

Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала)

Юлия Сергеевна Ценч¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Елена Владимировна Годлевская²,
кандидат педагогических наук, доцент,
e-mail: elengodl@ya.ru

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Челябинский государственный промышленно-гуманитарный техникум имени А.В. Яковлева, г. Челябинск, Российская Федерация

Реферат. Представлены результаты анализа диссертационных исследований научной школы Южного Урала, посвященных процессу проектирования почвообрабатывающих машин и агрегатов с применением методов математического моделирования. (*Цель исследования*) Установить закономерности проектирования почвообрабатывающих машин и агрегатов и на этой основе спрогнозировать перспективы их совершенствования с использованием методов математического моделирования. (*Материалы и методы*) Проанализировали вопросы, связанные с построением математических моделей по результатам полевых испытаний почвообрабатывающих машин в различных почвенно-климатических условиях, акцентировали внимание на принимаемых авторами оптимальных решений по конструированию, модернизации почвообрабатывающих машин и агрегатов. (*Результаты и обсуждение*) Показали, что процесс конструирования почвообрабатывающих машин проходил следующие этапы: эмпирическое конструирование, вычислительный эксперимент и применение системы автоматизированного проектирования. Отметили, что результатом развития инструментов научных исследований стало постепенное приближение получаемых математических моделей к реальным условиям работы почвообрабатывающих машин и агрегатов. Это позволило обеспечить заданный уровень показателей качества выполнения технологического процесса обработки почвы путем совершенствования и обоснования параметров почвообрабатывающих машин и разработать адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур применительно к почвенно-климатическим условиям различных регионов. (*Выводы*) Подтвердили, что дальнейшие исследования в области применения Системы автоматизированного проектирования машин для решения инженерных задач, касающихся повышения качества обработки почвы с заданными параметрами, почвообрабатывающими машинами и агрегатами направлены на создание конструкций вибрационных рабочих органов; использование силы сжатого воздуха и электромагнитных полей; создание почвообрабатывающих машин с высокой степенью автоматизации настройки на заданные условия работы; разработку систем дистанционного контроля за процессом работы рабочих органов почвообрабатывающих и посевных машин.

Ключевые слова: почвообрабатывающие машины, отвальная система земледелия, математическое моделирование, система автоматизированного проектирования машин.

■ **Для цитирования:** Ценч Ю.С., Годлевская Е.В. Математическое моделирование как инструмент проектирования сельскохозяйственных машин и агрегатов (применительно к истории развития научной школы Южного Урала) // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. №2. С. 4-12. DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12. EDN PXFEJV.

Mathematical Modeling as a Aspect for Designing Agricultural Machines and Units (Development History Of Southern Urals Scientific School)

Yuliya S. Tsench¹,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: vimasp@mail.ru;

Elena V. Godlevskaya²,
Ph.D.(Ed.), associate professor,
e-mail: elengodl@ya.ru

¹Federal research center of agricultural engineering VIM, Moscow, Russian Federation;

²Chelyabinsk State Industrial and Humanitarian Technical School named after A.V. Yakovlev, Chelyabinsk, Russian Federation



Abstract. This research paper examines the findings presented in the doctoral and PhD theses from the Southern Urals scientific school specifically focusing on the design process of tillage machines and units through the application of mathematical modeling. (*Research purpose*) The objective of the study is to identify the patterns in designing tillage machines and units and, based on these patterns forecast their potential enhancements using mathematical modeling. (*Materials and methods*) The paper analyses the creation of mathematical models based on field tests of tillage machine under diverse soil and climatic conditions emphasizing the authors’ optimal design and upgrade decisions (*Results and discussion*) The research reveals that the design process of soil-cultivating machines progressed through such stages as: empirical design, computational experimentation and the use of computer-aided design. The evolutionary development of research tools demonstrates a gradual convergence between the mathematical models and the actual working conditions of tillage machines and units. Consequently, this enables the improvement and substantiation of tillage machine parameters to meet specific quality criteria for the tillage process, as well as the development of adaptable crop cultivation technologies applicable to various regions’ soil and climatic conditions. (*Conclusions*) The study concludes that to enhance the performance of tillage machines and units and achieve the desired quality parameters, further research should focus on machine computer-aided design, including the design of vibratory working bodies, utilization of compressed air and electromagnetic fields, creation of highly automated soil-cultivating machines capable of adjusting to specified working conditions, and development of remote control systems for managing tillage and sowing machine operations.

Keywords: tillage machines, moldboard tillage system, mathematical modeling, computer-aided design of machines.

For citation: Tsench Yu.S., Godlevskaya E.V. Matematicheskoe modelirovanie kak instrument proektirovaniya sel'skokhozyaystvennykh mashin i agregatov (primenitel'no k istorii razvitiya nauchnoy shkoly Yuzhnogo Urala) [Mathematical modeling as a aspect for designing agricultural machines and units (development history of Southern Urals scientific school)]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2023. Vol. 17. N2. 4-12 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-2-4-12. EDN PXFEJV.

В конце 19-го – начале 20-го века представители агроинженерной науки активно занималась конструированием и созданием почвообрабатывающих машин. Фундаментальной основой этих процессов стала разработанная Горячкиным В.П. и его последователями наука «Земледельческая механика», описывающая базовые положения теоретической механики и механики материалов (почв) через математические зависимости. Создание системы математических уравнений открыло возможность для комплексного анализа процесса обработки почв различными научными школами.

Такие ученые, как Горячкин В.П., Артоболевский И.И., Василенко П.М., Лурье А.Б., Виноградов В.И., Подскребко М.Д., Бледных В.В., Синеоков Г.Н., Гячев Л.В., Капов С.Н., доказали возможность обоснования параметров рабочих органов и почвообрабатывающих машин на основе математических моделей [1-3, 9].

Анализ и обобщение материалов научных публикаций [4-9] позволили систематизировать материал и представить его в виде схемы, описывающей динамику и результаты исследований научных школ в области расчётов, конструирования и создания орудий отвальной системы земледелия (рис. 1).

Выполненный анализ показал, что процесс конструирования почвообрабатывающих машин начинался с азов эмпирического конструирования и заканчивался автоматизированным вычислительным экспериментом. Целью нашего исследования является раскрытие вклада ученых научной школы Южно-Урала в достижения науки и техники агропромыш-

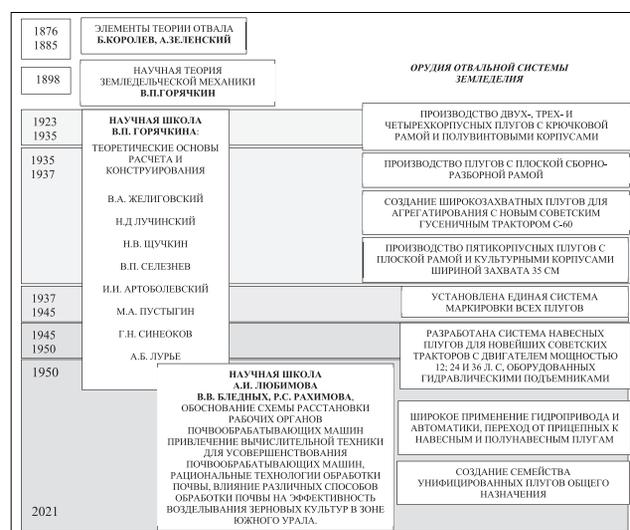


Рис. 1. Динамика и результаты исследований научных школ в области расчётов, конструирования и создания орудий отвальной системы земледелия

Fig. 1. Dynamics and results of the scientific schools’ research regarding the calculations, design and development of implements for moldboard tillage system

ленного комплекса страны.

Создавая теорию конструирования плуга, Горячкин В.П. использовал следующие теоретические разработки.

Геометрические. Использование законов геометрического подобия (углов лемеха, цилиндрических, гипербоидальных и парабоидальных, конических и винтовых поверхностей отвалов).

Технологические. Использование законов техниче-

ского подобия: плуги одной и той же серии должны удовлетворять условиям равной прочности; при одинаковых скоростях для всякого рода деформаций напряжение обратно пропорционально квадрату линейных размеров. Передача давления клином внутрь пласта. Деформация пласта поверхностью отвала; деформация пласта при работе плуга подчиняется общим законам о деформациях.

Агрономические. Рассмотрение характеристик пахоты, учет физико-механических свойств почвы (удельного веса, влагоемкости, связности, сопротивления почвы на разрыв, прилипания и коэффициента трения почвы относительно материала орудия).

Механические. Статическое и динамическое равновесие плуга, вес плуга, влияние скорости резания на работу плуга.

Перечисленные закономерности и связи составили основу математической модели инженерной задачи проектирования рабочего органа почвообрабатывающих машин.

Цель исследования – представить вклад ученых научной школы Южного Урала в достижения науки и техники агропромышленного комплекса страны и при этом установить закономерности развития методов математического моделирования для совершенствования почвообрабатывающих машин и агрегатов и на их основе спрогнозировать дальнейшие перспективы научных исследований.

Основоположником научной школы Южного Урала, занимающейся вопросами конструирования рабочих органов почвообрабатывающих машин, был Любимов А.И., возглавлявший с 1968 года кафедру «Почвообрабатывающие и посевные машины» в ЧИМЭСХ. Учеными Бледных В.В., Рахимовым Р.С., Каповым С.Н., Гайфуллиным Г.З., Мударисовым С.Г., Свечниковым П.Г., Сергеевым Ю.А., Рахимовым И.Р. под руководством Любимова А.И. были разработаны конструкции новых почвообрабатывающих машин: двухрядных плугов-рыхлителей, плоскорезов-щелевателей, двухрядных чизелей, которые внедрялись в сельскохозяйственное производство. Использование в конструкторских разработках вычислительной техники, а в последствии и системы автоматизированного проектирования являлось характерной особенностью научной школы Любимова А.И.

Материалы и методы. Любимов А.И., используя в своих научных трудах анализ и синтез динамической системы «плуг – почва – механизм навески – трактор», решал научно-технические задачи по разработке технологических основ создания новых и совершенствования существующих пахотных агрегатов.

Исходя из логики научного исследования, автор на основе общих уравнений движения агрегата составил дифференциальные уравнения, включающие обобщенные координаты перемещений трактора и плуга

в горизонтальном и вертикальном направлениях, а также угловых перемещений в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 2).

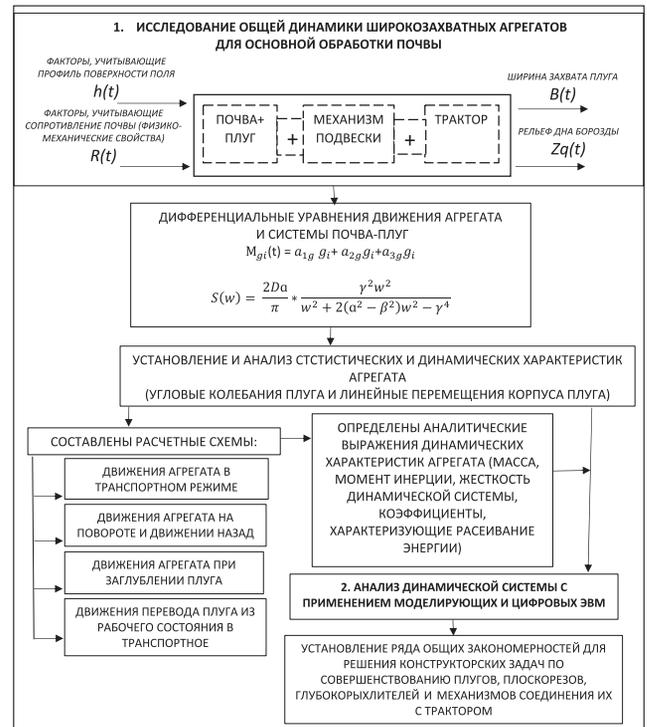


Рис. 2. Алгоритм методики исследования взаимодействия сложной динамической системы плуг – почва – механизм навески – трактор

Fig. 2. Algorithm of the methodology for studying the interaction of a complex dynamic plow - soil - plough hitch – tractor system

Далее была рассмотрена проектируемая система плуг – почва – механизм навески – трактор как двухмассовая система, соединенная механизмом навески (связью). Для исследования реакции агрегата (выраженной в ширине захвата плуга $B(t)$ и рельефе дна борозды $Zq(t)$) на внешние факторы (профиль поверхности поля $h(t)$ и сопротивление почвы $R(t)$) автором были использованы многочисленные статистические характеристики обобщенных координат объекта – оригинала (трактора К-700 и полунавесного плуга ПЛП-8-35). Полученные Любимовым А.И. многочисленные данные по полевым исследованиям показали, что частоты угловых и линейных колебаний трактора и плуга при пахоте совпадают с диапазонами частот, наблюдаемыми в спектре неровностей рельефа.

Это позволило уточнить расчётные схемы для решения таких задач, как: движение агрегата в транспортном режиме; движение агрегата на повороте и в реверсе; движение агрегата при заглублении плуга; движение агрегата при переводе плуга из рабочего в транспортное положение (рис. 2).

После этого были определены аналитические выражения динамических характеристик агрегата (массы, момента инерции, жесткости динамической си-

стемы, коэффициентов, характеризующих рассеивание энергии, и проведен анализ динамической системы с применением моделирующих и цифровых электронно-вычислительных машин. Полученные после обработки на ЭВМ закономерности явились исходными данными для решения задач совершенствования существующих конструкций плугов [10].

Используя данные проведенных исследований, Любимов А.И. так определил основные практические рекомендации: «При решении вопроса автоматизации необходимо, в первую очередь, совершенствовать конструкцию объекта регулирования, серьезно изменить параметры механизма навески и плуга, которые только после этого можно использовать как исполнительные механизмы автоматического регулирования. Автоматизированный пахотный агрегат необходимо рассматривать как систему многоконтурного раздельного регулирования. Отдельные контуры этой системы целесообразно исполнять по классу циклических автоматических систем с программным регулированием, другие контуры по классу следящих систем с замкнутым циклом» [10].

Научные труды Бледных В.В. посвящены разработке адекватных математических моделей технологических процессов для создания системы автоматизированного проектирования (САПР) рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Используя математические модели движения пласта почвы по плоскому рабочему органу в форме клина, Бледных В.В. вывел уравнение траектории движения, используя понятие угла резания почвы. Рассматривая вопросы формирования пласта и разрушения почвы рабочим органом, ученый выделил три последовательных процесса и представил их в виде моделей [11].

В основу исследуемой модели движения пласта почвы по плоскому рабочему органу в форме клина положена схема образования пласта (рис. 3), предложенная Гячевым Л.В. и описанная уравнением [12]:

$$\left. \begin{aligned} \tan \eta &= \cos \varepsilon \cdot \tan \gamma \\ \sin x &= \sin \gamma \cdot \sin \varepsilon \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где η – угол между траекторией движения почвы и лезвием клина AB ;

x – угол резания почвы трехгранным клином;

γ, ε – установочные углы трехгранного клина.

В основу математической модели формирования пласта заложен принцип наименьшего действия Мэппертюна-Лагранжа:

$$\delta S_0 = \delta \int_{t_0}^t 2\pi dt = 0, \quad (2)$$

где δ – символ полной вариации;

S – траектория движения почвы.

Модель разрушения почвы базируется на постулате: нагружение почвы нормальной силой происходит до ее разрушения. Это позволило составить ма-

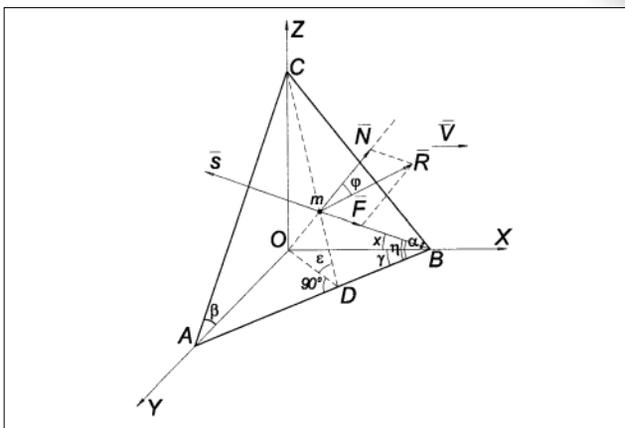


Рис. 3. Траектория движения почвы и силы, действующие на трехгранный клин при его движении в почве

Fig. 3. The trajectory of the soil movement and the forces acting on the triangular wedge during its movement in the soil

тематические модели, связывающие усилие на протаскивание рабочего органа (R_Y) с его параметрами и физико-механическими свойствами почвы (N, φ):

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_y}{R_n} &= \frac{\sin(a + \varphi)}{\cos \varphi} \\ \frac{R_y}{R_n} &= \frac{\sin(x + \varphi)}{\cos \varphi} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Используя последовательно приведенные модели процессов движения, формирования и разрушения пласта почвы, Бледных В.В. составил алгоритм определения тягового сопротивления рабочего органа и его составляющие по осям координат (рис. 4).

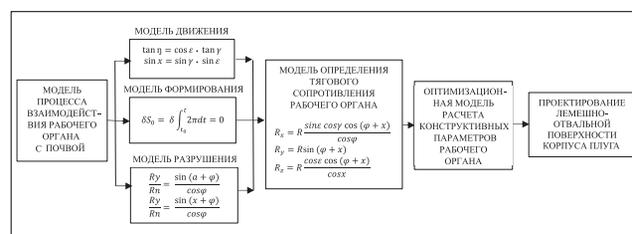


Рис. 4. Алгоритм математического моделирования технологических процессов, от которых зависит процесс совершенствования рабочих органов почвообрабатывающих машин

Fig. 4. Algorithm for mathematical modeling of technological processes affecting the process of upgrading tillage machine working bodies

На следующем этапе реализации алгоритма математического моделирования совершенствования рабочих органов почвообрабатывающих машин в качестве критерия оптимизации конструктивных параметров рабочего органа выступило его тяговое сопротивление. При этом при построении модели учитывались такие показатели технологического процесса, как засоренность поля сорной растительностью, физико-механические свойства поля (влажность почвы, коэффициент трения почвы о поверхность).

Отдельно представим алгоритм машинного проектирования лемешно-отвальной поверхности рабочего органа (рис. 5).

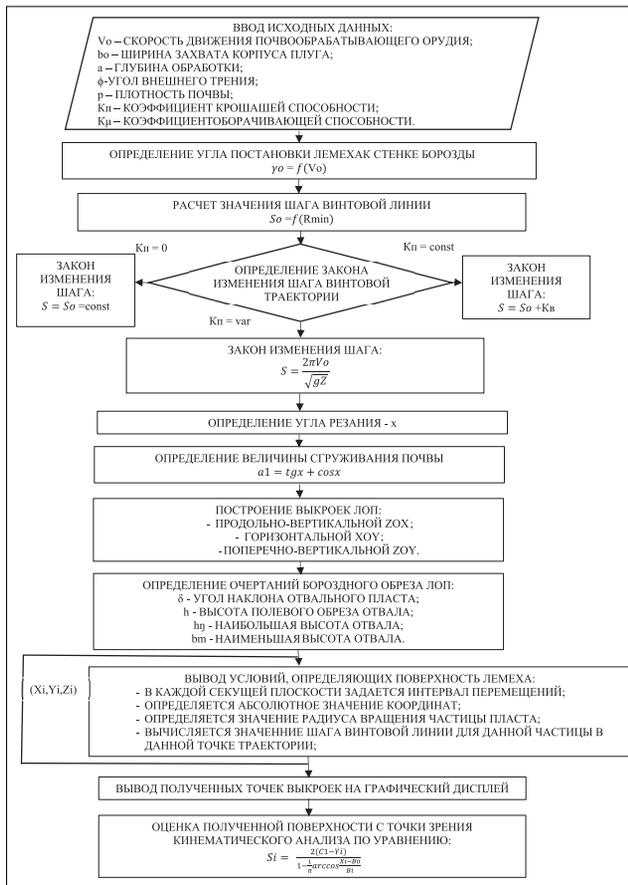


Рис. 5. Алгоритм машинного проектирования лемешно-отвальной поверхности рабочего органа

Fig. 5. Algorithm for the machine design of a working body share surface

Как видно, процесс математического моделирования выявляет зависимость геометрических параметров рабочих органов почвообрабатывающих машин с агротехническими показателями пахоты. Это дает возможность получить оптимальные энергетические показатели вспашки.

Сформулированное и обоснованное Бледных В.В. это новое направление позволило:

- осуществить изучение технологических процессов, проводить их оптимизацию и совершенствование конструкций рабочих органов почвообрабатывающих машин;
- управлять процессом крошения почв, задавая различные законы изменения траектории движения пласта по лемешно-отвальной поверхности;
- обосновать улучшение (на 15-18%) агротехнических показателей пахоты при использовании плугов для ромбической вспашки;
- показать, что к большинству задач по определению основных характеристик рабочих органов почво-

обрабатывающих агрегатов и параметров технологического процесса применимы известные принципы оптимизации систем [13].

Значительный вклад в создание общей модели технологического процесса внес Рахимов Р.С., исследуя рабочий процесс, заглубление, выглубление, транспортировку, поворот агрегата, он учел возмущающие факторы со стороны рельефа поля и твердости почвы в виде двумерных нестационарных случайных функций и определил показатели, характеризующие эффективность технологического процесса работы машин в виде равномерной глубины хода, тягового сопротивления и их вероятностных характеристик.

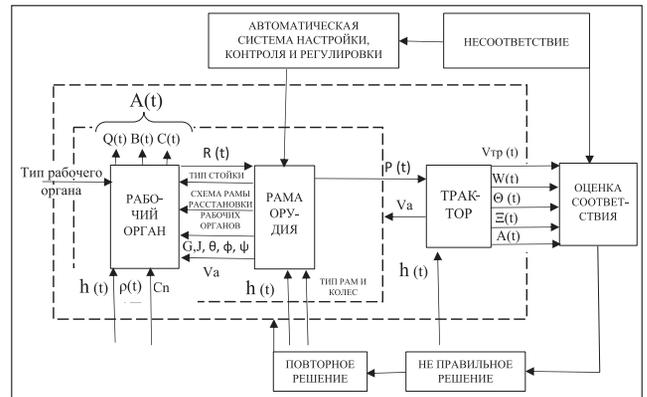


Рис. 6. Общая модель технологического процесса работы агрегата: $R(t)$ – сопротивление почвы; $P(t)$ – тяговое усилие; J – сила инерции; G – сила тяжести; θ, ϕ, ψ – углы поворота системы; C_n – параметр, характеризующий состояние поля; $Q(t)$ – глубина обработки; $B(t)$ – ширина захвата

Fig. 6. General model of the unit technological process: $R(t)$ – soil resistance; $P(t)$ – traction force; J – inertial force; G – gravity; θ, ϕ, ψ – system rotation angles; C_n is a parameter characterizing the state of the field; $Q(t)$ – tilling depth; $B(t)$ – capture width

Свернутую математическую запись общей модели технологического процесса работы агрегата Рахимов Р.С. представил в следующем виде:

$$\vec{F} \xrightarrow{\vec{A}(x)} \vec{Y}, \tag{4}$$

где \vec{Y} – вектор выходных параметров, к которым относятся показатели эффективности технологического процесса работы агрегата; $A(t)$ – агротехнические показатели работы агрегата; $W(t)$ – производительность агрегата; $E(t)$ – управляемость трактора; $\Theta(t)$ – расход топлива; $V_{tmp}(t)$ – транспортная скорость агрегата; V_a – скорость агрегата; \vec{X} – вектор внутренних выходных параметров, характеризующих элементы почвообрабатывающей машины (схему рамы, координаты элементов машины, жесткость рамы, массу рамы и рабочих органов, параметры колес, типы шарниров); \vec{F} – вектор внешних входных параметров, описывающих условия работы машин: $h(t)$ – факторы, учитывающие рельеф поля; $\rho(t)$ – факторы, учитывающие сопротивление почвы; $C(t)$ – крошение, сохранение стерни.

Разработанная обобщенная математическая модель (рис. 6) позволила ученому осуществить дальнейшие проектные процедуры, включающие в себя взаимодействие таких множеств, как матрица инцидентности, содержащая информацию о структуре взаимосвязей ориентированного графа конкретной конструктивной схемы широкозахватных почвообрабатывающих агрегатов с многосекционными орудиями; матрица угловой ориентации системы (трактора и почвообрабатывающего многосекционного орудия); уравнение движения агрегата для различных конструктивных схем на всех этапах технологического процесса; генерация на ЭВМ характеристик рельефа поля; генерация на ЭВМ свойств почвы (рис. 7).

Одной из поздних исследовательских работ в области проектирования почвообрабатывающих машин научной школы Южного Урала является диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук Рахимова И.Р.

Интерес представляет использование САПР как инструмента информационной поддержки для обоснования и принятия решений в процессе выбора адаптивных технических средств обработки почвы.

Данный вопрос, продиктованный временем, вытекает из условия получения максимальной прибыли с единицы посевной площади при минимальных затратах. На этот процесс большое влияние оказывают вид почвенно-климатической зоны, районированные



Рис. 7. Алгоритм создания системы автоматизированного проектирования широкозахватных почвообрабатывающих агрегатов с многосекционными орудиями

Fig. 7. Algorithm for developing a computer-aided design system for wide-cut tillage units with multi-section tools

технологии возделывания сельскохозяйственных культур, тракторный парк, почвообрабатывающие и посевные машины, которые обеспечат качество подготовки почвы с требуемыми свойствами для возделывания выбранной культуры в севообороте [14].

Рахимов И.Р., учитывая ранее проведенные исследования [15, 16] и используя накопленный научной школой опыт математического моделирования и агротехнические требования к созданию новых машин, провел расчеты и обосновал конструктивные параметры комплекса машин для тракторов класса тяги 1,4-5,0 [17].

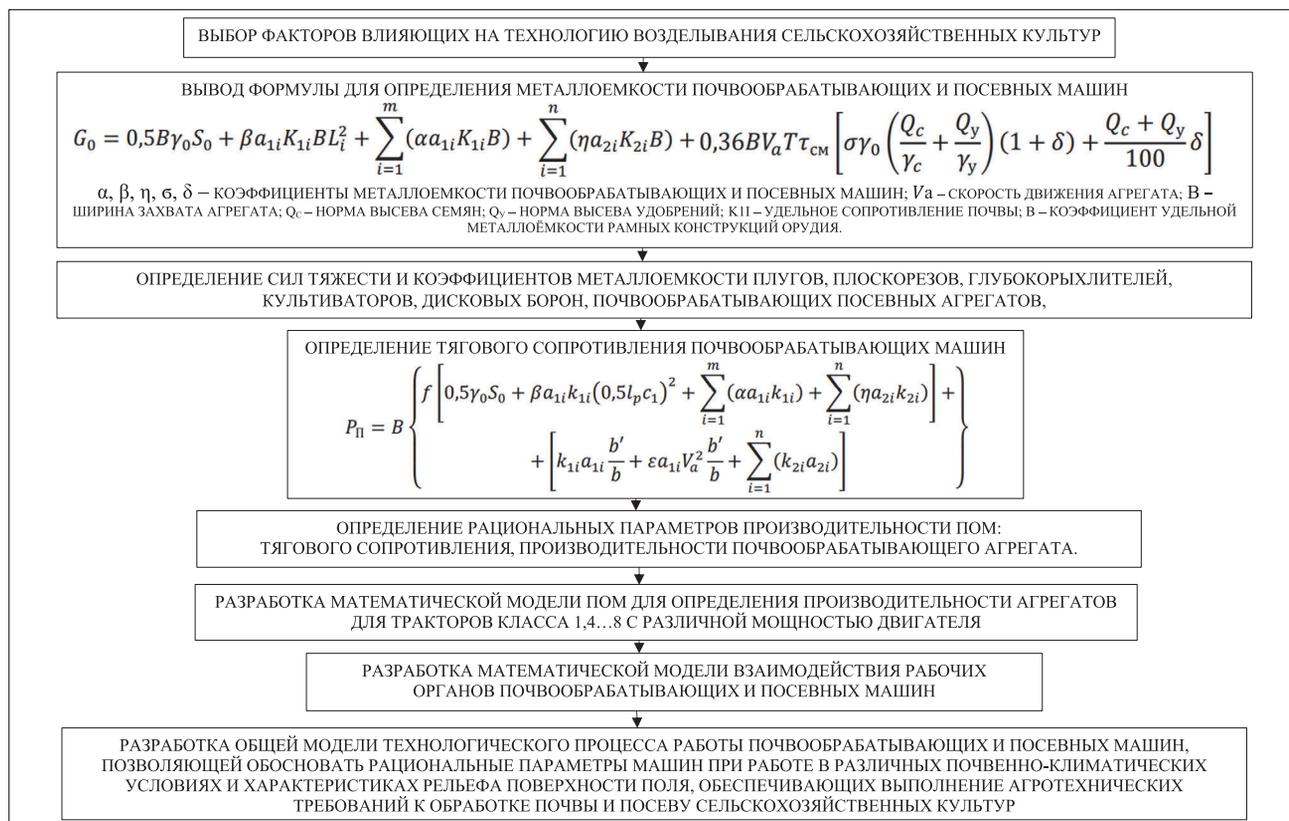


Рис. 8. Алгоритм научного обоснования и разработки адаптивных технологий и технических средств обработки почвы и посева
Fig. 8. Algorithm for scientific substantiation and development of adaptive technologies and technical means of tillage and sowing



- ских плугов // *Известия Томского политехнического университета*. 1934. N2. С. 79-92.
8. Экспериментальная теория резания лезвием // *Механизация и электрификация*. 1940. Вып. 4. С. 3-22.
 9. Лурье А.Б., Любимов А.И. Широкозахватные почвообрабатывающие машины. Л.: Машиностроение. 1981. 270 с.
 10. Любимов А.И. Динамика широкозахватных агрегатов основной обработки почвы: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Челябинск: ЧГАУ. 1973. 321 с.
 11. Бледных В.В. Основные закономерности силового взаимодействия трехгранного клина с почвой // *Достижения науки и техники АПК*. 2008. N8. С. 33-36.
 12. Гячев Л.В. Теория лемешно-отвальной поверхности // *Научные труды Азово-Черноморского института механизации сельского хозяйства*. 1961. Вып. 13. 317 с.
 13. Бледных В.В. Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе математического моделирования технологических процессов: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Л.: 1989. 38 с.
 14. Владоаккумуляционные технологии, техника для обработки почв и использование минеральных удобрений в экстремальных условиях: Научное издание ФАНО России, ВИМ, ВНИМС. Научные руководители: Измайллов А.Ю., Соркин Н.Т. Рязань: ВНИМС. 2014. 245 с.
 15. Зыбалов В.С., Добровольский И.П., Рахимов Р.С., Хлызов Н.Т., Капкаев Ю.Ш. Рациональное использование земель сельскохозяйственного назначения Челябинской области: монография. Челябинск: ЧГАУ. 2016. 266 с.
 16. Зыбалов В.С., Добровольский И.П., Хлызов Н.Т., Рахимов И.Р., Бархатов В.И. Управление плодородием почв Челябинской области: Монография. Челябинск: ЧГАУ. 2018. 193 с.
 17. Рахимов Р.С., Рахимов И.Р., Ялалетдинов Д.А., Фетисов Е.О., Хамитов Я.Ю., Юмагузин Р.М., Рахимжанов А.Р., Анохин С.В. Разработка технологии и изготовление импортозамещающего комплекса машин для возделывания сельскохозяйственных культур // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. N1. С. 86-96.
 18. Рахимов И.Р. Совершенствование рабочих органов машин для основной обработки почвы на основе моделирования процесса взаимодействия клина с почвой: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Челябинск: ЧГАУ. 2006. 27 с.
 19. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. Принципы формирования систем машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации технологических процессов в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 16. N4. С. 4-12.
 20. Ценч Ю.С. Становление и развитие научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / ФНАЦ ВИМ. М.: 2021. 419 с.

REFERENCES

1. Vinogradov V.I. Soprotivlenie rabochikh organov lemeshnogo pluga i metody snizheniya energoemkosti pakhoty: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [The resistance of the share plow working bodies and methods for reducing the plowing energy intensity: Dr.Sc. thesis]. Chelyabinsk: CHGAU. 1969. 697 (In Russian).
2. Kapov S.N., Rakhimov I.R. Modeli pochvy v zemledel'cheskoy mekhanike [Soil models in agricultural mechanics]. Tezisy dokladov na XI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chelyabinsk: CHGAU. 2001. 322-324 (In Russian).
3. Sineokov G.N. Proektirovanie pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Designing tillage machines]. Mashinostroenie. 1965. 311 (In Russian).
4. Zhalnin E.V. Postulaty V.P. Goryachkina i ikh dal'neyshee razvitiye [V.P. Goryachkin's postulates and their further development]. *Agroinzheneriya*. 2008. N2. 15-21 (In Russian).
5. Erokhin M.N. Rol' naslediya V.P. Goryachkina v agroinzhenernom obrazovanii XXI veka [The role of V.P. Goryachkina in agroengineering education of the XXI century]. *Agroinzheneriya*. 2008. N1. 7-10 (In Russian).
6. Rektor Chelyabinskogo GAU akademiku Rossel'khozakademii Vasiliyu Vasil'evichu Blednykh 70 let [The 70th anniversary of Vasily V. Blednykh, Rector of the Chelyabinsk State Agrarian University, Academician of the Russian Agricultural Academy]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2008. N7. 30-31 (In Russian).
7. Terskov G.D. K voprosu o postroenii otvalov amerikanskikh plugov [The issue of constructing American plow dumps]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 1934. N2. 79-92 (In Russian).
8. Eksperimental'naya teoriya rezaniya lezviem [Experimental theory of blade cutting]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya*. 1940. Vol. 4. 3-22 (In Russian).
9. Lur'e A.B., Lyubimov A.I. Shirokozakhvatnye pochvoobrabatyvayushchie mashiny [Wide-cut tillage machines]. Leningrad: Mashinostroenie. 1981. 270 (In Russian).
10. Lyubimov A.I. Dinamika shirokozakhvatnykh agregatov osnovnoy obrabotki pochvy: dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Dynamics of wide-cutting aggregates for basic tillage: Dr.Sc. thesis]. Chelyabinsk: CHGAU. 1973. 321 (In Russian).
11. Blednykh V.V. Osnovnye zakonomernosti silovogo vzaimodeystviya trekhgrannogo klina s pochvoy [The main regularities of the force interaction of a trihedral wedge with soil]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2008. N8. 33-36 (In Russian).
12. Gyachev L.V. Teoriya lemeshno-otval'noy poverkhnosti [Theory of share-dump surface]. *Nauchnye trudy Azovo-Chernomorskogo instituta mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva*. 1961. Vol. 13. 317 (In Russian).

13. Blednykh V.V. Sovershenstvovanie rabochikh organov pochoobrabatyvayushchikh mashin na osnove matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov: Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Upgrading machine working bodies based on mathematical modeling of technological processes: Dr.Sc. thesis abstract]. Leningrad: 1989. 38 (In Russian).
14. Vlagoakkumuliruyushchie tekhnologii, tekhnika dlya obrabotki pochv i ispol'zovanie mineral'nykh udobreniy v ekstremal'nykh usloviyakh: Nauchnoe izdanie FANO Rossii, VIM, VNIMS [Moisture storage technologies, soil cultivation equipment and the use of mineral fertilizers in extreme conditions]. Scientific supervisors: Izmaylov A.Yu., Sorokin N.T. Ryazan': VNIMS. 2014. 245 (In Russian).
15. Zybalov V.S., Dobrovolskiy I.P., Rakhimov R.S., Khlyzov N.T., Kapkaev Yu.Sh. Ratsional'noe ispol'zovanie zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya Chelyabinskoy oblasti: monografiya [Efficient use of the agricultural land in the Chelyabinsk region: monograph]. Chelyabinsk: CHGAU. 2016. 266 (In Russian).
16. Zybalov V.S., Dobrovolskiy I.P., Khlyzov N.T., Rakhimov I.R., Barkhatov V.I. Upravlenie plodorodiem pochv Chelyabinskoy oblasti: Monografiya [Management of soil fertility in the Chelyabinsk region: Monograph]. Chelyabinsk: CHGAU. 2018. 193 (In Russian).
17. Rakhimov R.S., Rakhimov I.R., Yalaletdinov D.A., Fetisov E.O., Khamitov Ya.Yu., Yumaguzhin R.M., Rakhimzhanov A.R., Anokhin S.V. Razrabotka tekhnologii i izgotovlenie importozameshchayushchego kompleksa mashin dlya vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Development of technology and manufacturing of an import-substituting complex of machines for cultivating crops]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*. 2020. N1. 86-96 (In Russian).
18. Rakhimov I.R. Sovershenstvovanie rabochikh organov mashin dlya osnovnoy obrabotki pochvy na osnove modelirovaniya protsessa vzaimodeystviya klina s pochvoy: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Upgrading the working bodies of main tillage machines based on modeling the interaction of the wedge with the soil: PhD thesis abstract]. Chelyabinsk: CHGAU. 2006. 27 (In Russian).
19. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S. Printsipy formirovaniya sistem mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Principles of forming machine and technology systems for integrated mechanization and automation of technological processes in crop production]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N4. 4-12 (In Russian).
20. Tsench Yu.S. Stanovlenie i razvitie nauchno-tekhnicheskogo potentsiala mekhanizatsii sel'skogo khozyaystva Rossii [Formation and development of scientific and technical potential of mechanization of agriculture in Russia]. *Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk*. FSAC VIM. Moscow: 2021. 419 (In Russian).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ценч Ю.С. – общее руководство, постановка задач исследования;

Годлевская Е.В. – анализ предметной области и формирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Tsench Yu.S. – general guidance, formulation of research objectives; Godlevskaya E.V. – analysis of the subject area and the formation of conclusions.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

05.04.2023
26.05.2023