

МЕХАНИЗАЦИЯ И ЭНЕРГЕТИКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК [631.3:633.1]:519.8
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-90-107>

Поступила в редакцию 12.12.2019
Received 12.12.2019

Цинчжэнь Ли^{1,2}, А. Н. Леонов¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

²Шихэцзи университет, Шихэцзи, Синьцзян, Китай

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
И СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕРНА ДЛЯ СРЕДНЕГО КИТАЯ
НА БАЗЕ БЕЛОРУССКОЙ ТЕХНИКИ**

Аннотация: Одной из главных проблем при производстве зерна в Китае является высокий уровень удельных затрат (высокая себестоимость). Основная причина – низкий уровень механизации. Разработка эффективных технологий и средств механизации является перспективным направлением, позволяющим снизить уровень удельных затрат при заданной производительности труда и сохранении достигнутой урожайности. Производство зерна является сложной системой, связанной с большим объемом информации: агротехнологической (сорт культуры, урожайность, физико-механические параметры участков, сроки выполнения операций, допустимый интервал скоростей для конкретной операции и т.д.), технико-экономической (мощностные и тяговые характеристики, пропускная способность, ширина захвата, эксплуатационная масса, объем бункера, стоимость). В настоящее время появились эффективные методы изучения сложных систем в результате разработки и широкого внедрения систем компьютерной математики, которые позволяют исследовать технологии и средства механизации методом многофакторного моделирования и многокритериальной оптимизации. В статье представлена многофакторная математическая модель, отличающаяся тем, что впервые взяты три группы одновременно варьируемых факторов – мощность двигателей, скорость движения МТА, сроки выполнения основных энергоемких операций – вспашка, уборка, а в качестве конфликтующих между собой параметров оптимизации – уровень удельных затрат, коэффициент потерь урожая, производительность труда, что позволяет всесторонне исследовать процесс производства зерна в любых природно-производственных условиях. Разработан технологический процесс (скорость движения агрегатов и сроки проведения основных операций (вспашка, уборка)) и соответствующий комплекс машин и оборудования, обеспечивающий минимальный уровень удельных затрат при заданной производительности труда и сохранении достигнутой урожайности с учетом специфики среднего Китая (2 урожая в год).

Ключевые слова: мощность двигателя, трактор, комбайн, скорость движения МТА, сроки операций, пропускная способность, уровень удельных затрат, производительность труда, урожайность, озимая пшеница, кукуруза, многофакторное моделирование, многокритериальная оптимизация

Для цитирования: Ли, Цинчжэнь. Моделирование и оптимизация технологического процесса и средств механизации производства зерна для среднего Китая на базе белорусской техники / Цинчжэнь Ли, А. Н. Леонов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 90–107. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-90-107>

Qingzhen Li^{1,2}, Andrey N. Leonov¹

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

²Shihezi University, Shihezi, Xinjiang, China

**MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESS AND MEANS OF MECHANIZATION
OF GRAIN PRODUCTION FOR MIDDLE CHINA BASED ON BELARUSIAN TECHNOLOGY**

Abstract: One of the main problems in grain production in China is the high level of unit costs (high cost price). The main reason is the low level of mechanization. Development of efficient technologies and means of mechanization is a promising area allowing to decrease the level of unit costs at a given labor efficiency and maintaining the achieved yield. Grain

production is a complex system associated with a large amount of information: agrotechnological (crop variety, crop yield, physical-and-mechanical parameters of land plots, terms of operations, permissible speed range for specific operations, etc.), technical-and-economic (power and traction parameters, throughput, working width, operating weight, hopper volume, cost). At present, efficient methods for studying complex systems have appeared as a result of development and widespread implementation of computer mathematics systems, which allow us to study mechanization technologies and tools using multi-factor modeling and multi-criteria optimization. The paper presents a multi-factor mathematical model, peculiar for the fact that the three groups of simultaneously varying factors are taken for the first time - engine power, MTA speed, timing of the main energy-intensive operations – plowing, harvesting, and as conflicting optimization parameters - unit cost level, coefficient of crop losses, labor efficiency, which allowed a comprehensive study of the grain production process in any natural-production conditions. A technological process has been developed (units speed and timing of the main operations (plowing, harvesting) and the corresponding range of machines and equipment, ensuring minimum level of unit costs at a given labor efficiency and maintaining the achieved crop yield, taking into account the specifics of the Middle China (2 crops per year).

Keywords: tractor, combined harvester, engine power, MTA speed, operation timing, throughput, unit costs, labor efficiency, crop yield, winter wheat, corn, multi-factor modeling, multi-criteria optimization

For citation: Li Q., Leonov A. N. Modeling and optimization of technological process and means of mechanization of grain production for middle China based on Belarusian technology. *Vestsi Natsyyanal'nyay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2020, vol. 58, no 1 pp. 90–107 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-90-107>

Введение. Производство зерна в Китае в конце XX века было недостаточным, так как норма потребления составила 0,40 т/чел. в год [1], а производство – только 0,32 т/чел. в год. Для повышения эффективности производства зерна колхозные наделы были переданы в пожизненную семейную аренду, в результате производство зерна было увеличено от 0,32 до 0,45 т/чел. в год (табл. 1).

Продовольственная безопасность Китая по количеству зерна была обеспечена, однако низкий уровень механизации при мелкотоварном производстве (0,5 га на семью) предопределил высокую себестоимость зерна, что делает его закупку для глубокой переработки невыгодной (табл. 2). Поэтому снижение уровня удельных затрат, но при сохранении достигнутого объема производства зерна в Китае является актуальной производственной задачей [2].

Решение этой проблемы может быть реализовано двумя способами: 1) разработка технологии и формирование оптимального комплекса машин и оборудования; 2) выведение новых сортов семян путем селекции на базе молекулярной биологии и генетики. Не умаляя важности второго направления, авторы тем не менее считают, что наиболее результативно первое, так как в настоящее время в Китае отмечается низкий уровень механизации. Беларусь обладает достаточно развитой материально-технической базой и высоким промышленным потенциалом сельхозмашиностроения (МТЗ, ММЗ, Гомсельмаш, Бобруйсксельмаш, Лидагропромаш, Амкодор и др.), в стране сформировано высокопрофессиональная система подготовки научных инженерно-технических кадров (5 аграрных НППЦ и 4 университета). Поэтому представляет научный и практический интерес исследование применения белорусской сельскохозяйственной техники для повышения уровня механизации в Китае.

Процесс производства зерна, являясь сложной технической системой, включает в себя следующие основные операции: предпосевную обработку почвы, посев, промежуточный уход за

Таблица 1. Динамика ВВП зерна сельскохозяйственных культур в Китае, млн т/год
Table 1. Dynamics of grain crops GDP in China, million tons/year

Год	Рис	Пшеница	Кукуруза	Соя	ВВП зерна	Удельный ВВП, т/чел в год
1980	140	55	63	19	320	0,32
2000	188	100	106	20	462	0,36
2015	213	234	259	18	662	0,45

Источник: Китайский статистический ежегодник [China Statistical Yearbook] [Electronic resource] // National Bureau of Statistics of China. Mode of access: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>. Date of access: 25.11.2019 (на кит. яз.).

Таблица 2. Техничко-экономические параметры производства зерна пшеницы и кукурузы в Китае и США, 2015 г.

Table 2. Engineering and economic parameters of wheat and corn grain production in China and the USA, 2015

Культура	Доля ручного труда, %		Стоимость зерна, у.е./т		
	США	Китай	США в США	США в Китае	Китай в Китае*
Пшеница	0,7	38	240	300	400
Кукуруза	0,5	45	160	260	380

Источник: Zhu, Xianfeng. Grain production trend in China and the USA / Xianfeng Zhu, Chengfang Wu // China Grain Economy. 2016. N 9. P. 36–39.

посевами, уборку урожая, выполняемых энергомашинами (трактор, комбайн) и соответствующими сельхозмашинами. Разработка растениеводческих технологий связана с использованием большого объема информации – агротехнологической (сорт культуры, урожайность, физико-механические параметры участков, сроки выполнения операций, допустимый интервал скоростей для конкретной операции и т.д.), технико-экономической (мощностные и тяговые характеристики, пропускная способность, ширина захвата, эксплуатационная масса, объем бункера, стоимость). Полное описание таких систем достигается только при наличии комплекса конфликтующих между собой параметров оптимизации, зависящих от управляющих факторов. В связи с этим описание и анализ функционирования таких систем требует достаточно мощных компьютеров с большим объемом основной и оперативной памяти, а также совершенного программного обеспечения. Именно поэтому раньше разработка таких систем в полном объеме была практически невозможна.

Многие исследователи пытались математически упростить эту задачу. Например, в работе [3] был предложен метод формирования МТА на основе определения минимума материальных затрат путем однокритериальной оптимизации, варьируя шириной захвата сельхозмашин. В работе [4] в качестве критерия эффективности машинно-тракторного парка (МТП) предложен обобщенный параметр оптимизации, формируемый на базе частных параметров методом весовых коэффициентов. В работе [5] разработана научно-методическая стратегия оптимального доукомплектования МТП с учетом ресурсных ограничений. В качестве целевой функции принимался максимальный объем продукции, который в значительной степени определяется потерями урожайности, связанными с нарушением агротехнических сроков. В работе [6] при формировании комплекса машин в качестве целевой функции взята прибыль, зависящая от сроков выполнения операций.

Так или иначе все эти работы были связаны с однокритериальной оптимизацией. Кроме того, сложность математического описания не позволяла использовать большое количество управляющих факторов, таких как мощность двигателя, скорость движения МТА, сроки выполнения операций, существенно влияющих на формирование оптимального технологического процесса и комплекса машин.

В работе [7] впервые АПК был исследован как сложная техническая система, всестороннее описание которой реализуется только при наличии конфликтующих между собой параметров оптимизации. В качестве таких параметров были приняты уровень удельных затрат γ и производительность труда W . Однако использование только одного управляющего фактора – мощности двигателя трактора – не позволило рассчитать оптимальные значения γ и W , так как на самом деле оба они зависят от трех независимых факторов: мощности двигателей, скорости движения МТА и сроков выполнения основных операций.

Анализ литературных данных [3–7], посвященных описанию сложных технических систем, позволяет сделать вывод, что в настоящее время целесообразно использовать новые, чрезвычайно эффективные методы изучения сложных технических системы. Эти методы возникли в результате разработки и широкого внедрения систем компьютерной математики, которые достаточно легко позволяют исследовать технологии и средства механизации методом многофакторного моделирования (МФМ) и многокритериальной оптимизации (МКО). В такой постановке решение этой задачи является важной и актуальной.

Цель исследования – разработка технологического процесса производства зерна и соответствующего комплекса энерго- и сельхозмашин, позволяющих снизить уровень удельных затрат при заданной урожайности и производительности труда методом многофакторного моделирования и многокритериальной оптимизации.

Основная часть. Разработанная теория проиллюстрирована на примере производства озимой пшеницы и кукурузы в среднем Китае (2 урожая в год) на базе белорусской сельхозтехники, перечень основных операций и соответствующего оборудования приведен в табл. 3.

1. Выбор параметров оптимизации. В данной статье в качестве параметров оптимизации взяты: γ – уровень удельных затрат, у.е/кг; μ – коэффициент потерь урожая; W – производительность труда, кг/(чел·с).

Уровень удельных затрат γ (у.е/кг). Его значение позволяет судить о конкурентоспособности разработанного технического решения на внутреннем и мировом рынках. Так как в Китае себестоимость зерна является относительно высокой, то ее снижение является актуальной научно-технической задачей.

Коэффициент потерь урожая μ характеризует относительную величину потерь урожая. Казалось бы, более естественным в качестве параметра оптимизации нужно взять урожайность зерна, так как между коэффициентом потерь урожая и урожайностью существует 100%-ная корреляция. Однако фермер не в состоянии управлять урожайностью в полной мере, так как она в значительной степени определяется погодными условиями. В отличие от урожайности коэффициент потерь урожая в значительной степени определяется интеллектом разработчика.

1. Производительность труда W (кг/с). Это важнейший параметр, определяющий уровень социально-экономического развития страны. Следует отметить, что по этому параметру и Беларусь и Китай в 3–5 раз отстают от стран ЕС¹. В заключение отметим, что γ , μ и W являются конфликтующими параметрами.

2. Выбор управляющих факторов. Управляющие факторы должны быть независимыми и оказывать существенное влияние на параметры оптимизации. В качестве факторов выбраны: 1) для вспашки $N_{\text{ном}}^{\text{тр}}$, v_{111} , Δt_{111} – номинальная мощность двигателя трактора (Вт), скорость его движения (м/с), продолжительность вспашки (дн); 2) для уборки пшеницы $N_{\text{ном}}^{\text{ком}}$, v_{142} , t_{142} , Δt_{142} – номинальная мощность двигателя комбайна (Вт), скорость его движения (м/с), момент начала (дн), продолжительность уборки (дн); 3) для уборки кукурузы v_{242} , t_{242} , Δt_{242} – скорость движения комбайна (м/с), момент начала (дн), продолжительность уборки (дн).

Фактор t_{111} – момент начала вспашки поля трактором под пшеницу не является управляющим, так как рассчитывается из следующего уравнения:

$$t_{111} = t_{242} + \Delta t_{242} - \Delta t_0, \quad (1)$$

где Δt_0 – время между моментами максимальной урожайности кукурузы и сева пшеницы, обеспечивающим ее максимальную урожайность, дни (рис. 1).

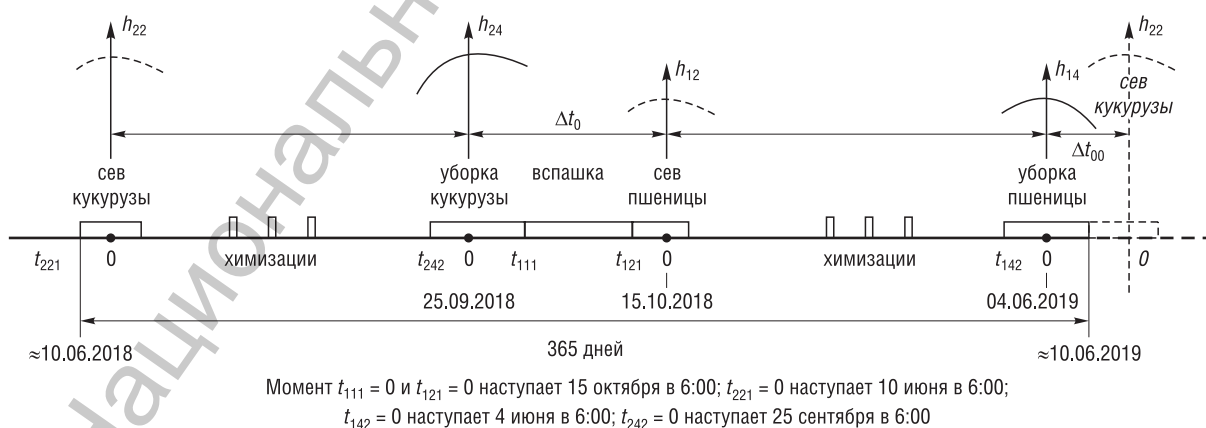


Рис. 1. Схема севооборота пшеницы и кукурузы в среднем Китае

Fig. 1. Wheat and corn crop rotation pattern in the Middle China

Таблица 3. Перечень основных операций и соответствующего оборудования для производства озимой пшеницы и кукурузы в среднем Китае

Table 3. List of main operations and related equipment for production of winter wheat and corn in the Middle China

Блок	Операция	Энергомашины	Сельхоз-машины
1	Вспашка под пшеницу	Трактор	Плуги
1	Посев пшеницы	Трактор	Сеялка
1	Химизация пшеницы (3 раза)	Трактор	Разбрасыватель
2	Уборка пшеницы	Комбайн	Жатка
1	Посев кукурузы	Трактор	Сеялка
1	Химизация кукурузы (3 раза)	Трактор	Разбрасыватель
2	Уборка кукурузы	Комбайн	Жатка

¹ О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства : Директива Президента Респ. Беларусь, 14.07.2007, № 3 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. 2007. № 146. 1/8668.

Таблица 4. Система индексации*

Table 4. Indexing System

Параметр	Индекс			
	1	2	3	4
Затраты, j	Топливо	Труд	Амортизация	-
Культуры, k	Пшеница	Кукуруза	-	-
Операции, l	Вспашка	Сев	Химизация	Уборка
Энергомашин, m	Трактор	Комбайн	-	-

*Операции вспашка, сев, химизации выполняются только трактором, уборка – только комбайном (см. табл. 4).

Например, D_{1231} – затраты на топливо при производстве кукурузы на химизацию с участием трактора; D_{12} – затраты на топливо при производстве кукурузы на всех операциях с участием соответствующих энергомашин.

Моделирование параметра оптимизации $\gamma = \gamma(\bar{X})$:

$$\gamma = \frac{D}{M}, \quad (2)$$

$$D = \sum_j^2 D_j, \quad (3)$$

где D – общие затраты, у.е; M – обобщенная масса собранного зерна, кг.

Затраты на топливо D_1 :

$$D_1 = (1 + k_{\text{смм}}) p_{\text{топ}} \sum_k^2 \sum_l^4 \sum_m^2 Q_{klm}, \quad (4)$$

где $k_{\text{смм}}$ – коэффициент использования смазочных материалов; $p_{\text{топ}}$ – стоимость топлива, у.е/кг; Q_{klm} – расход топлива, кг.

Расход топлива всеми тракторами и комбайнами Q_{klm} :

$$Q_{klm} = n_{\text{уч}} (N_{klm}^p g_{klm}^p \Delta t_{klm}^p + N_{klm}^{xx1} g_{klm}^{xx1} \Delta t_{klm}^{xx1} + N_{klm}^{xx2} g_{klm}^{xx2} \Delta t_{klm}^{xx2} + G_{\text{ост}} \Delta t_{klm}^{\text{ост}} + G_{\text{выгр}} \Delta t_{klm}^{\text{выгр}}), \quad m = 1, 2, \quad (5)$$

$$n_{\text{уч}} = \frac{S_0}{L_{\text{уч}} C_{\text{уч}}}, \quad (6)$$

$$G_{klm}^{\text{выгр}} = k_{klm}^{\text{выгр}} N_{\text{ном}}^m g_{\text{ном}}^m, \quad (7)$$

$$G_{klm}^{\text{ост}} = k_{klm}^{\text{ост}} N_{\text{ном}}^m g_{\text{ном}}^m, \quad (8)$$

$$\Delta t_{klm}^p = \frac{L_{\text{уч}} C_{\text{уч}}}{b_{klm} v_{klm}}, \quad (9)$$

$$\Delta t_{klm}^{xx1} = \frac{L_{klm}^{xx1}}{v_{klm}}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{klm}^{xx2} = \frac{L_{klm}^{xx2}}{v_{klm}}, \quad (11)$$

$$\Delta t_{klm}^{\text{ост}} = \Delta t_{klm}^{xx1, \text{ост}} \left(\frac{C_{\text{уч}}}{b_{klm}} - 1 \right) + \Delta t_{klm}^{xx2, \text{ост}}, \quad (12)$$

$$\Delta t_{klm}^{xxj, \text{ост}} = \Delta t_{1,klm}^{xxj} \frac{N_{\text{ном},klm}}{N_0} + \Delta t_{0,klm}^{xxj}, \quad i = 1, 2, \quad (13)$$

Каждый управляющий фактор имеет свой интервал варьирования, определяемый техническими и агротехнологическими требованиями, например:

$$N_{\text{ном}}^{\text{тр}} \in [N_1, N_2],$$

$$v_{111} \in [v_{111\text{min}}^{\text{арп}}, v_{111\text{max}}^{\text{арп}}],$$

$$\Delta t_{142} \in [\Delta t_{142\text{min}}^{\text{арп}}, \Delta t_{142\text{max}}^{\text{арп}}].$$

3. Многофакторное моделирование производства зерна. При моделировании сложной системы, каковой является производство зерна, используется большое число параметров. Для удобства работы с ними введем систему универсальной индексации (табл. 4).

$$\Delta t_{k42}^{\text{выгр}} = \Delta t_{\text{Б}} \frac{L_{\text{уч}} C_{\text{уч}} h_{k \max} (1 - \mu_k)}{V_{\text{Б}} \rho_k^{\text{зеп}}}, \quad (14)$$

$$\mu_k = 1 - (1 - \mu_k^{\text{т}}) \prod_{l=2}^4 (1 - \mu_{kl}), \mu_{k3} = 0, \quad (15)$$

где $n_{\text{уч}}$ – число участков; $L_{\text{уч}}$, $C_{\text{уч}}$ – длина и ширина одного участка соответственно, м; b_{klm} – ширина захвата, м; $N_{klm}^{\text{р}}$, N_{klm}^{xx1} , N_{klm}^{xx2} – мощность двигателей: в гоне, в поворотной полосе, при переезде с участка на участок соответственно, Вт; $g_{klm}^{\text{р}}$, g_{klm}^{xx1} , g_{klm}^{xx2} , $g_{\text{ном}}^{\text{м}}$ – удельный расход топлива: в гоне, в поворотной полосе, при переезде с участка на участок, при номинальном режиме работы двигателя, кг/Дж; $\Delta t_{klm}^{\text{р}}$, $\Delta t_{klm}^{\text{выгр}}$, $\Delta t_{klm}^{\text{xx1}}$, $\Delta t_{klm}^{\text{xx2}}$, $\Delta t_{klm}^{\text{ост}}$ – продолжительность работы на одном участке в гоне, при выгрузке зерна, в поворотной полосе, при переезде с участка на участок, при остановке на технологическое обслуживание соответственно, с; $G_{klm}^{\text{выгр}}$, $G_{klm}^{\text{ост}}$ – расход топлива при выгрузке зерна, при остановке на технологическое обслуживание соответственно, кг/с; $k_{klm}^{\text{выгр}}$, $k_{klm}^{\text{ост}}$ – топливный коэффициент двигателя при выгрузке зерна, при остановке на технологическое обслуживание соответственно; $\Delta t_{\text{Б}}$ – время разовой выгрузки зерна из бункера, с; μ_k , μ_{kl} – коэффициент потерь урожая; $\mu_k^{\text{т}}$ – коэффициент технологических потерь комбайна; $V_{\text{Б}}$ – емкость бункера комбайна, м³; $\rho_k^{\text{зеп}}$ – насыпная плотность собранного зерна, кг/м³; L_{xx1} , L_{xx2} – длина траектории: в поворотной полосе, при переезде с участка на участок соответственно, м; $\Delta t_{klm}^{\text{xx1.ост}}$, $\Delta t_{klm}^{\text{xx2.ост}}$ – время остановки на технологические цели: в поворотной полосе, при переезде с участка на участок соответственно, с; $\Delta t_{1,klm}^{\text{xx1}}$, $\Delta t_{1,klm}^{\text{xx2}}$, $\Delta t_{0,klm}^{\text{xx1}}$, $\Delta t_{0,klm}^{\text{xx2}}$ – константы, характеризующие специфику технологии, с; $N_0 = 1000$ Вт (для придания $N_{\text{ном}}/N_0$ безразмерного вида).

Выражение для D_1 получаем подстановкой уравнений (5)–(15) в формулу (4).

Затраты на труд D_2 :

$$D_2 = (1 + k_{\text{нак}}) \sum_k^2 \sum_l^4 \sum_m^2 n_{\text{см}} \Delta t_{\text{см}} \Delta t_{klm} n_m (p_m + p_m^{\text{вс}} k_{klm}^{\text{вс}}), \quad (16)$$

где n_m – количество энергомашин; $n_{\text{см}}$ – количество смен в день; $\Delta t_{\text{см}}$ – продолжительность смены, с/см; p_m , $p_m^{\text{вс}}$ – оплата труда механизатора и вспомогательных рабочих соответственно, у.е/с; $k_{klm}^{\text{вс}}$ – коэффициент вспомогательных рабочих.

Продолжительность операций Δt_{121} , Δt_{131} , Δt_{221} , Δt_{231} :

$$\Delta t_{klm} = \frac{(\Delta t_{klm}^{\text{р}} + \Delta t_{klm}^{\text{xx1}} + \Delta t_{klm}^{\text{xx2}} + \Delta t_{klm}^{\text{ост}} + \Delta t_{klm}^{\text{выгр}}) n_{\text{уч}}}{n_m n_{\text{см}} \Delta t_{\text{см}}}, \quad l = 2, 3; m = 1. \quad (17)$$

Количество тракторов, необходимых для вспашки под пшеницу, определяем по выражению

$$n_1 = \frac{n_{\text{уч}} (\Delta t_{111}^{\text{р}} + \Delta t_{111}^{\text{выгр}} + \Delta t_{111}^{\text{xx1}} + \Delta t_{111}^{\text{xx2}} + \Delta t_{111}^{\text{ост}})}{k_{\text{см}} n_{\text{см}} t_{\text{см}} \Delta t_{11}}. \quad (18)$$

Количество комбайнов, необходимых для уборки пшеницы и кукурузы, – по следующей формуле:

$$n_2 = n_{\text{уч}} \max \left(\frac{t_{142}^{\text{р}} + t_{142}^{\text{выгр}} + t_{142}^{\text{xx1}} + t_{142}^{\text{xx2}} + t_{142}^{\text{ост}}}{k_{\text{см}} n_{\text{см}} t_{\text{см}} \Delta t_{14}}, \frac{t_{242}^{\text{р}} + t_{242}^{\text{выгр}} + t_{242}^{\text{xx1}} + t_{242}^{\text{xx2}} + t_{242}^{\text{ост}}}{k_{\text{см}} n_{\text{см}} t_{\text{см}} \Delta t_{24}} \right). \quad (19)$$

Выражение для D_2 получается подстановкой уравнений (9)–(15) и (17)–(19) в формулу (16).

Затраты на амортизацию энерго- и сельхозмашин D_3 :

$$D_3 = \sum_m^2 n_m z_m C_m (1 + \xi_m) + \sum_m^2 \sum_k^2 \sum_l^4 n_m z_{klm}^{\text{схм}} c_{klm}^{\text{схм}} b_{klm} (1 + \xi_{klm}^{\text{схм}}), \quad (20)$$

где z_m , $z_{klm}^{\text{схм}}$ – коэффициент годовой амортизации энерго- и сельхозмашин; C_m – стоимость энергомашин, у.е.; $c_{klm}^{\text{схм}}$ – стоимость сельхозмашин, у.е/м; ξ_m , $\xi_{klm}^{\text{схм}}$ – коэффициенты затрат на ремонт и техобслуживание энерго- и сельхозмашин соответственно.

Выражение для D_3 получаем подстановкой уравнений (9)–(15) и (17)–(19) в формулу (20).

Выражение для D , получаемое подстановкой уравнений (9)–(20) в формулу (3), является функцией 8 управляющих факторов: $N_{\text{ном}}^{\text{тр}}$, $N_{\text{ном}}^{\text{км}}$, v_{111} , v_{142} , v_{242} , Δt_{111} , Δt_{142} , Δt_{242} .

Обобщенный объем собранного зерна M (пшеница и кукуруза):

$$M = S_0 h_{w_0}, \quad (21)$$

$$h_{w_0} = h_1 \frac{(1-w_1)}{(1-w_0)} + \theta h_2 \frac{(1-w_2)}{(1-w_0)}, \quad (22)$$

$$\theta = C_2 / C_1, \quad (23)$$

$$h_k = h_{k\max} (1 - \mu_k), \quad (24)$$

где h_{w_0} – обобщенная урожайность зерна (пшеница и кукуруза) при влажности длительного хранения w_0 , кг/м²; h_k – фактическая урожайность зерна при полевой влажности w_k , кг; C_k – стоимость зерна, у.е/кг.

Выражение для M , получаемое подстановкой уравнений (15) и (22)–(24) в формулу (21), является функцией 5 управляющих факторов: Δt_{111} , t_{142} , Δt_{142} , t_{242} , Δt_{242} .

Таким образом, математическая модель параметра оптимизации, μ представленная уравнениями (2)–(24), является функцией 10 управляющих факторов: $N_{\text{НОМ}}^{\text{ТР}}$, $N_{\text{НОМ}}^{\text{КМ}}$, v_{111} , v_{142} , v_{242} , Δt_{111} , t_{142} , Δt_{142} , t_{242} , Δt_{242} .

Моделирование параметра оптимизации $\mu = \mu(\bar{X})$:

$$\mu = 1 - \frac{h_1(1-w_1) + \theta h_2(1-w_2)}{h_{1\max}(1-w_1) + \theta h_{2\max}(1-w_2)}. \quad (25)$$

Таким образом, математическая модель параметра оптимизации μ , представленная уравнениями (15), (23), (24) и (25), является функцией 5 управляющих факторов: Δt_{111} , t_{142} , Δt_{142} , t_{242} , Δt_{242} .

Моделирование параметра оптимизации $W = W(\bar{X})$:

$$W = \frac{M}{Q_2}, \quad (26)$$

$$Q_2 = \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^4 \sum_{m=1}^2 Q_{2klm}, \quad (27)$$

$$Q_{2klm} = n_m \Delta t_{klm} + k_{klm}^{\text{BC}} n_m \Delta t_{klm}. \quad (28)$$

Таким образом, математическая модель параметра оптимизации W , представленная уравнениями (9)–(19), (26)–(28), является функцией 10 управляющих факторов: $N_{\text{НОМ}}^{\text{ТР}}$, $N_{\text{НОМ}}^{\text{КМ}}$, v_{111} , v_{142} , v_{242} , Δt_{111} , t_{142} , Δt_{142} , t_{242} , Δt_{242} .

При $l = 1, 2, 3$, $m = 1$ (трактор) для расчета параметров N_{klm}^{P} , N_{klm}^{XX1} , N_{klm}^{XX2} , b_{klm} , являющихся функциями от $N_{\text{НОМ}}^{\text{ТР}}$ и v_{klm} , следует использовать уравнение баланса мощности МТА [8–9]:

$$N_e^{\text{ТР}} = N_{\text{ТРМ}} + N_{\delta} + N_f + N_{\alpha} + N_{\text{кр}} + N_{\text{ВОМ}}, \quad (29)$$

$$N_{\text{ТРМ}} = (1 - \eta_{\text{МГ}}) N_{\text{НОМ}}^{\text{ТР}}, \quad (30)$$

$$N_{\delta} = \delta N_e^{\text{ТР}} \eta_{\text{МГ}}, \quad (31)$$

$$N_f = f_{\text{ТР}} v g (M_{\text{ТР}} + m_{\text{СХМ}} b), \quad (32)$$

$$N_{\alpha} = (M_{\text{ТР}} + m_{\text{СХМ}} b) v g \sin \alpha, \quad (33)$$

$$\begin{cases} \delta = \delta_{\max} \left[1 - (1 - F_{\text{к}} / F_{\text{кmax}})^m \right], \\ F_{\text{кmax}} = M_{\text{ТР}} g (\varphi_{\text{крmax}} + f_{\text{ТР.p}}), \\ F_{\text{к}} = N_e^{\text{ТР}} \eta_{\text{МГ}} (1 - \delta) / v, \end{cases} \quad (34)$$

$$N_{\text{кр}} = k_{0v} b v = k_0 [1 + \Delta_c (v - v_1)] b v. \quad (35)$$

$$N_{\text{ВОМ}} = k_{\text{ВОМ}} N_e^{\text{ТР}}, \quad (36)$$

где $N_e^{\text{ТР}}$, $N_{\text{ТРМ}}$, N_{δ} , N_f , N_{α} , $N_{\text{кр}}$, $N_{\text{ВОМ}}$ – мощность: эффективная двигателя трактора, на трансмиссию, буксование, качение, преодоление уклона, на крюке, на ВОМ соответственно, Вт; $\eta_{\text{МГ}}$ – механи-

ческий КПД трансмиссии; δ – коэффициент потерь мощности на буксование; F_k – тяговая сила трактора, Н; m – коэффициент; $\varphi_{кр\max}$ – коэффициент, равный отношению максимальной тяговой силы на крюке к весу трактора; $f_{тр}$ ($f_{тр,р}$, $f_{тр,хх1}$, $f_{тр,хх2}$) – коэффициент сопротивления качению (в загоне, поворотной полосе, при переезде с участка на участок соответственно); $M_{тр}$ – масса трактора, кг; $m_{схм}$ – удельная масса сельхозмашин, кг/м; $\gamma = 9,81$ м/с²; α – угол уклона местности, рад; k_{0v} – удельное сопротивление сельхозмашин при скорости v , Н/м; k_0 – удельное сопротивление сельхозмашины при скорости $v \leq v_1 = 1,4$ м/с, Н/м; Δ_c – темп нарастания удельного тягового сопротивления, с/м; $k_{вом}$ – коэффициент мощности на ВОМ.

Рабочая мощность в гоне N_{klm}^p :

$$N_{klm}^p = N_{ном}^{tp}, \quad l = 1, 2, 3; \quad m = 1. \quad (37)$$

Рабочая мощность в поворотной полосе и при переезде N_{klm}^{xxj} рассчитывается из уравнений (29)–(36), причем $N_e^{tp} = N_{klm}^{xxj}$, $\delta \approx 0$, $F_{оп} = 0$, $f_{тр} = f_{тр,ххj}$, $N_{кр} = 0$, $N_{вом} = 0$:

$$N_{klm}^{xxj} = (1 - \eta_{тр}^{мг}) N_{ном}^{tp} + (f_{кч}^{xxj} + \sin \alpha) (M_{тр} + m_{клм}^{схм} b_{клм}) g v_{клм}, \quad l = 1, 2, 3; \quad m = 1. \quad (38)$$

Параметр $b_{клм}$ рассчитывается из уравнений (29)–(36) при движении МТА в загоне, причем $N_e^{tp} = N_{ном}^{tp}$, $F_{оп} = m_{схм} b g$, $f_{тр} = f_{тр,р}$:

$$b_{клм} = \frac{(\eta_{тр}^{мг} - \delta_{клм} \eta_{тр}^{мг} - k_{клм}^{вом}) N_{ном}^{tp} - M_{тр} g v_{клм} (f_{тр,р} + \sin \alpha)}{\{f_{0клм} [1 + \Delta_{склм} (v_{клм} - v_0)] + m_{клм}^{схм} g \sin \alpha\} v_{клм}}, \quad l = 1, 2, 3; \quad m = 1. \quad (39)$$

При $l = 4$, $m = 2$ (комбайн) для представления $N_{клм}^p$, $N_{клм}^{xx1}$, $N_{клм}^{xx2}$, $b_{клм}$ функциями от $N_{ном}^{км}$ и $v_{клм}$ используется уравнение баланса мощности комбайна [9]:

$$N_e^{км} = \frac{M_3 g v (f_{кч} + \sin \alpha)}{\eta_{км}^{мг} \eta_{км}^{\delta} \eta_{км}^{пп} \eta_{км}^{гп}} + \frac{E_{уд} q_d (1 + k_{изм}) + E_{хх} q_n + k_{выгр} N_{ном}}{\eta_{км}^{вом}}, \quad (40)$$

$$M_3 = M_{кон} + V_{топ} \rho_{топ} / 2 + M_{кб} + V_{б} \rho_{зер} / 2 + m_{ж} b, \quad (41)$$

где $N_e^{км}$ – эффективная мощность комбайна, Вт; $\eta_{км}^{мг}$, $\eta_{км}^{\delta}$, $\eta_{км}^{пп}$, $\eta_{км}^{гп}$, $\eta_{км}^{вом}$ – КПД: трансмиссии ходовой части, буксования, клиноременного привода, гидропривода, ВОМ соответственно; M_3 , $M_{кон}$, $M_{зер}$, $M_{топ}$, $M_{кб}$ – масса эксплуатационная, конструкционная (без жатки), зерна в бункере (средняя), топлива в баке (средняя), комбайнера соответственно, кг; $V_{топ}$ – объем топливного бака, м³; $\rho_{топ}$ – плотность дизельного топлива, кг/м³; $m_{ж}$ – удельная масса жатки, кг/м; $f_{кч}$ – коэффициент сопротивления качению; $k_{изм}$ – коэффициент мощности измельчения; $E_{хх}$ – удельная энергия холостого хода механизмов, обеспечивающих технологический процесс, Дж/кг; $k_{выгр}$ – коэффициент мощности при выгрузке зерна из бункера.

Эффективная мощность двигателя комбайна при работе в гоне рассчитывается по уравнению (40), причем $N_e^{км} = N_{к42}^p$, $N_{выгр} = 0$, $f_{кч} = f_{кч,р}$:

$$N_{к42}^p = \frac{M_{к42} g f_{кч,р} v_{к42}}{\eta_{км}^{мг} \eta_{км}^{\delta} \eta_{км}^{пп} \eta_{км}^{гп}} + \frac{(1 + k_{изм}) E_{уд} q_k^d}{\eta_{км}^{вом}} + \frac{E_{кк} q_k^h}{\eta_{км}^{вом}}, \quad (42)$$

$$q_k^d = 0,6 a_k \left(1 + \eta \frac{h_{k4} - h_3}{h_3} \right) \left(1 + \frac{1}{\delta_k^c} \right) \left(1 - k_k^w (w_k - w_0) \right) q_n, \quad (43)$$

$$h_{k4} = h_{k\max} \prod_{l=1}^4 (1 - \mu_{kl}), \quad (44)$$

где δ_k^c – соломистость; q_k^d – допустимая пропускная способности комбайна, кг/с; a_k – коэффициент обмолачиваемости: $a_1 = 1$ (пшеница), $a_2 = 0,75$ (кукуруза); η – коэффициент для двухбарабанного молотильного аппарата $d = 0,27$; h_{k4} – урожайность зерна в поле при влажности w_k , кг/м²; q_n – номинальная пропускная способность молотильного аппарата при уборке эталонной пшеницы: $h_3 = 0,4$ кг/м², $\delta_k^c = 1,5$, $w_0 = 0,15$, кг/с; k_k^w – коэффициент влияния влажности; $h_{k\max}$ – урожайность при «идеальном» агропроцессе при влажности w_k , кг/м².

Мощность двигателя комбайна в поворотной полосе ($i = 1$) при переезде с участка на участок ($i = 2$) рассчитывается по уравнению (40), причем $N_e^{KM} = N_{xy}$, $N_{вом} = 0$:

$$N_{klm}^{xx_i} = \frac{M_{k42}^3 g_{kч}^{xx_i} v_{klm}}{\eta_{км}^{мг} \eta_{км}^{\delta} \eta_{км}^{рп} \eta_{км}^{гп}}, \quad l = 4, m = 2. \quad (45)$$

Ширину захвата жатки при уборке урожая определяли по такому выражению:

$$b_{klm} = \frac{q_k^{\Pi}}{v_{klm} h_k^w (1 + \delta_{klm}^c)}, \quad l = 4; m = 2. \quad (46)$$

Для расчета g_{klm}^p , $g_{klm}^{xx_1}$, $g_{klm}^{xx_2}$ воспользуемся уравнениями Лейдермана [10]:

$$g_e / g_{ном} = c_0 - c_0 (n/n_{ном}) + (n/n_{ном})^2, \quad (47)$$

$$N_e / N_{ном} = c_1 (n/n_{ном}) + (2 - c_1) (n/n_{ном})^2 - (n/n_{ном})^3, \quad (48)$$

где g_e – удельный расход топлива при мощности двигателя N_e , кг/Дж; c_0 , c_1 – константы для конкретной марки дизельного двигателя соответственно; n , $n_{ном}$ – угловая и номинальная угловая скорость коленчатого вала, с⁻¹; $N_{ном}$ – номинальная мощность двигателя, Вт; интервал варьирования $n/n_{ном} \in [0,3; 1,0]$.

Из уравнений (47) и (48) получаем

$$g_{мин} / g_{ном} = c_0 - c_0^2 / 4, \quad (49)$$

$$N_{g_{мин}} / N_{ном} = (4c_1c + 2(2 - c_1)c_0^2 - c_0^3) / 8. \quad (50)$$

Выражения (49) и (50) позволяют рассчитать значения c_0 , c_1 , используя паспортные данные $g_{мин}/g_{ном}$ и $N_{g_{мин}}/N_{ном}$. После этого уравнения (47) и (48) описывают зависимость $g_e/g_{ном} = g_e/g_{ном}(n/n_{ном})$ и $N_e/N_{ном} = N_e/N_{ном}(n/n_{ном})$ для конкретной линейки двигателей. Уравнения (47), (48) являются параметрическими. Исключая из них $n/n_{ном}$, методом МНК можно получить выражения $g_e = g_e(N_e)$ в явном виде, что позволяет рассчитать удельный расход топлива g_{klm}^p , $g_{klm}^{xx_1}$ и $g_{klm}^{xx_2}$ при известных значениях N_{klm}^p , $N_{klm}^{xx_1}$ и $N_{klm}^{xx_2}$.

4. Многокритериальная оптимизация (метод ϵ -ограничений [11]).

В качестве целевой функции выбран уровень удельных затрат:

$$\gamma(\bar{X}) \rightarrow \min. \quad (51)$$

На параметры оптимизации μ и W наложены следующие функциональные ограничения:

$$\mu(\bar{X}) \leq \mu_0, \quad W(\bar{X}) \geq W_0. \quad (52)$$

Кроме того, функциональные ограничения наложены на:

1) условие движения трактора [9, 10]:

$$\mu_{сц} M_{тр} g \geq f_{0klm} [1 + \Delta_{сklm} (v_{klm} - v_0)] b_{klm} + (f_{кч.р} + \sin \alpha) M_{тр} g; \quad (53)$$

2) экологическое требование для трактора:

$$\delta_{kl1} \leq \delta_0, \quad l = 1, 2, 3; \quad (54)$$

3) энергетическое требование для комбайна:

$$N_{142}^p \leq N_{ном}^{KM}, \quad (55)$$

$$N_{242}^p \leq N_{ном}^{KM}. \quad (56)$$

Факторные ограничения [12]:

$$N_1 \leq N_{ном}^{TP} \leq N_2, \quad (57)$$

$$N_3 \leq N_{ном}^{KM} \leq N_4, \quad (58)$$

$$(v_{klm})_{\min}^{\text{арп}} \leq v_{klm} \leq (v_{klm})_{\max}^{\text{арп}}, l = 1, 4, \quad (59)$$

$$t_{klm \min}^{\text{арп}} \leq t_{klm} \leq t_{klm \max}^{\text{арп}}, l = 1, 4, \quad (60)$$

$$\Delta t_{klm \min}^{\text{арп}} \leq \Delta t_{klm} \leq \Delta t_{klm \max}^{\text{арп}}, l = 1, 4; \quad (61)$$

4) условие выполнения годового цикла

$$t_{111} = t_{242} + \Delta t_{242} - \Delta t_0. \quad (62)$$

5. Исходные данные для оптимизации: агрофон среднего Китая: для вспашки – стерня, для посева кукурузы – стерня, глубина вспашки – 0,22 м; влажность земли – 0,22. Так как траектории движения трактора и комбайна в поворотной полосе оказывают влияние на энергетический и временной баланс, в качестве примера выбраны траектории, схемы которых представлены на рис. 2, 3.

Траектории движения трактора (см. рис. 2), часто применяемые в среднем Китае, зависят от соотношения $R_{\text{тр}}/b$: грибовидная с закрытой петлей ($b < 2R_{\text{тр}}$), беспетлевая круговая ($b = 2R_{\text{тр}}$), беспетлевая с линейным участком ($b > 2R_{text{тр}}$):

$$L_{klm}^{xx_1} = (\pi R_{\text{тр}} + |b_{klm} - 2R_{\text{тр}}| + L_{\text{тр}} + 2L_{\text{сц}}) \left(\frac{C_{\text{уч}}}{b_{klm}} - 1 \right), \quad l = 1, 2, 3; m = 1, \quad (63)$$

где $R_{\text{тр}}$ – радиус поворота трактора, м; $L_{\text{тр}}$, $L_{\text{сц}}$ – длина трактора и сцепки, м.

Траектория комбайна, представленная на рис. 3, описывается следующим уравнением:

$$L_{klm}^{xx_1} = [7R_{\text{км}}(\pi - 2) + 23b_{klm} + 7(L_{\text{км}} + 2L_{\text{ж}})] C_{\text{уч}} / (7b_{klm}), \quad l = 4; m = 2, \quad (64)$$

где $R_{\text{км}}$ – радиус поворота комбайна, м; $L_{\text{км}}$, $L_{\text{ж}}$ – длина комбайна и жатки, м.

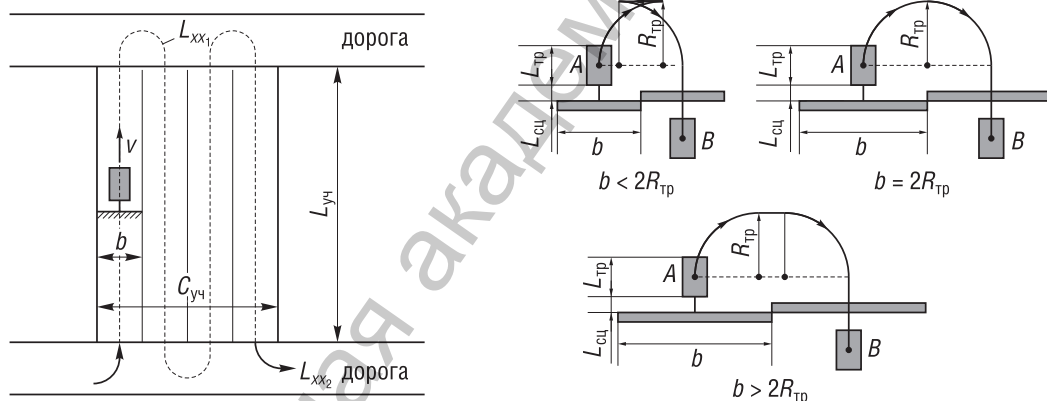


Рис. 2. Схема движения трактора в поворотной полосе

Fig. 2. Tractor headland movement pattern

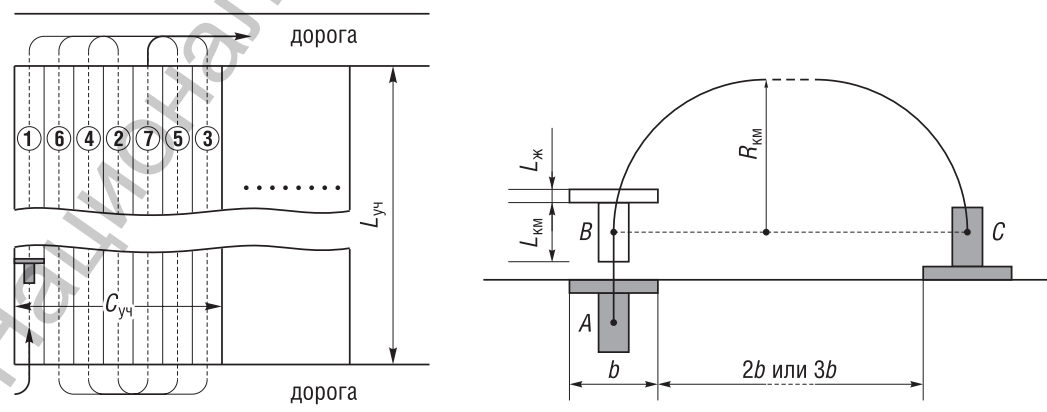


Рис. 3. Схема движения комбайна в поворотной полосе

Fig. 3. Combined harvester headland movement pattern

Таблица 5. Влияние сроков проведения сева и уборки пшеницы и кукурузы на их урожайность*

Table 5. Effect of wheat and corn sowing and harvesting timing on crop yield

Сев пшеницы			Уборка пшеницы			Сев кукурузы			Уборка кукурузы		
Дата сева	t_{12}	U_{12} , т/га	Дата уборки	t_{14}	U_{14} , т/га	Дата сева	t_{22}	U_{22} , т/га	Дата уборки	t_{14}	U_{24} , т/га
26 авг.	-20	3,24	27 мая	-8	4,16	26 мая	-15	6,78	15 Сен	-15	5,74
31 авг.	-15	3,92	29 мая	-6	4,49	31 мая	-10	6,90	20 Сен	-10	6,49
06 сен.	-10	4,48	31 мая	-4	4,76	05 июня	-5	6,97	25 Сен	-5	6,89
11 окт.	-5	4,86	2 июня	-2	4,93	10 июня	0	7,00	30 Сен	0	7,00
16 окт.	0	5,00	4 июня	0	5,00	15 июня	5	7,00	5 Ост	5	6,91
21 окт.	5	4,84	6 июня	2	4,93	20 июня	10	6,97	10 Ост	10	6,70
26 окт.	10	4,33	8 июня	4	4,69	25 июня	15	6,88	15 Ост	15	6,45
31 окт.	15	3,40	10 июня	6	4,26						
05 ноя.	20	2,00	12 июня	8	3,62						

*Задержка срока уборки одной из культур приводит к изменению срока посева другой, что, в свою очередь, отражается на урожайности обеих культур.

В табл. 5 приведены экспериментальные данные, отражающие влияние сроков операций на урожайность пшеницы и кукурузы [13, 16].

Банк данных, необходимых для оптимизации, приведен в табл. 6–11.

Структурные характеристики земельного участка, технологические и экономические параметры, характерные для среднего Китая, приведены в табл. 12–17.

На базе данных (см. табл. 6) методом МНК получена регрессионная зависимость коэффициента дифференциальных потерь в зависимости от даты проведения операции ψ с последующим расчетом коэффициента потерь урожая [17]:

$$\psi_{kl} = \alpha_{kl} t_{kl}^2 + \beta_{kl} t_{kl}^3, \quad (65)$$

$$\mu_{kl} = \int_{t_{kl}}^{t_{kl} + \Delta t_{kl}} \psi_{kl} = \alpha_{kl} \left(t_{kl}^2 + t_{kl} \Delta t_{kl} + \frac{(\Delta t_{kl})^2}{3} \right) + \beta_{kl} \left(t_{kl}^3 + \frac{3}{2} t_{kl}^2 \Delta t_{kl} + t_{kl} (\Delta t_{kl})^2 + \frac{(\Delta t_{kl})^3}{4} \right), \quad l = 2, 4, \quad (66)$$

t_{kl} – начало операции, дн (с); Δt_{kl} – продолжительность операции, дн (с); константы: $\alpha_{12} = 0,00119 \text{ дн}^{-2}$, $\beta_{12} = 0,0000154 \text{ дн}^{-3}$, $\alpha_{22} = 0,00016 \text{ дн}^{-2}$, $\beta_{22} = 0,000011 \text{ дн}^{-3}$, $\alpha_{14} = 0,00247 \text{ дн}^{-2}$, $\beta_{14} = 0,000099 \text{ дн}^{-3}$, $\alpha_{24} = 0,000376 \text{ дн}^{-2}$, $\beta_{14} = -0,000010 \text{ дн}^{-3}$.

Таблица 6. Техничко-экономические параметры тракторов торговой марки «БЕЛАРУС»

Table 6. Engineering and economic parameters of “BELARUS” make tractors

Марка трактора	$N_{\text{ном}}$, кВт	$R_{\text{тр}}$, м	$L_{\text{тр}}$, м	$M_{\text{тр}}$, т	$g_{\text{ном}}$, г/(кВт·ч)	$10^{-4} C_{\text{тр}}$, у.е.
«Беларус-892.2»	66	4,5	4,13	4,25	285	1,97
«Беларус-1021»	77	4,4	4,19	4,64	254	2,76
«Беларус-1221»	96	5,3	4,95	5,30	242	3,64
«Беларус-1523.3»	116	5,5	4,71	6,00	250	–
«Беларус-2022.3»	156	5,8	5,23	7,22	250	6,49
«Беларус-3022»	223	–	6,10	11,5	248	12,1
«Беларус-3522»	261	6,5	6,10	12,3	0,240	14,5

Источник: Универсально-пропашные тракторы Беларус МТЗ общего назначения (тягового класса 1,4–3,0) [Электронный ресурс] // Белтракт.ру. Режим доступа: <http://beltrakt.ru/traktory/universalnie-traktory/>. Дата доступа: 28.03.2019; Тракторы Минского тракторного завода [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://htz.ru/catalog/mtz/>. Дата доступа: 28.03.2019; Тракторы [Электронный ресурс] // Minsk Tractor Works. Режим доступа: <http://www.belarus-tractor.com/catalog/tractors/>. Дата доступа: 28.03.2019.

Для непрерывной оптимизации некоторые вспомогательные параметры, входящие в γ , W , μ (см. табл. 6, 7), были получены в виде регрессионных зависимостей от управляющих факторов $N_{\text{ном}}^{\text{тр}}$ и $N_{\text{ном}}^{\text{км}}$ методом МНК:

$$R_{\text{тр}} = k_{R_{\text{тр}}} \ln(N_{\text{ном}}^{\text{тр}}/N_0) + R_{\text{тр},0}, \quad R^2 = 0,96, \quad (67)$$

$$L_{\text{тр}} = k_{L_{\text{тр}}} \ln(N_{\text{ном}}^{\text{тр}}/N_0) + L_{\text{тр},0}, \quad R^2 = 0,97, \quad (68)$$

$$g_{\text{ном}} = k_{g_{\text{тр}}} N_0/N_{\text{ном}}^{\text{тр}} + g_{\text{ном},0}^{\text{тр}}, \quad R^2 = 0,54, \quad (69)$$

$$M_{\text{тр}} = k_{M_{\text{тр}}} N_{\text{ном}}^{\text{тр}}/N_0 + M_{\text{тр},0}, \quad R^2 = 0,98, \quad (70)$$

$$C_{\text{тр}} = k_{C_{\text{тр}}} N_{\text{ном}}^{\text{тр}}/N_0, \quad R^2 = 0,94, \quad (71)$$

$$q_{\text{н}} = k_q (N_{\text{ном}}^{\text{км}}/N_0) + q_0, \quad R^2 = 0,94, \quad (72)$$

$$R_{\text{км}} = k_{R_{\text{км}}} \ln(N_{\text{ном}}^{\text{км}}/N_0) + R_{\text{км},0}, \quad R^2 = 0,93, \quad (73)$$

$$g_{\text{ном}} = k_{g_{\text{км}}} (N_{\text{ном}}^{\text{км}}/N_0) + g_{\text{ном},0}^{\text{км}}, \quad R^2 = 0,78, \quad (74)$$

$$M_{\text{KM}} = k_{M_{\text{KM}}} (N_{\text{НОМ}}^{\text{KM}} / N_0) + M_{\text{KM},0}, \quad R^2 = 0,91, \quad (75)$$

$$C_{\text{KM}} = k_{C_{\text{KM}}} (N_{\text{НОМ}}^{\text{KM}} / N_0) + C_{\text{KM},0}, \quad R^2 = 0,97, \quad (76)$$

$$V_{\text{Б}} = k_{V_{\text{Б}}} \ln (N_{\text{НОМ}}^{\text{KM}} / N_0) + V_{\text{Б},0}, \quad R^2 = 0,91, \quad (77)$$

$$V_{\text{ТОП}} = k_{V_{\text{ТОП}}} \ln (N_{\text{НОМ}}^{\text{KM}} / N_0) + V_{\text{ТОП},0}, \quad R^2 = 0,95, \quad (78)$$

где $k_{R_{\text{ТР}}} = 1,55$ м; $R_{\text{ТР}} = -2,04$ м; $k_{L_{\text{ТР}}} = 1,55$ м; $L_{\text{ТР},0} = -2,43$ м; $k_{g_{\text{ТР}}} = 1,06 \cdot 10^{-6}$ кг/Дж; $g_{\text{НОМ},0}^{\text{ТР}} = 6,07 \cdot 10^{-8}$ кг/Дж; $k_{M_{\text{ТР}}} = 43,7$ кг; $M_{\text{ТР},0} = 1170$ кг; $k_{C_{\text{ТР}}} = 503$ у.е.; $k_q = 0,0393$ кг/с; $q_0 = 1,695$ кг/с; $k_{R_{\text{KM}}} = 2,91$ м; $R_{\text{KM},0} = -6,98$ м; $k_{g_{\text{KM}}} = -1,22 \cdot 10^{-11}$ кг/Дж; $g_{\text{НОМ},0}^{\text{KM}} = 6,29 \cdot 10^{-8}$ кг/Дж; $k_{M_{\text{KM}}} = 30,0$ кг; $M_{\text{KM},0} = 7300$ кг; $k_{C_{\text{KM}}} = 362,1$ у.е.; $C_{\text{KM},0} = 2,53 \cdot 10^4$ у.е.; $k_{V_{\text{Б}}} = 4,75$ м³; $V_{\text{Б},0} = -18,5$ м³; $k_{V_{\text{ТОП}}} = 0,432$ м³; $V_{\text{ТОП},0} = -1,74$ м³; $N_0 = 1000$ Вт (для придания $N_{\text{НОМ}}/N_0$ безразмерного вида); R^2 – коэффициент детерминации.

Т а б л и ц а 7. Техничко-экономические параметры комбайнов торговой марки «ПАЛЕССЕ»

Table 7. Engineering and economic parameters of “PALESSE” combined harvesters

Марка комбайна	$N_{\text{НОМ}}$, кВт	$q_{\text{н}}$, кг/с	$R_{\text{км}}$, м	$M_{\text{км}}$, т	$V_{\text{Б}}$, м ³	$V_{\text{ТОП}}$, м ³	$g_{\text{НОМ}}$, кг/кВт/ч	$10^{-4} C_{\text{км}}$, у.е.
«ПАЛЕССЕ GS575»	114	5	7,2	10,1	3,5	0,3	0,223	6,17
«ПАЛЕССЕ GS812»	169	8	7,5	12,0	5,5	0,5	0,217	9,46
«ПАЛЕССЕ GS10»	184	10	9,0	13,6	7	0,5	0,220	9,96
«ПАЛЕССЕ GS12A1»	243	12	8,6	14,4	8	0,6	0,212	13,1
«ПАЛЕССЕ GS14»	294	14	10,0	17,6	9	0,8	0,215	15,3
«ПАЛЕССЕ GS16»	390	16	10,0	18,1	9	0,8	0,210	18,1

Источник: Зерноуборочные комбайны [Электронный ресурс] // ГОМСЕЛЬМАШ. Режим доступа: <https://www.gomselmash.by/produktiya/zernouborochnye-kombainy/>. Дата доступа: 15.08.2019; Комбайн Палессе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tiu.ru/Kombajn-palesse-1.html>. Дата доступа: 15.08.2019.

Т а б л и ц а 8. Техничко-экономические константы тракторов торговой марки «БЕЛАРУС»

Table 8. Engineering and economic constants of “BELARUS” make tractors

$\eta_{\text{мг}}$	$\varphi_{\text{кр max}}$	δ_{max}	m	$\xi_{\text{тр}}$	$z_{\text{тр}}$	$k_{\text{смз}}$	$k_{\text{ном}}$	$L_{\text{сц}}$, м	$k_{\text{ост}}$	$\rho_{\text{топ}}$, кг/м ³
0,85	0,60	0,30	0,20	1,2	0,06	0,05	0	2,0	0,25	850

Источник: Тяговый расчет трактора : метод. указания / сост. Б. М. Тверсков ; Курган. гос. ун-т. Курган : КГУ, 2016. 27 с.

Т а б л и ц а 9. Технические константы двигателей трактора ММЗ с турбонаддувом и двигателей комбайна ЯМЗ с турбонаддувом

Table 9. Engineering constants of turbocharged engines of MMZ tractor and turbocharged engines of YMZ combined harvester

Марка двигателя трактора	$N_{g_{\text{мин}}} / N_{\text{ном}}$	$g_{\text{мин}} / g_{\text{ном}}$	ε	Марка двигателя	$N_{g_{\text{мин}}} / N_{\text{ном}}$	$g_{\text{мин}} / g_{\text{ном}}$	ε
Д-260.1, Д-260.2S2, Д-260.4S2	0,87	0,96	0,25	ЯМЗ	0,696	0,927	0,25

Источник: Трёхцилиндровый двигатель ММЗ-3LD [Электронный ресурс] // Минский моторный завод. Режим доступа: <http://www.po-mmz.minsk.by/catalogue/3>. Дата доступа: 26.03.2019; Двигатели ЯМЗ [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dvigateli-yamz.ru/katalog/yamz-850/yamz-856_10/yamz-e856_10/. Дата доступа: 15.08.2019.

Т а б л и ц а 10. Техничко-экономические константы комбайнов марки «ПАЛЕССЕ»

Table 10. Engineering and economic constants of “PALESSE” combined harvesters

$\eta_{\text{мг}}$	$\eta_{\text{б}}$	$\eta_{\text{рп}}$	$\eta_{\text{гп}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$\xi_{\text{км}}$	$z_{\text{км}}$	$k_1^{\text{изм}}$	$k_2^{\text{изм}}$	$E_{\text{сц}}$, Дж/кг	$E_{\text{уд}}$, Дж/кг	$L_{\text{км}}$, м	$L_{\text{ж}}$, м	$t_{\text{б}}$, с	$V_{\text{топ}}$, м ³	$k_{\text{выгр}}$
0,85	0,97	0,90	0,80	0,95	0,5	0,10	0,70	0,80	2750	7400	10,8	2	180	0,51	0,30

Источник: Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А. В. Новиков [и др.] ; ред. А. В. Новиков. Минск : БГАТУ, 2011. 408 с.

Т а б л и ц а 11. Техничко-экономические константы сельскохозяйственных машин белорусских производителей для производства зерна

Table 11. Engineering and economic constants of agricultural machines of Belarusian producers for grain production

Сельскохозяйственные машины	$m_{\text{схм}}$, кг/м	$c_{\text{схм}}^{\text{схм}}$, у.е/м	$\xi_{\text{схм}}^{\text{схм}}$	$\varepsilon_{\text{схм}}^{\text{схм}}$	$p_{\text{схм}}^{\text{схм}}$, у.е/м
Плуги	585	1500	0,8	0,125	1500
Сеялка пшеницы	500	1600	0,8	0,125	1600
Сеялка кукурузы	500	1600	0,8	0,125	1600
Разбрасыватель	485	1300	0,8	0,125	1300
Жатка для пшеницы	320	2000	1,8	0,125	1000
Жатка для кукурузы	350	2500	1,8	0,125	1300

Источник: Плуг ПЛН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://deal.by/Plug-pln.html>. Дата доступа: 28.03.2019;

Т а б л и ц а 12. Структурные константы земельного участка

Table 12. Structural constants of land plot

$L_{\text{уч}}$, м	$C_{\text{уч}}$, м	$L_{\text{хх2}}$, м	α , рад	μ	$f_{\text{тр,р}}$	$f_{\text{тр,хх1}}$	$f_{\text{тр,хх2}}$	$f_{0,111}$, N/м	$f_{0,121}$, N/м	$f_{0,131}$, N/м	$f_{0,221}$, N/м	$f_{0,231}$, N/м
400	200	500	0	0,7	0,10	0,08	0,06	11050	1200	400	1400	400

Источник: Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А. В. Новиков [и др.]; ред. А. В. Новиков. Минск : БГАТУ, 2011. 408 с.

Т а б л и ц а 13. Технологические константы при производстве зерна

Table 13. Engineering constants during grain production

$k_{\text{см}}$	$\Delta_{\text{с,111}}$, с/м	$\Delta_{\text{с,121}}$, с/м	$\Delta_{\text{с,131}}$, с/м	$\Delta_{\text{с,221}}$, с/м	$\Delta_{\text{с,231}}$, с/м	$t_{0,k/1}^{\text{хх1}}$, с	$t_{1,k/1}^{\text{хх1}}$, с	$t_{0,k/2}^{\text{хх2}}$, с	$t_{1,k/2}^{\text{хх2}}$, с	$t_{0,k/2}^{\text{хх2}}$, с	$t_{1,k/2}^{\text{хх2}}$, с
0,75	0,02	0,015	0,01	0,015	0,01	37	0,32	0	0	66	0,36

Источник: Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А. В. Новиков [и др.]; ред. А. В. Новиков. Минск : БГАТУ, 2011. 408 с.

Т а б л и ц а 14. Природно-производственные условия среднего Китая

Table 14. Natural and production conditions of Middle China

$P_{\text{топ}}$, у.ед/кг	$k_{\text{нак}}$	$n_{\text{всп}}$	p_1^1 , у.ед/с	p_1^0 , у.ед/с	p_2^1 , у.ед/с	p_2^0 , у.ед/с	$M_{\text{кв}}$, кг
1,0	0,35	0	$2,53 \cdot 10^{-6}$	$7,32 \cdot 10^{-4}$	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$6,94 \cdot 10^{-4}$	80

Источник: 原油价格指数 布伦特 [Crude Oil Price Index Brent] [Electronic resource] // Youjia.ChemCp.com. Mode of access: <http://youjia.chemcp.com/>. Дата доступа: 25.12.2019.

Т а б л и ц а 15. Агротехнологические данные среднего Китая

Table 15. Agro-engineering data of Middle China

Вид культуры	$h_{\text{макс}}$, т/га	$\delta_{\text{с}}$	w_k	w_0	μ_k^1	$\rho_{\text{ср}}$, т/м ³	C_k , у.ед./т
Пшеница ($k=1$)	5,0	1,04	0,22	0,15	0,015	0,70	300
Кукуруза ($k=2$)	7,0	1,00	0,25	0,15	0,015	0,71	250

Источник: 中国统计年鉴 [China Statistical Yearbook] [Electronic resource] // National Bureau of Statistics of China. Mode of access: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>. Date of access: 25.11.2019.

Т а б л и ц а 16. Агротехнологические требования для производства зерна

Table 16. Agro-engineering requirements for grain production

$v_{11\text{min}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{11\text{max}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{k2\text{min}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{k2\text{max}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{k3\text{min}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{k3\text{max}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{k4\text{min}}^{\text{агр}}$, м/с	$v_{k4\text{max}}^{\text{агр}}$, м/с
1,3	3,3	1,4	3,3	2,2	3,3	0,8	2,2
$t_{11\text{min}}^{\text{агр}}$, дн.	$t_{11\text{max}}^{\text{агр}}$, дн.	$\Delta t_{11\text{min}}^{\text{агр}}$, дн.	$\Delta t_{11\text{max}}^{\text{агр}}$, дн.	$t_{k4\text{min}}^{\text{агр}}$, дн.	$t_{k4\text{max}}^{\text{агр}}$, дн.	$\Delta t_{k4\text{min}}^{\text{агр}}$, дн.	$\Delta t_{k4\text{max}}^{\text{агр}}$, дн.
-15	15	0	30	-10	10	0	20

Источник: Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А. В. Новиков [и др.]; ред. А. В. Новиков. Минск : БГАТУ, 2011. 408 с.

Коэффициент $\delta_{\text{тр}}$ входит в уравнение (34) в неявном виде. По данным $\eta_{\text{трм}}$, $\varphi_{\text{кр max}}$, δ_{max} , m (см. табл. 8) была получена зависимость $\delta_{\text{тр}}$ от управляющих факторов $N_{\text{ном}}^{\text{тр}}$ и v в явном виде методом МНК [10]:

$$\delta_{\text{тр}} = \left[a_{\delta} \ln \left(\frac{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}}{N_0} \right) + b_{\delta} \right] \left(\frac{v}{v_0} \right)^c, \quad R^2 = 0,97, \quad (79)$$

где $a_{\delta} = 0,537$; $b_{\delta} = -1,48$; $c = -2,73$; $v_0 = 1$ м/с (для придания v/v_0 безразмерного вида).

Параметрические уравнения (47)–(50) на базе данных $N_{\text{гмин}}/N_{\text{ном}}$ и $g_{\text{мин}}/g_{\text{ном}}$ (см. табл. 9) методом МНК преобразованы в явную зависимость $g_e = g_e(N_e)$:

$$\frac{g_e}{g_{\text{ном}}} = 1,70 - 2,79 \left(\frac{N_e^{\text{тр}}}{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}} \right) + 5,25 \left(\frac{N_e^{\text{тр}}}{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}} \right)^2 - 5,53 \left(\frac{N_e^{\text{тр}}}{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}} \right)^3 + 2,37 \left(\frac{N_e^{\text{тр}}}{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}} \right)^4, \quad R^2 = 1,00 \text{ (трактор);} \quad (80)$$

$$g_e/g_{\text{ном}} = 1,257 - 0,976 \left(\frac{N_e^{\text{км}}}{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}} \right) + 0,718 \left(\frac{N_e^{\text{км}}}{N_{\text{ном}}^{\text{тр}}} \right)^2, \quad R^2 = 1,00 \text{ (комбайн).} \quad (81)$$

Уравнения (65)–(81) статистически значимы по критерию Фишера [18].

На базе уравнений (51)–(62), а также банка данных (см. табл. 5–17) проведена многокритериальная оптимизация с помощью компьютерной математической программы «Поиск решения» в MS Excel и получены следующие результаты.

1) Путём многофакторного моделирования и многокритериальной оптимизации разработан технологический процесс с соответствующими комплексом машин и оборудования для производства пшеницы и кукурузы на площади $S_0 = 2000$ га (250 участков по 400×200 м²) для среднего Китая (2 урожая в год) при функциональных ограничениях $\mu \leq 5\%$, $W \geq 5$ т/(чел·ч), параметры которого приведены в табл. 17, 18.

Т а б л и ц а 17. Результаты многокритериальной оптимизации отдельных операций

T a b l e 17. Results of multicriteria optimization of specific operations

Показатель	Операция	Пшеница	Кукуруза
Сроки	Вспашка	02.10 (14:00) – 19.10 (17:12)	–
	Сев	19.10 (17:12) – 21.10 (15:36)	08.06 (6:00) – 10.06 (9:22)
	Химизация	01.02; 15.03; 28.04 (по 9,5 ч)	03.07; 01.08; 20.08 (по 9,5 ч)
	Уборка	30.05 (15:36) – 07.06 (22:00)	20.09 (6:00) – 02.10 (14:00)
Скорость, м/с	Вспашка	2,1	–
	Сев	2,0	2,0
	Химизация	2,0	2,0
	Уборка	2,2	2,2
Ширина захвата, м	Вспашка	2,4	–
	Сев	19,1	16,3
	Химизация	68,4	68,4
	Уборка	8,8	5,5
Расход топлива, кг/т	Вспашка	1,41	–
	Сев	0,19	0,22
	Химизация	$0,07 \cdot 3 = 0,21$	$0,07 \cdot 3 = 0,21$
	Уборка	1,40	2,10
Затраты труда, чел-ч/т	Вспашка	0,10	–
	Сев	0,011	0,013
	Химизация	$0,004 \cdot 3 = 0,012$	$0,004 \cdot 3 = 0,012$
	Уборка	0,029	0,042
$q_{\text{д}}$, кг/с	Уборка	18,0	16,5

Т а б л и ц а 18. Результаты оптимизации технологического процесса производства зерна

Table 18. Results of improvement of grain production technological process

$\gamma_{\min}$, у.е./т	Затраты, у.е./т			μ	W , т/(чел·ч)	M , т	$N_{\text{ном}}^{\text{ком}}$, кВт	$n_{\text{тр}}$	$N_{\text{ном}}^{\text{ком}}$, кВт	q_n , кг/с	$n_{\text{км}}$
	топливо	труд	амортиз.								
28,7	6,0	0,7	22,0	0,05	5,0	$2,05 \cdot 10^4$	89	7,3	397	17,1	4,3
29,0	6,0	0,7	22,3	0,05	5,3	$2,05 \cdot 10^4$	101	7,0	390	17,1	4,0

Результаты оптимизации (см. табл. 18) показали, что годовой цикл выдержан полностью: 2 октября в 14:00 закончена уборка кукурузы, и тут же началась вспашка поля под озимую пшеницу. Кроме этого, в первом варианте оптимизации получилось 7,3 трактора и 4,3 комбайна. При повторной оптимизации, в которой выбрано целочисленное количество тракторов и комбайнов (7 и 4), при этом уровень удельных затрат вырос на 0,3 у.е/т, однако за счет этого производительность труда увеличилась на 0,3 т/(чел·ч).

2) Установлено, что при производстве зерна изменение параметров оптимизации γ и μ носит конфликтующий характер (рис. 4, участок $a-b$): уменьшение уровня удельных затрат γ возможно только за счет увеличения потерь урожая μ . Например, для участка $L_{\text{уч}} = 400$ м, $C_{\text{уч}} = 200$ м уменьшение γ с 33,4 до 27,0 у.е/т возможно только за счет увеличения μ от 3 до 9 % (рис. 4). Работа при $\mu > 13,7$ % бессмысленна, так как γ и μ не носят конфликтующий характер, и оба параметра ухудшаются (рис. 4, участок $b-v$).

3) Параметры γ и W также носят конфликтующий характер (рис. 5, участок $b-v$): увеличение производительности труда W возможно только за счет увеличения уровня удельных затрат γ . Например, для участка $L_{\text{уч}} = 400$ м, $C_{\text{уч}} = 200$ м увеличение W от 4 до 7 т/ч возможно только за счет роста $\gamma_{\min}$ от 28,5 до 30,0 у.е/т (см. рис. 5). Работа при $W < W_{\min}$ бессмысленна, так как уровень удельных затрат повышается, а производительность труда уменьшается (рис. 5, участок $a-b$).

До сих пор при расчете уровня удельных затрат были учтены затраты, связанные только с механизацией производства зерна. Для корректной оценки себестоимости зерна следует учесть затраты на транспортировку зерна в процессе уборки урожая, стоимость: семян, удобрений, воды, химикатов, производственных зданий. Поэтому общий уровень удельных затрат равен

$$\gamma_{\text{общ}} = \gamma + \frac{D_0}{M}, \quad (82)$$

где D_0 – затраты, независимые от средств механизации, у.е.;

$$D_0 = \delta_{\text{тр}} M + \phi S + \omega D_{\text{нед}}, \quad (83)$$

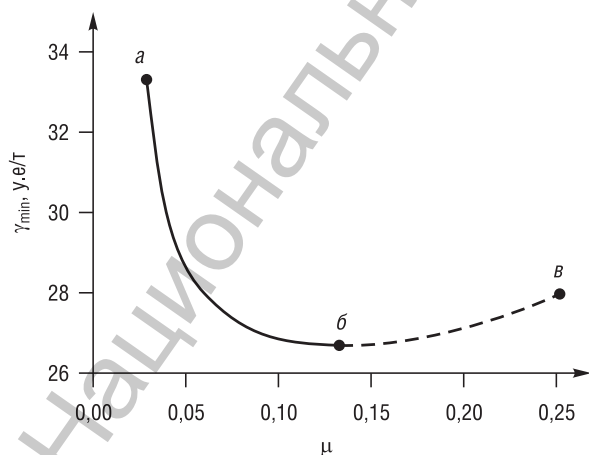


Рис. 4. Зависимость минимального уровня удельных затрат от потерь зерна

Fig. 4. Dependence of minimum level of unit costs on grain losses

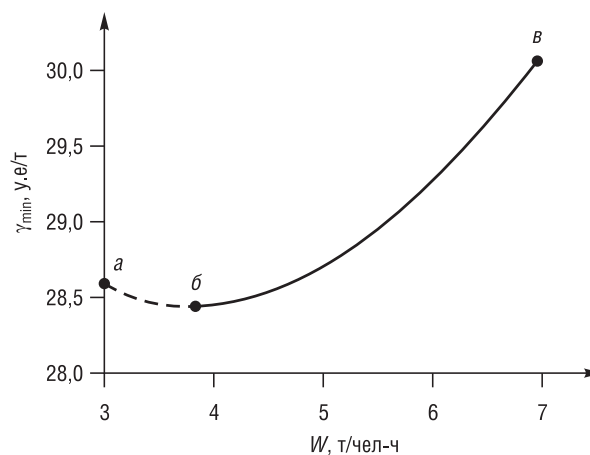


Рис. 5. Зависимость минимального уровня удельных затрат от производительности труда

Fig. 5. Dependence of minimum level of unit costs on labor efficiency

$$\phi = \sum_{k=1}^2 (A_{\text{сем } k} P_{\text{сем } k} + A_{\text{уд } k} P_{\text{уд } k} + A_{\text{хим } k} P_{\text{хим } k} + A_{\text{вод } k} P_{\text{вод } k}). \quad (84)$$

Здесь $\delta_{\text{тр}}$ – удельные затраты на транспортировку зерна (топливо, труд амортизации автомобилей), у.е/т; ϕ – удельные затраты на вспомогательные материалы (семена, удобрения, воду, химикаты), у.е/м²; ω – коэффициент годовой амортизации недвижимости (здание, земля); $D_{\text{нед}}$ – стоимость недвижимости, у.е.; $A_{\text{сем } k}$ – расход семян, кг/м²; $A_{\text{вод } k}$ – расход воды при производстве k -й культуры, м³/м²; $A_{\text{уд } k}$ – расход удобрений, кг/м²; $A_{\text{хим } k}$ – расход химикаты, кг/м²; $P_{\text{сем } k}$ – стоимость семена, долл/кг; $P_{\text{вод}}$ – стоимость воды, долл/м³; $P_{\text{уд } k}$ – стоимость удобрения, долл/кг; $P_{\text{хим } k}$ – стоимость химикатов, долл/кг.

Оценка затрат, не связанных с механизацией производства зерна, с учетом специфики среднего Китая (2 урожая в год) показала, что аренда автомобилей для транспортировки собранного урожая на элеватор составляет ≈ 15 у.е/т; затраты на семена ≈ 20 у.е/т; удобрения ≈ 70 у.е/т; воду ≈ 15 у.е/т; на химикаты $\approx 0,5$ у.е/т, амортизация зданий ≈ 5 у.е/т, соответственно, себестоимость зерна составит ≈ 155 у.е/т при $W \geq 5$ т/га и $\mu \leq 5\%$.

Выводы

1. Построена многофакторная математическая модель, описывающая взаимосвязь параметров оптимизации от управляющих факторов при производстве зерна, отличающаяся тем, что впервые взяты три группы одновременно варьируемых управляющих факторов (мощность двигателей энергомашин, скорость их движения, сроки выполнения основных энергоемких операций – вспашка, уборка) и комплекс конфликтующих между собой параметров оптимизации (уровень удельных затрат, коэффициент потерь, производительность труда), что позволяет всесторонне исследовать процесс производства зерна при любых природно-производственных условиях.

2. Для реализации непрерывной многокритериальной оптимизации были построены корреляционные уравнения, отражающие зависимость вспомогательных параметров от управляющих факторов: для тракторов и комбайнов – удельный расход топлива, масса, радиус поворота, длина, стоимость; для тракторов – коэффициент буксования; для комбайнов – пропускная способность, потери зерна от сроков выполнения операции.

3. Методом многокритериальной оптимизации найден оптимальный комплекс управляющих факторов, на основе которого разработан технологический процесс (скорость движения агрегатов и сроки проведения основных операций (вспашка, уборка)) и соответствующий комплекс машин и оборудования, обеспечивающие минимальный уровень удельных затрат при заданной величине потерь урожая и производительности труда с учетом специфики производства зерна среднего Китая (2 урожая в год).

4. Разработанная с помощью метода многофакторного моделирования и многокритериальной оптимизации теория позволяет изучать сложные технические системы, функционирование которых характеризуется большим объемом информации. Практическое значение данной теории заключается в решении народнохозяйственных задач, направленных на повышение рентабельности и конкурентоспособности сельскохозяйственной продукции.

Список использованных источников

1. Tang, Hua-Jun. Study on per capita grain demand based on Chinese reasonable dietary pattern / Hua-Jun Tang, Zhe-Min Li // *Scientia Agricultura Sinica*. – 2012. – Vol. 45, N 11. – P. 2315–2327. <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2012.11.022>
2. Zhu, Xianfeng. Grain production trend in China and the USA / Xianfeng Zhu, Chengfang Wu // *China Grain Economy*. – 2016. – N 9. – P. 36–39.
3. Hunt, D. Farm power and machinery management / D. Hunt. – 4th ed. – Ames : Iowa State Univ. Press, 1964. – 274 p.
4. Шило, И. Н. Особенности оптимизации состава технических средств для многоукладного сельского хозяйства / И. Н. Шило, Е. Г. Родов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомств. темат. сб. / Белорус. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва*. – Минск, 1996. – Вып. 35. – С. 9–17.
5. Шило, И. Н. Ресурсосберегающие технологии сельскохозяйственного производства / И. Н. Шило, В. Н. Дашков. – Минск : [б. и.], 2003. – 183 с.

6. Shepelev S., Shepelev V., Almetova Z. Optimization of technical equipment for crop sowing processes. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1258–1262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.142>
7. Zangiev A. A., Shpil'ko A. V., Glevshin A. G. *Maintenance of machine and tractor park*. Moscow, KolosS Publ., 2008. 318 p. (in Russian).
8. Савочкин, В. А. Тяговый расчет трактора / В. А. Савочкин ; Моск. гос. техн. ун-т «МАМИ». – М. : МГТУ «МАМИ», 2001. – 48 с.
9. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства : / А. В. Новиков [и др.] ; ред. А. В. Новиков. – Минск : БГАТУ, 2011. – 408 с.
10. Ли, Цинчжэнь. Определение номинальной мощности двигателя трактора и скорости МТА для выполнения конкретной операции с минимальным уровнем удельных затрат / Цинчжэнь Ли, А. Н. Леонов // *Агропанорама*. – 2019. – № 4 (134). – С. 26–32.
11. Sawaragi, Y. Theory of multiobjective optimization / Y. Sawaragi, T. Tanino, H. Nakayama. – Orlando : Academic Press, 1985. – 296 p. – (Mathematics in Science and Engineering ; vol. 176). [https://doi.org/10.1016/s0076-5392\(09\)x6017-0](https://doi.org/10.1016/s0076-5392(09)x6017-0)
12. Леонов, А. Н. Определение номинальной мощности двигателя комбайна и скорости его движения при уборке зерновых, обеспечивающих минимальный уровень удельных затрат при заданной производительности труда / А. Н. Леонов, Цинчжэнь Ли // *Агропанорама*. – 2019. – № 6 (136). – С. 10–18.
13. Effects of different sowing stage on yield of wheat with different sowing methods / Hong-yang Wang [et al.] // *Modern Agr. Science a. Technology*. – 2014. – N 24. – P. 11–12.
14. Wu, Zhong-liang. Effects of harvesting period on the yield of wheat / Zhong-liang Wu, Wei-qing Shen, Yin-lou Jiang // *J. of Anhui Agr. Sciences*. – 2016. – № 3. – P. 46–47.
15. Li, Yilong. Effects of harvesting period on the yield of corn / Yilong Li // *Modern Agr. Science a. Technology*. – 2017. – N 6. – P. 14–16. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5739.2017.06.010>
16. Affect of sowing date on yield and main characteristics of summer maize / Zhi-gang Tian [et al.] // *J. of Hebei Agr. Sciences*. – 2006. – Vol. 10, N 4. – P. 14–15. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1088-1631.2006.04.004>
17. Леонов, А. Н. Моделирование зависимости фактической урожайности зерновых от сроков посева и уборки / А. Н. Леонов, Цинчжэнь Ли // *Агропанорама*. – 2018. – № 4 (128). – С. 21–30.
18. Себер, Дж. А. Ф. Линейный регрессионный анализ / Дж. А. Ф. Себер ; пер. с англ. В. П. Носко ; под ред. М. Б. Малютова. – М. : Мир, 1980. – 456 с.

References

1. Tang Hua-Jun, Li Zhe-Min. 基于中国居民平衡膳食模式的人均粮食需求量研究 [Study on per capita grain demand based on Chinese reasonable dietary pattern]. *中国农业科学 = Scientia Agricultura Sinica*, 2012, vol. 45, no. 11, pp. 2315–2327 (in Chinese). <https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2012.11.022>
2. Zhu Xianfeng, Wu Chengfang. 从中美两国成本比较看我国粮食政策取向 [Grain production trend in China and the USA]. *中国粮食经济 = China Grain Economy*, 2016, no. 9, pp. 36–39 (in Chinese).
3. Hunt D. *Farm power and machinery management*. 4th ed. Ames, Iowa State University Press, 1964. 274 p.
4. Shilo I. N., Rodov E. G. Features of optimizing the composition of technical equipment for multi-structured agriculture. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhdovedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: an interdepartmental subject collection]. Minsk, 1996, iss. 35, pp. 9–17 (in Russian).
5. Shilo I. N., Dashkov V. N. *Resource-saving technologies of agricultural production*. Minsk, 2003. 183 p. (in Russian).
6. Shepelev S., Shepelev V., Almetova Z. Optimization of technical equipment for crop sowing processes. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1258–1262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.142>
7. Zangiev A. A., Shpil'ko A. V., Glevshin A. G. *Maintenance of machine and tractor park*. Moscow, KolosS Publ., 2008. 318 p. (in Russian).
8. Savochkin V. A. *Tractor traction calculation*. Moscow, Moscow State Technical University “MAMI”, 2001. 48 p. (in Russian).
9. Novikov A. V., Lyakhov A. P., Neparko T. A., Shilo I. N., Timoshenko V. Ya., Chebotarev V. P. (et al.). *Technical support for crop production*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2011. 408 p. (in Russian).
10. Li Qingzhen, Leonov A. N. Determination of the rated power of the tractor engine and the speed of the MTA to perform a specific operation with a minimum level of unit costs. *Agropanorama*, 2019, no. 4 (134), pp. 26–32 (in Russian).
11. Sawaragi Y., Tanino T., Nakayama H. *Theory of multiobjective optimization*. Orlando, Academic Press, 1985. 296 p. [https://doi.org/10.1016/s0076-5392\(09\)x6017-0](https://doi.org/10.1016/s0076-5392(09)x6017-0)
12. Leonov A. N., Li Qingzhen. Determination of the rated power of the combine engine and its speed when harvesting grain, providing a minimum level of unit costs at a given labor productivity. *Agropanorama*, 2019, no. 6 (136), pp. 10–18 (in Russian).
13. 播种方式和播期对小麦产量的影响 [Effects of different sowing stage on yield of wheat with different sowing methods]. *现代农业科技 = Modern Agricultural Science and Technology*, 2014, no. 24, pp. 11–12 (in Chinese).
14. Wu Zhong-liang, Shen Wei-qing, Jiang Yin-lou. 不同收割时期对小麦产量及千粒重的影响 [Effects of harvesting period on the yield of wheat]. *安徽农业科学 = Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, no. 3, pp. 46–47 (in Chinese).
15. Li, Yilong. 不同收获期对玉米产量的影响 [Effects of harvesting period on the yield of corn]. *现代农业科技 = Modern Agricultural Science and Technology*, 2017, no. 6, pp. 14–16 (in Chinese). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5739.2017.06.010>

16. Tian Zhi-gang, Tian Jun-qin, Cao Zhi-yan, Zhang Yao-hui. 播种期对夏玉米产量及主要性状的影响 [Affect of sowing date on yield and main characteristics of summer maize]. 河北农业科学 = *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2006, vol. 10, no. 4, pp. 14-15 (in Chinese). <https://doi.org/10.3969/j.issn.1088-1631.2006.04.004>
17. Leonov A. N., Li Qingzhen'. Modeling the dependence of actual grain yields on sowing and harvesting dates. *Agropanorama*, 2018, no. 4 (128), pp. 21-30 (in Russian).
18. Seber G. A. F. *Linear regression analysis*. New York, Wiley, 1977. 465 p.

Информация об авторах

Ли Цинчжэнь – аспирант, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь), Шихэзи университет, Шихэзи (ул. Северная, 4, 832003, Шихэзи, Китай). E-mail: 190570873@qq.com

Леонов Андрей Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры моделирования и проектирования, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lannik@rambler.ru

Information about authors

Qingzhen Li - Postgraduate Student. The Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus), Shihezi University (280 N 4th Rd, Shihezi, Xinjiang, China). E-mail: 190570873@qq.com

Andrey N. Leonov - D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99 Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Belarus). E-mail: lannik@rambler.ru