

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫМИ АГРЕГАТАМИ

В. Л. Федяев, Э. Р. Галимов, Р. Р. Ахметзянов, Т. Н. Вагизов, Г. В. Пикмуллин

Реферат. Цель настоящих исследований – определение оптимальной крюковой нагрузки и скорости движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных тракторов для повышения эффективности обработки почвы. Работа основано на теоретико-экспериментальном подходе, сочетающем методы математического моделирования и производственной оптимизации с верификацией по данным полевых испытаний. Полевые испытания проведены в ФГБОУ ВО Казанский ГАУ и Кировской МИС в период 1990-2005 годы на типичных агрофонах Среднего Поволжья: слежавшейся пахоте (при этом плотность составила 1350-1415 кг/м³, влажность 13-15%), свежевспаханном поле (1275-1315 кг/м³, 14-16%) и стерне (1475-1520 кг/м³, 12-14%). Использовались стандартные и сертифицированные приборы: динамометры R 320, счетчики расхода топлива DFM-5, приборы ЭИА-П и УРДП-АФИ. В результате установлено, что оптимальная крюковая нагрузка при прямолинейном движении МТА составляет 6.5 кН для почвы со средними свойствами, а оптимальная скорость движения – 1.25 от теоретической скорости агрегата. Для различных агрофонов нагрузка варьировалась: 6.9 кН на слежавшейся пахоте, 6.6 кН на свежевспаханном поле и 5.9 кН на стерне. При маневрировании МТА оптимальная нагрузка снижается с ростом теоретической скорости по гиперболическому закону: увеличение скорости на 70% приводит к снижению нагрузки на 25-30%. Коэффициент поворачиваемости при этом уменьшается на 15-20%, что позволяет сократить радиус поворота агрегата. Полученные соотношения позволяют количественно оценивать влияние агрофизических свойств почвы на режимы работы МТА и могут быть использованы при разработке систем автоматизированного управления сельскохозяйственной техникой.

Ключевые слова: машинно-тракторные агрегаты, прямолинейное движение, маневрирование, оптимизация, практические рекомендации.

Введение. Большинство сельскохозяйственных работ, особенно в растениеводстве, выполняется с применением достаточно сложных технических систем, требующих больших затрат, в том числе энергоресурсов, зачастую, в весьма сложных условиях. Поэтому постоянно совершенствуются соответствующая техника, технологии, разрабатываются специальные меры, приемы. Одно из направлений этой работы – оптимизация конструкций тракторов, машин, сельскохозяйственных орудий, режимов их работы. В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных универсально-пропашных тракторов.

Отдельные аспекты этой проблемы, касающиеся, в основном, повышения эффективности сельскохозяйственных тракторов и машинно-тракторных агрегатов рассматриваются в работах А. Н. Беляева, Т. В. Тришиной, А. Н. Брюховецкого, И. А. Высоцкой [1], В. В. Новикова, А. В. Поздеева [2], А. А. Глущенко, И. Р. Салахутдинова, А. К. Субаевой, Калимуллина М.Н. [3], С. М. Яхина, Ф. Х. Халиуллина, А. З. Имамиева, А.В. Матяшина, Егорова С.В. [4], С. В. Малокова, Е. В. Позднякова, М. В. Шавкова, А.Ф. Петкова, И.И. Шанина, А.В. Белгова [5], А. А. Лопарева, К. В. Новикова, А. С. Комкина [6], А. Р. Валиева, И. Н. Матвеева, С. В. Щитова [7], А.А. Лопарева [8], Д. С. Гапича, В. А. Привалова [9], Н. В. Бышова, С. Н. Борычева, И. А. Успенского и др. [10].

В некоторых из них, например, монография [6], приводятся определенные сведения об оптимальных скоростях трактора, его нагрузке и других показателях. Постановка и решение задач оптимизации параметров

многофункциональности тракторных агрегатов представлены в статье Маслова Г.Г., Юдиной Е.М., Цыбулевского В.В., Вовк В.В. [11]. Методики и примеры отыскания оптимальных скоростей движения МТА на базе гусенично-колесного трактора, режимов их маневрирования, а также конструкторских параметров описаны в работе Фасхутдинова М.Х., Федяева В.Л. [12]. Кроме того, в публикациях Бледных В.В., Свечникова П.Г. [13], Д.Т. Халиуллина, А.В. Белинского, А.Р. Валиева, Р.Р. Лукманова, Г. Бургеса [14], А.Р. Валиева, Г. С. Юнусова, А. А. Мустафина и др. [15] рассмотрены вопросы оптимизации энергетических и экономических показателей комбинированного агрегата. Комплекс исключительно важных проблем оптимизации доремонтной, межремонтной наработки, наработки до списания и уровня эксплуатации тракторов обсуждается в статьях И.Г. Галиева, К.А. Хафизова, А.А. Нурмиева, [16, 17].

Таким образом, в целом, оптимизации конструкций тракторов, сельскохозяйственных машин и орудий, МТА и уровня их эксплуатации посвящено довольно много исследований. Гораздо меньше – оптимизации движения машинно-тракторных агрегатов при выполнении разнообразных сельскохозяйственных работ (пахота, боронование, культивирование, посев и т.д.) с максимальным учетом особенностей применяемой техники, специфики данных работ, разных условий их выполнения, других факторов и требований. Поэтому тема настоящей статьи, целью которой являются исследования по определению оптимальной крюковой нагрузки и скорости движения машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе колесных

тракторов для повышения эффективности обработки почвы, является актуальной. При этом решаются две практически важные оптимизационные задачи: прямолинейного (или близкого к нему) движения и маневрирования МТА. Специфика постановки и решения этих задач состоит в том, что в рамках теоретико-экспериментального подхода наряду с базовыми положениями теории производственной оптимизации широко используются имеющиеся в научно-технической литературе экспериментальные данные.

Условия, материалы и методы. Рассмотрим вначале равномерное прямолинейное либо близкое к прямолинейному движение машинно-тракторного агрегата (МТА) с колесным универсально-пропашным трактором, имеющим передние управляемые колеса с пневматическими шинами малого, а задние ведущие колеса с шинами большого типоразмера. Предположим, что движение осуществляется на горизонтальной почве однородного состава и структуры с нагрузкой на крюке, обусловленной навесными сельскохозяйственными орудиями, машинами, а также прицепами. Известно, что при этом действительная скорость движения МТА

$$v = \frac{0.1 \cdot n \cdot r_{kr}}{i_T}, \quad (1)$$

где n - число оборотов в минуту коленчатого вала двигателя трактора, i_T - общее передаточное число трансмиссии, определяемое как отношение числа оборотов n к числу оборотов ведущих колес n_k ; r_{kr} - кинематический радиус ведущих колес трактора при движении с нагрузкой.

Необходимо пояснить, что кинематический радиус колеса представляет собой радиус некоторого фиктивного недеформированного колеса, определяемый экспериментально с помощью формулы:

$$r_{kr} = \frac{S_k}{2\pi \cdot n_k}. \quad (2)$$

В выражении (2) S_k - замеренная длина пути, пройденного за n_k оборотов колеса. В общем, кинематический радиус зависит от деформируемости покрышек, шин, давления в них; вертикальных и окружных нагрузок, действующих на шины, скорости вращения колеса, температуры окружающей среды.

С другой стороны, действительная скорость МТА

$$v = \frac{0.1 \cdot (1 - \delta) \cdot n \cdot r_k}{i_T}. \quad (3)$$

Здесь r_k - кинематический радиус ведущих колес при движении трактора без нагрузки,

$\delta = \frac{v_T - v}{v_T}$ - коэффициент буксования, характеризующий относительное уменьшение действительной скорости v по сравнению с теоретической (возможной) скоростью агрегата

$$v_T = \frac{0.1 \cdot n \cdot r_k}{i_T}. \quad (4)$$

Величина коэффициента буксования δ существенно зависит, во-первых, от давления в ведущих пневматических шинах, наличия почвозацепов на них, от значений тяговых усилий; во-вторых, от состава, структуры, плотности и влажности, а также температуры верхних обрабатываемых слоев почвы.

Далее остановимся на случае, когда в выражениях (1), (3) для v , а также в (4) величины i_T , $n_k = \beta_k \cdot v_0$

$$(\beta_k = \frac{nr_k}{v_0})$$

- безразмерный множитель, v_0 - характерная скорость ($v_0 = 1.5$ м/сек) считаются заданными, а коэффициент буксования δ зависит, в основном, линейно от безразмерной крюковой нагрузки

$$p = \frac{P_{kr}}{P_0},$$

где P_{kr} - размерная крюковая нагрузка, $P_0 \approx 10$ кН - средняя (характерная) величина P_{kr} .

Очевидно, что в дополнение к нагрузке p необходимо учитывать характер верхних слоев почвы (например, слежавшаяся пахота, свежеспаханное поле, стерня), соответственно, изменение плотности ρ этих слоев, скорости v движения МТА, а также, пусть небольшое, угла поворота α_0 передних колес трактора. Учет названных факторов является достаточно сложной проблемой. В статье, ориентируясь на применение теоретико-экспериментального подхода, воспользуемся имеющимися в научно-технической литературе, в частности, в монографии [12] данными. Они были получены в период 1990-2005 годы в ФГБОУ ВО Казанском ГАУ, Кировская МИС в результате проведения полевых испытаний МТА с серийно производимыми колесными универсально-пропашными тракторами МТЗ в соответствии с имеющейся нормативной документацией, специально разработанной программой. При этом применялись как стандартные измерительные приборы и оборудование, так и сертифицированные приборы, приспособления и методики. Кроме того, были выделены два специально подготовленных участка с различными физико-механическими свойствами, замеры плотности, влажность почвы выполнялись многократно на разной глубине в теплое время года. Для повышения эффективности многофакторных экспериментов проводилось их планирование, при обработке полученных данных использовались имеющиеся методики.

Соответственно, перед началом испытаний осуществлялась проверка трактора согласно ГОСТ 25836-83, ГОСТ 28305-89; участки для испытаний выбирались по ГОСТ 30745-2001 (ИСО 789-9-90), ГОСТ 26953-86;

эксперименты проводились в соответствии с ГОСТ 20915-75 в рамках программы, содержащей описание объекта исследований, комплектность материальной базы, используемых методик и приборного обеспечения, контролируемых параметров, показателей работы агрегатов и способов обработки полученных

результатов.

Отметим, в частности, что на выбранных участках был ровный микрорельеф, агрофизический фон – слежавшаяся пахота, свежеспаханное поле, стерня. Характерные значения показателей их в весенне-летнее время проведения экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические показатели почвы

Наименование	Слежавшаяся пахота	Свежеспаханное поле	Стерня
Плотность, кг/м ³	1350-1415	1275-1315	1475-1520
Влажность, %	13-15	14-16	12-14

В качестве основных стандартных приборов применялись динамометры (весовые индикаторы Р 320), датчики расхода топлива (счетчик – расходомер DFM - 5), прибор ЭИА-П для замера количества оборотов ведущих колес трактора, путеизмерительное (пятое) колесо, прибор УРДП-АФИ с дополнительным оборудованием (регистрация деформации почвы). Нестандартные приборы и приспособления использовались для определения тянущей силы движителя, оценки механических свойств почвы, сопротивления почвы сжатию и сдвигу. Применение названных приборов регламентируется соответствующими методиками, инструкциями.

В силу того, что рассматриваемые испытания представляют собой многофакторные эксперименты с целью минимизации количества их, применялась известная методика планирования экспериментов, включая операции обработки экспериментальных данных, также как оценка значений среднего квадратичного отклонения, коэффициентов вариации; критериев Стьюдента, Кохнера, характеризующих однородность результатов измерений построенных дисперсий соответственно; критерия Фишера, позволяющих судить о том, во сколько раз расчетные значения откликов отличаются от экспериментальных данных. В целом, сравнения результатов расчетов, полученных с помощью регрессионных зависимостей (математических модулей), и экспериментов показывают удовлетворительное согласие их [12].

Из результатов испытаний следует, что относительно безразмерных переменных аппроксимационная зависимость коэффициента буксования от названных параметров будет:

$$\delta_i = a_i (\bar{\rho}_i, \bar{v}, \bar{\alpha}_0) + b_i (\bar{\rho}_i, \bar{v}, \bar{\alpha}_0) \cdot p. \quad (5)$$

Здесь индекс i ($i=1,2,3$) означает соответствующие показатели буксования δ_i , безразмерной плотности

$$\bar{\rho}_i = \frac{\rho_i}{\rho_{0i}}$$

(ρ_{0i} - средняя плотность), коэффициентов a_i , b_i для различных агрофизических фонов ($i=1$ - слежавшаяся пахота, $i=2$ свежеспаханное поле, $i=3$ стерня). Безразмерные скорость движения МТА

$$\bar{v} = \frac{v}{v_0}, \text{ угол поворота } \bar{\alpha}_0 = \frac{2\pi\alpha_0}{360}.$$

Приблизительно, в соответствии с результатами экспериментов, имеем:

$$a_i \approx k_i (\bar{\delta}_0 + \bar{\alpha}_0 \cdot f_{i0}) \bar{v}, \\ b_i \approx \bar{k}_0 \bar{\alpha}_0 \bar{v}. \quad (6)$$

В формулах $\bar{\alpha}_0 = \frac{\bar{\alpha}_0}{\bar{\alpha}_{00}}$ ($\bar{\alpha}_{00} = 0.47$ - нормирующий коэффициент), $\bar{v} = \frac{v}{v_0}$

($\bar{v}_0=0.67$ - нормирующий множитель); $\bar{\delta}_0 \approx 0.33$, $\bar{k}_0 \approx 0.30$ - соответственно, средние значения коэффициента буксования при прямолинейном движении МТА ($\alpha_0=0$) и множителя b_i , когда $\bar{\alpha}_0 = \bar{\alpha}_{00}$, $\bar{v} = \bar{v}_0$. При этом параметры

$$k_i = k_i(\bar{\rho}_i) = \begin{cases} 0.85 \\ 1.35 \\ 0.26 \end{cases}, \\ f_{i0} = f_{i0}(\bar{\rho}_i) = \begin{cases} 0.10 (i=1) \\ 0.12 (i=2) \\ 0.06 (i=3) \end{cases}. \quad (7)$$

Необходимо иметь в виду, что данные параметры неявно зависят от безразмерной плотности $\bar{\rho}_i$ обрабатываемого слоя почвы. Видно, что наибольшие значения они принимают в случае слежавшейся пахоты, наименьшие - стерни.

Поскольку при неизменных прочих переменных с возрастанием плотности почвы коэффициент буксования уменьшается, соответственно, уменьшается и крюковая нагрузка. Поэтому предположим, что параметры $k_i = k_i(\bar{\rho}_i)$, аппроксимируются нелинейной (параболической) функцией:

$$k_i = g_i(p) = C_{0i} + C_{1i}p + C_{2i}p^2, \quad (8)$$

где C_{0i} , C_{1i} , C_{2i} эмпирические коэффициенты.

Оценить их можно, воспользовавшись, например, результатами испытаний колесных тракторов, приведенными в [12].

Отметим: при записи зависимостей (5) - (8) учитывается то, что, когда МТА движется прямолинейно по слою рыхлой почвы, находящемуся на твердом подслое, либо по верхнему слою твердой (плотной) почвы, коэффициент буксования будет меньше, чем при движении по рыхлой почве, (свежеспаханному полю).

Если угол поворота передних колес трактора мал ($\alpha_0 \approx 0$), МТА движется со средней скоростью $v=1.5$ м/сек ($\tilde{v}=1.5$), то коэффициенты C_{0i} , C_{1i} , C_{2i} удовлетворяют следующему уравнению:

$$C_{0i} + C_{1i}p + C_{2i}p^2 = 3\delta_i \quad (9)$$

Полагая в (9) $p=0.5, 1.0, 1.5$ ($P_{kr}=5, 10, 15$ кН), определяя $\delta_i=(0.18, 0.2, 0.38)$, $\delta_2=(0.28, 0.30, 0.43)$, $\delta_3=(0.21, 0.23, 0.28)$ с применением названных результатов испытаний, найдем:

$C_{01}=0.96$, $C_{11}=-1.32$, $C_{21}=0.96$ (слежавшаяся пахота);

$C_{02}=1.12$, $C_{12}=-0.90$, $C_{22}=0.68$ (свеже-спаханное поле);

$C_{03}=0.58$, $C_{13}=-0.70$, $C_{23}=0.50$ (стерня).

Когда некий гипотетический агрофизический фон обладает свойствами, средними по отношению к рассматриваемым, для оценки соответствующих коэффициентов аппроксимации вида (8) можно использовать средние значения

$$\bar{C}_0=0.77, \bar{C}_1=-0.74, \bar{C}_2=0.58.$$

Располагая выражениями для a_i , b_i , k_i в соотношении (5), для определения δ_i получим формулу:

$$\delta_i = \delta_i(\tilde{\alpha}, \tilde{v}, p) = (\xi_{0i} + \xi_{1i}p + \xi_{2i}p^2)\tilde{v} \quad (10)$$

Здесь коэффициенты $\xi_{0i} = \xi_{0i}(\tilde{\alpha}_0) = \xi_{i0}$, $\xi_{1i} = \xi_{1i}(\tilde{\alpha}_0) = k_0\tilde{\alpha}_0 + \xi_{i1}$, $\xi_{2i} = \xi_{2i}(\tilde{\alpha}_0) = \xi_{i2}$; параметр $\xi_{i1} = \xi_{i1}(\tilde{\alpha}_0) = \tilde{\delta}_0 + \tilde{\alpha}_0 f_{i0}$.

Поскольку в соответствии с (1) безразмерная нормативная скорость

$$\tilde{v} = \frac{\tilde{v}}{\tilde{v}_0} \text{ будет:}$$

$$\tilde{v} = 0.1\gamma_k(1-\delta) \quad (\gamma_k = \frac{\beta_k}{(\tilde{v}_0 i_T)}) \quad (11)$$

то уравнение для отыскания её с учетом (10) примет вид:

$$\tilde{v} = 0.1\gamma_k(1-(\xi_{0i} + \xi_{1i}p + \xi_{2i}p^2)\tilde{v}). \quad (12)$$

Отсюда скорость:

$$\tilde{v} = \tilde{v}(\tilde{\alpha}, p) = \frac{0.1\gamma_k}{(1+0.1\gamma_k(\xi_{0i} + \xi_{1i}p + \xi_{2i}p^2))}. \quad (13)$$

Считая соотношения (10) - (13) математической моделью технического объекта, как и в работах [18, 19, 20], воспользуемся методами производственной оптимизации таких объектов. Поскольку имеет место т.н. параметрическая оптимизация, примем в качестве критерия оптимальности (целевой функции) выражение (13), варьируемого параметра - безразмерную крюковую нагрузку p .

Обратимся далее и вопросам оптимизации движения МТА при маневрировании. Предположим, как и ранее, что маневрирование осуществляется на горизонтальной почве однородного состава и структуры. При этом различают гоновою, круговую и диагональный способы движения агрегата. Рассматривая, преимущественно, круговой способ движения, отметим, что процесс поворота МТА состоит,

в общем, из этапов перехода от прямолинейного движения к криволинейному с постепенным уменьшением радиуса кривизны траектории (вход в поворот), последующего движения с постоянным радиусом кривизны (равномерный поворот) и этапа возвращения к прямолинейному движению (выход из поворота). Следует также иметь в виду, что при повороте МТА с колесным трактором, с одной стороны; крюковая нагрузка может уменьшаться, если, например, навесные орудия устанавливаются в транспортное положение. С другой стороны, в силу торможения повернутых передних колес, велика вероятность, что ведущие колеса трактора будут буксовать, возможно даже больше, чем при прямолинейном движении.

Принято при оценке маневренности МТА выделять в качестве основных следующие показатели:

- радиус поворота агрегата; при этом различают действительный R и геометрический R_g радиусы поворота МТА

($R_g = \frac{L}{\tan \alpha_0}$, L - продольная база трактора); коэффициент поворачиваемости агрегата

$$k_r = \frac{R}{L} \tan \alpha_0 \approx \frac{\bar{\alpha}_0 R}{L} \quad (\bar{\alpha}_0 = \frac{2\pi \alpha_0}{360^\circ});$$

- угол поворота α_0 передних колес трактора (безразмерный нормированный угол поворота

$$\bar{\alpha}_0 = \frac{\alpha_0}{\alpha_{00}});$$

- линейная скорость v_R равномерного движения МТА по окружности радиуса R (безразмерная нормированная окружная скорость

$$\xi_R = \frac{v_R}{v_0 \tilde{v}_0});$$

- смещение МТА относительно прямолинейного пути (курса) агрегата.

В результате полевых испытаний маневренности МТА на базе колесного трактора установлено, что коэффициент поворачиваемости k_R соответствующего агрегата зависит от безразмерной крюковой нагрузки p следующим образом [12]:

$$k_R = \frac{B_0 + B_1 p + B_2 p^2}{D_0 + D_1 p + D_2 p^2}. \quad (14)$$

В выражении (14), в свою очередь, величина коэффициентов $B_0, B_1, B_2; D_0, D_1, D_2$ определяется безразмерными значениями угла поворота $\bar{\alpha}_0$ передних колес трактора, окружной скорости агрегата ξ_R , а также свойствами агрофизического фона, значениями других показателей. Установление всех закономерностей в достаточно полном объеме представляет большие трудности. Поэтому ограничимся случаем, когда зависимость $k_R = k_R(p)$ представляется в виде:

$$k_R = k_R(p) \approx R_0 + R_1 p + R_2 p^2 + R_3 p^3 \quad (15)$$

где коэффициенты R_0, R_1, R_2, R_3 данной степенной аппроксимации зависят лишь от $\bar{\alpha}_0, \xi_R$, и свойств агрофизического фона (слежавшаяся пахота, свежеспаханное поле, стерня и др.); изменение коэффициентов поворачиваемости МТА характеризуют результаты испытаний, приведенные в работах [8,12].

Из них видно, что в случае слежавшейся пахоты, свежеспаханного поля зависимость коэффициента поворачиваемости от крюковой нагрузки P_{kr} ($0 < P_{kr} < 10 \text{ кН}$) явно нелинейна, особенно при $P_{kr} < 5 \text{ кН}$. Однако при испытаниях на стерне нелинейность проявляется в меньшей степени, следовательно, коэффициенты R_2, R_3 в (15) малы. Более того, при неизменных прочих параметрах с увеличением крюковой нагрузки во всех случаях коэффициент поворачиваемости МТА возрастает.

Влияние относительно небольшого изменения линейной окружной скорости агрегата v_R на коэффициент поворачиваемости незначительно, в большей степени заметно только при больших крюковых нагрузках. Наоборот, действительный радиус поворота МТА при изменении угла поворота передних колес трактора в диапазоне, например, от 14° до 27° зависит от величины α_0 существенно. Так при крюковой нагрузке 5.0 кН, углах поворота $\alpha_0 = 14^\circ, 20^\circ, 27^\circ$ действительный радиус поворота МТА R на слежавшейся пахоте, соответственно, будет, приблизительно, 10.8, 6.2, 5.3 м. Радиус поворота, естественно, увеличивается с уменьшением угла α_0 . При этом коэффициент поворачиваемости агрегата

$$k_R = \frac{\bar{\alpha}_0 R}{L} = 0.39, 0.35, 0.38 (L \approx 7.0 \text{ м}),$$

т.е. меняется сравнительно мало.

Таким образом, в последующем можно использовать значения коэффициентов R_0, R_1, R_2, R_3 в соотношении (12) для k_R , полученных в результате обработки экспериментальных данных при средних значениях углов поворота передних колес трактора и окружных скоростях движения МТА, но зависящих от свойств агрофизического фона.

Далее, принимая во внимание сказанное, воспользуемся для оценки безразмерной окружной скорости $\xi_R = \frac{\bar{v}}{v_0}$ равномерного

движения МТА при повороте аппроксимацией вида (13), упростив которую, запишем:

$$\xi_R = \xi_R(p) = \xi_0 + \xi_1 p + \xi_2 p^2 + \xi_3 p^3 \quad (16)$$

где при сравнительно малых значениях крюковой нагрузки $p(p < 1)$ коэффициенты $\xi_0 = 1 - 0.1\gamma_k(1-0.1\gamma_k)\xi_{0b}, \xi_1 = -0.1\gamma_k(1-0.2\gamma_k\xi_{0b})\xi_{1b}, \xi_2 = -0.1\gamma_k(1-0.2\gamma_k\xi_{0b})\xi_{2b}, \xi_3 = 0.02\gamma_k^2\xi_{1b}\xi_{2b}$.

Если, кроме того, параметр γ_k , характеризующий безразмерную линейную скорость вращения ведущих колес трактора мал ($\gamma_k < 1$), то $\xi_0 \approx 1 - 0.1\gamma_k\xi_{0b}, \xi_1 \approx -0.1\gamma_k\xi_{1b}, \xi_2 \approx 1 - 0.1\gamma_k\xi_{2b}, \xi_3 \approx 0$.

Эти коэффициенты достаточно просто выражаются через эмпирические параметры

C_{0b}, C_{1b}, C_{2b} (см. соотношение (10)).

В случае, когда величины $\gamma_k, \xi_{0b}, \xi_{1b}, \xi_{2b}$ определяющие коэффициенты $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \xi_3$ зафиксированы, нетрудно убедиться, имея в виду зависимость (13), что с увеличением крюковой нагрузки безразмерная окружная скорость $\xi_R(p)$ движения МТА уменьшается. Данное обстоятельство, а также отмеченная выше обратная закономерность изменения коэффициента поворачиваемости агрегата $k_R(p)$, позволяют надеяться, что воспользовавшись обобщенным критерием, включающем оба эти показателя, можно определить оптимальное значение безразмерной крюковой нагрузки p_m при маневрировании МТА.

Следуя имеющимся в научно-технической литературе рекомендациям [12], запишем обобщенный критерий (целевую функцию) в виде:

$$Q = \frac{\beta_1 \xi_R(p)}{q_1} + \frac{\beta_2 k_R(p)}{q_2}, \quad (17)$$

где β_1, β_2 – коэффициенты, характеризующие значимость показателей ξ_R, k_R (весовые коэффициенты), такие, что $\beta_1 + \beta_2 = 1$; параметры q_1, q_2 – соответственно, наилучшая (наименьшая) безразмерная скорость движения агрегата ($q_1 \neq 0$) и предельно допустимый коэффициент поворачиваемости МТА ($q_2 > 0$). Эти параметры задаются экспертно.

Результаты и обсуждения. Основываясь на приведенных в предыдущем разделе материалах, применяя названные методы, рассмотрим последовательно оптимизационные задачи о прямолинейном и круговом движении МТА. В первом случае, так как ограничения на безразмерную скорость v отсутствуют, для отыскания оптимальных решений продифференцируем выражение (13) по параметру p . Приравняв первую производную нулю, с учетом формулы (10), найдем оптимальное значение безразмерной крюковой нагрузки $p = p_m$ при прямолинейном движении МТА:

$$p_m = \frac{-0.5\xi_{1i}}{\xi_{2i}} = \frac{-0.5(\bar{k}_0\bar{\alpha}_0 + \xi_i C_{1i})}{\xi_i C_{2i}}, \quad (18)$$

согласно которому при малых углах поворота передних колес трактора, приблизительно,

$$p_m \approx \frac{-0.5C_{1i}}{C_{2i}}. \quad (19)$$

Таким образом, величина оптимальной крюковой нагрузки определяется, преимущественно, зависимостью коэффициента буксования трактора от механических свойств агрофизического фона (верхнего обрабатываемого слоя почвы).

При этом безразмерная оптимальная скорость v_m (см. соотношение (13)) прямолинейного движения машинно-тракторного агрегата будет:

$$\tilde{v}_m = \frac{0.1\gamma_k}{(1 + 0.1\gamma_k(\xi_{0i} + \xi_{1i}p_m + \xi_{2i}p_m^2))}.$$

В простейшем случае, когда угол поворота передних колес трактора мал, оптимальная скорость агрегата

$$\tilde{v}_m = \frac{0.1\gamma_k}{(1+0.033\gamma_k k_{im}(p_m))},$$

где $k_{im} = C_{0i} + C_{1i}p_m + C_{2i}p_m^2$ - значение параметра k_i в случае оптимальной крюковой нагрузки.

При замене в этом соотношении величины k_{im} на осредненное значение $k_m = C_0 + C_1p_m + C_2p_m^2$ размерную оптимальную скорость прямолинейного движения МТА можно оценить с помощью выражения:

$$v_m \approx \frac{0.1nr_k}{\sigma_m i_T} \quad (\sigma_m = 1 + 0.033\gamma_k \bar{k}_m). \quad (20)$$

В формуле (20) коэффициент σ_m заведомо больше единицы, он зависит от безразмерных

параметров $\gamma_k = \frac{\beta_k}{(\bar{v}_0 i_T)} = \frac{nr_k}{v_0 \bar{v}_0 i_T}$ и $\bar{k}_m$.

Если обратиться вновь к названному гипотетическому агрофизическому фону, то согласно оценок (18), (19) оптимальная безразмерная крюковая нагрузка

$$p_m = \bar{p}_m = \frac{-0.5\bar{C}_1}{\bar{C}_2} \approx 0.65 \quad (P_{kr} = 6,5 \text{ кН}),$$

средняя размерная оптимальная скорость прямолинейного движения МТА ($k_m = 0,54$)

$$\bar{v}_m \approx \frac{v_T}{1+0.03\theta_k}, \quad (21)$$

где безразмерная скорость $\theta_k = \theta_k(v_T) = \frac{\omega_k}{v_0}$

$\omega_k = \frac{nr_k}{i_T}$, v_0 - характерная скорость

($v_0 = 1.5$ м/сек), $v_T = 0,1w_k$ - размерная теоретическая скорость (4).

Очевидно, что, когда свойства реального агрофизического фона близки к свойствам гипотетического, предельно простую формулу (21) можно также использовать для приближенных расчетов оптимальной скорости агрегатов и в этом случае.

Данные результаты оптимизации нетрудно представить графически. Так оптимальная размерная крюковая нагрузка P_{krm} при прямолинейном движении МТА по слежавшейся пахоте, свежевспаханному полю, стерне и полю с осредненными агрофизическими свойствами, соответственно, будет 6.9, 6.6, 5.9, 6.5 кН. В виде диаграммы эти результаты показаны на рис. 1. Зависимость оптимальной размерной скорости движения агрегата v_m по полю с осредненными агрофизическими показателями от безразмерного параметра θ_k иллюстрирует рис. 2.

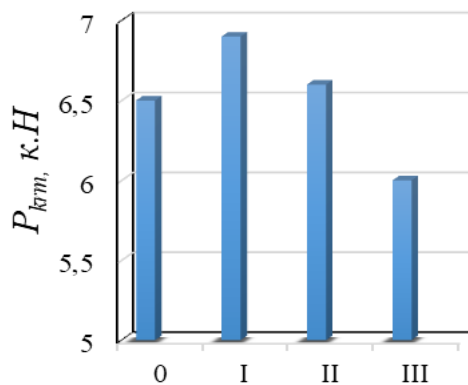


Рис.1- Агрофизический фон:

0 – гипотетический; I – слежавшаяся пахота; II – свежевспаханное поле; III – стерня

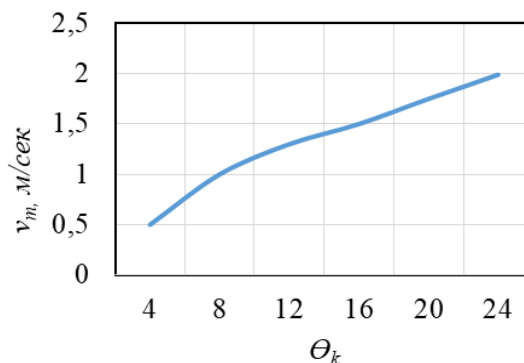


Рис. 2 – Зависимость оптимальной скорости движения МТА от параметра θ_k

В рассматриваемом случае при определении режимов движения агрегата на практике следует, вначале, оценить оптимальную крюковую нагрузку. В основном, она определяется показателями агрофизического фона почвы. В отсутствие таковых необходимо обратиться к научно-технической литературе, возможно также применение методов интерполяции и экстраполяции. Далее рассчитывается оптимальная скорость движения МТА с использованием, по-прежнему, агрофизических показателей. Однако, в дополнение к ним, надо задать, учитывая особенности, специфику эксплуатации тракторов, теоретическую скорость движения их.

При маневрировании МТА, круговым движением агрегатов, дифференцируя соотношение по p , приравнявая производную нулю, получим для отыскания оптимального значения $p = p_m$ уравнение:

$$\chi_3 p^2 + 2\chi_1 p + \chi_0 = 0. \quad (22)$$

Решение уравнения (22) имеет вид:

$$p = p_m = \frac{(-\chi_1 \pm \sqrt{\chi_1^2 - \chi_0 \chi_2})}{\chi_2},$$

где коэффициенты $\chi_0 = \frac{\beta_1 \xi_1}{q_1} + \frac{\beta_2 R_1}{q_2}$,

$$\chi_1 = \frac{\beta_1 \xi_2}{q_1} + \frac{\beta_2 R_2}{q_2}, \quad \chi_2 = 3\left(\frac{\beta_1 \xi_3}{q_1} + \frac{\beta_2 R_3}{q_2}\right).$$

В простейшем случае ($\xi_3 \approx 0$, $R_3 \approx 0$, $\chi_2 \approx 0$)

$$p = p_m \approx \frac{-0.5\chi_0}{\chi_1} \approx -0.5\bar{\xi} \left(1 - \left(\frac{\bar{q}}{\bar{\beta}}\right)\left(\frac{R_2}{\xi_2} - \frac{R_1}{\xi_1}\right)\right). \quad (23)$$

Здесь $\bar{\beta} = \frac{\beta_1}{\beta_2}$, $\bar{q} = \frac{q_1}{q_2}$; значение

$$\bar{\xi} = \frac{\xi_1}{\xi_2} \approx \frac{C_{1i}}{C_{2i}}$$

которое согласно (18), (19) при близком к прямолинейному движению МТА по модулю равняется удвоенной оптимальной безразмерной крюковой нагрузке; ξ_1 , ξ_2 - коэффициенты разложения функции $\xi_R = \xi_R(p)$, оцениваются с помощью соотношений, приведенных в аппроксимации (16). Коэффициенты R_1 , R_2 разложения показателя k_R в ряд по p (зависимость (15)) с использованием результатов испытаний МТА [12] можно оценить следующим образом.

При маневрировании МТА по слежавшейся пахоте, свежеспаханному полю, стерне выберем в качестве контрольных значения безразмерной крюковой нагрузки $p=0.0$, 0.5 , 0.75 . Учитывая, что в рассматриваемом диапазоне изменения угла поворота передних колес трактора коэффициент поворачиваемости меняется слабо, найдем для каждого из названных видов агрофизического фона среднюю величину коэффициента поворачиваемости при средней окружной скорости $v = 1,5$ м/сек и выделенных нагрузках:

$k_{R1} = (0.50, 0.54, 0.58)$ - слежавшаяся пахота;

$k_{R2} = (0.55, 0.58, 0.61)$ - свежеспаханное поле;

$k_{R3} = (0.44, 0.49, 0.55)$ - стерня.

Отсюда, если $R_3 = 0$, то при движении МТА по слежавшейся пахоте, свежеспаханному полю, стерне коэффициенты R_0 , R_1 , R_2 , соответственно, будут: $R_0 = (0.50, 0.52, 0.44)$, $R_1 = (0.02, 0.04, 0.06)$, $R_2 = (0.12, 0.08, 0.08)$.

Как и выше, в случае, когда маневрирование МТА осуществляется на почве с гипотетическими (средними) свойствами, средние коэффициенты $R_0 = 0.50$, $R_1 = 0.04$, $R_2 = 0.09$.

При этом в выражении (23) для оптимальной крюковой нагрузки

$$\bar{\xi} \approx \frac{-0.5\bar{C}_1}{\bar{C}_2},$$

$\xi_1 \approx -0.1\gamma_k \cdot (\bar{\chi}_0 \bar{\alpha} + \bar{\xi} \bar{C}_1)$, $\xi_2 \approx -0.1\gamma_k \cdot \bar{\xi} \bar{C}_2$; $\bar{\alpha} = 0,75$ - средний безразмерный угол поворота передних колес трактора $\bar{\xi} = \bar{\delta}_0 + \bar{\alpha} \bar{f}_0 = 0,4$ -

среднее значение множителей ξ_i , $\gamma_k = \frac{\theta_k}{\bar{V}_0}$

Соответственно, оптимальная безразмерная средняя крюковая нагрузка при маневрировании

$$\bar{p}_m \approx 0.65(1 + 2.7\left(\frac{H}{\theta_k}\right)(1 + \frac{3.3}{1 + \bar{\alpha}})) \quad (24)$$

где $H = \frac{\bar{q}}{\bar{\beta}}$ - величина, которая, по существу,

характеризует при оптимизации движения МТА значимость окружной скорости, коэффициента поворачиваемости; $\bar{\alpha}$ - представляет собой безразмерный нормированный угол поворота передних колес трактора;

$\theta_k = 10\bar{v}_T$, $\bar{v}_T = \frac{v_T}{v_0}$, ($v_0 = 1,5$ м/сек) - безраз-

мерная теоретическая скорость движения агрегата.

Наконец, подставляя в соотношение (15) значение оптимальной безразмерной величины крюковой нагрузки p_m , определяемое с помощью формулы (23), или среднюю крюковую нагрузку $\bar{p}_m$ (24), найдем величину оптимального коэффициента поворачиваемости МТА k_{Rm} , среднего коэффициента поворачиваемости $\bar{k}_{Rm}$ при маневрировании МТА на почве со средним агрофизическим фоном. В последнем случае:

$$K_m = \bar{k}_{Rm} = \bar{R}_0 \bar{p}_m + \bar{R}_2 \bar{p}_m^2 \approx 0.50 + \bar{p}_m (0.04 + 0.09 \bar{p}_m). \quad (25)$$

В данной оптимизационной задаче, как и предыдущей (прямолинейное движение МТА), вначале определим оптимальную крюковую нагрузку p_m при условии, что заданы параметры β_1 , β_2 , означающие значимость (вес) безразмерной окружной скорости ξ_R и коэффициента поворачиваемости агрегата k_r , а также характерные величины q_1 , q_2 ,

соответственно, круговой скорости и коэффициента поворачиваемости агрегата. Пусть $\beta_1 = 0.4$, $\beta = 0.6$; $q_1 = 0.5$, $q_2 = 1.5$; отсюда $\bar{\beta} = 0.67$, $\bar{q}_1 = 0.33$, $H = 0.5$.

Ограничиваясь только случаем маневрирования МТА на почве со средними агрофизическими свойствами, воспользовавшись формулой (24), оценим изменение оптимальной размерной крюковой нагрузки P_{krm} в зависимости от параметра Θ_k , характеризующего теоретическую скорость трактора v_T . Из рис. 3 видно, что с увеличением Θ_k , а значит и теоретической скорости, величина P_{krm} уменьшается по закону, близкому к гиперболическому. В выделенном интервале изменяется Θ_k , приблизительно, в 1.7 раза.

Влияние этого же параметра Θ_k на оптимальный коэффициент поворачиваемости МТА $K_m = \bar{k}_{km}$ иллюстрирует рисунок 4.

Ожидаемо, что при возрастании Θ_k коэффициент $\bar{k}_{km}$ уменьшается, т.е. появляется возможность уменьшить действительный радиус поворота агрегата, сократить время маневрирования.

Итак, на практике (в полевых условиях) оператор, инженер, возможно, исследователь должны, как было отмечено выше, выбрать необходимую теоретическую скорость движения агрегата, задать характерные величины q_1 , q_2 ; веса β_1 , β_2 , означающие значимость показателей ζ_R и k_k при маневрировании. Затем следует рассчитать оптимальную крюковую нагрузку P_m с помощью формулы (23) или (24). Можно, разумеется, воспользоваться рисунком 3. В завершение, с использованием формул (16), (25) при оговоренных условиях, определяется оптимальная окружная скорость, коэффициент поворачиваемости МТА.

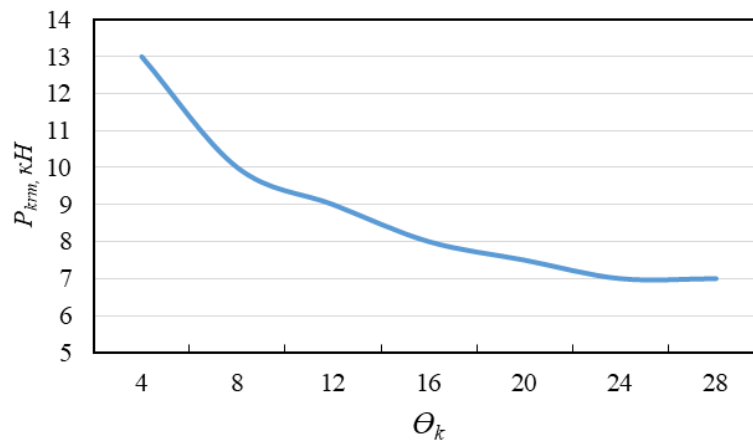


Рис. 3 – Зависимость оптимальной крюковой нагрузки от параметра Θ_k

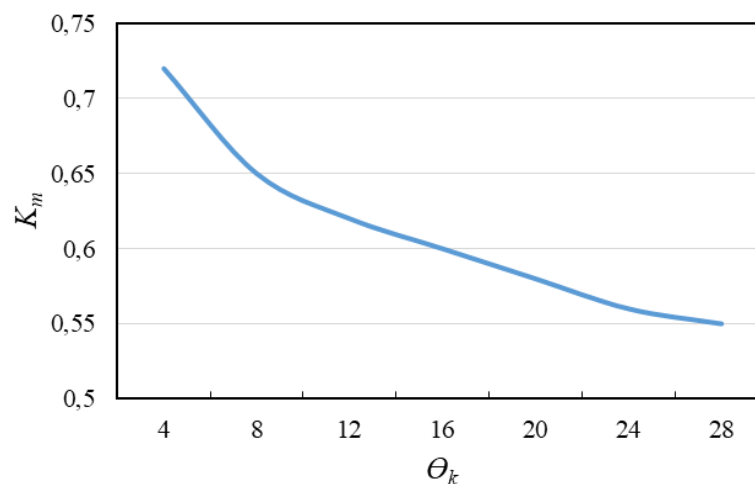


Рис. 4 – Зависимость оптимального коэффициента поворачиваемости МТА от параметра Θ_k

Выражение (25), в сочетании с (24), наглядно иллюстрирует изменение оптимального коэффициента поворачиваемости, а значит и радиуса поворота МТА, в зависимости от скорости движения, угла поворота передних колес трактора: с увеличением скорости, угла

поворота величина оптимального радиуса поворота МТА уменьшается. Другими словами, в случае необходимости уменьшения радиуса поворота, скорость движения МТА, угол поворота передних колес транспорта можно увеличить (разумеется, в пределах разумного).

Например, при прямолинейном движении МТА в теплое время года по почве со средними агрофизическими показателями оптимальная крюковая нагрузка равняется 6.5 кН, а оптимальная скорость будет меньше теоретической скорости агрегата, приблизительно, в 1.2 раза. В случае маневрирования МТА установлено, что с увеличением теоретической скорости агрегата величина оптимальной крюковой нагрузки уменьшается. Следовательно, увеличивая скорость кругового движения МТА, величину крюковой нагрузки необходимо уменьшать.

В целом, полученные соотношения, установленные закономерности частично подтверждают известные, что говорит об их достоверности. С другой стороны, они представляют возможность количественной оценки влияния свойств почвы на выбор оптимальных режимов обработки ее.

К сожалению, непосредственно сравнить данные оптимальные решения с имеющимися в научно-технической литературе сложно, поскольку, например, известные выражения для расчета оптимальной скорости прямолинейного движения МТА содержит показатель, характеризующий максимальный КПД трактора, который в полученных соотношениях не содержится, при проведении полевых испытаний не определялся. Более того, результаты оптимизации режимов маневрирования МТА нам не известны.

Таким образом, в рамках теоретико-экспериментального подхода с использованием методов математического моделирования, производственной оптимизации, результатов полевых испытаний прямолинейного и кругового движения машинно-тракторных агрегатов, получены соотношения для расчета оптимальной крюковой нагрузки, скорости прямолинейного движения, коэффициента поворачиваемости при маневрировании агрегатов. Научная новизна и, вместе с тем, значимость этих соотношений состоит в том, что они содержат параметры, характеризующие агрофизические свойства почвы.

Выводы. В результате выполнения работы с применением методов математического

моделирования, производственной оптимизации, когда часть зависимостей является аппроксимацией имеющихся в научно-технической литературе экспериментальных данных (теоретико-экспериментальный подход) достигнута поставленная цель по оптимизации режимов движения машинно-тракторных агрегатов. Установлены конкретные количественные зависимости: для прямолинейного движения МТА оптимальная крюковая нагрузка составляет 6.5 кН, а скорость движения – 1.25 от теоретической скорости агрегата. Для основных типов агрофонов оптимальная нагрузка варьируется от 5.9 кН (стерня) до 6.9 кН (слежавшаяся пахота). При маневрировании МТА доказано, что увеличение теоретической скорости на 70% приводит к снижению оптимальной крюковой нагрузки на 25-30% по гиперболическому закону, при одновременном уменьшении коэффициента поворачиваемости на 15-20% и, соответственно, радиуса поворота агрегата.

Практическая значимость результатов заключается в возможном применении полученных соотношений при проектировании систем автоматизированного управления МТА и разработке рекомендаций по эксплуатации тракторов в различных почвенных условиях. Данные аналитические зависимости позволяют количественно оценить влияние агрофизических свойств почвы на энергоэффективность агрегатов, также могут быть использованы при создании алгоритмов оптимального выбора режимов обработки почвы. Согласно этим соотношениям рекомендуется при прямолинейном движении устанавливать крюковую нагрузку 6.5-6.9 кН в зависимости от типа почвы, а при маневрировании – снижать нагрузку пропорционально квадрату скорости движения МТА.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются учет динамических свойств почвы и климатических факторов в оптимизационных моделях, разработка методов адаптивного управления МТА в режиме реального времени, а также решение задач оптимизации в условиях неопределенности параметров агрофона.

Литература

1. К согласованию кинематических характеристик поворота колёсной машины / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина, А. Н. Брюховецкий, И. А. Высоцкая // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. Т. 13 № 3(66). С. 12-18. doi: 10.17238/issn2071-2243.2020.3.12.
2. Новиков В. В., Поздеев А. В. Влияние угловой демпфирующей связи на колебания трехосной двухсекционной бесподвесочной колесной машины // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 4. С. 54-61. doi: 10.31992/0321-4443-2019-4-54-61.
3. К формированию модели эффективности функционирования сельскохозяйственного трактора в составе МТА при работе на альтернативных видах топлива / А. А. Глушенко, И. Р. Салахутдинов, А. К. Субаева, Калимуллин М.Н. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19 № 1(73). С. 42-47. doi: 10.12737/2073-0462-2024-42-47.
4. Анализ кинематики навесного устройства трактора с регулируемыми характеристиками / С. М. Яхин, Ф. Х. Халиуллин, А. З. Иمامиев, А.В. Матяшин, С.В. Егоров // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 17-2. С. 250-259. doi: 10.26160/2658-3305-2022-17-250-259.
5. Анализ современных конструкций комбинированных почвообрабатывающих машин и агрегатов / С. В. Малюков, Е. В. Поздняков, М. В. Шавков, А.Ф. Петков, И.И. Шанин, А.В. Белгов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2023. № 2 (70). С. 523-534. – doi: 10.32786/2071-9485-2023-02-61.

6. Лопарев А. А., Новиков К. В., Комкин А. С. Исследование процесса сопротивления качению сельскохозяйственных тракторов-Киров: ООО Издательство Радуга-ПРЕСС", 2021. 202 с.—ISBN 978-5-6044635-9-8.
7. Валиев А. Р., Матвеев И. Н., Щитов С. В. Снижение полных энергозатрат за счет повышения устойчивости движения агрегата // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 3 (37). С. 72-76. doi: 10.12737/14760.
8. Лопарев А.А. Буксование ведущих колес трактора МТЗ-80 и свойства почвы // Земледелие. 2002. №3. С.23-24.
9. Гапич Д. С., Привалов В. А. Прогнозирование тягово-сцепных показателей колесных тракторов при динамическом характере крюкового усилия // Известия МГТУ МАМИ. 2016. № 4(30). С. 20-24.
10. Особенности применения современного тракторного транспорта в технологических процессах по возделыванию сельскохозяйственных культур / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев, И. А. Успенский и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 126. С. 180-198. doi: 10.21515/1990-4665-126-013.
11. Оптимизация параметров многофункционального пахотного агрегата / Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина, В. В. Цыбулевский, В. В. Вовк // Colloquium-Journal. 2018. № 6-1(17). С. 62-65.
12. Фасхутдинов М. Х., В. Л. Федяев. Гусенично-колесные движители универсально-пропашных тракторов. Проблемы и перспективы Казань: Академия наук РТ, 2021. 304 с. ISBN 978-5-9690-0891-5.
13. Бледных В. В., Свечников П. Г. Оптимизация рабочих органов, конструктивной схемы и параметров орудия // Агропродовольственная политика России. 2015. № 1(37). С. 7-11.
14. Optimization of plow adjustment / D. T. Khaliullin, A. Belinsky, A. R. Valiev, Lukmanov R.R., Bourges G. // Bio web of conferences 2020. P. 000103. doi: 10.1051/bioconf/20202700103.
15. Оптимизация энергетических и экономических показателей комбинированного агрегата / А. Р. Валиев, Г. С. Юнусов, А. А. Мустафин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 3(41). С. 72-78. doi: 10.12737/22680.
16. Optimization of main parameters of tractor and unit for seeding cereal crops with regards to their impact on crop productivity / R. Khafizov, C. Khafizov, A. Nurmiev, I. Galiev // Engineering for Rural Development: Proceedings. 2018. Vol. 17. P. 168-175. doi: 10.22616/ERDev2018.17.N192.
17. Optimization of main parameters of tractor and unit for plowing soil, taking into account their influence on yield of grain crops / C. Khafizov, R. Khafizov, A. Nurmiev, I. Galiev // Engineering for Rural Development: 2020. P. 585-590. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF131.
18. Акулин Е. В., Свиридова Л. Е. Применение математического моделирования в науке и технике // Вестник науки. 2021. Т. 2. № 3(36). С. 123-127.
19. Тяговое сопротивление секции чизельного плуга с рабочими органами различной геометрической формы / С. Д. Фомин, Д. С. Гапич, С. И. Субботин, Ю. А. Швабауэр // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 2(74). С. 358-367. doi: 10.32786/2071-9485-2024-02-42.
20. Ибятков Р. И., Зиганшин Б. Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1(65). С. 50-55. doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.

Сведения об авторах:

Федяев Владимир Леонидович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, e-mail: vlfed2020@gmail.com

Институт механики и машиностроения ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.

Галимов Энгель Рафикович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения, сварки и производственной безопасности, e-mail: ERGalimov@kai.ru

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия.

Ахметзянов Ришат Ринатович – кандидат технических наук, доцент кафедры общинженерных дисциплин, e-mail: rishat83@mail.ru

Вагизов Тагир Наилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры общинженерных дисциплин, e-mail: toha-174@mail.ru

Пикмуллин Геннадий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой общинженерных дисциплин, e-mail: pikmullin@mail.ru

Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия.

OPTIMIZATION OF SOIL CULTIVATION MODES WITH MACHINE-TRACTOR UNITS

V. L. Fedyaev, E. R. Galimov, R. R. Akhmetzyanov, T. N. Vagizov, G. V. Pikmullin

Abstract. The objective of this study is to determine the optimal hook load and travel speed of machine-tractor units based on wheeled tractors to improve soil cultivation efficiency. This work is based on a theoretical and experimental approach combining mathematical modeling and production optimization methods with verification using field test data. Field tests were conducted at Kazan State Agrarian University and Kirov Institute of Agricultural Sciences from 1990 to 2005. The study was conducted on typical agricultural conditions of Middle Volga region: compacted arable land (with a density of 1350-1415 kg/m³ and a moisture content of 13-15%), freshly plowed soil (1275-1315 kg/m³, 14-16%) and stubble (1475-1520 kg/m³, 12-14%). Standard and certified instruments were used: R 320 dynamometers, DFM-5 fuel consumption meters, and EIA-P and URDP-AFI devices. It was found that the optimal hook load for rectilinear movement of the machine-tractor unit is 6.5 kN for soil with average properties and the optimal travel speed is 1.25 times theoretical speed of the unit. The load varied for different agricultural backgrounds: 6.9 kN on compacted arable land, 6.6 kN on freshly plowed land and 5.9 kN on stubble. When maneuvering machine-tractor units, the optimal load decreases with increasing theoretical speed according to a hyperbolic law: a 70% increase in speed leads to a 25-30% decrease in load. The turning coefficient decreases by 15-20%, allowing for a smaller turning radius. The resulting relationships allow for a quantitative assessment of the impact of soil agrophysical properties on machine-tractor unit operating modes and can be used in the development of automated control systems for agricultural machinery.

Key words: machine-tractor units, linear motion, maneuvering, optimization, practical recommendations.

References

1. Belyaev AN, Trishina TV, Bryukhovetskiy AN, Vysotskaya IA. [On the coordination of kinematic characteristics of the turning of a wheeled vehicle]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.13. 3 (66). 12-18 p. doi: 10.17238/issn2071-2243.2020.3.12.
2. Novikov VV, Pozdeev AV. [Influence of the angular damping link on vibrations of a three-axle two-section non-suspension wheeled vehicle]. Traktory i selkhoz mashiny. 2019; 4. 54-61 p. doi: 10.31992/0321-4443-2019-4-54-61.
3. Glushchenko AA, Salakhutdinov IR, Subaeva AK, Kalimullin MN. [Towards the formation of a model of operating efficiency of an agricultural tractor as part of an MTA when operating on alternative fuels]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 1 (73). 42-47 p. doi: 10.12737/2073-0462-2024-42-47.
4. Yakhin SM, Khaliullin FK, Imamiev AZ, Matyashin AV, Egorov SV. [Analysis of the kinematics of a tractor hitch with adjustable characteristics]. Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo. 2022; 17-2. 250-259 p. doi: 10.26160/2658-3305-2022-17-250-259.
5. Malyukov SV, Pozdnyakov EV, Shavkov MV, Petkov AF, Shanin II, Belgov AV. [Analysis of modern designs of combined tillage machines and units]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2023; 2(70). 523-534 p. – doi: 10.32786/2071-9485-2023-02-61.
6. Loparev AA, Novikov KV, Komkin AS. [Study of the rolling resistance process of agricultural tractors]. Kirov: OOO Izdatelstvo Raduga-PRESS. 2021; 202 p. – ISBN 978-5-6044635-9-8.
7. Valiev AR, Matveev IN, Shchitov SV. [Reduction of total energy consumption by increasing the stability of the unit's movement]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015; Vol.10. 3(37). 72-76 p. doi: 10.12737/14760.
8. Loparev AA. [Slipping of the drive wheels of MTZ-80 tractor and soil properties]. Zemledelie. 2002; 3. 23-24 p.
9. Gapich DS, Privalov VA. [Forecasting the traction and coupling indicators of wheeled tractors with a dynamic nature of the hook force]. Izvestiya MGTU MAMI. 2016; 4(30). 20-24 p.
10. Byshov NV, Borychev SN, Uspenskiy IA. [Features of modern tractor transport use in technological processes for agricultural crops cultivation]. Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017; 126. 180-198 p. doi: 10.21515/1990-4665-126-013.
11. Maslov GG, Yudina EM, Tsybulevskiy VV, Vovk VV. [Optimization of the parameters of a multifunctional plowing unit]. Colloquium-Journal. 2018; 6-1(17). 62-65 p.
12. Faskhutdinov MKh, Fedyayev VL. Gusenichno-kolesnye dvizhiteli universalno-propashnykh traktorov. Problemy i perspektivy. [Tracked-wheel movers of universal-row-crop tractors. Problems and prospects]. Kazan: Akademiya nauk RT. 2021; 304 p. ISBN 978-5-9690-0891-5.
13. Blednykh VV, Svechnikov PG. [Optimization of working units, design scheme and parameters of the implement]. Agroproduktivnaya politika Rossii. 2015; 1 (37). 7-11 p.
14. Khaliullin DT, Belinskiy A, Valiev AR, Lukmanov RR, Bourges G. Optimization of plow adjustment. Bio web of conferences. 2020; 000103 p. doi: 10.1051/bioconf/20202700103.
15. Valiev AR, Yunusov GS, Mustafin AA. [Optimization of energy and economic indicators of a combined unit]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; Vol.11. 3(41). 72-78 p. doi: 10.12737/22680.
16. Khafizov R, Khafizov C, Nurmiev A, Galiev I. Optimization of main parameters of tractor and unit for seeding cereal crops with regards to their impact on crop productivity. Engineering for Rural Development: Proceedings. 2018; Vol.17. 168-175 p. doi: 10.22616/ERDev2018.17. N192.
17. Khafizov C, Khafizov R, Nurmiev A, Galiev I. Optimization of main parameters of tractor and unit for plowing soil, taking into account their influence on yield of grain crops. Engineering for Rural Development: 2020; 585-590 p. doi: 10.22616/ERDev.2020.19.TF131.
18. Akulin EV, Sviridova LE. [Application of mathematical modeling in science and technology]. Vestnik nauki. 2021; Vol.2. 3 (36). 123-127 p.
19. Fomin SD, Gapich DS, Subbotin SI, Shvabauer YuA. [Traction resistance of a chisel plow section with working units of different geometric shapes]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2024; 2(74). 358-367 p. doi: 10.32786/2071-9485-2024-02-42.
20. Ibyatov RI, Ziganshin BG. [On modeling random processes in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 1 (65). 50-55 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.

Authors:

Fedyayev Vladimir Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, leading researcher, e-mail: vlfed2020@gmail.com

Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Federal Research Center of Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.

Galimov Engel Rafikovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Materials Science, Welding and Industrial Safety, e-mail: ERGalimov@kai.ru

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia.

Akhmetzyanov Rishat Rinatovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Engineering Disciplines, e-mail: rishat83@mail.ru

Vagizov Tagir Nailevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of General Engineering Disciplines Department, e-mail: toha-174@mail.ru

Pikmullin Gennadiy Vasilevich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of General Engineering Disciplines Department, e-mail: pikmullin@mail.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.