

Андрей ЕФРЕМОВ, Юлия БЕЛОЦКАЯ

*Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь
e-mail: efremov.kafei@gmail.com, yuliya.belotskaya@gmail.com*

УДК 338.43:631.1

<https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-10-65-81>

Эвристический алгоритм оптимизации выполнения комплекса механизированных работ в полеводстве в условиях цифровизации

В современных условиях обеспечение конкурентоспособности сельскохозяйственного производства невозможно без точной и научно обоснованной системы его организации, неотъемлемым элементом является планирование выполнения механизированных агротехнических работ. Модели оптимизации использования машинно-тракторного парка предприятия в полеводстве основаны на математическом аппарате линейного программирования и сильно упрощают действительность.

В данном исследовании рассмотрена возможность применения нелинейных моделей к решению задачи оптимального планирования проведения весенне-полевых работ.

Особое внимание уделено эвристическому алгоритму получения начального опорного плана, близкого к оптимальному, и целочисленного решения. Приведен пример расчетов по предлагаемой методике для конкретного агропромышленного предприятия. Описанный эвристический алгоритм может быть успешно применен на практике в оперативном-производственном планировании использования машинно-тракторного парка в полеводстве.

Ключевые слова: полеводство, цифровая трансформация АПК, машинно-тракторный парк, оптимизация агротехнических работ, механизированные работы, задача о составлении расписания, целочисленное программирование.

Andrei EFREMOV, Yulia BELOTSKAYA

*Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus
e-mail: efremov.kafei@gmail.com, yuliya.belotskaya@gmail.com*

Heuristic algorithm for optimizing the implementation of a complex of mechanized works in field farming in conditions of digitalization

In modern conditions, ensuring the competitiveness of agricultural production is impossible without an accurate and scientifically based system of organization of production, an integral element is planning the implementation of mechanized agricultural technical work. Models for optimizing the

use of the enterprise's machine and tractor fleet in field farming are based on the mathematical apparatus of linear programming and greatly simplify reality.

This study considers the possibility of using nonlinear models to solve the problem of optimal planning of spring-field work.

Particular attention is paid to the heuristic algorithm for obtaining an initial reference plan, close to the optimal, and an integer solution. An example of calculations according to the proposed method for a specific agroindustrial enterprise is given. The described heuristic algorithm can be successfully applied in practice in operational-production planning of the use of the available machine-tractor fleet in field farming.

Keywords: crop farming, digital transformation of the agroindustrial complex, machine and tractor fleet, optimization of agrotechnical works, mechanized work, problem of scheduling, integer programming.

Введение

На настоящем этапе развития АПК Республики Беларусь важнейшей задачей, стоящей перед сельскохозяйственными предприятиями, является повышение конкурентоспособности некоторых видов продукции и производства в целом. Решение невозможно без обеспечения стабильного и относительно низкого уровня затрат, что обуславливает необходимость рациональной и научно обоснованной организации производства.

В современных условиях хозяйствования подготовкой плана выполнения комплекса механизированных сельскохозяйственных работ занимаются специалисты предприятия (чаще всего эту функцию берут на себя агрономы). При этом их подавляющее большинство либо полагается на свой собственный профессиональный опыт, либо ограничивается методами «наивного» прогнозирования. Однако ответ на вопрос, какой трактор (комбайн) отправить на выполнение конкретной операции и сколько он должен на ней отработать при достаточно большом объеме работ и разнообразии состава машинно-тракторного парка (МТП) предприятия, не может быть получен без применения математических алгоритмов и средств компьютерного моделирования.

Основоположником задачи оптимизации выполнения комплекса механизированных работ в полеводстве считается Л. В. Канторович, который в начале 1960-х гг. разработал экономико-математическую модель, содержащую несколько тысяч переменных и ограничений. Решению данной научной проблемы посвящен целый ряд работ, в том числе отечественных ученых, в частности А. В. Ленского [1], А. С. Сайганова [2, 3], А. В. Новикова, Д. А. Жданко, Т. А. Непарко, А. М. Новика [4, 5] и др.

Однако в разработках этих и других авторов есть один серьезный недостаток – предложенные ими модели базируются на применении методов линейного программирования, что искусственно упрощает задачу и не всегда гарантирует результаты, приближенные к реальным условиям хозяйствования.

Кроме того, далеко не все модели обеспечивают получение целочисленного оптимального плана. Даже если отказаться от введения ограничения по цело-

численности некоторых переменных, возникает проблема округления, которая в описанных выше моделях не решена. Надо отметить, что округление в ту или иную сторону, особенно при малых значениях переменных, существенно влияет на величину целевой функции.

Таким образом, в данном исследовании мы ставим перед собой следующие задачи:

изучить нелинейную экономико-математическую модель оптимизации выполнения комплекса машинно-тракторных работ (МТР) в полеводстве;

выбрать наиболее подходящий инструмент для решения соответствующей задачи математического программирования;

разработать эвристический алгоритм, позволяющий получить близкий к оптимальному план выполнения МТР;

предложить механизм корректировки полученного решения с учетом ограничений целочисленности;

рассчитать примерную погрешность предлагаемой методики для конкретного комплекса агротехнических работ;

сделать выводы о возможностях практического применения предлагаемого эвристического алгоритма.

Материалы и методы

Исследование выполнено на приближенных к реальным условиям исходных данных о составе МТП аграрного предприятия, перечне весенне-полевых работ, нормах выработки машинно-тракторных агрегатов, нормативной себестоимости механизированных операций и принятых технологических регламентах выращивания сельскохозяйственных культур. Основой для построения авторского алгоритма послужил ряд научных статей и отчетов. В ходе исследования применялись как общенаучные (синтеза, анализа, сравнения и др.), так и специальные (линейного, целочисленного линейного и нелинейного программирования) методы.

Основная часть

Для демонстрации практического применения предлагаемого эвристического алгоритма сформулируем задачу нелинейной оптимизации для одной из отечественных сельскохозяйственных организаций Гродненской области. Предположим, что в рамках весенне-полевых работ МТП требуется выполнить ряд взаимосвязанных агротехнических операций по погрузке, транспортировке и внесению твердых минеральных удобрений под посевы озимого рапса (табл. 1). Для этого предполагается использовать имеющуюся в распоряжении рассматриваемого предприятия сельскохозяйственную технику (табл. 2).

Т а б л и ц а 1. Объем механизированных агротехнических операций

Агротехническая операция	Плановый объем работ (за смену)
Погрузка минеральных удобрений	2800 т
Транспортировка минеральных удобрений	2000 т
Внесение минеральных удобрений	300 га

Т а б л и ц а 2. Наличное количество сельскохозяйственной техники

Марка трактора (комбайна, погрузчика)	Количество техники, ед.
Амкодор	2
МТЗ-82	25
К-700	9
Atles 946 RZ+	1
ДТ-75	2
ТО18В	1
МТЗ-1221	15
МТЗ-1523	3
МТЗ-3022	5

В табл. 3 и 4 представлена исходная информация о нормативной выработке и себестоимости часа МТР соответственно. Источником указанных в табл. 1–4 данных являются первичные документы аграрного предприятия, в частности рабочий план проведения весенне-полевых работ, технологические карты возделывания озимого рапса, путевые листы механизаторов (форма № 501-АПК), утвержденные руководителем организации нормы производительности труда и расхода топлива на механизированных работах, а также отчет об основных средствах с указанием величины остаточной стоимости сельскохозяйственной техники и др.

Т а б л и ц а 3. Матрица часовой производительности

Марка сельскохозяйственной техники	Вид механизированных работ		
	погрузка минеральных удобрений, т/ч	транспортировка минеральных удобрений, т/ч	внесение минеральных удобрений, га/ч
Амкодор	25	38	15
МТЗ-82	26	34	9
К-700	24	35	11
Atles 946 RZ+	27	42	19
ДТ-75	24	32	10
ТО18В	23	33	11
МТЗ-1221	24	33	19
МТЗ-1523	23	32	12
МТЗ-3022	23	30	8

Т а б л и ц а 4. Матрица цен 1 ч работы, бел. руб.

Марка сельскохозяйственной техники	Вид механизированных работ		
	погрузка минеральных удобрений	транспортировка минеральных удобрений	внесение минеральных удобрений
Амкодор	6,82	7,26	9,98
МТЗ-82	6,60	7,53	7,32
К-700	6,62	7,75	7,98
Atles 946 RZ+	9,31	8,86	12,42
ДТ-75	7,82	7,82	10,18
ТО18В	5,61	8,02	10,44
МТЗ-1221	7,57	8,20	10,99
МТЗ-1523	8,00	7,42	11,80
МТЗ-3022	7,64	7,81	10,93

Математическая модель задачи

Рассмотрим оптимизационную задачу, экономическая постановка которой приведена выше.

Эндогенные переменные:

x_{ij} – число имеющихся у предприятия единиц сельскохозяйственной техники j -го наименования, назначенных на выполнение i -й агротехнической операции;

u_{ij} – фактическая продолжительность работы сельскохозяйственной техники j -го наименования, занятой на выполнении i -й агротехнической операции в течение рабочей смены (выражается в часах).

Экзогенные параметры:

N – число агротехнических операций, входящих в оптимизируемый комплекс работ;

M – количество наименований тракторов (комбайнов, погрузчиков), которые имеются в распоряжении сельскохозяйственной организации;

D – плановая продолжительность интервала времени, в течение которого требуется провести заданные МТР (выражается в рабочих сменах либо днях);

T_{\max} – верхний предел длительности рабочей смены, т. е. максимально допустимое время, которое в течение суток может быть отработано одним трактором либо комбайном (выражается в часах);

V_i – совокупный объем работ на выполнении i -й агротехнической операции (измеряется в т, га и т. п. в зависимости от специфики работ);

K_j – количество единиц сельскохозяйственной техники j -го наименования, имеющихся в распоряжении аграрного предприятия;

p_{ij} – часовая выработка сельскохозяйственной техники j -го наименования при выполнении i -й агротехнической операции;

c_{ij} – себестоимость одного часа работы сельскохозяйственной техники j -го наименования при выполнении i -й агротехнической операции.

Критерий оптимальности:

$F(x_{ij}, y_{ij})$ – суммарные издержки на выполнение заданного комплекса весенне-полевых работ (в белорусских рублях).

$$F(x_{ij}, y_{ij}) = D \cdot \sum_j \sum_i x_{ij} \cdot y_{ij} \cdot c_{ij} \rightarrow \min.$$

Ограничения:

по доступному для предприятия числу тракторов (комбайнов, погрузчиков):

$$\sum_i x_{ij} \leq K_j.$$

В любом временном интервале общее количество единиц сельскохозяйственной техники j -го наименования, работающих суммарно на выполнении всех МТР, не может быть больше, чем их списочное количество; продолжительности рабочей смены:

$$\sum_i y_{ij} \leq T_{\max}.$$

Количество часов, отработанных в течение дня каждым трактором (комбайном), не должно превышать нормативной длительности рабочей смены; выполнению запланированных объемов механизированных работ:

$$D \cdot \sum_j p_{ij} \cdot x_{ij} \cdot y_{ij} \geq V_i.$$

Суммарный объем механизированных работ, выполненных машинно-тракторными агрегатами, назначенными на определенную агротехническую операцию, обязан быть не меньше установленного планового задания (в этом случае предполагается, что ситуация, когда план перевыполнен, допустима, однако следует отметить, что этот факт не повлияет на итоговое решение оптимизационной задачи);

экономическому смыслу эндогенных переменных:

$$x_{ij} \in Z_+, \quad y_{ij} \in R_+.$$

Количество единиц сельскохозяйственной техники конкретного наименования, назначенных на выполнение каждой МТР, в итоге обязано быть целым и неотрицательным (отметим, что нулевое значение вполне правомочно). Фактическая длительность работы каждой единицы сельскохозяйственной техники конкретного наименования для любой МТР должна быть неотрицательной, но не обязательно выражаться целым числом.

Инструментальная реализация модели

Для обеспечения возможности применения изложенной выше экономико-математической модели необходимо разработать алгоритм получения ее численного решения. В этом аспекте есть ряд сдерживающих факторов, с которыми сталкивается исследователь либо специалист аграрного предприятия:

масштабность модели. Количество марок сельскохозяйственной техники и число позиций в перечне весенне-полевых (либо уборочных) работ, которые требуется выполнить на протяжении года, может быть очень большим. В то же время практически все пакеты прикладных программ (например, Ms Excel, GAMS, Matlab, AMPL), а в особенности их некоммерческие версии, имеют ограничения по размерности обрабатываемых данных (т. е. количество переменных и ограничительных условий строго лимитировано);

качество начального плана (перед запуском численного эксперимента требуется установить исходные значения эндогенных параметров).

Это особенно актуально для получения адекватных результатов по нелинейным моделям.

В некоторых случаях для построения начального плана используют информацию о выполнении аналогичного комплекса механизированных работ в прошлых периодах. Но следует отметить, что такой подход не всегда приемлем, потому что в очередном периоде производственные условия могут претерпеть существенные изменения. Тогда полученный указанным путем план может оказаться далеким от оптимального. Кроме того, нужных данных у сельскохозяйственной организации может не оказаться (например, если комплекс работ выполняется впервые) или же они могут быть неактуальными (в частности, по причине списания части основных средств либо закупки новой техники).

Таким образом, для корректного решения поставленной научно-практической задачи представляется необходимым разработать эвристический алгоритм нахождения начального плана, который был бы как можно ближе к глобальному экстремуму. При этом такой алгоритм в идеале не должен требовать привлечения дорогостоящего программного обеспечения в силу ограниченности финансовых возможностей отечественных аграрных предприятий и недостатка квалифицированных кадров, способных проводить необходимые аналитические расчеты. Следует понимать, что проектируемый эвристический алгоритм должен учитывать целый ряд практических нюансов реального производственного процесса в полеводстве. В этой связи с математической точки зрения в данном случае некорректно применять стандартные жадные алгоритмы, суть которых состоит в стремлении достичь экстремума на каждой итерации численного эксперимента для обеспечения оптимальности итогового решения. Несмотря на то что в настоящее время в научной литературе не предложен универсальный критерий для оценки результативности использования жадных алгоритмов для решения нелинейных оптимизационных задач, большинство специалистов

сходятся во мнении, что они не в состоянии гарантировать получение истинно оптимального значения целевой функции и оптимального плана по целому ряду задач теории расписаний [6, 7]. В то же время нельзя отрицать, что проектируемый эвристический алгоритм может носить итерационный характер.

Руководствуясь соображениями элементарной логики, можно заключить, что на первой итерации наиболее рационально использовать трактор (комбайн, погрузчик), обладающий минимальным значением себестоимости выполнения выбранной агротехнической операции. Но, как отмечено выше, было бы некорректно анализировать каждую МТР обособленно по причине того, что они являются элементами единого комплекса. Кроме того, при принятии решения о назначении сельскохозяйственной техники конкретного наименования на выполнение определенной МТР было бы некорректно не принимать во внимание выработку агрегатов, которая непосредственно участвует в вычислении левых частей ограничений оптимизационной задачи и косвенно влияет на итоговую сумму затрат на выполнение комплекса работ.

Рассмотрим ситуацию, когда относительно мощный трактор (с соответственно более высокой себестоимостью часа работы) способен завершить выполнение некоторой агротехнической операции хотя и с относительно немалыми издержками, но гораздо быстрее по сравнению с малопроизводительным трактором с недорогой себестоимостью работы. В этом случае на данной операции будет задействовано меньше единиц сельскохозяйственной техники, что обусловит сокращение суммарных затрат на комплекс операций.

Таким образом, на начальном этапе работы алгоритма предлагается для всех наименований сельскохозяйственной техники и каждой агротехнической операции рассчитать так называемый коэффициент предпочтительности назначения трактора (комбайна) j -й марки на i -ю МТР (далее – коэффициент предпочтительности) – k_{ij} .

Так как при поиске наиболее рационального плана назначений мы ставим перед собой цель минимизации суммарных издержек, можно сделать вывод, что коэффициент предпочтительности должен быть прямо пропорционален часовой выработке агрегатов (p_{ij}) и обратно пропорционален себестоимости часа работы сельскохозяйственной техники (c_{ij}):

$$k_{ij} \sim \frac{p_{ij}}{c_{ij}}.$$

Следует отметить, что имеется возможность установить наиболее подходящую единицу измерения для p_{ij} и c_{ij} . Так, единица измерения производительности для каждой МТР может быть своя – в соответствии с ее содержанием (т/ч, шт/ч, га/ч и т. д.), и это важно для реализации алгоритма на практике. С целью обеспечения корректной сопоставимости данных при применении экономико-

математических методов нередко используется переход к нормированным показателям. Тогда вычисление коэффициента предпочтительности можно рассчитать следующим образом:

$$k_{ij} = \frac{p_{ij}}{p_i} : \frac{c_{ij}}{c_i}.$$

Для отыскания близкого к оптимальному плану изложенной выше задачи необходимо использовать пошаговый алгоритм.

Этап 1. По результатам обработки данных, представленных в табл. 1–4, определяем элементы матрицы коэффициентов предпочтительности (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Матрица коэффициентов предпочтительности

Марка сельскохозяйственной техники	Коэффициент предпочтительности по операциям		
	погрузка минеральных удобрений	транспортировка минеральных удобрений	внесение минеральных удобрений
Амкодор	1,107	1,210	1,218
МТЗ-82	1,190	1,031	0,971
К-700	1,094	1,031	1,116
Atles 946 RZ+	0,876	1,082	1,238
ДТ-75	0,938	0,935	0,795
ТО18В	1,199	0,940	0,853
МТЗ-1221	0,957	0,919	1,392
МТЗ-1523	0,868	0,985	0,824
МТЗ-3022	0,908	0,877	0,593

Этап 2. Находим наибольший элемент матрицы $\|k_{ij}\|$. В нашем случае он равен $k_{i1j1} = 1,392$ и относится к назначению трактора МТЗ-1221 на операцию внесения минеральных удобрений.

Этап 3. Для выбранной марки трактора и МТР устанавливаем максимально допустимую длительность рабочей смены: в нашем случае она составляет 8 ч. Затем вычисляем необходимое число единиц техники, для чего предлагается использовать следующую формулу:

$$x_{i0j0} = \min \left\{ \left[\frac{V_i^{(0)}}{D \cdot p_{i0j0} \cdot T_{\max}} \right] + 1; K_j^{(0)} \right\}.$$

Суть данной формулы состоит в обеспечении целочисленности получаемого значения, причем округление в этом случае правильно проводить именно в большую сторону. Однако здесь же нужно проследить, чтобы расчетное

количество назначаемых на операцию единиц сельскохозяйственной техники данного наименования не превысило их списочную численность.

После этого следует уменьшить продолжительность смены до такого значения, при котором весь объем работ на данной сельскохозяйственной операции будет выполнен:

$$y_{i0j0} = \min \left\{ \frac{V_i^{(0)}}{D \cdot x_{i0j0} \cdot p_{i0j0}}; T_{\max} \right\}.$$

Данная формула принимает во внимание ограничение по длительности рабочей смены.

Этап 4. В данном случае возможно несколько вариантов дальнейших действий. Если $x_{i0j0} \cdot y_{i0j0} \cdot p_{i0j0} \cdot D = V_i$, то на этом следует завершить анализ i -й механизированной работы и перейти снова к этапу 2. Необходимо только из матрицы коэффициентов предпочтений предварительно удалить тот, который до этого был признан наибольшим, а также другие коэффициенты, которые расположены в той же строке. Кроме того, следует скорректировать текущее значение остаточного объема i -й механизированной работы с V_i на $V_i^{(1)} = 0$.

Если же $x_{i0j0} \cdot y_{i0j0} \cdot p_{i0j0} \cdot D < V_i$, то нужно повторно возвратиться к этапу 2 алгоритма, предварительно удалив тот коэффициент, который до этого был признан максимальным, и заменив текущее значение остаточного объема i -й механизированной работы с V_i на $V_i^{(1)} = V_i - x_{i0j0} \cdot y_{i0j0} \cdot p_{i0j0} \cdot D$.

После этого алгоритм повторяется до тех пор, пока на некотором m -м этапе не будет выполняться соотношение $V_1^{(m)} = V_2^{(m)} = \dots = V_N^{(m)}$.

В нашем случае на 1-м шаге имеем:

$$x_{i1j1} = \min \left\{ \left[\frac{300}{1 \cdot 18,9 \cdot 8} \right] + 1; 15 \right\} = 3;$$

$$y_{i1j1} = \min \left\{ \frac{300}{1 \cdot 3 \cdot 18,9}; 8 \right\} \approx 5,30 \text{ (ч)}.$$

Проверяем, полностью ли выполнена работа «внесение минеральных удобрений»: $3 \cdot 5,30 \cdot 18,9 \cdot 1 = 300$ – верно. Значит, на этом анализ данной операции завершен, поэтому исходную матрицу коэффициентов предпочтительности следует заменить редуцированной (табл. 6).

Также внесем изменения в другие переменные: $V_3^{(1)} = 0$ (га), $K_7^{(1)} = 15 - 3 = 12$.

Возвращаемся к этапу 2. Теперь наибольшим элементом является $k_{i2j2} = 1,21$. Это значение соответствует закреплению погрузчиков Амкодор за транспортировкой минеральных удобрений.

Т а б л и ц а 6. Редуцированная матрица коэффициентов предпочтительности

Марка сельскохозяйственной техники	Коэффициент предпочтительности по операциям	
	погрузка минеральных удобрений	транспортировка минеральных удобрений
Амкодор	1,107	1,210
МТЗ-82	1,190	1,031
К-700	1,094	1,031
Atles 946 RZ+	0,876	1,082
ДТ-75	0,938	0,935
ТО18В	1,199	0,940
МТЗ-1221	0,957	0,919
МТЗ-1523	0,868	0,985
МТЗ-3022	0,908	0,877

На 2-м шаге получаем:

$$x_{i_2 j_2} = \min \left\{ \left[\frac{2000}{1 \cdot 38,47 \cdot 8} \right] + 1; 2 \right\} = \min \{8; 2\} = 2;$$

$$y_{i_2 j_2} = \min \left\{ \frac{2000}{1 \cdot 2 \cdot 38,47}; 8 \right\} = 8 \text{ (ч)}.$$

Проверяем, полностью ли выполнена работа «транспортировка минеральных удобрений»: $2 \cdot 8 \cdot 38,47 \cdot 1 \approx 615,5 < 2000$. Значит, анализируемая операция выполнена не в полном объеме.

$$V_2^{(2)} = 2000 - 615,5 = 1384,5 \text{ (т); } K_1^{(2)} = 2 - 2 = 0.$$

Переходим к следующему шагу.

$k_{i_3 j_3} = 1,199$. Это значение соответствует закреплению тракторов ТО18В за погрузкой минеральных удобрений.

На 3-м шаге получаем:

$$x_{i_3 j_3} = \min \left\{ \left[\frac{2800}{1 \cdot 22,27 \cdot 8} \right] + 1; 1 \right\} = \min \{17; 1\} = 1;$$

$$y_{i_3 j_3} = \min \left\{ \frac{2800}{1 \cdot 1 \cdot 22,27}; 8 \right\} = 8 \text{ (ч)}.$$

Проверяем, полностью ли выполнена работа «погрузка минеральных удобрений»: $1 \cdot 8 \cdot 22,27 \cdot 1 \approx 178 < 2800$. Значит, анализируемая операция выполнена не в полном объеме.

$$V_1^{(3)} = 2800 - 178 = 2622 \text{ (т); } K_6^{(3)} = 1 - 1 = 0.$$

Переходим к следующему шагу.

Новое значение максимального коэффициента предпочтительности – $k_{i4j4} = 1,189$. Эта величина соответствует закреплению тракторов МТЗ-82 за погрузкой минеральных удобрений.

На 4-м шаге получаем:

$$x_{i4j4} = \min \left\{ \left[\frac{2622}{1 \cdot 26 \cdot 8} \right] + 1; 25 \right\} = \min \{14; 25\} = 14;$$

$$y_{i4j4} = \min \left\{ \frac{2622}{1 \cdot 14 \cdot 26}; 8 \right\} \approx 7,21 \text{ (ч)}.$$

Проверяем, полностью ли выполнена работа «погрузка минеральных удобрений»: $14 \cdot 7,21 \cdot 26 \cdot 1 = 2622 = V_1^{(3)}$. Значит, рассматриваемая операция выполнена полностью.

$$V_1^{(4)} = 0 \text{ (т); } K_2^{(4)} = 25 - 14 = 11.$$

Переходим к следующему шагу.

Прежде всего требуется понизить порядок матрицы коэффициентов предпочтительности (табл. 7).

Т а б л и ц а 7. Матрица коэффициентов предпочтительности на завершающем этапе

Марка сельскохозяйственной техники	Коэффициент предпочтительности при транспортировке минеральных удобрений
МТЗ-82	1,031
К-700	1,031
Atles 946 RZ+	1,082
ДТ-75	0,935
МТЗ-1221	0,919
МТЗ-1523	0,985
МТЗ-3022	0,877

Новое значение максимального коэффициента: $k_{i5j5} = 1,08$. Эта величина соответствует закреплению тракторов Atles 946 RZ+ за транспортировкой минеральных удобрений.

На 5-м шаге имеем:

$$x_{i5j5} = \min \left\{ \left[\frac{1384,5}{1 \cdot 42 \cdot 8} \right] + 1; 1 \right\} = \min \{6; 1\} = 1;$$

$$y_{i5,j5} = \min \left\{ \frac{1384,5}{1 \cdot 1 \cdot 42}; 8 \right\} = 8 \text{ (ч)}.$$

Проверяем, полностью ли выполнена работа «транспортировка минеральных удобрений»: $1 \cdot 8 \cdot 42 \cdot 1 = 336 < V_2^{(2)}$. Значит, анализируемая операция выполнена не в полном объеме.

$$V_2^{(5)} = 1384,5 - 336 = 1048,5 \text{ (т); } K_4^{(5)} = 1 - 1 = 0.$$

Переходим к очередному шагу.

Новое значение максимального коэффициента предпочтительности – $k_{i6,j6} \approx 1,03$. Это значение соответствует закреплению тракторов МТЗ-82 за транспортировкой минеральных удобрений.

На 6-м шаге имеем:

$$x_{i6,j6} = \min \left\{ \left\lceil \frac{1048,5}{1 \cdot 34 \cdot 8} \right\rceil + 1; 11 \right\} = \min \{5; 11\} = 5;$$

$$y_{i6,j6} = \min \left\{ \frac{1048,5}{1 \cdot 5 \cdot 34}; 8 \right\} \approx 6,18 \text{ (ч)}.$$

Проверяем, полностью ли выполнена работа «внесение минеральных удобрений»: $5 \cdot 6,18 \cdot 34 \cdot 1 = 1048,5 = V_2^{(5)}$. Значит, выполнение рассматриваемой операции завершено.

$$V_1^{(4)} = V_2^{(6)} = 0 \text{ (т), } V_3^{(1)} = 0 \text{ (га)}.$$

Таким образом, работа эвристического алгоритма закончена.

Агрегируем полученные результаты в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Оптимальные значения эндогенных переменных

Вид механизированных работ	Марка сельскохозяйственной техники	Количество техники, ед.	Объем выработки за смену, ч
Погрузка минеральных удобрений	ТО18В	1	8
	МТЗ-82	14	7
Транспортировка минеральных удобрений	Амкодор	2	8
	Atles 946 RZ+	1	8
	МТЗ-82	5	6
Внесение минеральных удобрений	МТЗ-1221	3	5

Рассчитаем значение целевой функции, которого удалось достичь в процессе эвристической оптимизации.

$$F(x_{ij}, y_{ij}) = D \cdot \sum_j \sum_i x_{ij} \cdot y_{ij} \cdot c_{ij} = 1 \cdot (1 \cdot 8 \cdot 5,61 + 14 \cdot 7,21 \cdot 6,60 + 2 \cdot 8 \cdot 7,26 + \\ + 1 \cdot 8 \cdot 8,86 + 5 \cdot 6,18 \cdot 7,53 + 3 \cdot 5,3 \cdot 10,99) \approx 1305,21 \text{ (бел. руб.)}.$$

Это и есть минимальная стоимость выполнения рассматриваемого комплекса работ.

В условиях интеллектуализации АПК Республики Беларусь и создания цифровой платформы национального аграрного сектора решение задач по управлению сельскохозяйственным производством должно перейти на качественно новый уровень. Речь идет уже не просто о широком применении компьютерных алгоритмов, численных методов и экономико-математического моделирования, а о поэтапном внедрении технологий искусственного интеллекта. Так, сегодня для составления оптимального варианта закрепления машинно-тракторных агрегатов за механизированными агротехническими операциями можно использовать прогрессивные прикладные пакеты, основанные на привлечении заранее обученных нейронных сетей для нахождения расписания, близкого к оптимальному [8, 9]. Одним из таких пакетов, хорошо зарекомендовавших себя при решении класса аналогичных задач, является Ruomo. Он построен на синтаксисе языка Python и позволяет уйти от классического способа решения, базирующегося на поиске строго оптимального с математической точки зрения варианта распределения техники. Вместо этого алгоритм осуществляет ограниченный перебор, руководствуясь результатами обучения специализированных искусственных нейронных сетей на других выборочных совокупностях. Такой подход позволяет при незначительной потере точности расчетов существенным образом экономить машинное время и память. Кроме того, важным преимуществом указанного инструментария является его принадлежность к технологиям open source – в противоположность программам-солверам (решателям оптимизационных задач), работа с коммерческими версиями которых часто обходится недешево.

Еще одним аспектом влияния цифровизации на организацию выполнения комплекса механизированных работ в полеводстве является автоматизация сбора исходных данных для решения оптимизационных задач, а также проверки первичных данных на наличие в них ошибок.

В дальнейшем интерес представляет разработка методик расчета нормативной производительности машинно-тракторных агрегатов и себестоимости часа МТР путем анализа ретроспективных статистических данных указанного предприятия и, что важно, – других аналогичных в отрасли [10]. В данном случае может возникнуть необходимость привлечения технологий анализа и хранения больших данных [11, 12].

Сравним результат эвристической оптимизации с тем, который можно получить с применением солвера GAMS 24.2.1 (сегодня является одним из самых совершенных средств автоматизированной оптимизации) (табл. 9).

Т а б л и ц а 9. Результаты решения оптимизационной задачи в пакете GAMS

Вид механизированных работ	Марка сельскохозяйственной техники	Количество техники, ед.	Время работы, ч
Погрузка минеральных удобрений	ТО18В	1	8
	МТЗ-82	13	7,76
Транспортировка минеральных удобрений	Амкодор	2	8
	Atles 946 RZ+	1	8
	МТЗ-82	12	2,57
Внесение минеральных удобрений	МТЗ-1221	2	7,94

П р и м е ч а н и е. Значение целевой функции – 1303,79 (бел. руб.).

Относительное отклонение стоимости комплекса агротехнических работ, найденной эвристическим путем, от оптимального значения по методу обобщенного приведенного градиента составило для данной задачи

$$\left| \frac{1305,21 - 1303,79}{1303,79} \right| 100\% \approx 0,11\%.$$

Такая низкая погрешность свидетельствует о достаточно высоком качестве предложенного эвристического алгоритма, а также о возможности его применения для решения данного класса оптимизационных задач.

Следует отметить, что в условиях цифровой трансформации обоснование и последующее принятие управленческих решений, связанных с организацией сельскохозяйственного производства, должно осуществляться с применением современных информационных технологий и компьютерных методов обработки данных [13].

Заключение

В результате исследования обоснован выбор наиболее рациональных методов и инструментов решения задачи оптимизации выполнения комплекса механизированных работ в полеводстве по критерию минимума суммарных приведенных затрат и предложен эвристический алгоритм, позволяющий за конечное число итераций получить без привлечения специализированного программного обеспечения достаточно близкое к оптимальному расписание МТП сельскохозяйственного предприятия. Представленный алгоритм апробирован на данных конкретного комплекса весенне-полевых работ.

Кроме того, изучены особенности оптимизации использования машинно-тракторных агрегатов в условиях цифровой трансформации бизнес-процессов в аграрном секторе, выделены проблемные аспекты, связанные с решением задачи обеспечения рационального с экономической точки зрения режима эксплуатации тракторов, комбайнов и других сельскохозяйственных машин при выполнении комплекса весенне-полевых работ.

Стоит отметить, что на современном этапе развития сельскохозяйственного производства для обеспечения эффективности и результативности принятия управленческих решений необходимо привлекать к этому процессу передовой опыт и прогрессивные информационные технологии. В этом ключе особую роль играют корпоративная культура обращения с данными и повышение уровня квалификации персонала аграрных предприятий.

ПРИМЕЧАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта БРФФИ Ф23НФ-017 «Математические модели и компьютерные технологии календарного планирования производства и энергетики в условиях экономической неопределенности».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ленский, А. В. Организационно-экономические основы развития машинно-технологических станций в АПК Республики Беларусь: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / А. В. Ленский; Гос. науч. учреждение «Ин-т аграр. экономики Нац. акад. наук Беларуси». – Минск, 2003. – 20 с.
2. Сайганов, А. С. Предпосылки и перспективы создания и функционирования машинно-технологических станций в Беларуси / А. С. Сайганов // Экономические проблемы агропромышленного комплекса: науч. тр. междунар. науч.-практ. конф., Минск, 15–16 окт. 1998 г. – Минск, 1999. – С. 257–261.
3. Сайганов, А. С. Механизм формирования и регулирования рынка производственно-технических услуг в районном звене АПК: монография / А. С. Сайганов, М. И. Белько; Акад. аграр. наук Респ. Беларусь, Белорус. науч.-исслед. ин-т экономики и информ. АПК. – Минск, 1998. – 53 с.
4. Новые подходы к разработке методики определения нормативов потребности в сельскохозяйственной технике [Оптимизация состава МТП Белоруссии] / А. В. Новиков [и др.] // Агропанорама. – 2019. – № 3. – С. 10–13.
5. Методики определения показателей состава и использования машинно-тракторного парка сельскохозяйственного предприятия / А. В. Новиков [и др.] // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–7 июня 2019 г. – Минск: Белорус. гос. аграр. техн. ун-т, 2019. – С. 222–230.
6. Бойков, В. А. О применении жадных алгоритмов в некоторых задачах дискретной математики / В. А. Бойков // Програм. продукты и системы. – 2019. – № 1. – С. 55–62.
7. Топка, В. В. Жадный алгоритм в календарном планировании инновационных проектов / В. В. Топка, А. Д. Цвиркун, Е. В. Юркевич // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): тр. 9-й Междунар. конф., М., 3–5 окт. 2016 г.: в 2 т. – М.: Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова РАН, 2016. – Т. 1. – С. 216–227.

8. Клишина, Ю. С. Решение оптимизационных задач на основе онтологий и нейросетей / Ю. С. Клишина, П. А. Колпаков, В. А. Мохов // Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике: материалы Междунар. молодеж. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 3–4 дек. 2018 г. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 27–30.

9. Нейросетевое управление ресурсами в структурном подразделении предприятия / Е. В. Долгова [и др.] // Приборы и системы. Упр., контроль, диагностика. – 2006. – № 7. – С. 61–66.

10. Ефремов, А. Проблемные аспекты определения технико-экономических показателей машинно-тракторного парка сельскохозяйственного предприятия / А. Ефремов // Аграр. экономика. – 2016. – № 4. – С. 39–43.

11. Тихонова, А. В. Системный подход к анализу больших данных АПК с использованием методов Data Science / А. В. Тихонова, А. И. Сидоров // Цифровые технологии анализа данных в сельском хозяйстве. – М.: Науч. консультант, 2022. – С. 179–210.

12. Лукина, И. В. Использование больших данных в АПК / И. В. Лукина, Н. Н. Белова, Т. П. Виеру // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 25 февр. 2022 г. – Чебоксары: Чуваш. гос. аграр. ун-т, 2022. – С. 415–420.

13. Ефремов, А. Обзор тенденций цифровой трансформации сельскохозяйственного производства / А. Ефремов, И. Ковалев // Аграр. экономика. – 2023. – № 1. – С. 50–57.

Поступила в редакцию 17.09.2023

Сведения об авторах

Ефремов Андрей Александрович – заведующий кафедрой экономической информатики, кандидат экономических наук, доцент;
Белоцкая Юлия Сергеевна – аспирант

Information about the authors

Efremov Andrei Aleksandrovich – Head of the Department of Economic Informatics, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor;
Belotskaya Yulia Sergeevna – Post-Graduate Student