

**Математическое моделирование в исследовании технологического процесса
создания противоэрозионного микрорельефа на склоновых землях**

Николай Михайлович Соколов¹, Пётр Александрович Покусаев¹, Светлана Валентиновна Чумакова²

¹ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» г. Саратов, Россия

²Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, г. Саратов, Россия
e-mail: ch-sv@yandex.ru

Аннотация. Проведен теоретический анализ технологического процесса формирования на поверхности склоновых полей противоэрозионного микрорельефа, обоснованы необходимые конструктивные параметры рабочих органов приспособления, оказывающих влияние на технологические параметры создаваемого микрорельефа, с целью снижения водной и технологической эрозии.

Ключевые слова: водная и технологическая эрозия; противоэрозионное приспособление; почвообрабатывающее орудие; микрорельеф; кулиса; лемешно-подрезающие рабочие органы; математическое моделирование; вектор; дифференциальное уравнение.

Для цитирования: Соколов Н. М., Покусаев П. А., Чумакова С. В. Математическое моделирование в исследовании технологического процесса создания противоэрозионного микрорельефа на склоновых землях // Аграрный научный журнал. 2023. № 12. С. 167–170. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp167-170>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Mathematical modeling in the study of the technological process of formation
of anti-erosion microrelief on sloping lands**

Nikolai M. Sokolov¹, Pyotr A. Pokusaev¹, Svetlana V. Chumakova²

¹Federal Agricultural Research Center for South-East Region, Saratov, Russia

²Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: ch-sv@yandex.ru

Abstract. A theoretical analysis of the technological process of forming an anti-erosion microrelief on the surface of slope fields was carried out, the necessary design parameters of the working parts of the device that influence the technological parameters of the created microrelief were substantiated in order to reduce water and technological erosion.

Keywords: water and technological erosion; anti-erosion device; tillage implement; microrelief; backstage; plowshare-cutting working bodies; math modeling; vector; differential equation.

For citation: Sokolov N.M., Pokusaev P.A., Chumakova S.V. Mathematical modeling in the study of the technological process of formation of anti-erosion microrelief on sloping lands. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(12):167–170. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i12pp167-170>.

Введение. Потепление климата, в совокупности с частыми засухами и проявлением эрозии приводят к безвозвратной потере почвенного плодородия и загрязнению территорий.

Многими исследованиями, проведенными [1, 2] в Поволжье, отмечено, что под действием водной и технологической эрозии на склоновых полях ежегодно теряется более 50 % выпадающих зимних осадков и до 7 плодородной почвы с каждого гектара. Для естественного восстановления утраченного плодородия на таких землях, в засушливых условиях, требуется несколько десятилетий. Это вызывает необходимость совершенствования применяемых технологий и средств механизации позволяющих более рационально использовать природные ресурсы и повышать продуктивность обрабатываемых земель в данных условиях.

Целью исследований является повышение качества обработки почвы, путем проведенного анализа и определения оптимальных конструктивных параметров рабочих органов, создающих на поверхности пашни, противоэрозионный микрорельеф, позволяющий снизить водную и технологическую эрозию на склоновых полях.

Методика исследований. Исследование технологического процесса создания противоэрозионного микрорельефа при обработке склоновых земель проводили на основе анализа передовых агротехнологий используемых в производстве с использованием основных положений классической механики и математики.





Результаты исследований. Согласно агротребованиям, при обработке склоновых земель, с целью повышения противозерозивной устойчивости на поверхности пашни необходимо оставлять до 80 % стерни предшествующей культуры. Такие обработки обеспечивают лучшее снегозадержание и снижают смыв почвы при снеготаянии, в сравнении со вспашкой. Это достигается за счет дополнительного сопротивления со стороны стерни, которая снижает энергию стекающих водных потоков и обеспечивает лучшее сцепление верхних слоев почвы с корневой системой пожнивных остатков. Однако за счет более плотного сложения пахотного слоя, на таких обработках, возрастают потери воды со стоком. Кроме этого, имеет место сползание верхних слоев плодородной почвы вниз по склону под действием технологической эрозии, возникающей от воздействия на пласт почвы рабочих органов орудий [3, 4]. В связи с этим с целью повышения противозерозивной защищенности склоновых полей в ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» разработан технологический процесс мелкой, ресурсосберегающей обработки почвы, который позволяет значительно снизить материальные затраты на производство и сократить потери природных ресурсов [5, 6].

Отличительной особенностью разработанного способа обработки почвы является то, что на поверхности пашни поперек склона создается противозерозивный микрорельеф в виде кулис. Данные кулисы формируются одновременно со сплошным рыхлением, посредством подрезания верхнего слоя почвы со стерней и перемещения подрезанной массы постоянно вверх по склону. Таким образом создаваемые кулисы расчленяют обработанный склон поля на множество элементарных, изолированных друг от друга, замкнутых участков. Это обеспечивает выравнивание плодородного слоя по толщине и сокращает энергию водных потоков, внутри каждого образованного замкнутого участка, расположенного между кулисами.

Проведенными поисковыми опытами было выявлено, что для образования поперек склона противозерозивного микрорельефа, наиболее технологичными и надежными являются односторонние рабочие органы, оснащенные подрезающим лемехом с отвальной поверхностью [9]. В передней части рамы почвообрабатывающего орудия, данные рабочие органы установлены с возможностью поворота в горизонтальной плоскости на 90° [6]. Это позволяет при работе агрегата производить подрезание верхнего почвенного слоя с пожнивными остатками и перемещать срезанную массу вверх по склону. При разворотах агрегата на краях поля производят поворот лемешно-подрезающих органов в горизонтальной плоскости на 90° . Это позволяет перемещать подрезанную почвенно-стерневую массу вновь вверх по склону создавая из нее противозерозивный микрорельеф.

В этом случае на частицу почвы массой M , перемещаемую по отвальной поверхности рабочего органа, действует пространственная система сил (см. рисунок).

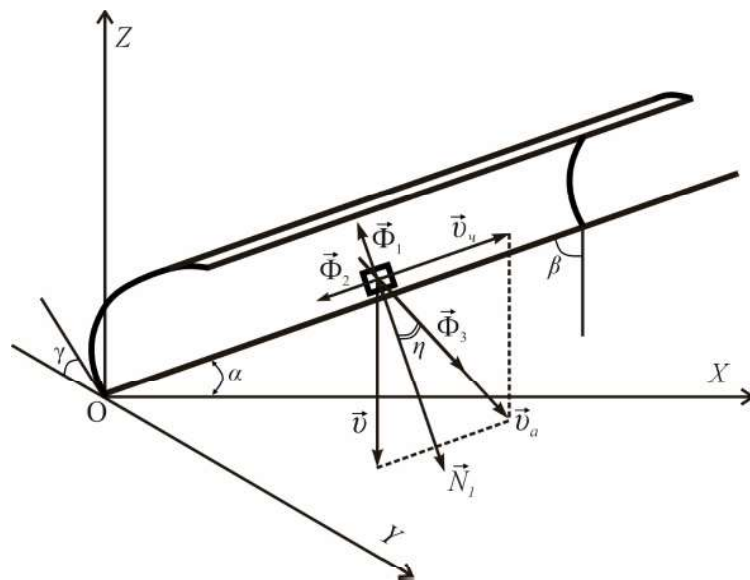


Схема сил, действующих на перемещаемую по отвалу рабочего органа частицу почвы массой M

Введем обозначения.

Силы, действующие на перемещаемую частицу почвы отвальной поверхностью рабочего органа:

$\vec{N}_1$ – вектор нормальной реакции со стороны необработанной почвы;

$\vec{N}_2$ – вектор нормальной реакции со стороны отвала рабочего органа;

$\vec{N}_3$ – вектор нормальной реакции почвы при перемещении частицы почвы вверх по отвалу рабочего органа;

$\vec{\Phi}_1$ – вектор силы трения перемещаемой частицы почвы по поверхности поля;

$\vec{\Phi}_2$ – вектор силы трения частицы почвы вдоль по отвалу рабочего органа;

$\vec{\Phi}_3$ – вектор силы трения частицы почвы при ее перемещении вверх по отвалу рабочего органа.



Обозначения коэффициентов:

μ_1 — коэффициент трения частицы почвы по поверхности поля;

μ_2 — коэффициент трения частицы почвы по металлической поверхности отвала рабочего органа;

μ_3 — коэффициент, связанный с влажностью обрабатываемой почвы;

μ_4 — коэффициент, связанный с пористостью обрабатываемой почвы.

Другие обозначения:

l — длина отвала рабочего органа, м;

m — масса перемещаемой частицы почвы, кг;

$\vec{v}$ — скорость движения почвообрабатывающего агрегата, м/с;

$\vec{v}_q$ — скорость схода частицы почвы с отвала рабочего органа, м/с;

$\vec{v}_a$ — абсолютная скорость перемещаемой частицы почвы, м/с;

t — время работы почвообрабатывающего агрегата, с.

С целью упрощения дальнейших расчетов считаем, что скорость почвообрабатывающего агрегата есть величина постоянная, то есть $v_{\text{тр}} = \text{const}$.

Запишем закон изменения относительной скорости частицы почвы по отвальной поверхности рабочего органа в векторной форме с учетом введенных обозначений и коэффициентов:

$$m (\vec{v}_q)'_t = \vec{G} + \vec{v} l \mu_3 \mu_4 (\overline{\mu_1 N_1} + \overline{\mu_2 N_2} + \overline{\mu_2 N_3} - \overline{\mu_1 \Phi_1} - \overline{\mu_2 \Phi_2} - \overline{\mu_2 \Phi_3}). \quad (1)$$

Получили дифференциальное уравнение первого порядка относительно переменных v_q и t [8].

При составлении уравнения (1) знаки слагаемых учитывают направление соответствующих векторов.

При определении скорости частицы почвы, был учтен поперечный уклон обрабатываемого участка поля, на котором создается противоэрозионный микрорельеф (кулисы). [11]

Обозначим:

$\angle \alpha$ — поперечный уклон поля, град;

$\angle \beta$ — угол поворота рабочего органа к направлению движения, град;

$\angle \gamma$ — угол резания лемеха рабочего органа, град;

$\angle \eta$ — угол трения, град;

При построении математической модели сделали переход от векторной формы уравнения (1) к дифференциальному уравнению (3) [7, 10].

Так как

$$(v_q)'_t = \frac{dv_q}{dt}, \quad (2)$$

получен вид дифференциального уравнения [8], позволяющего найти скорость схождения частицы почвы с отвала при заданных начальных условиях [10]:

$$m \frac{dv_q}{dt} = \vec{G} + v l \mu_3 \mu_4 (\overline{\mu_1 N_1} + \overline{\mu_2 N_2} + \overline{\mu_2 N_3} - \overline{\mu_1 \Phi_1} - \overline{\mu_2 \Phi_2} - \overline{\mu_2 \Phi_3}). \quad (3)$$

Умножив обе части уравнения на dt , получили равенство вида

$$m dv_q = \vec{G} + v l \mu_3 \mu_4 (\overline{\mu_1 N_1} + \overline{\mu_2 N_2} + \overline{\mu_2 N_3} - \overline{\mu_1 \Phi_1} - \overline{\mu_2 \Phi_2} - \overline{\mu_2 \Phi_3}) dt. \quad (4)$$

Проинтегрировав обе части уравнения (4) [8], получим:

$$m \int dv_q = \int (\vec{G} + v l \mu_3 \mu_4 (\overline{\mu_1 N_1} + \overline{\mu_2 N_2} + \overline{\mu_2 N_3} - \overline{\mu_1 \Phi_1} - \overline{\mu_2 \Phi_2} - \overline{\mu_2 \Phi_3})) dt. \quad (5)$$

Таким образом, была установлена функциональная зависимость [8]:

$$v_q = v_q(\mu_3, \mu_4, v, l, m, t, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3). \quad (6)$$

По составленной программе с использованием уравнения (5) получили табличные значения относительной скорости схода частицы почвы с отвала рабочего органа [11] (см. таблицу).

Исходные данные, используемые при расчете [11]:

$$v = 2,5 \text{ м/с}; \mu_1 = 0,9; \mu_2 = 0,83; \mu_3 = 0,4; \mu_4 = 0,4; l = 0,75 \text{ м}; m = 0,001 \text{ кг}.$$

α , град	β , град	v , м/с	$v_{\text{ч}}$, м/с
0	40	2,8	2,45
2	40	2,8	2,43
4	40	2,8	2,41
6	40	2,8	2,39
8	40	2,8	2,36
0	45	2,8	2,38
2	45	2,8	2,36
4	45	2,8	2,34
6	45	2,8	2,32
8	45	2,8	2,3

Заключение. Поисковыми опытами выявлено, что для образования противоэрозионного микрорельефа путем подрезания верхнего почвенного слоя с пожнивными остатками и перемещения подрезанной массы вверх по склону, наиболее простыми по конструкции, надежными в работе и экономически целесообразными являются лемешно-подрезающие рабочие органы с отвальной поверхностью, установленные на раме орудия с возможностью поворота на 90° в горизонтальной плоскости.

Теоретическими исследованиями установлено, что относительная скорость схода частицы почвы с отвальной поверхности рабочего органа зависит от поступательной скорости агрегата, поперечного уклона обрабатываемого поля, угла установки рабочих органов к направлению движения, угла резания лемехов рабочих органов и физико-механических свойств обрабатываемой почвы.

Проведенный анализ показал, что надежность технологического процесса создания противоэрозионного микрорельефа возможна на участках с поперечным уклоном до 8° , при глубине подрезания верхнего почвенного слоя 4...6 см, углах установки лемешно-подрезающих рабочих органов к направлению движения $40...45^\circ$ и скорости движения агрегата до 2,8 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ресурсосберегающие технологии возделывания озимой пшеницы в агроландшафтах Поволжья. Саратов, 2008. 64с.
2. Шабает А.И., Соколов Н.М., Жолинский Н.М. Ресурсосберегающая почвозащитная обработка почвы в агроландшафтах Поволжья // Земледелие. 2007. № 1. С. 20-123.
3. Бледных В.В., Рахимов З.С. Механическая эрозия при обработке почвы на склонах // Динамика почвообрабатывающих агрегатов и рабочие органы для обработки почвы: Тр. ЧИМЭСХ. Челябинск: ЧИМЭСХ, 1982. С. 14-19.
4. Макарова М.С., Зацаринный В.А. Перемещение пласта почвы при вспашке склоновых полей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 8. С. 16-18.
5. Патент РФ № 2719720, МПК A01B 79\02, A01B 13\16. Способ противоэрозионной обработки почвы в паровом поле / Соколов Н.М., Стрельцов С.Б., Худяков В.В., Соколов В.Н., Графов В.П. Заявлено 19.07.2019; Опубликовано 22.04.2020 Бюл. № 12.
6. Патент РФ № 2728129, МПК A01B 13\06, A01B 49\06. Орудие для противоэрозионной обработки почвы / Соколов Н.М., Стрельцов С.Б., Либерцев С.А., Покусаев П.А. Заявлено 17.07.2019; Опубликовано 28.07.2020 Бюл. №22.
7. Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б., Воронина П.В. Математическое моделирование. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2014. 263 с.
8. Камышова Г.Н., Чумакова С.В., Терехова Н.Н. Математический анализ. Саратов, 2012. 88 с.
9. Буйлов В.Н., Люляков И.В., Чумакова С.В. К вопросу о причинах износа рабочих органов культиваторов // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: материалы 30-го Междунар. семинара им. В.В. Михайлова. 2017. С. 139-141.
10. Чумакова С.В., Абдразаков Я.Р. Применение математического моделирования к задачам прикладного характера // Современная интеллектуальная трансформация социально-экономических систем: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 147-150.
11. Соколов Н.М., Покусаев П.А., Чумакова С.В. Влияние конструктивных параметров почвообрабатывающего орудия на образование противоэрозионного микрорельефа // Аграрный научный журнал. 2023. № 5. С. 160-165.

REFERENCES

1. Resource-saving technologies for cultivating winter wheat in agro-landscapes of the Volga region. Saratov, 2008. 64 p.
2. Shabaev A.I., Sokolov N.M., Zholinsky N.M. Resource-saving soil-protective tillage in agricultural landscapes of the Volga region. *Agriculture*. 2007; 1: 20-123.
3. Blednykh V.V., Rakhimov Z.S. Mechanical erosion during tillage on slopes. *Dynamics of tillage units and working bodies for tillage*. Chelyabinsk: CHIMESKh, 1982: 14-19.
4. Makarova M.S., Zatsarinny V.A. Movement of the soil layer when plowing slope fields. // *Mechanization and electrification of agriculture*. 2008; 8: 16-18.
5. RF Patent No. 2719720, IPC A01B 79\02, A01B 13\16. Method of anti-erosion tillage in a fallow field / Sokolov N.M., Streltsov S.B., Khudyakov V.V., Sokolov V.N., Grafov V.P. Announced 07/19/2019; Published 04/22/2020 Bulletin. No. 12.
6. RF Patent No. 2728129, IPC A01B 13\06, A01B 49\06. Tool for anti-erosion tillage / Sokolov N.M., Streltsov S.B., Libertsev S.A., Pokusaev P.A. Declared 07/17/2019; Published 07/28/2020 Bulletin. No. 22.
7. Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B., Voronina P.V. Math modeling. Novosibirsk: RIC NSU, 2014. 263 p.
8. Kamysheva G.N., Chumakova S.V., Terekhova N.N. Mathematical analysis. Saratov, 2012. 88 p.
9. Builov V.N., Lyulyakov I.V., Chumakova S.V. On the issue of the causes of wear of the working parts of cultivators. *Problems of efficiency and operation of automotive and tractor equipment*. 2017: 139-141.
10. Chumakova S.V., Abdrazakov Y.R. Application of mathematical modeling to applied problems // *Modern intellectual transformation of socio-economic systems*. 2020: 147-150.
11. Sokolov N.M., Pokusaev P.A., Chumakova S.V. Influence of design parameters of tillage implements on the formation of anti-erosion micro-relief. *The agrarian scientific journal*. 2023; 5: 160-165.

Статья поступила в редакцию 30.06.2023; одобрена после рецензирования 24.07.2023; принята к публикации 30.07.2023.
The article was submitted 30.06.2023; approved after reviewing 24.07.2023; accepted for publication 30.07.2023.

