УДК: 338.43+519.863+631.15
JEL-классификация: C61

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ В ПОЛЕВОДСТВЕ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕЕЗДОВ

Ефремов А.А., Белоцкая Ю.С., Матвейчук Н.М., Сотсков Ю.Н.

Ефремов Андрей Александрович (efremov.kafei@gmail.com), кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь).

Белоцкая Юлия Сергеевна (yuliya.belotskaya@gmail.com), аспирант, ассистент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, (г. Минск, Беларусь).

Матвейчук Наталья Михайловна (matsveichuk@tut.by), кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, Белорусский государственный аграрный технический университет, (г. Минск, Беларусь).

Сотсков Юрий Назарович (sotskov48@mail.ru), доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, (г. Минск, Беларусь).

Аннотация. Для аграрного сектора в Республике Беларусь характерны тенденции объединения и присоединения сельскохозяйственных предприятий. Это приводит к увеличению расстояний между местами базирования машинно-тракторных агрегатов и местами выполнения весенне-полевых и уборочных работ в полеводстве. Усиливается влияние транспортных затрат на себестоимость сельскохозяйственной продукции. Возникает необходимость в разработке методов поддержки принятия решений, позволяющих учитывать технологические переезды при выполнении агротехнических операций. В статье систематизированы подходы к решению возникающих проблем и представлена постановка задачи целочисленного линейного программирования для оптимизации работы машинно-тракторного парка, которая отличается от известных задач учетом мест базирования техники, участков выполнения механизированных работ и технологических переездов. Критерий оптимальности включает минимизацию совокупных затрат при выполнении машинно-тракторных работ с учетом расходов на приобретение дополнительной сельскохозяйственной техники для выполнения работ в установленные агрономические сроки.

Ключевые слова: математическое моделирование, оптимизация, целочисленное линейное программирование, сельское хозяйство, логистика.

Для цитирования: Ефремов, А. А. Оптимизация работы машинно-тракторных агрегатов в полеводстве с учетом технологических переездов / А. А. Ефремов, Ю. С. Белоцкая, Н. М. Матвейчук, Ю. Н. Сотсков // Экономика, моделирование, прогнозирование : сб. науч. тр. / НИЭИ Министерства экономики Республики Беларусь. – Мн., 2026. – Вып. 20. – С. 239–248.

Введение. В последние годы для аграрного сектора Республики Беларусь характерны тенденции объединения и присоединения сельскохозяйственных предприятий, что приводит к увеличению расстояний между местами базирования машинно-тракторных агрегатов и выполнения весенне-полевых и уборочных работ.

В результате таких изменений в аграрном секторе производства существенно возрастает влияние транспортных издержек на себестоимость сельскохозяйственной продукции и конкурентоспособность сельскохозяйственных предприятий. Возникает необходимость в разработке соответствующих моделей и методов поддержки принятия решений, позволяющих учитывать затраты на технологические переезды сельскохозяйственной техники при выполнении агротехнических операций.

Согласно распространенному определению, оптимизация планирования технологических переездов в сельском хозяйстве включает выбор маршрутов перемещения сельскохозяйственной

техники между обустроенными участками хранения и ремонта техники, между сельскохозяйственными полями, местами временного хранения техники и фермами. Перечисленные мероприятия и работы должны быть реализованы таким образом, чтобы по возможности минимизировать затраты на перемещение техники. Оптимальное планирование технологических переездов позволит сократить временные потери и материальные затраты сельскохозяйственных предприятий, что благотворно отразится на рентабельности сельскохозяйственного производства.

Математическая постановка задачи оптимизации выполнения необходимых агротехнических операций машинно-тракторными агрегатами (МТА) была сформулирована Л.В. Канторовичем в начале 1960-х годов. Предложенная модель[1] представляет собой задачу линейного программирования. Впоследствии было предложено множество модификаций базовой модели Канторовича [1–8].

Следует отметить, что и в настоящее время в научной литературе отсутствует единообразный подход к решению проблемы оптимизации логистики передвижения сельскохозяйственной техники при выполнении механизированных работ в полеводстве.

В оптимизационной задаче, рассматриваемой в статье, требуется минимизировать совокупные производственные затраты, необходимые для выполнения множества сельскохозяйственных механизированных работ. При этом производственные затраты зависят от количества агрегатов в составе основных машин и, возможно, дополнительных машин, которые должны обеспечивать своевременное выполнение запланированных объемов механизированных работ в полеводстве. Агрегаты и машины должны быть предназначены для выполнения конкретных операций в конкретные периоды времени.

Оптимизационная задача относится к классу задач теории расписаний и может быть представлена как задача оптимального назначения.

Обзор методов и опубликованных результатов

Согласно классификации, предложенной И.А. Колегаевым[2], методы планирования состава и использования МТА можно разделить на две основные группы: «традиционные», связанные с повышением эффективности календарных планов, происходящим в соответствии с графиками использования машин, агрегатов и рабочих; и «оптимизационные» методы, когда оптимизация календарных планов сводится к поиску оптимальных значений заданных критериев эффективности в рамках той или иной экономико-математической модели.

В ряде других публикаций принято выделять три группы методов, используемых для формирования оптимального расписания выполнения заданного множества механизированных работ. Первую группу образуют так называемые инженерные методы. На наш взгляд, такие методы не следует относить к оптимизационным методам, поскольку они, согласно общепринятой классификации, соответствуют «традиционным» методам (как правило, при этом используется изначально составленный календарный план распределения техники). Выбор агрегатов для выполнения механизированных работ, как правило, существенно зависит от квалификации лица, принимающего решение. Одна из наиболее часто используемых процедур распределения техники для выполнение производственных операций в инженерном методе основана на экспертных оценках.

[1] Канторович, Л. В. Оптимизационные задачи в условиях автоматизированных систем управления / Л. В. Канторович – М. : ЦЭМИ АН СССР, 1983. – 30 с. – (Препринт пленарного доклада на II конференции по оптимальному планированию и управлению народным хозяйством / ЦЭМИ АН СССР).

[2] Колегаев, И. А. Разработка принципов и обоснование параметров компьютерного моделирования вариантов использования машинно-тракторного парка сельскохозяйственного предприятия для целей оперативного управления технологическими процессами в растениеводстве : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Колегаев И. А.; Костромская гос. сельскохозяйственная академия. – Кострома, 2004. – 173 л.

Вторую группу составляют эвристические оптимизационные методы. Они основаны на эмпирических правилах, с помощью которых из исходного множества альтернативных сельскохозяйственных агрегатов, способных реализовать заданную совокупность операций, выбирается подмножество, определяющее минимальные интегральные затраты на выполнение всего множества запланированных работ. Такой подход показал удовлетворительное качество получаемых решений при сравнительно быстрой реализации соответствующих алгоритмов на ЭВМ. Недостатком таких методов является неустойчивость получаемого решения в случае варьирования исходных данных задачи, когда полученный состав комплекта агрегатов может существенно изменяться даже при незначительном изменении параметров целевой функции. Этот недостаток обусловлен сущностью эвристических алгоритмов, построенных на имитации ручных и, как правило, интуитивных процедур формирования базового состава машинно-тракторных агрегатов, а также необходимостью последующей корректировки полученного множества агрегатов.

Третья группа состоит из методов математического программирования. Особое место в этой группе занимают методы целочисленного линейного программирования. Дело в том, что при получении нецелочисленного результата его сложно применить для расчета реальной потребности предприятий в технике и для определения показателей формируемого комплекта агрегатов. Если в полученном решении количество техники оказалось равным, например, 3,75, такой результат можно трактовать и как 3, и как 4.

При округлении с избытком этот результат получается неоптимальным, поскольку способствует росту капитальных затрат и определяет неоправданное увеличение значения целевой функции. В случае округления количества техники с недостатком часть запланированных работ, производимая с использованием всей имеющейся техники, может оказаться невыполненной. Для преодоления возникающих проблем приходится либо корректировать сроки проведения запланированных работ, что не всегда возможно в связи с технологическими требованиями и условиями, либо включает во множество используемых агрегатов дополнительные альтернативную технику, агрегаты и машины, что зачастую становится неоптимальным в реальных производственных условиях.

Рассматриваемой проблематикой отечественные и зарубежные специалисты занимаются с 60-х годов прошлого столетия. При стремлении ученых максимально приблизить математические модели к реальным условиям хозяйствования в научной литературе наблюдается переход от методов линейного программирования к более сложным методам, причем каждое следующее поколение исследователей привносит в модели дополнительные ограничения и новые критерии оптимальности.

Интенсивное развитие компьютерных технологий позволило автоматизировать нахождение численных решений сложных по структуре и целевым функциям задач, в том числе оптимизационных задач большой размерности.

Значительный вклад в развитие рассматриваемой научной проблематики внесли белорусские ученые. В частности, И.И. Леньков [9] разработал усовершенствованную экономико-математическую модель оптимизации использования и доукомплектования машинно-тракторного парка сельхозпредприятий, учитывающую специфику отрасли, расстановку техники и комплектование агрегатов для максимизации экономического эффекта. Предложенная модель интегрируется в систему оптимизации агропромышленного комплекса района, обеспечивая согласование важных производственных параметров.

Оптимизацией технических параметров эксплуатации машинно-тракторных агрегатов в сельском хозяйстве занимались В.Р. Петровец и Н.В. Чайчиц [10]. Т. А. Непарко [11] предложила методику прогнозирования рационального состава МТА на основе многокритериального выбора и интегрального критерия «удаления от цели», минимизирующего затраты на ресурсы при

условии соблюдения агротехнических сроков. Предложенный метод позволяет моделировать обработку полей различными агрегатами, оценивая эффективность по использованию ресурсов времени, материалов, энергии и других затрат.

А. М. Каган и А. В. Колмыков [12] предложили формулу для расчета затрат на перегоны машинно-тракторных агрегатов в полеводстве, учитывающую объем выполненных механизированных работ, среднюю выработку, коэффициент сменности, количество переездов, а также формулу для определения потерь, связанных с непроизводительными затратами времени на технологические переезды.

Рассмотрим далее специфические характеристики основных подходов, предлагаемых российскими специалистами для решения рассматриваемых классов оптимизационных задач. В.А. Баришполец [13] вводит в научный оборот комплексы работ со стохастической структурой. Некоторые исследователи считают целесообразным вести учет надежности машинных агрегатов в виде заданной вероятности их поломки и выхода из строя. На основании введенных частных показателей выводится общая оценка надежности системы используемых машин. В статье [14] описано разработанное авторами программное средство мультиагентной генетической оптимизации выполнения комплекса взаимосвязанных работ.

В работе [15] авторы указывают на необходимость учета взаимозаменяемости исполнителей работ. В рассмотренном авторами случае – это агрегаты и обслуживающие их механизаторы. А. Ю. Егорова и В. М. Монтлевич [16] обратили внимание на возможность «дробления заданных работ», дополнив целевую функцию слагаемыми, представляющими собой функции штрафа за нарушение заданных директивных сроков начала выполнения отдельных работ, а также за отказ от выполнения некоторых работ и сокращение продолжительности некоторых из них.

В статье [17] описан программный комплекс оптимизации работ в растениеводстве, в котором помимо стандартных параметров учитываются расходы на ремонт и техническое обслуживание машин, на их страхование и хранение, а также на альтернативные издержки производства. С.В. Анисимова и И.Е. Денежкина [18] предложили использовать в качестве инструментария оптимизации состава машинно-тракторного парка математический аппарат динамического программирования.

Г.А. Иовлев и И.И. Голдина [19] предложили использовать для оптимального управления комплексом уборочных работ математический аппарат, основанный на теории вероятностей. В качестве ключевых были выделены следующие случайные показатели: время заполнения бункера, время ожидания выгрузки из бункера, время движения комбайна до места остановки (или стоянки). О.Б. Маций [20] предложил использовать для решения задачи об оптимальном назначении матрично-перестановочный подход, обеспечивающий возможность рекурсивного нахождения оптимальных решений. А.Ю. Воронов [21] разработал математическую модель оптимизации погрузочно-транспортных работ, в которой основной акцент сделан на учет простоев техники, а также на выявление зависимостей между продолжительностью смены, временем конкретного рейса, временем погрузки и иными параметрами на основе аппарата регрессионного анализа.

Представляет научный и практический интерес оценка эффективности календарного плана выполнения комплекса взаимосвязанных операций. В работе [22] для этих целей предложено использовать алгоритм Дейкстры. Ряд авторов предлагали использовать имитационное моделирование и рассматривали в качестве альтернативной целевой функции, например, минимизацию отклонений моментов окончания работ от заданных директивных сроков, минимизацию времени простоя исполнителей или минимизацию фронта выполняемых работ [23].

Укрупненный подход к оптимизации, предусматривающий объединение машинно-тракторных агрегатов в звенья, предложен в статье [24]. Ее авторами рассмотрены различные варианты

закрепления уборочно-транспортных звеньев за конкретными полями и построены графики потребностей в сельскохозяйственной технике для нескольких севооборотов.

В работе [25] авторы используют для оптимизации комплекса работ в аграрном производстве генетический алгоритм поиска вектора приоритетов. В статье [26] предложена модель, достаточно полно учитывающая человеческий фактор при выполнении заданного комплекса работ. В частности, в модель включены такие переменные, как степень соблюдения норм безопасности при выполнении работ, уровень концентрации сотрудников, а также степень их усталости и мотивации.

Математическая модель и задача составления расписания выполнения сельскохозяйственных работ с учетом затрат на переезды техники

Исходя из постановки оптимизационных задач, предложенных в статьях [27–29], представим экономико-математическую модель, учитывающую технологические переезды МТА и грузовых автомобилей от мест базирования техники к местам выполнения работ и обратно. Рассматриваемую технику будем представлять в виде одной из следующих возможных комбинаций:

а) трактор и сельскохозяйственная машина (плуг, борона, сеялка, разбрасыватель удобрений и т.п.);

б) комбайн (пригодный для выполнения уборочных операций);

в) грузовой автомобиль (для операций транспортировки семян и удобрений, а также для отвоза урожая от места уборки);

г) комбайн и специальная насадка (например, приспособление для уборки рапса).

Для упрощения моделирования в случаях б) и в) будем предполагать, что к автомобилю (либо комбайну) присоединяется специальный агрегат, количество единиц которого у рассматриваемого сельскохозяйственного предприятия достаточно велико.

Управляемые переменные: x_{ijkmpt} – количество МТА в составе трактора (или комбайна) марки j и сельхозмашины (орудия) марки k, которые базируются в пункте m и предназначены для выполнения механизированной работы i на поле p в день t;

L_{jm} – количество тракторов (комбайнов) марки j, которые базируются в пункте m;

R_{km} – количество сельхозмашин (орудий) марки k, которые базируются в пункте m;

L'_j – количество рекомендуемых к приобретению в плановом периоде тракторов (или комбайнов) марки j;

R'_k – количество рекомендуемых к приобретению в плановом периоде сельхозмашин (орудий) марки k.

Экзогенные переменные: τ – нормативная продолжительность рабочей смены, т.е. время, которое в течение дня может быть отработано одним МТА (это время определяется в часах);

V_{ip} – общий объем механизированных работ вида i, которые необходимо выполнить на поле p (объем работ определяется в соответствующих единицах измерения: т, га);

L_j – количество наличных тракторов (или комбайнов) марки j;

R_k – количество наличных сельхозмашин (орудий) марки k;

p_{ijkt} –производительность МТА в составе трактора (комбайна) марки j и сельхозмашины (орудия) марки k при выполнении механизированной работы i (индекс t в данном случае необходим для того, чтобы можно было обнулять производительность в те периоды времени, которые не входят в агротехнический срок рассматриваемой операции);

u_{ijk} –стоимость одного часа работы МТА в составе трактора (или комбайна) марки j и сельхозмашины (орудия) марки k при выполнении механизированной работы i;

C_j^L – затраты на приобретение трактора (или комбайна) марки j;

C_k^R – затраты на приобретение сельхозмашины (орудия) марки k;

T_j^L – нормативный срок эксплуатации трактора (или комбайна) марки j;

T_k^R – нормативный срок эксплуатации сельхозмашины (орудия) марки k;

s_{pm} – расстояние от места базирования машинно-тракторного агрегата в пункте m до поля p;

w_{jk} – затраты на 1 км перегона МТА в составе трактора (или комбайна) марки j и сельхозмашины (орудия) марки k (ден. ед./км);

v – усредненная нормативная скорость перегона машинно-тракторного агрегата от места базирования к местам выполнения работ и обратно (км/ч);

J – количество марок имеющихся в наличии тракторов (или комбайнов);

K – количество марок имеющихся в наличии сельхозмашин (орудий);

M – количество пунктов базирования МТА;

P – количество используемых полей;

I – количество видов механизированных работ;

T – количество дней в интервале планирования.

Целевая функция. Следующая функция $F\left(x_{ijkmpt}\right)$ определяет приведенные совокупные затраты на выполнение всего комплекса механизированных работ (в ден. ед.):

$$F=\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\sum_{p=1}^{P}\sum_{t=1}^{T}x_{ijkmpt}\cdot\left(u_{ijk}\cdot\left(\tau-\frac{2s_{pm}}{v}\right)+2s_{pm}\cdot w_{jk}\right)+\sum_{j=1}^{J}\left(\frac{C_j^L}{T_j^L}\cdot L_j'+\frac{C_k^R}{T_k^R}\cdot R_k'\right)\to\min, \quad (1)$$

$$i=1,\ldots,I,\quad j=1,\ldots,J,\quad k=1,\ldots,K,\quad m=1,\ldots,M,\quad p=1,\ldots,P,\quad t=1,\ldots,T.$$

Содержательный смысл критерия минимизации функции $F\left(x_{ijkmpt}\right)$ состоит в следующем: этот критерий включает, во-первых, затраты на выполнение машинно-тракторных работ с учетом потерь времени на переезды; во-вторых, этот критерий включает затраты на перегон техники (в частности, стоимость топлива, ГСМ и затраты на оплату труда водителей и механизаторов); в-третьих, этот критерий включает затраты на приобретение недостающего количества тракторов (комбайнов) и недостающих сельхозмашин (орудий).

Ограничения, учитываемые в экономико-математической модели

а) Ограничения по наличному количеству тракторов (и/или комбайнов):

$$\sum_{m=1}^{M}L_{jm}=L_j+L_j',\quad j=1,\ldots,J. \quad (2)$$

В каждый момент времени совокупное количество тракторов (комбайнов) марки j, размещенных одновременно во всех пунктах базирования и временного хранения техники, должно соответствовать их наличному количеству с учетом дополнительно приобретаемых единиц новой техники.

б) Ограничения по наличному количеству сельхозмашин (орудий):

$$\sum_{m=1}^{M}R_{km}=R_k+R_k',\quad k=1,\ldots,K. \quad (3)$$

В каждый момент времени совокупное количество сельхозмашин (орудий) марки k, размещенных одновременно во всех пунктах базирования и временного хранения техники, должно соответствовать их наличному количеству с учетом дополнительно приобретаемых единиц новой техники.

в) Ограничения по комплектованию МТА тракторами (и комбайнами):

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\sum_{p=1}^{P} x_{ijkmpt} \le L_{jm}, \quad j=1,\ldots, J, \quad m=1,\ldots,M, \quad t=1,\ldots,T. \tag{4}$$

Для любого временного периода должно выполняться следующее условие: из каждого m-го места базирования (или временного хранения) техники можно направить на выполнение механизированных работ МТА не более того количества тракторов (и комбайнов) соответствующей марки, которое имеется в данный момент времени в m-м месте базирования (или временного хранения) техники.

г) Ограничения по комплектованию МТА сельхозмашинами (орудиями):

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{p=1}^{P} x_{ijkmpt} \le R_{km}, \quad k=1,\ldots,K, \quad m=1,\ldots,M, \quad t=1,\ldots,T. \tag{5}$$

Для любого временного периода должно выполняться следующее условие: из каждого m-го места базирования (или временного хранения) техники можно направить на выполнение механизированных работ МТА не более того количества сельхозмашин (орудий) соответствующей марки, которое имеется в данный момент времени в m-м месте базирования (или временного хранения) техники.

д) Ограничения по выполнению плановых объемов отдельных агротехнических работ:

$$\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T} x_{ijkmpt} \cdot p_{ijkt} \ge V_{ip}, \quad i=1,\ldots,I, \quad p=1,\ldots,P. \tag{6}$$

Общий объем работ вида i, выполненных всеми МТА на поле p, должен быть не меньше запланированного объема работ (здесь предполагается, что превышение выполнения заданного плана работ теоретически возможно).

е) Ограничения по экономическому содержанию управляемых переменных:

$$x_{ijkmpt}, L_{jm}, R_{km}, L'_j, R'_k \in \mathbb{Z}_+,$$
$$i=1,\ldots,I, \quad j=1,\ldots, J, \quad k=1,\ldots,K, \quad m=1,\ldots,M, \quad p=1,\ldots,P, \quad t=1,\ldots,T.$$

Таким образом, количество МТА, а также тракторов (комбайнов) и сельхозмашин (сельхозорудий) должно выражаться целым неотрицательным числом. Отметим, что нулевые значения количества машинно-тракторных агрегатов также допускаются.

В представленной постановке задача выбора расписания с учетом затрат на логистику может быть решена средствами специализированных программ-солверов (Gurobi / cbc / CPLEX) либо с применением технологий языка Python (Фреймворк Pyomo). В последнем случае за счет привлечения аппарата предварительно обученных нейросетевых моделей решение задачи может быть получено даже при достаточно большом количестве необходимых для этого вычислительных мощностей.

Обсуждение результатов. Предложенное развитие и обобщение задачи оптимального распределения МТА по механизированным операциям в полеводстве позволяет осуществлять поддержку принятия управленческих решений оперативно-производственного и тактического уровня в части определения оптимального расписания выполнения машинно-тракторных работ, распределения МТА между пунктами базирования техники и приобретения необходимой техники.

В ходе компьютерной реализации представленной выше экономико-математической модели и соответствующего алгоритма могут быть получены следующие результаты.

Во-первых, можно получить распределение имеющейся в распоряжении аграрного предприятия техники между пунктами базирования. Например, если у хозяйства есть два меха-

низированных двора, то модель может определить, где и какие трактора, комбайны, грузовые автомобили и т.п. следует разместить с целью минимизирования затрат на предстоящие технологические переезды. Допустим, из наличных 8 единиц самоходных опрыскивателей ROSA алгоритм может рекомендовать три самоходных опрыскивателя отправить базироваться на механизированном дворе № 1 и пять – на механизированном дворе № 2.

Во-вторых, можно получить расписание выполнения механизированных работ на конкретный рабочий день. Например, 10 сентября агрегат в составе МТЗ-3022 и КШП-10 направляется из механизированного двора № 2 на определенное поле (модель указывает его номер) для выполнения культивации сельскохозяйственной культуры, которая по планам агронома будет там высеваться (предположим, озимая тритикале).

В-третьих, можно получить перспективный план пополнения МТП аграрного предприятия новой техникой. Например, если модель выявит недостаток производственных мощностей на операции «вспашка», то для выполнения всего комплекса весенне-полевых работ в заданные сроки хозяйству будет рекомендовано приобрести в дополнение к имеющимся плугам некоторое количество новых единиц (предположим, два плуга ППО-8-40К).

Заключение. В данной статье систематизированы различные методы и подходы к решению задач оптимизации работы машинно-тракторного парка. Представлена математическая постановка задачи целочисленного линейного программирования для оптимизации работы машинно-тракторного парка, которая отличается от известных постановок аналогичных задач учетом мест базирования техники, участков выполнения механизированных работ и необходимых технологических переездов техники.

В качестве критерия оптимальности предложено использовать совокупные приведенные затраты на выполнение комплекса машинно-тракторных работ в полеводстве с учетом расходов на приобретение недостающей сельскохозяйственной техники для соблюдения установленных технологических сроков выполнения запланированных работ.

Предложенную в статье модель планируется апробировать на реальном сельхозпредприятии с целью поддержки принятия решений, позволяющих учитывать затраты на технологические переезды сельскохозяйственной техники при выполнении агротехнических работ и операций в установленные агротехнические сроки.

В качестве перспективного направления развития представленных в статье исследований предложенную постановку задачи можно дополнить учетом расстояний, необходимых для перемещения техники непосредственно по сельскохозяйственному полю.

Также можно принимать во внимание дополнительные второстепенные факторы, такие как рельеф поля, засоренность посевов, каменистость поля, типы дорожного покрытия, дифференциацию урожайности от одного поля к другому и вариацию скорости движения техники в зависимости от загруженности прицепа (и кузова).

Интерес для дальнейших исследований представляют нелинейная и негладкая модификации приведенной выше постановки оптимизационной задачи. В частности, нелинейность целевой функции может возникать при рассмотрении продолжительности смены как вариабельной величины. Негладкая модификация целевой функции может возникать при рассмотрении особых условий работы МТА (например, целесообразно учитывать сверхурочные смены механизаторов, которые оплачиваются повышенным тарифом оплаты труда) либо при рассмотрении случая недовыполнения заданного плана сельскохозяйственных работ.

Заслуживает внимания возможность решения представленной в статье оптимизационной задачи методом имитационного (стохастического) моделирования с последующим анализом устойчивости и чувствительности получаемых расписаний выполнения запланированных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барам, Х. Г. 1970. Научные основы технического нормирования механизированных полевых работ / Х. Г. Барам. – М. : Колос, 1970. – 440 с.

2. Гатаулин, А. М. 1990. Математическое моделирование экономических процессов в сельском хозяйстве : учебник по экономической специальности / А. М. Гатаулин, Г. В. Гаврилов, Т. М. Сорокина, А. И. Филатов ; под ред. А. М. Гатаулина. – М. : Агропромиздат, 1990. – 432 с.

3. Качанова, Л. С. 2006. Оптимизация машинно-тракторного парка сельскохозяйственного предприятия : методические рекомендации / Л. С. Качанова. – М. : МГАУ, 2006. – 46 с.

4. Бородина, Е. Н. Оптимизация состава машинно-тракторного парка крестьянских (фермерских) хозяйств и доли услуг сторонних организаций / Е. Н. Бородина, Ю. О. Горячев // Междунар. техн.-экон. журн. – 2011. – № 1. – С. 11–17.

5. Валге, А. М. Выбор рационального состава машинно-тракторного парка с использованием СУБД / А. М. Валге, Ю. Г. Артемьев, Э. А. Папушин // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства : сб. науч. тр. / ГНУ СЗНИИМЭСХ. – Санкт-Петербург, 2013. – Вып. 84. – С. 36–42.

6. Кушнарев, Л. И. Результаты оптимизации машинно-тракторного парка хозяйств и машинно-технологических станций / Л. И. Кушнарев, В. Б. Дзуганов, А. В. Дзуганов // Междунар. науч. журн. – 2013. – № 4. – С. 13–18.

7. Раднаев, Д. Н. Моделирование в оптимизации машинно-тракторного парка / Д. Н. Раднаев, Б. Д. Докин, С. Н. Прокопьев // Вес. Бурятской гос. с.-х. акад. им. В.Р. Филиппова. – 2013. – № 3(32). – С. 65–70.

8. Зуев, Н. А. 2016. Современные представления об оптимизации состава машинно-тракторного парка (МТП) сельскохозяйственных организаций / Н. А. Зуев, Б. Д. Докин // Состояние и инновации техн. сервиса машин и оборудования : материалы VIII региональной науч.-практ. конференции студентов и аспирантов, посвященной 80-летию НГАУ-НСХИ, Новосибирск, 10–11 ноября 2016 г. / Новосибирский гос. ун-т. – Новосибирск, 2016. – С. 16–19.

9. Леньков, И. И. Экономико-математическое моделирование экономических систем и процессов в сельском хозяйстве / И. И. Леньков. – Мн. : Дизайн ПРО, 1997. – 304 с.

10. Петровец, В. Р. Сельскохозяйственные машины : учеб. пособие / В. Р. Петровец, Н. В. Чайчиц. – Мн. : Ураджай, 2003. – 202 с.

11. Непарко, Т. А. Прогнозирование рационального состава машинно-тракторных агрегатов / Т. А. Непарко // Агропанорама. – 2004. – № 2. – С. 30–36.

12. Каган, А. М. Установление оптимальных размеров землепользования сельскохозяйственных предприятий с отраслевой организационно-производственной структурой / А. М. Каган, А. В. Колмыков // Проблемы экономики. – 2008. – №1 (6). – С. 61–70.

13. Баришполец, В. А. Сетевое моделирование стохастических процессов выполнения комплекса взаимосвязанных операций / В. А. Баришполец // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 59–84.

14. Антонова, А. С. 2012. Генетическая оптимизация при решении задачи планирования проектных работ / А. С. Антонова, К. А. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=7409 (дата обращения: 23.03.2026).

15. Анисимов, В. Г. Алгоритм ресурсно-временной оптимизации выполнения комплекса взаимосвязанных работ / В. Г. Анисимов, Е. Г. Анисимов // Вестник Российской таможенной академии. – 2013. – № 1. – С. 80–87.

16. Егорова, А. Ю. Моделирование технологических связей комплекса работ / А. Ю. Егорова, В. М. Монтлевич // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2014. – № 8(119). – С. 259–263.

17. Ленский, А. В. Методические аспекты оптимизации парка технических средств для растениеводства / А. В. Ленский, Е. М. Иванов, Е. Каждан // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2015. – № 2. – С. 102–111.

18. Анисимова, С. В. Оптимизация машинно-тракторного парка сельхозпредприятия в новых условиях хозяйствования / С. В. Анисимова, И. Е. Денежкина // Финансы: теория и практика. – 2016. – № 6. – С. 71–77.

19. Иовлев, Г. А. Оперативная оптимизация работы уборочного комплекса / Г. А. Иовлев, И. И. Голдина // Агропродовольственная политика России. – 2016. – № 9(60). – С. 34–37.

20. Маций, О. Б. Перестановочно-матричный подход к построению оптимального назначения / О. Б. Маций // Вестник Национального технического университета. Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. – 2019. – № 28 (1353). – С. 30–38.

21. Воронов, А. Ю. Математическая модель оптимизации работы карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов / А. Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2(148). – С. 13–18.

22. Шарова, А. С. Оценка эффективности моделирования календарного планирования комплексной механизации монтажных работ каркаса здания / А. С. Шарова, С. И. Вахрушев // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2021. – № 2(17). – С. 109–115.

23. Воробьев, В. С. Имитационная модель технического обслуживания железнодорожного пути / В. С. Воробьев, С. О. Репин // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. – 2022. – № 1(4). – С. 7–16.

24. Бельц, А. Ф. Оптимизация совместной работы уборочно-транспортных комплексов на примере АО «Учхоз Зерновое» Зерноградского района Ростовской области / А. Ф. Бельц, Л. Ю. Шевырев, А. Н. Каплунов // Наука и техника транспорта. – 2022. – № 3. – С. 60–64.

25. Пащенко, А. Ф. Поиск оптимального расписания / А. Ф. Пащенко, М. Д. Тордия, Л. Д. Хижинская // Датчики и системы. – 2022. – № 3(262). – С. 48–54.

26. Николюкин, М. С. Моделирование поддержки принятия решений в системе управления складским комплексом / М. С. Николюкин, А. Д. Обухов, В. В. Алексеев // Правовая информатика. – 2023. – № 3. – С. 54–64.

27. Ефремов, А. А. Оптимизация оперативно-производственного планирования на предприятиях АПК / А. А. Ефремов // Веснік Магілеўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. Серыя D. Эканоміка, сацыялогія, права. – 2015. – № 2 (46). –С. 31–38.

28. Ефремов, А. А. Обоснование управленческих решений о закупке сельскохозяйственной техники на основе нелинейных моделей оптимизации / А. А. Ефремов // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016.– № 2. – С. 21–24.

29. Ефремов, А. А. 2017. Оптимизация разрывных функций методом аппроксимации логистической кривой / А. А. Ефремов, Э. М. Аксень // Экономика, моделирование, прогнозирование : сб. науч. тр. / НИЭИ Министерства экономики Республики Беларусь. – Мн., 2017. – Вып. 11. – С. 175–185.

Статья поступила 23.03.2026 г.

METHODS OF THE OPTIMIZATION OF THE WORK OF MACHINERY TRACTORY AGREGATES IN FOLLOW-UP TO TECHNOLOGICAL TRANSPORTATIONS

A. Efremov, Yu. Belotskaya, N. Matsveichuk, Yu. Sotskov

Andrei Efremov (efremov.kafei@gmail.com), PhD in Economics, Associate Professor, Head of Department, Belarussin State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus).

Yuliya Belotskaya (yuliya.belotskaya@gmail.com), Postgraduate Student, Assistant Professor, Belarussin State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus).

Natalja Matsveichuk (matsveichuk@tut.by), PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Department, Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Belarus).

Yuri Sotskov (sotskov48@mail.ru), Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, United Institute of Informatics Problems, National Akademie of Sciences (Minsk, Belarus).

Abstract. The agrarian sector in Republic of Belarus has been characterized by the trend of consolidation and mergers of agricultural enterprises. This leads to an increase in distances between bases of machine-tractor units and locations of spring-field and harvest mechanized operations in crop production. The impact of transportation spending on the cost of agricultural production and the competitiveness of agrarian business intensifies. There arises a need to develop decision-support tools that allow taking into account the technological relocations during the performance of a complex of agronomic operations. The article systematizes modern approaches for solving this scientific problem and introduces a mathematical formulation of the integer linear programming for the operation of the machine-tractor fleet, which differs from known problems to date by accounting for equipment basing locations, fields of mechanized operations and technological relocations. As an optimality criterion it is proposed to use the total discounted costs for performing the complex of machine-tractor operations in crop production, taking into account the expenses for acquiring the missing agricultural machinery in order to meet the agronomic deadlines.

Keywords: mathematical modeling, optimization, integer linear programming, agriculture, logistics.