

**Воротников И. Л., Розанов А. В., Богатырев С. А., Луконин Н. А.**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ**  
**ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО АГРЕГАТА НА**  
**УРОЖАЙНОСТЬ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО**  
**АГРЕГАТА НА УРОЖАЙНОСТЬ ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУР**

**MODELING THE INFLUENCE OF PARAMETERS TILLAGE UNIT FOR YIELD MISSING**  
**CROPS**

3

**Воротников Игорь Леонидович**

доктор экономических наук,  
профессор, заведующий кафедрой «Проектный  
менеджмент и внешнеэкономическая деятельность в  
АПК»  
ФГБОУ ВО СГАУ им. Н.И. Вавилова,  
гор. Саратов, Россия

**Vorotnikov Igor Leonidovich**

doctor of Economic Sciences,  
professor, head of the department "Project management  
and foreign economic activity in the agro-industrial  
complex"  
Saratov State Agrarian University. Saratov, Russia

**Розанов Александр Владимирович**

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Экономическая кибернетика»  
ФГБОУ ВО СГАУ им. Н.И. Вавилова,  
гор. Саратов, Россия

**Rozanov Alexander Vladimirovich**

candidate of physical and mathematical sciences,  
Associate Professor of the Department of "Economic  
Cybernetics"  
Saratov State Agrarian University. Saratov, Russia

**Богатырев Сергей Аркадьевич**

доктор технических наук,  
профессор кафедры «Проектный менеджмент и  
внешнеэкономическая деятельность в АПК»  
ФГБОУ ВО СГАУ им. Н.И. Вавилова,  
гор. Саратов, Россия

**Bogatyrev Sergey Arkadievich**

doctor of Technical Sciences,  
professor of the department "Project management and  
foreign economic activity in the agro-industrial complex"  
Saratov State Agrarian University. Saratov, Russia

**Луконин Никита Андреевич**

обучающийся в аспирантуре,  
аспирант кафедры «Проектный менеджмент и  
внешнеэкономическая деятельность в АПК»  
ФГБОУ ВО СГАУ им. Н.И. Вавилова,  
гор. Саратов, Россия

**Lukonin Nikita Andreevich**

postgraduate student of the department "Project  
management and foreign economic activity in the agro-  
industrial complex"  
Saratov State Agrarian University. Saratov, Russia

*Аннотация. Данная статья посвящена вопросам выбора на основе математического моделирования оптимального сочетания эксплуатационно-технологических параметров почвообрабатывающего агрегата, влияющих на урожайность пропашных культур на примере подсолнечника на предварительном этапе разработки и внедрения системы Strip-Till. В работе основное внимание сосредоточено на выявлении и компьютерной оптимизации эксплуатационно-технических параметров, значимых с точки зрения*

*Annotation. This article is devoted to the selection, based on mathematical modeling, of the optimal combination of operational and technological parameters of the tillage unit that affect the yield of row crops using the example of sunflower at the preliminary stage of development and implementation of the Strip-Till system. The work focuses on the identification and computer optimization of operational and technical parameters that are significant from the point of view of the impact on yield*

влияния на урожайность.

**Ключевые слова:** полосовая обработка почвы (Strip-Till), почвообрабатывающий агрегат, эксплуатационно-технологические параметры, урожайность, оптимизация, градиентный метод

**Keywords:** strip tillage, tillage unit, operational and technological parameters, yield, optimization, gradient method

### Введение.

Сущность модельных построений при выборе оптимального сочетания технических параметров комбинированного почвообрабатывающего агрегата заключается в выявлении компонентов системы, оказывающих наибольшее влияние на конечный результат – повышение урожайности и снижение производственных затрат [5]. В итоге появляется возможность концентрации и целевого использования ограниченных ресурсов с максимальным эффектом.

Для принятия научно-обоснованного решения о внедрении современной технологии Strip-Till в сельскохозяйственное производство необходимо предварительно определить оптимальное сочетание эксплуатационно-технологических параметров технических средств для полосовой обработки почвы.

Целью исследований является поиск и численная оптимизация значений параметров почвообрабатывающего агрегата, применяемого для полосовой обработки почвы с одновременным внесением удобрений, на основе данных, полученных в результате предварительного информационного поиска.

### Материалы и методы исследования.

Оптимизация технических параметров почвообрабатывающих агрегатов для полосовой обработки почвы предполагает повышение урожайности и сведение к минимуму затрат трудовых, материальных и энергетических ресурсов [1].

Урожайность ( $Y$ , ц/га) зависит в разной степени от физико-механических свойств почвы и требований к агротехническим и эксплуатационно-технологическим характеристикам используемых сельскохозяйственных машин для основной обработки почвы с одновременным внесением удобрений и должна удовлетворять следующему критерию оптимальности:

$$Y = f_1(P, B, a, W, V, q, t_{\text{ост}}, a_y, H_N) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $P$  - тяговое сопротивление орудия, кН,  $B$  - ширина захвата, м,  $a$  - глубина обработки почвы, м,  $W$  - производительность, га/час,  $V$  - скорость движения, км/час,  $q$  - давление агрегата на почву, кПа,  $t_{\text{ост}}$  - остаточный ресурс рабочих органов машины, (моточас),  $H_N$  - доза внесения удобрений, кг/га,  $a_y$  – глубина внесения удобрений, м.

Оптимизация параметров почвообрабатывающего агрегата предполагает поиск рациональной комбинации факторов, влияющих на урожайность и приведенных в формуле (1), при которой осваивается максимально возможный ресурсосберегающий потенциал технологии обработки почвы Strip-Till, альтернативной традиционным её видам.

Опыт показывает, что изолированное рассмотрение влияния разнокачественных факторов на целевую функцию абстрактно и малопродуктивно. По-этому с целью получения достоверных результатов в настоящей работе для оценки возможностей применения технологии Strip-Till предлагается использовать комплексный подход на основе моделирования динамики векторов-градиентов [2], одновременно показывающих направления наибольшего роста урожайности при максимальном темпе снижения затрат под влиянием комплекса перечисленных выше показателей. Оптимальные градиенты скалярного поля численных значений взаимовлияющих факторов, полученные в результате моделирования, позволяют избежать непроизводительных расходов, а

движение по градиентам обеспечивает максимально быстрое достижение наилучших показателей урожайности для конкретных условий.

На предварительном этапе обработки массива информационных данных было проведено агрегирование факторов в обобщающие компоненты с устранением малозначимых параметров, практически не влияющих на конечный результат (см. табл.1).

Таблица 1 – Агрегированные показатели для построения поверхностей отклика и получения уравнения регрессии на примере подсолнечника

Урожайность культуры (подсолнечника), $Y$ , ц/га	Глубина внесения удобрений, $a_y$ , м	Глубина обработки почвы, $a$ , м	Доза внесения удобрений, $H_N$ , кг/га	Производительность агрегата, $W$ , га/час
1	2	3	5	6
10–25	0,12 – 0,35	0,2–0,4	50–150	2–6

В настоящей работе анализ значимости агротехнических факторов, влияющих на урожайность и затраты, был выполнен на основе многомерной регрессионной модели с коэффициентами при соответствующих регрессорах в виде частных производных, одновременно являющихся координатами вектора-градиента целевой функции.

С принципиальной точки зрения изменение урожайности  $Y$  по агрегированным факторам может быть представлено в форме суммы частных дифференциалов вида:

$$d\bar{Y} = \frac{dY}{da_y} \cdot \bar{a}_y + \frac{dY}{da} \cdot \bar{a} + \frac{dY}{dH_N} \cdot \bar{H}_N + \frac{dY}{dW} \cdot \bar{W}, \quad (2)$$

где  $\bar{Y}$ ,  $\bar{a}_y$ ,  $\bar{a}$ ,  $\bar{H}_N$ ,  $\bar{W}$  – нормализованные величины урожайности  $Y$ , глубины внесения удобрений  $a_y$ , глубины обработки почвы  $a$ , дозы внесения удобрений  $H_N$ , и производительности агрегата  $W$ . Формула (2) представляет собой вектор-градиент, координатами которого являются частные производные по разнокачественным факторам. Вектор-градиент указывает направление наискорейшего подъема или спуска по регрессионной поверхности из центра облака средних значений исходных точек [4, 6, 8]. Следовательно, задавая начальные значения факторов влияния из допустимых для них диапазонов, можно вычислить координаты вектора-градиента и, соответственно, направление наискорейшего движения к максимально возможной урожайности при заданных агротехнических ограничениях.

### Основная часть. Результаты исследования.

Численные значения факторов, коррелирующих друг с другом и влияющих в различной степени на урожайность, получены на основе автоматизированного информационного поиска из литературных источников, опубликованных по результатам научных исследований, посвященных разработке ресурсосберегающих технологий почвообработки по системе Strip-Till.

Так, например, значения такого технического параметра, как тяговое со-противление почвообрабатывающего орудия  $P$ , согласно рекомендациям [11] должны находиться в

интервале  $30 \div 60$  кН, стремясь к минимуму. Оптимальная ширина захвата  $B$  должна варьироваться в пределах от 3 до 6 м [9]. Глубина обработки почвы,  $a$  колеблется в пределе  $0,2 \div 0,35$  м [7]. Производительность пахотного агрегата  $W$  должна составлять  $2 \div 6$  га/час при рабочей скорости движения  $V$ , равной  $5 \div 12$  км/час. Давление почвообрабатывающего агрегата на почву  $q$  не должно превышать 180 кПа [3]. Рекомендательный остаточный ресурс тост применяемых при основной обработке почвы сельскохозяйственных машин должен стремиться к максимально возможному значению в соответствии с современными требованиями к обновляемости техники [10]. При внесении азотно-фосфорных удобрений в борозды на глубину  $15 \div 25$  см урожайность подсолнечника повышается на  $4 \div 10\%$  по сравнению с поверхностным разбрасыванием. Наибольшая урожайность подсолнечника достигается при глубине подпочвенного внесения азотных удобрений –  $12 \div 32$  см, дозе внесения азотных удобрений –  $50 \div 150$  кг/га, при этом на глубину  $15 \div 25$  см должно закладываться  $70 \div 80\%$  вносимой дозы [12].

На основе представленной выше процедуры вектор-градиентной оптимизации по численным значениям диапазонов изменения урожайности, дозы и глубины внесения удобрений, глубины обработки почвы и производительности агрегата, взятых из литературных источников применительно к полосовой обработке почвы под подсолнечник и приведенных в таблице 1, было построено следующее нормализованное регрессионное уравнение:

$$\bar{Y} = 3,2 \cdot \bar{a}_y + 1,82 \cdot \bar{a} + 0,13 \cdot \bar{H}_N + 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot \bar{W}, \quad (3)$$

где соответственно  $\bar{Y}$ ,  $\bar{a}_y$ ,  $\bar{a}$ ,  $\bar{H}_N$ ,  $\bar{W}$  – нормализованные величины урожайности  $Y$  (параметр оптимизации), глубины внесения удобрений  $a_y$ , глубины обработки почвы  $a$ , дозы внесения удобрений  $H_N$ , и производительности агрегата  $W$  (факторы влияния).

Нормализация проводилась по формуле:

$$\bar{X} = \frac{(X_i - X_{cp})}{\sigma}, \quad (4)$$

где  $X_i$  и  $X_{cp}$  – текущее и среднее значения соответствующего параметра;  $\sigma$  – его среднее квадратическое отклонение.

Коэффициент детерминации  $R_2$ , который определяет, насколько близко (в статистическом смысле) математическая функция, выбранная для аппроксимации, соответствует реальным данным, для уравнения (3) равен  $R_2 = 0,95$ , что свидетельствует об адекватности математической модели.

Поверхность отклика для данной регрессионной модели является сложным многомерным многообразием, отображение которого на плоскости не представляется возможным. Тем не менее, основные особенности и динамику движения по параметрам к оптимуму урожайности можно проиллюстрировать на отдельных сечениях меньшей размерности.

На рисунке 1 представлено трехмерное сечение регрессионной поверхности урожайности для подсолнечника, на которой красными стрелками изображены последовательные положения вектора-градиента при дискретных переходах в направлении к максимальной урожайности, а также соответствующие линии равного

уровня этих сечений с указателями направлений оптимального изменения влияющих факторов на двумерных поверхностях агротехнических параметров (синие стрелки).

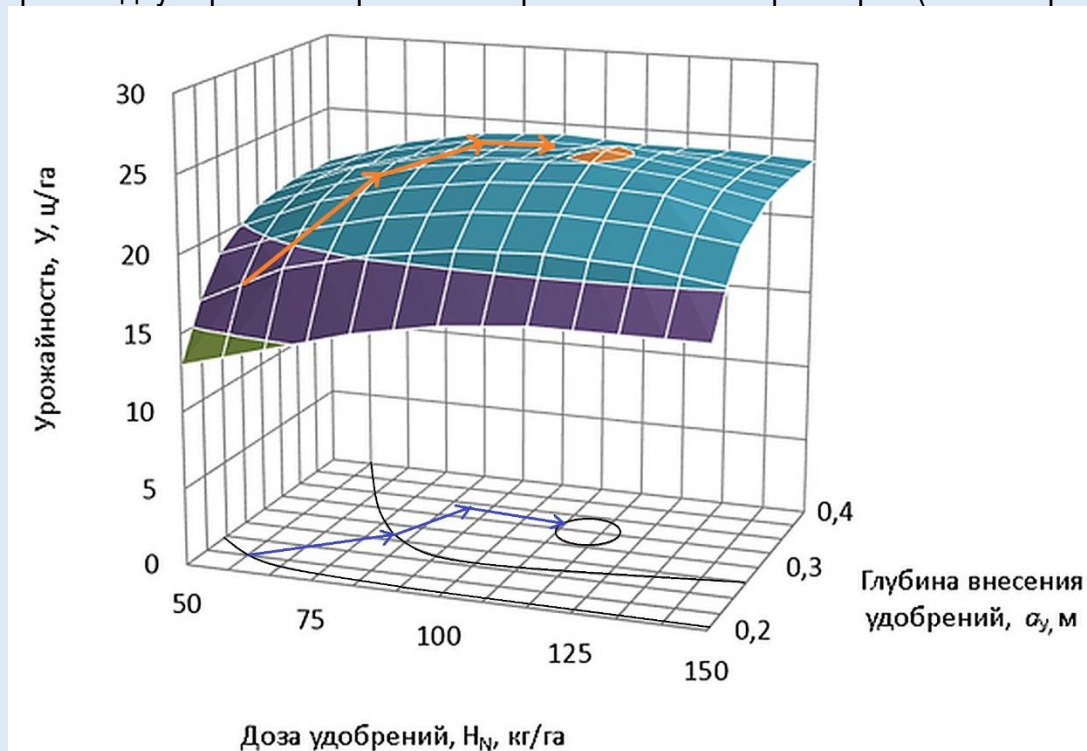


Рисунок 1 – Графическое представление градиентного метода оптимизации урожайности подсолнечника на трехмерном сечении поверхности отклика и в плоскости параметров дозы и глубины внесения удобрений при реализации технологии Strip-Till

#### Выводы.

В заключение следует отметить, что анализ величин и уровня значимости коэффициентов уравнения множественной регрессии показывает, что ключевыми параметрами, которые оказывают определяющее влияние на урожайность, являются глубина внесения и доза внесения удобрений, а также глубина обработки почвы. Влияние на урожайность производительности агрегата незначительно.

Результаты математического моделирования методом оптимального градиента предполагается использовать при назначении режимов полосовой обработки почвы и корректировке агротехнических и эксплуатационно-технологических параметров при модернизации комбинированных почвообрабатывающих агрегатов применительно к условиям засушливого земледелия.

#### Список литературы

1. Богатырев С.А. Разработка общей модели формирования теоретических основ восстановления деталей // Научная мысль, № 3, 2015. – С. 320-322.
2. Воротников И.Л. Организационно-экономические основы формирования и развития ресурсосберегающего уклада АПК. Диссертация... д-ра экон. наук: 08.00.05, Саратов, 2006. – 382 с.
3. ГОСТ Р 58656-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия движителей на почву. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.
4. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер. – М.: Вильямс И.Д., 2019. – 912 с.

5. Доценко А.Е. Совершенствование технологического процесса глубокой обработки почвы за счет разработки комбинированного рабочего органа. Диссертация кандидата технических наук. – Волгоград, 2017. – 166 с.

6. Есаулов, И.Г. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: Учебное пособие / И.Г. Есаулов. – СПб.: Лань П, 2016. – 224 с.

7. Капустин А.Н. Основы теории и расчета машин для основной и поверхностной обработки почв, посевных машин и машин для внесения удобрений: курс лекций / А.Н. Капустин; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 134 с.

8. Карлберг, К. Регрессионный анализ в Microsoft Excel / К. Карлберг. – М.: Диалектика, 2019. – 400 с.

9. Кленин Н.И., Егоров В.Г. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. - М.: КолосС, 2013. - 464 с.

10. Оценка надежности машин и оборудования: теория и практика: учеб-ник /И.Н. Кравченко и др. – М.: Альфа-М: ИНФРА-М, 2012. – 336 с.

11. Соколов В.В., Н.Ф. Карпов, И.Л. Новожилов. Тяговое сопротивление агрегата на отдельном поле и множестве полей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, № 7 (129), 2015. – С. 125-128.

12. Darapuneni M.K., Lauriault L.M., Dodla S.K., Idowu O.J., Grover K., Martinez G., Djaman K., Angadi S.V. Temporal variations in plant and soil characteristics following strip-till manure application. SOIL & TILLAGE RESEARCH, vol. 194, article №104350, published NOV 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104350.

### References

1. Bogatyrev S.A. Development of a general model for the formation of the theoretical foundations of the restoration of parts // Scientific Thought, No. 3, 2015. - P. 320-322.

2. Vorotnikov I.L. Organizational and economic foundations for the formation and development of a resource-saving structure of the agro-industrial complex. Dissertation ... Dr. econ. Sciences: 08.00.05, Saratov, 2006. - 382 p.

3. GOST R 58656-2019. Agricultural mobile equipment. Methods for determining the impact of movers on the soil. - M.: Standartinform, 2019. - 20 p.

4. Draper, N. Applied regression analysis / N. Draper. - M.: Williams I.D., 2019, - 912 p.

5. Dotsenko A.E. Improvement of the technological process of deep tillage through the development of a combined working body. Dissertation of the candidate of technical sciences. - Volgograd, 2017. - 166 p.

6. Esaulov, I.G. Regression data analysis in the Mathcad package: Textbook / I.G. Esaulov. - SPb.: Lan P, 2016. - 224 p.

7. Kapustin A.N. Fundamentals of the theory and calculation of machines for basic and surface tillage of soils, seeding machines and machines for fertilizing: a course of lectures / A.N. Kapustin; Yurga Technological Institute. - Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2013. - 134 p.

8. Karlberg, K. Regression analysis in Microsoft Excel / K. Karlberg. - M.: Dialectics, 2019. - 400 p.

9. Klenin N.I., Egorov V.G. Agricultural and reclamation machines. - M.: KolosS, 2013. - 464 p.

10. Assessment of the reliability of machines and equipment: theory and practice: textbook / IN. Kravchenko et al. - M.: Alpha-M: INFRA-M, 2012. - 336 p.

11. Sokolov V.V., N.F. Karpov, I.L. Novozhilov. Traction resistance of the unit on a separate field and a set of fields // Bulletin of the Altai State Agrarian University, No. 7 (129), 2015. - P. 125-128.

12. Darapuneni M.K., Lauriault L.M., Dodla S.K., Idowu O.J., Grover K., Martinez G., Djaman K., Angadi S.V. Temporal variations in plant and soil characteristics following strip-till manure application. SOIL & TILLAGE RESEARCH, vol. 194, article №104350, published NOV 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104350.