян // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – №6. – С. 58-64.
3. Справочник по высшей математике [Текст]: справочник / М. Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
4. Трубилин Е. И. Равновесие дисковых борон и луцильников в горизонтальной плоскости [Текст] / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов // Труды Кубанского государственного аграрного университета – Краснодар.: Из-во. «КубГАУ». – 2013. № 40. С. 166–169.
5. Трубилин Е. И. Заглуляющая способность дисковых борон и луцильников [Текст] / Е. И. Трубилин, К. А. Сохт, В. И. Коновалов, В. В. Кравченко // Техника и оборудование для села. – 2013. – №1. – С. 31-34.

References

1. Kanarev F. M. Rotacionnye pochvoobrabatyvajushhie mashiny i orudija [Tekst] / F. M. Kanarev. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 142 s.
2. Nesmijan A. Ju. Tehnicheskie harakteristiki i agrotehnicheskie pokaza-teli raboty pochvoobrabatyvajushhih agregatov [Tekst] / A. Ju. Nesmijan // Traktory i sel'hozmashiny. – 2017. – №6. – S. 58-64.
3. Spravochnik po vysshej matematike [Tekst]: spravoch-nik / M. Ja. Vygodskij. – M.: AST: Astrel', 2006. – 991 s.
4. Trubilin E. I. Ravnovesie diskovyh boron i lushhil'nikov v gorizon-tal'noj ploskosti [Tekst] / E. I. Trubilin, K. A. Soht, V. I. Konovalov // Trudy Ku-banskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta – Krasnodar.: Iz-vo. «KubGAU». – 2013. № 40. S. 166–169.
5. Trubilin E. I. Zagluljajushhaja sposobnost' diskovyh boron i lushhil'ni-kov [Tekst] / E. I. Trubilin, K. A. Soht, V. I. Konovalov, V. V. Kravchenko // Tehnika i oborudovanie dlja sela. – 2013. – №1. – S. 31-34.