

Математическое моделирование разрушение почвенного монолита глубокорыхлителем с заданной степенью крошения

В.П. Максимов, Н.В. Скамарохов, А.Е. Ушаков

*Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А.К. Кортунова
Донской государственный аграрный университет*

Аннотация: Современные методы определения параметров орудия не учитывают все особенности глубокого рыхления, прежде всего, такие важнейшие показатели качества разуплотнения почв, как степень крошения и конфигурация зоны разрыхления. Поэтому поиск решения проблемы по оценке качества разуплотнения почвы на стадии проектирования, в зависимости от параметров рабочих органов глубокорыхлителя и заданных физико-механических характеристик почвы является актуальной задачей. Целью работы является разработка алгоритма по оценке влияния параметров верхних деформаторов на качества крошения и зону разрыхления на основе современных технологий математического и имитационного моделирования. Это достигается путем разработки метода по определению параметров рыхлящих элементов глубокорыхлителя на основе моделирования процессов взаимодействия рыхлящих элементов с почвой с учетом факторов, определяющих качество разуплотнения и энергоемкость процесса разуплотнения обрабатываемой почвы. Важной частью метода является разработка модели разрушения почвенных глыб, сходящих с рыхлящих элементов на почвенные комки с заданным качеством дробления. Для описания этих процессов использованы положения классической механики твердых тел и механики грунтов (почв). Применение полученных результатов позволит определить рациональную конфигурацию и соответствующие параметры почворыхляющей пластины, на стадии проектирования глубокорыхлителя.

Ключевые слова: математическое моделирование, глубокое рыхление, почворыхляющие элементы, алгоритм расчета, степень крошения.

Введение

Рациональная обработка почвы является важным звеном в системе мероприятий по обеспечению высокой культуры земледелия. Известно, что необходимыми условиями для роста и развития растений являются нормальный водно-

воздушный режим почвы, её оптимальные плотность и структура. В настоящее время основным способом создания благоприятных для сельскохозяйственных растений свойств почвы является её механическая обработка. Одна из основных причин, снижающих урожайность сельхозкультур, переуплотнение почвы в результате многократного воздействия ходовых систем энергонасыщенных технологических машин. Поэтому проблема повышения качества разуплотнения переуплотненных почв является актуальной. Лучшие результаты по параметрам качества, энергоёмкости и экологической безопасности дают нам минимальные технологии, для которых используются почвообрабатывающие орудия чизельного типа. Механическая обработка почвы глубокорыхлителем направлена в основном на образование наилучших условий для последующей посадки растений, скопления внутрипочвенной влаги, а также защиту от эрозии. Оптимальными сроками проведения глубокого рыхления почвы являются октябрь и ноябрь месяцы. В это время почва имеет низкую влажность и хорошо крошится [1].

Существует несоответствие между теорией и практикой, что затрудняет создание глубокорыхлителя, отвечающего всем агротехническим требованиям. Агротехническая оценка включает в себя определение следующих показателей: неравномерность глубины хода рабочих органов, степень крошения пласта, гребнистость поверхности поля, а также содержание эрозионноопасных частиц [2]. Несмотря на множественные исследования, эта проблема окончательно не решена. В представленной работе поставлен и решен ряд задач, способствующих решению поставленной проблемы. При этом были учтены особенности работы орудия на глубине более 50 сантиметров. Разработка математической модели разрушения почвенного монолита базировалась на фундаментальных законах механики грунтов и механики твердых тел. Оценка эффективности

применения почворыхлящих пластин различных типов по критерию максимума степени крошения проводится по специально спроектированному алгоритму.

Материалы и методы

В Южном федеральном округе большое количество земель подвержено в той или иной степени различным факторам деградации. Снижения их влияния при обработке почвы можно достигнуть за счет разработки современных технологий и соответствующих рабочих органов. Основными негативно влияющими факторами в ЮФО остаются водная и ветровая эрозия. В тоже время обширная география и большое разнообразие почв создают значительные трудности при использовании серийного оборудования. Одним из способов обработки почвы, снижающим действие водной и ветровой эрозии, является безотвальное глубокое рыхление с сохранением стерни на поверхности. В настоящее время, при разработке рабочих органов почвообрабатывающих машин, используют современные конструкторские технологии и программные комплексы, такие, как КОМПАС-3D, Autodesk Inventor, Solidworks, Ansys, а также ряд других, которые позволяют применять параметрическое проектирование и моделирование процессов взаимодействия. При рассмотрении различных задач на практике часто встречается необходимость использования численных комплексов, позволяющих выполнить моделирование элементов орудий и расчет их напряженного состояния под воздействием нагрузки [3]. Анализ серийных агрегатов для глубокого рыхления показал, что, несмотря на большое разнообразие конструкций не удастся достичь полного соответствия результатов обработки всем предъявляемым агротехническим требованиям. Так, для повышения области разрыхления производители часто используют дополнительные элементы деформации, такие, как верхние почворыхлящие пластины. Однако эффект от верхних деформаторов сложно

оценить на стадии проектирования по причине недостаточно разработанной теории взаимодействия. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- провести анализ существующих дополнительных почворыхлящих элементов, используемых на рабочих органах глубокорыхлителей и процесс их взаимодействия со средой;
- определить влияние параметров почворыхлящих элементов на качество и область разрыхляемой зоны;
- разработать алгоритм для определения основных конструктивных и режимных параметров дополнительных почворыхлящих элементов в зависимости от условий их эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния параметров почворыхлящей пластины (верхнего деформатора) на качество разрыхления необходимо на начальном этапе рассмотреть процесс образования на верхнем деформаторе почвенных монолитов (глыб). Данный процесс рассматривался многими учеными, в том числе, и доктором технических наук Л.В. Гячевым [4]. Предложенный подход и схема взаимодействия Гячева, по нашему мнению, наиболее подходят в качестве основы для исследования последующего окончательного разрушения почвы с заданной степенью крошения. На рисунке 1 представлена базовая расчетная схема образования почвенных глыб.

В контексте рассматриваемого вопроса этот подход следует развивать, уточнить некоторые моменты взаимодействия и дополнить соответствующими моделями разрушения. При рассмотрении процесса образования почвенных глыб приняты следующие допущения:

- рассматривается непрерывный установившийся процесс;
 - деформатор (почворыхлящая пластина) представлен плоским клином;
-

- моделью почвенного пласта является твердое деформируемое тело, способное сопротивляться различным деформациям;
- пласт почвы, входящий на деформатор, представлен как консольная балка.

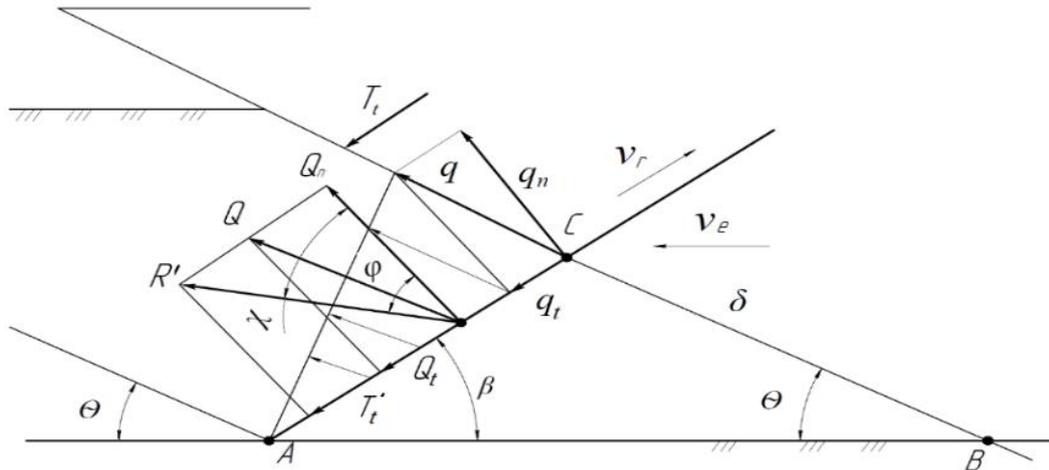


Рис. 1. – Схема образования почвенных глыб верхним деформатором

Пусть пласт нагружен погонными нагрузками q_n и q_t и сжимающей силой T_m , возникающей из-за трения пласта по клину. Тогда, учитывая, что пласт рассматривается, как консольная балка, можно по одной из теорий прочности определить напряжения в опасном сечении (плоскость, проходящая через точку A), превышающие прочность пласта и найти размеры (длину L при известных, высоте a и ширине b), соответствующие образованию плоскости сдвига (трещины). В то же время изгибающийся момент через напряжения σ и момент сопротивления изгибу W , определим, как $M_{из} = \sigma \cdot W$ [5].

Разберем следующий этап, где происходит дальнейшее разрушение глыб, сходящих с деформатора. Очевидно, что в момент схода с деформатора образовавшихся ранее почвенных глыб происходит дополнительное их крошение на почвенные комки. Этот процесс слабо освещен в литературе. Приняв гипотезу, что в момент схода с деформатора почвенные глыбы дополнительно крошатся под действием сил гравитации, рассмотрим

соответствующую расчетную схему (рисунок 2).

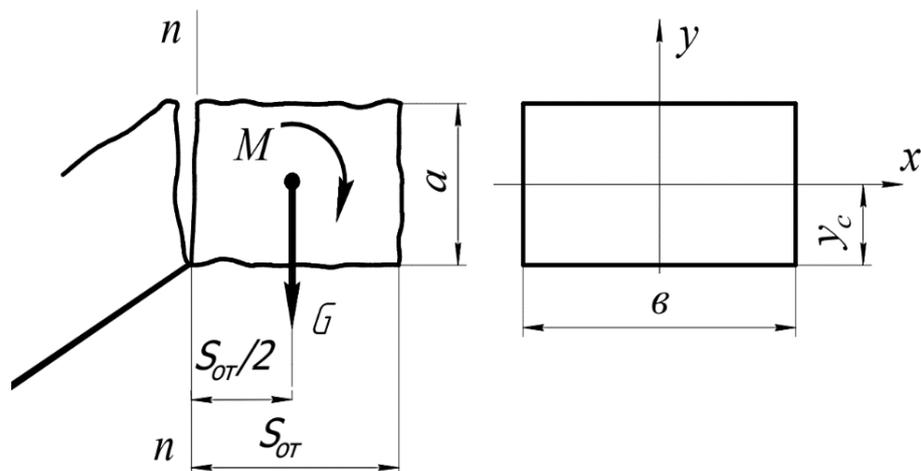


Рис. 2 – Схема отрыва комка почвы

По плоскости $n-n$ происходит, отрыв почвенного комка от почвенной глыбы, движущейся по поверхности деформатора. На комок действуют следующие силы: – поперечная сила Q численно равная весу комка G (Н); – изгибающий момент M ; нормальные σ и касательные τ напряжения [6,7].

После отрыва почвенный комок при падении на дно борозды (рисунок 3) дополнительно крошится.

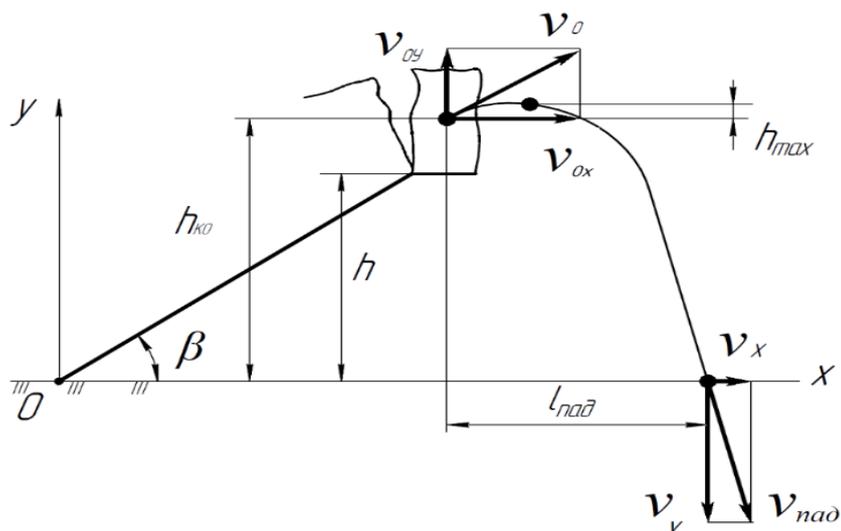


Рис. 3. – Падение комка почвы после схода деформатора

В целом весь процесс разрушения почвенного монолита происходит из-за распада связей частиц почвы и образования почвенных комков.

Осуществление данного процесса возможно при соответствующих энергетических затратах. Следовательно, необходимо найти баланс между энергией, необходимой для образования почвенных комков, и способом доставки внешней энергии в почву. Это является основной задачей разуплотнения почвы. Одна часть определяется исходными физико-механическими свойствами почвы, а вторая часть определяется конструктивными особенностями и энергетическими свойствами рабочих органов. Вследствие чего все основные теории по разрушению твердых тел основываются на энергетическом подходе [8, 9], что позволяет определить степень окончательного крошения почвенного комка после его падения на дно борозды.

Для точности расчетов следует учесть выводы академика В.А. Желиговского о важности учета энергии сжатого почвенного воздуха [10].

Применение новой технологии оценки окончательного гранулометрического состава разрабатываемой почвы на стадии проектирования позволит в полной мере использовать преимущество энергосберегающих почвозащитных технологий обработки почвы и комбинированных агрегатов, выполняющих в один проход несколько технологических операций в требуемые агротехнические сроки [11].

На основе вышепредставленного разработан алгоритм оценки эффективности применения почворыхлящих пластин по критерию степени крошения.

Принятые обозначения величин, используемых при разработке алгоритма оценки эффективности применения почворыхлящих пластин приведены в таблице № 1.

Алгоритм реализован в среде Matlab. Его блок-схема представлена на рисунке 4. Он позволяет определить оптимальные геометрические и режимные параметры верхнего деформатора в рамках заданных ограничений

путем нахождения максимально возможной для данных условий степени крошения, которая является основным показателем, определяющим качество разрыхляемой области.

Таблица № 1

Принятые обозначения

β - угол наклона клина, град V_e – переносная скорость перемещения клина, м/с b - ширина сечения (комка), м a - высота сечения (комка), м γ - удельный вес почвы, Н/м ³ f - коэффициент трения почвы о клин t - перемещении клина за время t , с E - модуль упругости, Па d – напряжение, Па g - ускорение свободного падения, м/с ² h - высота до центра тяжести сечения в момент схода с деформатора, м $\cos B$ - косинус угла наклона клина \sin - Синус угла наклона клина V_r – относительная скорость перемещения частицы почвы по клину, м/с	U - Коэффициент сжатия V - Абсолютная скорость частицы, м/с L - длина плчвенной глыбы, м S_{ot} - длина комка в момент отрыва, м H_{max} - максимальная высота подъема ц.т. комка над точкой схода, м h_m - максимальная высота подъема по деформатору, м J - объем пласта, м ³ G - объем комка, м ³ W_y - кинетическая энергия пласта, сходящего с отвала, Дж W_h - потенциальная энергия подъема, Дж A_1 - работа разрушения пласта деформатором, Дж W - Работа на разрушение почвенного пласта, Дж λ – степень крошения
--	--

Перед запуском алгоритма вводятся начальные данные, соответствующие принятому орудю и физико-механическим свойствам почвы, а именно: β , v_e , b , a , f , t , E , σ , γ , g , h .

Работоспособность разработанного алгоритма зависит от качественного выбора этих параметров (1). После задания условия соотношения $W \geq A$, при котором происходит перебор параметров с определенным интервалом.

$$A = \pi * (d^2) * (D^3) * \lambda / (4 * E). \quad (1)$$

Для определения степени крошения в структуре MATLAB задается цикл, по которому идет поиск оптимального значения λ до выполнения условия $W \geq A$. В момент, когда значение W становится меньше A , программа останавливается на предыдущем значении A и отображает полученное таким образом оптимальное значение λ .

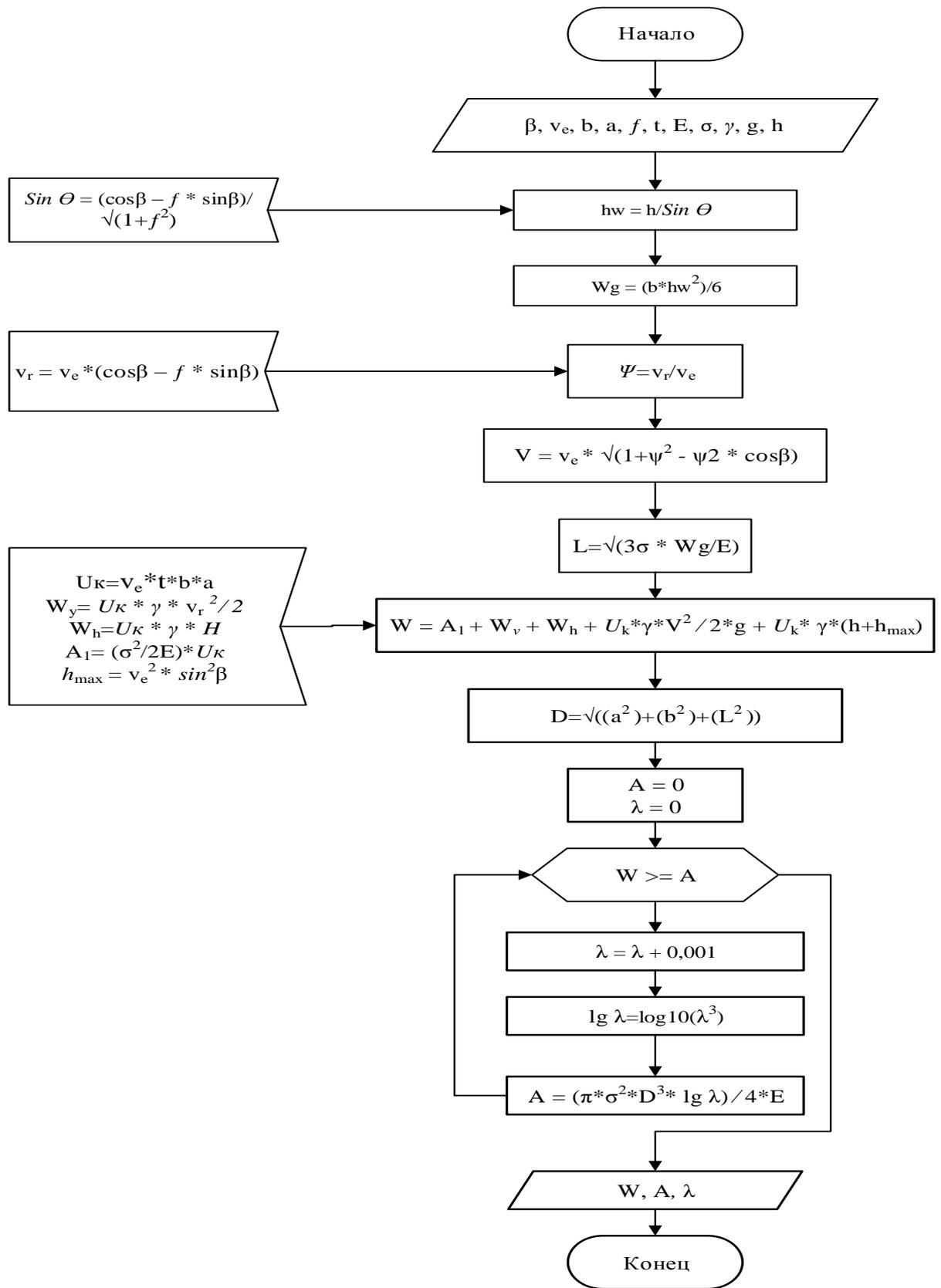


Рис. 4. – Алгоритм оценки степени крошения почвы

При проверке полученных параметров для сравнительного анализа были выбраны 3 типа деформатора от разных производителей с разными параметрами и возможностями изменения угла установки.

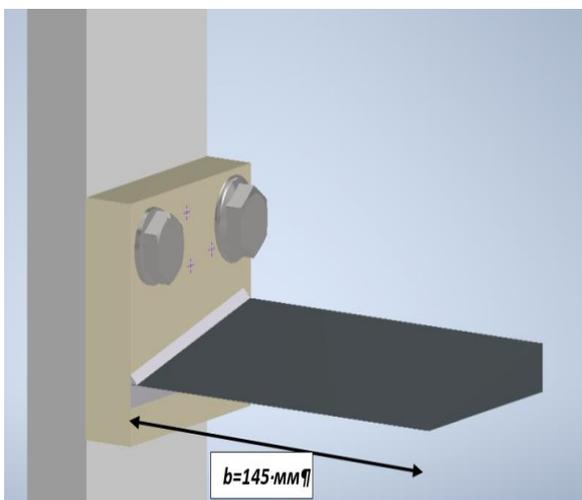


Рис. 5. – Рабочий орган типа А

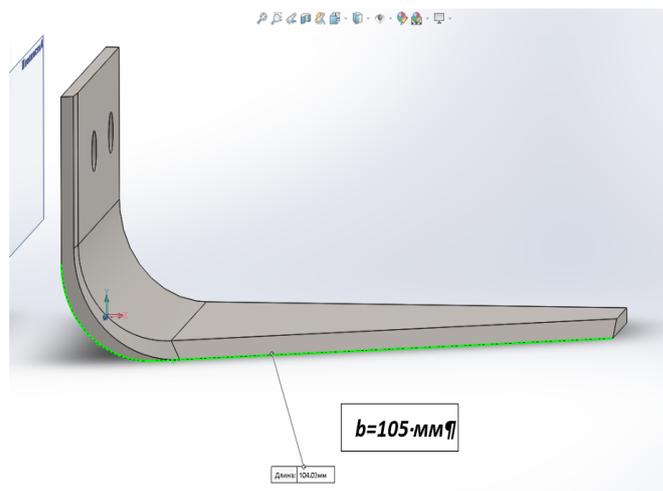


Рис. 6. – Рабочий орган типа Б

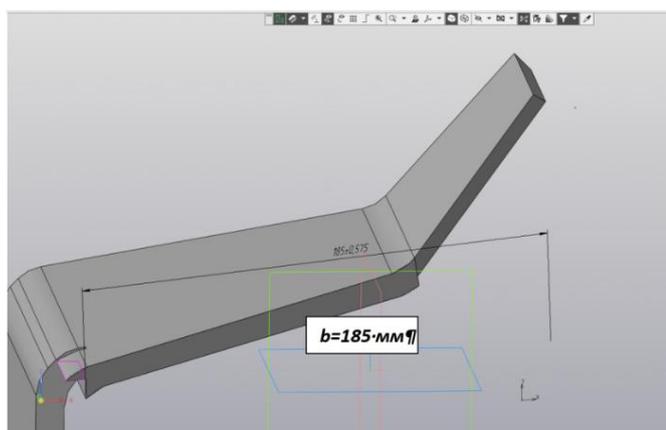


Рис. 7. – Рабочий орган типа В

Рабочий орган типа А имеет ширину захвата 145 мм и не имеет возможности изменять угол установки, угол заточки 15 градусов.

Рабочий орган типа Б имеет ширину захвата 105 мм, и может устанавливаться по 3 позициям 0, 15, 25 градусов, с углом заточки 30 градусов.

Рабочий орган типа В имеет изогнутый вид с общей шириной захвата 185 мм и 3 позиции установки 15, 25, 35 градусов.

Используя приведенный алгоритм, сравнивая три этих пластины, определяем лучшую из них. Исходные данные были взяты эмпирическим путем:

$a = 0.2$ - высота сечения (комка), м

$\gamma = 14219$ - удельный вес почвы, Н/м³

$f = 0.5$ - коэффициент трения почвы о клин

$t = 0.1$ - перемещении клина за время t (с)

$E = 55000000$ - модуль упругости, (Па)

$h = 0.2$ - высота до центра тяжести сечения в момент схода с деформатора, м

$g = 9.8$ - ускорение свободного падения м/с².

Результаты расчетов по алгоритму для 3-х пластин представлены в таблицах № 2,3,4:

Таблица № 2

Рабочий орган типа А

	Установка угла пластины = 15		
V_e - перемещении клина со скоростью (переносной, м/с)	1	2	2,5
W - Работа на разрушение почвенного пласта, Дж	24	74	119
λ – степень дробления	0.3063	0.9416	1.5015

Таблица № 3

Рабочий орган типа Б

	Установка угла пластины = 0			Установка угла пластины = 15			Установка угла пластины = 25		
V_e - перемещении клина со скоростью (переносной, м/с)	1	2	2,5	1	2	2,5	1	2	2,5
W - Работа на разрушение почвенного пласта, Дж	14	34	47	17	52	83	19	75	129
λ – степень дробления	0.2386	0.5617	0.7795	0.2750	0.8573	1.3727	0.3267	1.2479	2.1465

Таблица № 4

Рабочий орган типа В

	Установка пластины = 15			Установка пластины = 25			Установка пластины = 35		
	угла	угла	угла	угла	угла	угла	угла	угла	угла
V_e - перемещении клина со скоростью (переносной, м/с)	1	2	2,5	1	2	2,5	1	2	2,5
W - Работа на разрушение почвенного пласта, Дж	32	99	157	38	139	237	43	176	311
λ - степень дробления	0.3042	0.9257	1.4716	0.3548	1.3094	2.2336	0.4092	1.6675	2.9399

Заключение

Использование алгоритма оценки качества рыхления почворыхлящими элементами позволяет еще на стадии проектирования учесть параметры разрабатываемых деформаторов, а также среду взаимодействия. Это даёт возможность скорректировать и адаптировать производство данных элементов в зависимости от обрабатываемой среды и необходимого качества крошения. Оценка показателей 3-х верхних почворыхлящих деформаторов (рисунки 5 - 7) приводит к выводу, что использование пластины типа В позволит достичь степени крошения в 2.93 при скорости 2.5 и угле установке 35 градусов. При этом работа на разрушение почвенного пласта составит 311 Дж. Данная степень крошения хоть и является лучшей среди 3-х рассмотренных вариантов, но все ещё достаточно низкая. Это говорит о необходимости совершенствования данных элементов на стадии проектирования. Также необходимо отметить, что алгоритм оценивает степень крошения не всего рабочего органа, а лишь отдельно взятого элемента. Важной частью представленного метода является разработка

модели разрушения почвенных глыб, сходящих с рыхлящих элементов на почвенные комки с заданным качеством крошения. Для описания этих процессов использованы положения классической механики твердых тел и механики грунтов (почв). Применение полученных результатов позволит определить рациональную конфигурацию и соответствующие параметры почворыхлящей пластины глубокорыхлителя.

Литература

1. Тагаев А.М., Махмаджанов С.П., Агромелиорация: окультуривание сероземных почв // Почвоведение и агрохимия. 2021. №3. С. 24-28.
2. Пархоменко Г. Г., Божко И. В., Камбулов С. И., Пахомов В. И. / Агротехнические и энергетические показатели почвообрабатывающих рабочих органов // Инженерные технологии и системы. - 2021. - Т. 31, № 1. - С. 109-126. - DOI: 10.15507/2658-4123.031.202101.109-126
3. Черпаков А.В., Шиляева О.В., Параметрическое моделирование плиты перекрытия в комплексе Ansys // Инженерный вестник Дона. 2019. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6060.
4. Гячев, Л.В. Теория лемешно-отвальной поверхности. зерноград, М: Гостехиздат. 1961. С. 317.
5. Балабанов В.И., Леонтьев Ю.П., Макаров А.А. Оценка неравномерности глубины рыхления мелиорируемых земель рабочим органом мелиоративного рыхлителя // Агроинженерия. 2021. № 6(106). С. 20-25.
6. Калинин Р.К., Ивашнев М.В., Системный подход к выбору мощности мульчерной машины для подготовки лесных площадей и борьбы с лесными пожарами // Инженерный вестник Дона. 2020. №12. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6733.
7. Платонов А.А., Терновская О.В. Математическая модель оценки качества работ по расчистке территорий от нежелательной растительности //



Инженерный вестник Дона. 2022. №6. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7746.

8. Yaxin Yu, Jikun Liu, Bingliang Ye, Gaohong Yu, Xuejun Jin, Liang Sun and Junhua Tong. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission // Chin. J. Mech. Eng. 2019. 32:49 URL: doi.org/10.1186/s10033-019-0357-3.

9. Gowripathi Rao N. R. N. V., Chaudhary H., Sharma A. K. Optimal design and analysis of oscillatory mechanism for agricultural tillage operation // SN Applied Sciences 2019. 1:1003. URL: doi.org/10.1007/s42452-019-1025-z.

10. Желиговский, В.А. Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов. Тбилиси. Груз. с.-х. ин-та. 1960. С. 146.

11. Тоштемиров С.Ж., Раззаков Т.Х., Эргашев Г.Х., Бадалов С.М. Новая технология и агрегат для подготовки почвы к посеву. // Вестник науки и образования. 2021. №6 (109). С. 25-28.

References

1. Tagaev A.M., Maxmadzhanov S.P. Pochvovedenie i agroxiimiya. 2021. №3. pp. 24-28.

2. Parxomenko G G., Bozhko I. V. Kambulov S. I., Paxomov V. I. Inzhenerny`e texnologii i sistemy`. 2021. T. 31, № 1. pp. 109-126. DOI: 10.15507/2658-4123.031.202101.109-126.

3. Cherpakov A.V., Shilyaeva O.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6060.

4. Gyachev, L.V. Teoriya lemeshno-otval`noj poverxnosti [Theory of the share-dump surface]. Zernograd, M: Gostexizdat. 1961. P. 317.



5. Balabanov V.I., Leont`ev Yu.P. Makarov A.A. Agroiuzheneriya. 2021. № 6(106). pp. 20-25.
6. Kalinin R.K., Ivashnev M.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №12. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6733.
7. Platonov A.A., Ternovskaya O.V. Inzhenerny`j vestnik Dona. 2022. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7746.
8. Yaxin Yu, Jikun Liu, Bingliang Ye, Gaohong Yu, Xuejun Jin, Liang Sun and Junhua Tong. Chin. J. Mech. Eng. 2019. 32:49 URL: doi.org/10.1186/s10033-019-0357-3.
9. Gowripathi Rao N. R. N. V., Chaudhary H., Sharma A. K. SN Applied Sciences 2019. 1:1003. URL: doi.org/10.1007/s42452-019-1025-z.
10. Zheligovskij, V.A. E`lementy` teorii pochvoobrabaty`vayushhix mashin i mexanicheskoy texnologii sel`skoxozyajstvenny`x materialov [Elements of the theory of soil-cultivating machines and the mechanical technology of agricultural materials]. Tbilisi. Gruz. s.-x. in-ta. 1960. P. 146.
11. Toshtemirov S.Zh., Razzakov T.X., E`rgashev G.X., Badalov S.M. Vestnik nauki i obrazovaniya. 2021. №6 (109). pp. 25-28.