

DOI  
УДК 631.372

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЫСКИВАТЕЛЯ

К. А. Хафизов, А. А. Нурмиев, Р. Н. Хафизов, Н. Р. Залаков

**Реферат.** Исследования проводили с целью разработки энергетической математической модели агрегата по защите растений с прицепным опрыскивателем, позволяющей проводить оптимизацию параметров и режимов работы, с учетом их влияния на размеры и потери урожая культуры. Для сравнения с установившимися на практике тенденциями изменения параметров опрыскивателей были выполнены вычислительные эксперименты с использованием разработанной математической модели. Объект исследования – аналог трактора МТЗ-82, основные параметры которого (масса, мощность двигателя, кинематическая длина и др.) могут быть изменены, аналог прицепного опрыскивателя с переменными параметрами (ширина захвата, рабочая скорость, объем бака, длина дышла, расположение центра масс, ширина профиля и диаметр опорного колеса и др.). Критерий оптимизации был составным и включал в себя сумму прямых и косвенных энергетических затрат при работе агрегата, с учетом энергии урожая, потерянного из-за отклонений от оптимальных параметров и режимов работы опрыскивателя. Неверный выбор параметров агрегата приводит к потерям урожайности, складывающимся из ее снижения из-за нарушения срока выполнения технологической операции по защите посевов от сорной растительности, утаптывания части посевов движителями агрегата при обработке, особенно при отсутствии возможности поворота за пределами поля, из-за уплотнения почвы в зоне роста и развития корневых систем растений. Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием разработанной энергетической математической модели показали, что увеличение ширины захвата опрыскивателей с 16 до 32 м при скорости агрегата 12 км/ч ведет к снижению суммарных энергетических затрат с 3250 МДж/га до 1692 МДж/га, увеличение скорости агрегата с 7 до 12 км/ч, при ширине захвата 32 м снижает суммарные энергетические затраты с 1971 до 1692 МДж/га. Уменьшение ширины профиля шины колеса опрыскивателя с 0,6 до 0,2 м, сопровождается уменьшением суммарных энергетических затрат с 2793 МДж/га до 1692 МДж/га.

**Ключевые слова:** машинно-тракторный агрегат, опрыскиватель, энергозатраты, потери урожайности, оптимизация параметров, критерий оптимизации.

**Введение.** Защита растений – одна из важнейших технологических операций при возделывании зерновых и других сельскохозяйственных культур, поэтому разработке новых технических решений для опрыскивания вегетирующих посевов [1, 2, 3] и совершенствованию теории их применения [4, 5, 6] уделяется значительное влияние. Однако большинство исследователей в своих работах ограничиваются обоснованием одного из параметров опрыскивателя (ширины захвата, скорости агрегата, объема бака и др.) [7, 8, 9], используя такие частные показатели эффективности, как производительность и затраты денежных средств [10, 11, 12]. В последние годы наблюдается тенденция к росту изучения влияния сложных динамических явлений, сопровождающих работу опрыскивателей, на эффективность их работы [5, 13, 14].

В связи с тем, что основная цель защиты растений не повышенная производительность агрегатов и снижение затрат на обработку посевов, было бы интересно выявить такие параметры опрыскивателей, которые обеспечивают не только большую производительность и минимальные эксплуатационные затраты, но и обеспечивают наименьшие потери урожайности, а также самые низкие затраты энергии, в том числе урожая, теряемого из-за неверно выбранных параметров опрыскивателя [15, 16, 17].

Цель исследования – разработка энергетической математической модели агрегата с прицепным опрыскивателем, позволяющей

проводить оптимизацию параметров и режимов работы с учетом их влияния на размеры и потери урожая, а также проведение вычислительных экспериментов, с использованием разработанной математической модели для сравнения с установившимися на практике тенденциями изменения параметров опрыскивателей.

**Условия, материалы и методы.** Для разработки математической модели опрыскивателя использовали наработанный в сфере эксплуатации МТА, теории тракторов и автомобилей прикладной математический аппарат, а также достижения агрономических и инженерных наук.

Критерий оптимизации был составным и включал в себя совокупность прямых и косвенных затрат энергии в МДж при опрыскивании 1 га посевов. К косвенным энергетическим относятся удельные затраты энергии на изготовление, ремонт и техническое обслуживание агрегата в МДж/га.

К прямым энергетическим затратам относим энергию затраченную оператором на управление агрегатом, энергию использованную двигателем агрегата топлива и смазочных материалов, энергию потерянного урожая, выраженную в МДж/га.

Потери урожая возникают из-за увеличения сроков опрыскивания, вытаптывания посевов ходовой частью агрегата, а также уплотнения почвы. Математически это можно записать в виде формулы:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & \mathcal{E}_{изг.мп}^{y\delta} + \mathcal{E}_{изг.онр}^{y\delta} + \mathcal{E}_{КР.мп}^{y\delta} + \\ & + \mathcal{E}_{ТОР.мп}^{y\delta} + \mathcal{E}_{ТОР.онр}^{y\delta} + \mathcal{E}_{упр}^{y\delta} + \mathcal{E}_{ТСМ}^{y\delta} + \\ & + \mathcal{E}_{агр}^{y\delta} + \mathcal{E}_{упан}^{y\delta} + \mathcal{E}_{упл}^{y\delta} \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}$  – удельные суммарные энергетические затраты, МДж/га (является критерием оптимизации параметров МТА);

$\mathcal{E}_{изг.мп}^{y\delta}, \mathcal{E}_{изг.онр}^{y\delta}$  – энергия, затраченная на изготовление соответственно трактора и опрыскивателя, приходящаяся на 1 га, МДж/га;

$\mathcal{E}_{КР.мп}^{y\delta}, \mathcal{E}_{ТОР.мп}^{y\delta}, \mathcal{E}_{ТОР.онр}^{y\delta}$  – энергия, затраченная соответственно на капитальный, текущий ремонт и техническое обслуживание трактора и опрыскивателя, МДж/га;

$\mathcal{E}_{упр}^{y\delta}$  – энергия, затраченная на управление трактором (переключение передач, повороты, остановку и трогание с места, технологическое обслуживание сельскохозяйственной машины), МДж/га;

$\mathcal{E}_{ТСМ}^{y\delta}$  – энергия топлива, затраченная на выполнение агрегатом технологической операции, МДж/га;

$\mathcal{E}_{агр}^{y\delta}$  – энергия урожая, потерянная от нарушения агротехнических сроков выполнения операции, МДж/га;

$\mathcal{E}_{упан}^{y\delta}$  – энергия урожая, потерянная из-за утаптывания посевов движителями агрегата, МДж/га;

$\mathcal{E}_{упл}^{y\delta}$  – энергия урожая, потерянная из-за уплотнения почвы движителями агрегата, МДж/га.

Вычислительные эксперименты по оптимизации ширины захвата опрыскивателя и его рабочей скорости проводили для случая, когда поворот агрегата осуществляется за пределами поля, при следующих исходных условиях:

- площадь поля  $F_{поля}=30$  га;
- длина гона  $l_{гона}=0,8$  км;
- расстояние переезда  $l_{пер}=3$  км;
- коэффициент прочности несущей поверхности поля  $Q_1=0,9$ ;
- объем работ  $Q=1000$  га;
- число тракторов, занятых на операции  $N_{тракт}=1$  шт.;
- продолжительность рабочего дня  $T_{дnev}=14$  ч;
- планируемая урожайность культуры  $УР=40$  ц/га;
- норма внесения ядохимикатов  $НЗ=150$  л/га;
- давление насоса  $P_{насос}=3$  МПа;
- давление воздуха в шинах  $P_w=0,16$  МПа;
- число колес на одном борту моста  $Z_k=1$  шт.;
- коэффициент сцепления колес с почвой  $K_{сцеп}=0,5$ ;

коэффициент сопротивления перекатыванию колес  $f_{переk}=0,1$ .

В ходе исследований определяли математическую связь между элементами критерия оптимизации, параметрами агрегата, режимом работы опрыскивателя, учитывая совокупность факторов сложной системы трактор–оператор–опрыскиватель–поле–почва–урожай.

**Результаты и обсуждение.** Удельные энергозатраты на изготовление техники прямо пропорциональны общим (абсолютным) энергозатратам [16, 17, 18] на изготовление составных элементов агрегата в заводских условиях и обратно пропорциональны ширине захвата опрыскивателя, скорости его перемещения, коэффициенту использования времени смены, годовой загрузке трактора и опрыскивателя, а также сроку их службы. Для трактора математически это выражается зависимостью:

$$\mathcal{E}_{изг.мп}^{y\delta} = \frac{\mathcal{E}_{изг.мп}}{0,01 \cdot T_{год} \cdot T_{сл} \cdot V_p \cdot B_p \cdot \tau}, \quad (2)$$

где

$\mathcal{E}_{изг.мп}^{y\delta}$  – удельная энергия, затраченная на изготовление трактора или опрыскивателя, МДж/га;

$\mathcal{E}_{изг.мп}$  – энергия, затраченная на изготовление трактора или опрыскивателя, МДж;

$T_{год}$  – срок службы трактора или опрыскивателя, лет;

$T_{сл}$  – годовая загрузка трактора или опрыскивателя в часах, ч/год;

$V_p$  – рабочая скорость агрегата, км/ч;

$B_p$  – рабочая ширина захвата агрегата, м;

$\tau$  – коэффициент использования времени смены.

Коэффициент использования времени смены можно рассчитать по формуле:

$$\tau = \frac{0,77}{\left(1 + \left[1,2/l_z \cdot V_{нов} + 0,1 \cdot (t_{н.н.} + l_{пер}/V_{пер})/F_n + 0,1 \cdot (t_{заг} + t_{м}) \cdot H/60 \cdot V_{сук} \cdot \psi\right] \cdot B_p \cdot V_p\right)} \quad (3)$$

где  $l_z$  – длина гона, м;

$V_{нов}$  – скорость поворота агрегата в конце гона, км/ч;

$t_{н.н.}$  – время подготовки к переезду, ч;

$l_{пер}$  – расстояние переезда, км;

$V_{пер}$  – скорость переезда, км/ч;

$F_n$  – площадь поля, га;

$t_{заг}$  – время загрузки емкости опрыскивателя, мин;

$t_{по}$  – время подъезда к месту заправки, мин;

$H$  – норма внесения жидкости, л/га;

$V_{емк}$  – объем емкости опрыскивателя, л;

$\psi$  – коэффициент использования объема бака опрыскивателя;

$B_p$  – рабочая ширина захвата агрегата, м;

$V_p$  – рабочая скорость агрегата, км/ч.

Для поддержания техники в работоспособном состоянии проводят ремонт и техническое обслуживание. Методика их расчета приведена в работах [16, 17]. Допустим удельные энергозатраты на капитальный ремонт трактора  $\mathcal{E}_{КР}^{y\partial}$  можно рассчитать по следующей зависимости:

$$\mathcal{E}_{КР}^{y\partial} = \frac{a_{КР}}{a_p} \cdot \mathcal{E}_{изг.тр}^{y\partial} \quad (4)$$

где

$\mathcal{E}_{КР}^{y\partial}$  – энергия на капитальный ремонт трактора, в расчете на единицу площади, МДж/га;

$a_{КР}$  – коэффициент отчислений на капитальный ремонт трактора;

$a_p$  – коэффициент отчислений на реновацию трактора.

По такой же методике рассчитываются остальные составляющие энергозатрат на поддержание техники в работоспособном состоянии.

Энергозатраты на управление опрыскивателем  $\mathcal{E}_{упр}^{y\partial}$  зависят от совершенства техники и

связаны с энергозатратами воздействия на органы управления агрегатом, а также с интенсивностью этих воздействий, что для каждого агрегата требует индивидуальной методики расчета. В связи с этим для упрощенных расчетов предлагается формула (5):

$$\mathcal{E}_{упр}^{y\partial} = K_{ТР} \cdot (n_{мех} + n_{всп}) / W \quad (5)$$

где

$K_{ТР}$  – коэффициент перевода затрат труда в МДж, МДж/чел×ч;

$n_{мех}$  – число механизаторов, чел;

$n_{всп}$  – число вспомогательных рабочих, чел;

$W$  – производительность опрыскивателя, га/ч.

Прямые удельные энергетические затраты, связанные с использованием различных видов

топлива и масел  $\mathcal{E}_{ТСМ}^{y\partial}$  (МДж/га) можно рассчитать по формуле (6):

$$\mathcal{E}_{ТСМ}^{y\partial} = K_{ТСМ} \cdot (\tau \cdot G_p + \tau_{пер} \cdot G_{пер} + \tau_{x.x} \cdot G_{x.x}) / W \quad (6)$$

где

$K_{ТСМ}$  – коэффициент перевода массы топлива и смазочных материалов в энергию, МДж/кг;

$\tau_{пер}$  – коэффициент использования времени смены на переезды;

$\tau_{x.x}$  – коэффициент использования времени смены на остановках агрегата при холостой работе двигателя;

$G_p, G_{пер}, G_{x.x}$  – часовой расход топлива соответственно на рабочем ходу, переездах агрегата и холостом ходу двигателя, кг/ч [19, 20].

Расход топлива двигателем трактора при работе под нагрузкой рассчитывается по формулам (7, 8, 9, 10, 11), исходя из показателей работы двигателя на номинальном режиме и мощности, развиваемой двигателем в зависимости от текущей нагрузки:

$$G_p = (G_{ном} \cdot (n_{x.x} - n_i) + G_{x.x} \cdot (n_i - n_{ном})) / (n_{x.x} - n_{ном}) \quad (7)$$

$$n_i = \left( M_{ном} \cdot n_{x.x} + \sqrt{((M_{ном} \cdot n_{x.x})^2 - (4 \cdot M_{ном} \cdot 9550 \cdot N_i \cdot (n_{x.x} - n_{ном})))} \right) / (2 \cdot M_{ном}) \quad (8)$$

$$M_{ном} = 9549 \cdot N_{ном} / n_{ном} \quad (9)$$

$$G_{ном} = g_{еном} \cdot N_{ном} \quad (10)$$

$$N_i = \left( \frac{V_p \cdot f_{опр} \cdot \lambda_{ц.м.опр} \cdot [G_{опр} + V_{емк} \cdot \rho_{жидк} \cdot \psi]}{[2,7 \cdot \eta_m \cdot \xi_{ов}] +} \right) + \left( \frac{p \cdot V_p \cdot B_p \cdot H}{3,6 \cdot 10^4 \cdot \eta_{нас} \cdot \eta_{вом}} \right) \quad (11)$$

где  $n_{x.x}, n_i, n_{ном}$  – частота вращения коленчатого вала двигателя на холостом ходу, текущая в зависимости от нагрузки на двигатель и номинальная, об/мин;

$G_{ном}$  – часовой расход топлива двигателем на номинальном режиме его работы, кг/ч;

$M_{ном}$  – крутящий момент на валу двигателя при работе на номинальном режиме, Н·м;

$N_{ном}$  – мощность, выдаваемая двигателем при работе на номинальном режиме, кВт;

$N_i$  – мощность, выдаваемая двигателем при работе с текущей нагрузкой, кВт;

$g_{еном}$  – удельный расход топлива на номинальном режиме работы двигателя, г/кВт·ч;

$\rho_{жидк}$  – удельный вес жидкого раствора кН/л;

$\lambda_{ц.м.опр}$  – коэффициент распределения веса опрыскивателя с жидкостью на колеса опрыскивателя;

$f_{опр}$  – коэффициент сопротивления перекачиванию колес опрыскивателя;

$G_{опр}$  – вес опрыскивателя без воды, кН;

$\xi_{ов}$  – коэффициент загрузки двигателя по мощности;

$p$  – давление, создаваемое насосом опрыскивателя при подаче жидкости на распылители опрыскивателя, МПа;

$\eta_{ВОМ}$  – КПД вала отбора мощности (ВОМ) трактора;

$\eta_{нас}$  – КПД насоса опрыскивателя;

$\eta_m$  – тяговое КПД трактора.

Масса современных прицепных опрыскивателей  $M_{опр}$  зависит от ширины захвата  $B_p$ . Исходя из анализа характеристик большого количества прицепных опрыскивателей выявлена регрессионная зависимость между величинами этих показателей:

$$M_{опр} = 5843,2 - 216,636 \cdot B_p + 5,076 \cdot B_p^2 \quad (12)$$

Тяговое КПД трактора рассчитаем по формулам:

$$\eta_m = \frac{(0,92 \cdot B_p \cdot \kappa_{схм} \cdot (1 - \delta))}{(B_p \cdot \kappa_{схм} + f_{mp} \cdot G_{mp} \cdot \lambda_{mp} + f_{mp} \cdot G_{опр} \cdot (1 - \lambda_{опр}))} \quad (13)$$

где  $\kappa_{схм}$  – удельное сопротивление опрыскивателя, кН/м;

$G_{mp}$  – вес трактора, кН;

$\delta$  – буксование колес трактора;

$\lambda_{опр}$  – коэффициент распределения веса опрыскивателя на колеса опрыскивателя;

$\lambda_{mp}$  – коэффициент распределения веса трактора на ведущие колеса;

$f_{mp}$  – коэффициент сопротивления перекатыванию колес трактора.

Буксование колес трактора можно рассчитать по формулам:

$$\delta = a \cdot p + v \cdot p^c \quad (14)$$

$$p = (B_p \cdot \kappa_{схм}) / (\varphi (G_{mp} \cdot \lambda_{mp} + G_{опр} (1 - \lambda_{опр}))) \quad (15)$$

где  $a, v, c$  – коэффициенты пропорциональности в эмпирической формуле Б. С. Свирищева, учитывающие особенности ходовой части трактора;

$\varphi$  – коэффициент сцепления колес трактора с опорной поверхностью.

Технологическая операция по защите растений проводится с целью снижения потерь урожая. На сегодняшний день отсутствуют методика и расчет, связанная с изменениями параметров опрыскивателя.

Энергия потерянного урожая складывается из энергии урожая, который теряется из-за несвоевременного выполнения технологической операции ( $\mathcal{E}_A$ ) и из-за негативного воздействия движителей трактора на посевы ( $\mathcal{E}_Y$ ), то есть  $\mathcal{E}_{ном} = \mathcal{E}_A + \mathcal{E}_Y$

Воздействие движителей агрегата на посевы проявляется через вытаптывание их части и ухудшение условий развития растений из-за уплотнения почвы. Поэтому энергия урожая, теряемая из-за негативного воздействия движителей трактора на посевы, будет складываться из энергии, потерянной в связи со снижением урожая из-за уплотнения почвы  $\mathcal{E}'_Y$

и в связи с вытаптыванием колесами трактора и опрыскивателя посевов  $\mathcal{E}''_Y$

Математически это можно записать в виде уравнения:

$$\mathcal{E}_Y = \mathcal{E}'_Y + \mathcal{E}''_Y \quad (16)$$

Для расчета энергии урожая, потерянной из-за несвоевременного выполнения технологической операции по уходу за растениями возможно применение следующей формулы [19, 20, 21]:

$$\mathcal{E}_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_1-1} (C_{пi} \cdot i \cdot W \cdot T_{смi} \cdot n_{смi}) + (N_1 + 1) \cdot \Delta i \cdot C_{пN_1} \cdot W \cdot T_{смN_1} \cdot n_{смN_1}}{S_0} \quad (17)$$

где

$C_{пi}$  – коэффициент потерь урожая, МДж/га×день;

$N_1$  – число целых дней в общем количестве дней, необходимых для полного завершения работ по защите растений  $N_1$ ;

$\Delta i$  – остаточный неполный день в  $N_1$ ;

$S_0$  – объем работы за сезон, приходящийся на один посевной агрегат, на данной операции, га.

Коэффициент потерь урожая  $C_{пi}$ , рассчитываем по формуле:

$$C_{пi} = Y_{пл} \cdot \Delta y \cdot Q / 100 \quad ; \quad (18)$$

где  $Y_{пл}$  – планируемая урожайность, кг/га;

$\Delta y$  – потери урожая в % на 1 день нарушения агротехнического срока выполнения технологической операции;

$Q$  – энергоемкость 1 кг продукта (зерна), МДж/кг.

Общее количество дней, необходимых для полного завершения работ по защите растений  $N_1$  рассчитаем по формуле:

$$N_1 = \frac{S_0}{W \cdot T_{смi} \cdot n_{смi}} \quad , \quad (19)$$

где  $N_1$  – число дней необходимых для выполнения операции на площади  $S_0$ ;

$n_{смi}$  – коэффициент сменности;

$T_{смi}$  – продолжительность смены, час.

Величину  $\Delta y$  можно установить на основе полевых агрономических опытов или с использованием ранее установленных значений (табл. 1) [22].

Энергию потерянную в связи со снижением урожая из-за уплотнения почвы возможно рассчитать по формуле (21):

$$\mathcal{E}'_Y = \frac{Y_{пл} \cdot A \cdot Q \cdot (U_T - [U])}{100} \quad (20)$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности, %×м/кН;

$U_T$  – показатель, характеризующий уплотняющее воздействие движителей трактора на почву, кН/м;

$[U]$  – допустимый уровень уплотняющего воздействия движителей трактора, ниже которого не происходит снижение урожайности культур ( $[U] = 75$  кН/м).

Таблица 1– Уменьшение потерь урожая  $\Delta u$  на 1 день сокращения периода полевых работ, %

Число сорняков, шт/м <sup>2</sup>	Озимая пшеница	Яровая пшеница	Ячмень	Гречиха	Рис	Лен-долгунец	Кукуруза на силос	Картофель	Сахарная свекла	Подсолнечник	Соя	Однолетние травы	Многолетние травы
	Коэффициенты потерь урожайности, %/сут (*)												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,014	0,020	0,018	0,033	0,013	0,001	0,0242	0,0253	0,02	0,02	0,05	0,02	0,029
10	0,027	0,038	0,038	0,064	0,03	0,020	0,0475	0,0495	0,03	0,05	0,09	0,04	0,053
15	0,040	0,057	0,057	0,094	0,037	0,320	0,0700	0,0716	0,05	0,07	0,13	0,06	0,074
25	0,064	0,092	0,017	0,147	0,059	0,047	0,1133	0,1147	0,07	0,11	0,19	0,10	0,113
50	0,117	0,174	0,164	0,253	0,111	0,092	0,2100	0,2042	0,14	0,2	0,28	0,18	0,178
75	0,163	0,244	0,228	0,328	0,158	0,131	0,2908	0,2747	0,19	0,27	0,33	0,26	0,215
100	0,201	0,307	0,281	0,382	0,198	0,173	0,3592	0,3284	0,23	0,32	0,36	0,33	0,236
200	0,304	0,488	0,423	0,481	0,321	0,310	0,5442	0,4526	0,35	0,45	0,39	0,53	0,262
500	0,396	0,694	0,550	0,516	0,469	0,571	0,7100	0,5168	0,45	0,54	0,39	0,77	0,275

Для расчета  $U_T$  в работе [23] предлагается зависимость:

$$U_T = \frac{B_1}{2 \cdot B_p} \cdot \sum_{j=1}^n U_j + [U] \cdot \left(1 - \frac{n \cdot B_1}{2 \cdot B_p}\right), \quad (21)$$

где  $B_1$  – ширина зоны влияния уплотняющего воздействия трактора на урожайность сельскохозяйственных культур на поле, м (в ориентировочных расчетах  $B_1 = 10,8$  м);

$n$  – общее число следов движителей, оставляемых трактором на поле за один проход;

$U_j$  – уплотняющее воздействие движителей в  $j$ -м следе, кН/м.

Уплотняющее воздействие движителей в  $j$ -м следе находим по уравнению:

$$U_j = w \cdot v \cdot q_{\max}, \quad (22)$$

где  $w$  – коэффициент, зависящий от размеров и формы опорной поверхности движителей (для колесного движителя  $w = 1,25$  [23]);

$v$  – ширина движителя, м;

$q_{\max}$  – максимальное давление каждого движителя трактора и опрыскивателя на почву, кПа.

Максимальное давление каждого движителя трактора и опрыскивателя на почву параметр  $q_{\max}$  зависит от параметров трактора [24, 25, 26], его движителя и свойств почвы. Для выявления формулы его расчета были проведены исследования, основанные на теории подобия и планирования многофакторных экспериментов. После анализа их данных было получено уравнение [27, 28, 29], адекватно отражающее результаты этих исследований:

$$q_{\max} = 3,46 \cdot \rho_w - 7,4493 \cdot B \cdot \rho_w / D + 0,075552 \cdot H_n - 0,23353 \cdot (\rho_n \cdot \rho_w \cdot D^3) / M. \quad (23)$$

где  $q_{\max}$  – максимальное давление колеса на почву, Н/м<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр колеса, м;

$M$  – масса, приходящаяся на одно колесо, кг;

$B$  – ширина профиля колеса, м;

$H_n$  – твёрдость почвы, Па;

$\rho_n$  – плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_w$  – давление воздуха в шинах, Н/м<sup>2</sup>.

По формуле (24) можно рассчитать максимальное давление на почву управляемых колес трактора, его ведущих колес и колес опрыскивателя. Для этого предварительно определяется масса агрегата, которая приходится на соответствующие колеса.

Расчет массы, приходящейся на переднее управляемое колесо трактора:

$$M_{тр.пер} = M_{тр} \cdot (1 - \lambda_{тр}) \cdot 50 - 100 \cdot L_{кр} \cdot (M_{опр} + V_{емк} \cdot \psi \cdot \rho) \cdot (1 - \lambda_{опр}) / (2 \cdot L), \quad (24)$$

где  $L_{кр}$  – кинематическая длина трактора, м;

$L$  – длина базы трактора, м.

Расчет массы, приходящейся на заднее колесо трактора:

$$M_{тр.пер} = M_{тр} \cdot \lambda_{тр} \cdot 50 + 100 \cdot L_{кр} \cdot (M_{опр} + V_{емк} \cdot \psi \cdot \rho) \cdot (1 - \lambda_{опр}) \cdot (L + L_{кр}) / (2 \cdot L), \quad (25)$$

Расчет массы, приходящейся на колесо опрыскивателя:

$$M_{опр} = 100 \cdot (M_{опр} + V_{емк} \cdot \psi \cdot \rho) \cdot \lambda_{опр} / 2, \quad (26)$$

Расчет максимального уплотняющего воздействия управляемых колес трактора ( $q_{\max.пер.}$ ), задних колес трактор ( $q_{\max.задн.}$ ), колес опрыскивателя ( $q_{\max.опр.}$ ) проводится по формуле (24) путем подстановки соответствующих параметров.

Расчет суммарного уплотняющего воздействия  $U_j$  3-ех колес агрегата, движущихся след в след [23]:

$$\sum_{j=1}^3 U_j = w \cdot (b_{пер.тр} \cdot q_{\max.пер} + b_{задн.тр} \cdot q_{\max.задн} \cdot k_{i.задн} \cdot (\log 2 - \log 1) + b_{опр} \cdot q_{\max.опр} \cdot k_{i.опр} \cdot (\log 3 - \log 2)) \quad (27)$$

$$k_{i.задн} = \frac{1}{\log 2 - \log 1} - \frac{q_{\max.пер}}{q_{\max.задн} \cdot ((\log 2 - \log 1) - 1)}, \quad (28)$$

$$k_{i,опр} = \frac{1}{\log 3 - \log 2} - \frac{q_{\max\_задн}}{q_{\max\_опр}((\log 3 - \log 2) - 1)}, \quad (29)$$

где  $b_{пер.тр}$ ,  $b_{задн.тр}$ ,  $b_{опр}$  – ширина профиля шины соответственно передних колес трактора, задних колес трактора и колес опрыскивателя, м;  $k_{i\_задн}$ ,  $k_{i\_опр}$  – коэффициенты, учитывающие увеличение уплотнения почвы в следах передних колес трактора при качении по ним ведущих задних колес трактора и колес опрыскивателя.

Энергия урожая, потерянная из-за вытаптывания части посевов колесами трактора и агрегата, рассчитывается с использованием следующего алгоритма. Площадь прямоугольного поля  $F_n$  определяется как произведение ширины  $B_n$  на длину  $L_n$ :

$$F_n = B_n \times L_n. \quad (30)$$

Если повороты опрыскивателя осуществляются за пределами поля, то площадь утаптываемых посевов  $F_{утап}$  можно определить из уравнения:

$$F_{утап} = 2 \cdot b_{ш. макс} \cdot L_n \cdot \left( \frac{B_n}{B_p} \right) = 2 \cdot b_{ш. макс} \cdot F_n / B_p \quad (31)$$

где  $b_{ш. макс}$  – ширина самой широкой шины в движителях агрегата, м.

Тогда энергия урожая, теряемого из-за утаптывания посевов движителями агрегата  $\mathcal{E}_y''$  рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_y'' = \frac{200 \cdot F_{утап} \cdot Q \cdot Y \cdot b_{ш. макс}}{B_p}, \quad (32)$$

где  $Q$  – энергосодержание 1 кг зерна, МДж/кг;  $Y$  – урожайность культуры, ц/га.

Если повороты опрыскивателя осуществляются в пределах поля, то площадь утаптываемых посевов  $F_{утап}$  определяется по формуле:

$$F_{утап} = F_{у.поле} + F_{у.пов}, \quad (33)$$

где  $F_{у.поле}$  – площадь утаптываемых посевов на гоне, м<sup>2</sup>;  $F_{у.пов}$  – площадь утаптываемых посевов на поворотных полосах, м<sup>2</sup>.

Площадь утаптываемых посевов на гоне можно рассчитать по формуле:

$$F_{у.поле} = 2 \cdot b_{ш. макс} \cdot (2 \cdot b_{ш. макс} \cdot L_n \cdot \left( \frac{B_n}{B_p} \right) - B_p) \cdot \left( \frac{B_n}{B_p} \right) + 2 \cdot b_{ш. макс} \cdot l_2 \cdot \left( \frac{B_n}{B_p} \right) = 2 \cdot b_{ш. макс} \cdot l_2 \cdot (F_n / (L_n \cdot B_p)), \quad (34)$$

Площадь утаптываемых посевов на поворотных полосах определить из выражений:

$$F_{у.пов} = (F_{сл.упр.} + F_{сл.вед.} + F_{сл.опрыск.}) \cdot n_{пов}, \quad (35)$$

где  $F_{сл.упр.}$  – площадь следов управляемых колес трактора, м<sup>2</sup>;  $F_{сл.вед.}$  – площадь следов ведущих колес трактора, м<sup>2</sup>;

$F_{сл.опрыск.}$  – площадь следов колес опрыскивателя, м<sup>2</sup>. Исходя из теоретических выкладок в работе [15]:

$$F_{у.пов} = 2\pi \left( b_{упр} \cdot \left[ \sqrt{L^2 + \left( \rho + \frac{B_{км}}{2} \right)^2} + \sqrt{L^2 + \left( \rho - \frac{B_{км}}{2} \right)^2} \right] + 2\rho \cdot b_{вед} + B_p \cdot b_{опр} \right) \cdot \left( \frac{B_n}{B_p} \right) \quad (36)$$

$$F_{у.пов} = 2\pi \left( b_{упр} \cdot \left[ \sqrt{L^2 + \left( \rho + \frac{B_{км}}{2} \right)^2} + \sqrt{L^2 + \left( \rho - \frac{B_{км}}{2} \right)^2} \right] + 2\rho \cdot b_{вед} + B_p \cdot b_{опр} \right) \cdot (10000 \cdot F_n / ((L_n + B_p) \cdot B_p))$$

где  $b_{упр}$ ,  $b_{вед}$ ,  $b_{опр}$  – ширина профиля шины соответственно управляемых и ведущих колес трактора, колес опрыскивателя;

$L$  – база трактора, м;

$\rho$  – радиус поворота трактора с передними управляемыми колесами, м;

$B_{км}$  – колея трактора, м;

Радиус поворота трактор определяется по зависимости [30]:

$$\rho = \sqrt{(0,5B_p)^2 + L_D^2 - L_{кр}^2}, \quad (37)$$

где  $L_D$  – длина дышла опрыскивателя, м;

$L_{кр}$  – вылет точки прицепа (кинематическая длина трактора), м.

Энергия урожая, потерянного из-за утаптывания посевов колесами агрегата на поворотной полосе:

$$\mathcal{E}_{у.пов}'' = Y \cdot Q \cdot (F_{у.пов} / 100), \text{ МДж.} \quad (38)$$

$$\mathcal{E}_{у.пов}'' = \frac{100 \cdot F_{у.пов} \cdot (L_n + B_p) \cdot Y \cdot Q}{B_p \cdot F_n}, \text{ МДж/га.}$$

Из-за большого размера математической модели и учета большого количества факторов, трудно проследить влияние каждого из них, а также отдельных параметров агрегата на величину суммарных энергетических затрат, поэтому возникает необходимость получения наглядных графиков, раскрывающих это влияние, по результатам вычислительных экспериментов.

В результате расчетов с использованием разработанной математической модели агрегата по защите растений с прицепным опрыскивателем были получены следующие оптимальные параметры:

- ширина захвата опрыскивателя  $V_{opt} = 32$  м;
- скорость агрегата  $V_{opt} = 12$  км/ч;
- объем бака опрыскивателя  $V_{емкopt} = 5000$  л;
- диаметр колеса опрыскивателя  $D_k = 1,778$  м;
- ширина шины колеса опрыскивателя  $V_{digit} = 0,2$  м;
- коэффициент распределения веса опрыскивателя на его колеса  $\lambda_{ц.т.опр} = 0,83$ .

Минимальные суммарные энергетические затраты при оптимальных параметрах опрыскивателя  $E_{min} = 1692,2$  МДж/га.

Анализ графических зависимостей указывает на то, что ширина захвата опрыскивателя оказывает большее влияние на величину сум-

марных энергетических затрат, чем его скорость (рис. 1).

На скорости 12 км/ч при изменении ширины захвата с 16 до 32 м суммарные энергетические затраты снижаются с 3250 МДж/га до 1692 МДж/га, или на 1558 МДж/га, а при увеличении скорости агрегата с 7 до 12 км/ч при ширине захвата 32 м – с 1971 до 1692 МДж/га, или на 279 МДж/га.

При уменьшении ширины профиля колеса опрыскивателя в заданных пределах от 0,6 до 0,2 м (рис. 2) суммарные энергетические затраты снижаются с 2793 МДж/га до 1692 МДж/га, или на 1101 МДж/га.

В пределах заданных границ варьирования коэффициента распределения веса опрыскивателя на его опорные колеса от 0,83 до 1 при ширине профиля шины равной 0,2 м

суммарные энергетические затраты возрастают с 1692 МДж/га до 2102 МДж/га.

Полученные результаты верифицируются с существующими тенденциями в изменении параметров прицепных опрыскивателей.

В мировой практике наблюдается увеличение ширины захвата опрыскивателей (до 50 м), объема бака опрыскивателя (до 6000 л и более) и скорости выполнения технологической операции (до 20 км/ч и более), а также переход на использование узкопрофильных шин (в пределах 0,2 м).

Разработанная энергетическая математическая модель агрегатов по уходу за растениями позволяет получить большее количество дополнительной информации, связанной с оптимизацией его параметров, без проведения дорогостоящих натуральных экспериментов.

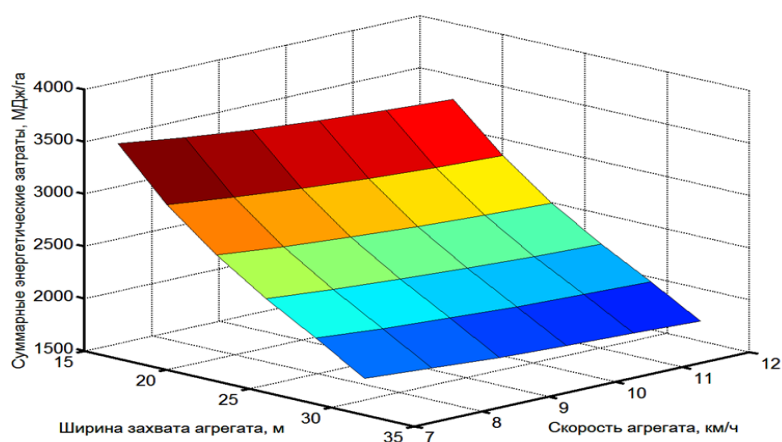


Рис. 1 – Влияние ширины захвата и скорости опрыскивателя на суммарные энергетические затраты

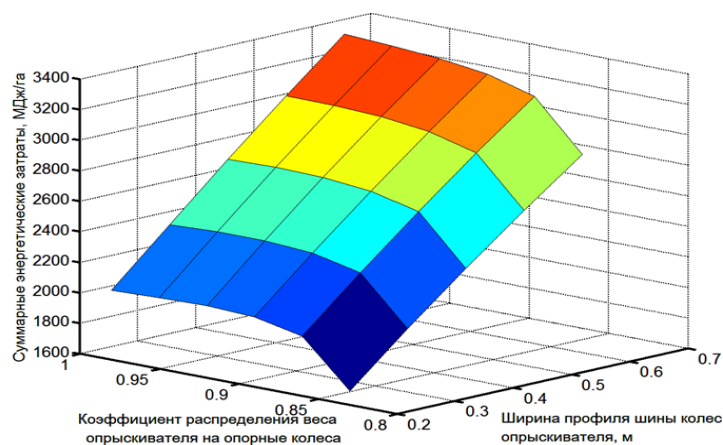


Рис. 2 – Влияние коэффициента распределения веса опрыскивателя на его колеса и ширины профиля колес на суммарные энергетические затраты

**Выводы.** В результате теоретических изысканий составлена математическая модель работы прицепного опрыскивателя с трактором 4к4а по критерию суммарные энергетические затраты с учетом энергии теряемого урожая. Результаты предварительных вычислительных экспериментов, проведенных с ее использованием совпадают с тенденциями изменения параметров опрыскивателей в

мировой практике (увеличение ширины захвата и рабочей скорости, снижение ширины профиля шин колеса), что ведет к снижению суммарных энергетических затрат и потере урожая. Рост ширины захвата опрыскивателя и его рабочей скорости ведут к снижению суммарных энергетических затрат, причем влияние ширины захвата на критерий оптимизации проявляется сильнее, чем влияние скорости.

Так, на скорости 12 км/ч при изменении ширины захвата с 16 до 32 м суммарные энергетические затраты уменьшаются на 1558 МДж/га, а увеличение скорости агрегата с 7 до 12 км/ч при ширине захвата 32 м снижает их на 279 МДж/га.

Минимальные суммарные энергетические затраты достигаются при ширине профиля колеса опрыскивателя равном 0,2 м и наименьшем коэффициенте распределения веса опрыскивателя на его опорные колеса равном 0,83. При снижении ширины профиля колеса опрыскивателя в пределах от 0,6 до 0,2 м суммарные энергетические затраты

уменьшаются на 1101 МДж/га, а увеличение коэффициента распределения веса опрыскивателя на его опорные колеса с 0,83 до 1 приводит к их росту при ширине профиля шины 0,2 м на 402 МДж/га.

Разработанная энергетическая математическая модель работы прицепного опрыскивателя в агрегате с трактором 4к4а позволят проводить вычислительные эксперименты по исследованию влияния различных параметров опрыскивателя и факторов рассматриваемой системы на размеры энергетических затрат и потери урожайности и находить оптимальные варианты их конструирования и эксплуатации.

#### Литература

1. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития / А. С. Дорохов, И. А. Старостин, А. В. Ешин и др. // *Агроинженерия*. 2022. Т.24. № 3. С. 12-18. doi: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.
2. Бирюков А. В., Пономарев В. А. Патент на полезную модель № 120852 U1 Российская Федерация, МПК А01М 7/00. Штанговый опрыскиватель для обработки полевых культур: № 2012126036/13: заявл. 25.06.2012; опубл. 10.10.2012.
3. Мезникова М. В. Влияние технологических параметров вертикального опрыскивания на обеспечение экологической безопасности при возделывании пропашных культур // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2022. № 4(68). С. 502-514. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-59.
4. Аналитические исследования технических параметров самодвижущихся опрыскивателей / Е. Е. Демин, А. С. Старцев, А. А. Протасов и др. // *Аграрный научный журнал*. 2021. № 12. С. 112-114. doi: 10.28983/asj.y2021i12pp112-114.
5. Федоренко В. Ф. Оптимизация методов и инструментов экологической трансформации применения средств защиты растений // *Техника и оборудование для села*. 2022. № 5(299). С. 22-26. doi: 10.33267/2072-9642-2022-5-22-26.
6. Зырянов А.П., Гуляев Д.В. Теоретическое исследование баланса времени смены работы опрыскивателя // *Вестник ЧГАА*. 2013. Т. 65. С. 20-23.
7. Захаренко В.А. Экономическая эффективность пестицидов в агроэкосистемах стратегически важных культур при использовании техники с элементами информационных технологий и точного земледелия // *Достижения науки и техники АПК*. 2022. Т. 36. № 2. С. 4-7.
8. Дьячков А.П. К вопросу определения грузоподъемности основного бака полуприцепного опрыскивателя // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2016. № 1 (48). С. 56-63.
9. Константинов М.М., Петренко Е.С. Технико-экономическое обоснование ширины захвата штангового опрыскивателя // *Известия ОГАУ*, 2018. № 1(68). С.122-125.
10. Перспективные мобильные средства на шинах сверхнизкого давления для сельскохозяйственного производства / З. А. Годжаев, В. И. Прядкин, П. А. Колядин и др. // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89. № 4. С. 277-286. doi: 10.17816/0321-4443-115016.
11. Назаров Н. Н., Яковлев Н. С. Методические подходы к обоснованию технологической схемы опрыскивателя для защиты зерновых культур // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2017. Т. 47. № 4 (257). С. 66-72.
12. Обзор основных конструкций опрыскивателей при разработке объемного и ленточного внесения рабочих растворов в системе экологического земледелия / Э. В. Заяц, А. И. Филиппов, Н. Д. Лепешкин и др. // *Межведомственный тематический сборник «Механизация и электрификация сельского хозяйства»*. Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2020. Вып. 53. С. 27–33.
13. Разработка гидравлической схемы к опрыскивателю с телескопическими секциями для ленточного или объемного внесения рабочих растворов / А. И. Филиппов, А. А. Аутко, С. И. Козлов и др. // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 3. С. 150-155.
14. Кузнецов, В. В. Учёт нелинейных параметров опрыскивателя при постановке вычислительных экспериментов на Simulink-модели // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2018. № 1(17). С. 69-76.
15. Фёдоров Р.Н., Хафизов К.А. Определение потерь урожая и направления их снижения от уплотнения ходовыми системами машинно-тракторных агрегатов по уходу за растениями // *Вестник Казанского ГАУ*. 2009. № 4 (14). С. 152-155.
16. Хафизов К. А. Оптимизация параметров и режимов работы МТА на основе энергетического анализа // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. № 7. С. 32-34.
17. Хафизов К. А. Методика расчета МТА по критерию "совокупные энергозатраты" // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2006. № 3. С. 46-51.
18. Севернев М.М. Временная методика энергетического анализа в сельском хозяйстве. Минск, 1991. 126 с.
19. Галеев, Г. Г., Нурмиев А. А., Шириязданов Р. Р. К расчету транспортного обеспечения уборочных агрегатов в АПК // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2011. Т. 6. № 3(21). С. 75-77.
20. Галеев, Г. Г., Нурмиев А. А., Шириязданов Р. Р. К обоснованию потребности крестьянских и малых фермерских хозяйств в тракторах // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2010.



Т. 5. № 4(18). С. 106-107.

21. Хафизов К. А., Халиуллин Ф. Х. Пути повышения эффективности использования машинно-тракторных агрегатов // Техника и оборудование для села. 2015. № 10. С. 20-22.

22. Туликов А.М. Вредоносность сорных растений в посевах полевых культур // Известия ТСХА. 2002. вып.1. С. 82-107.

23. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва - урожай. М.: Агропромиздат, 1985.304с.

24. Rationale for Measurements to be Selected for Tractors to Perform Agricultural Activities Differing in Energy Intensity / K. A. Khafizov, R. N. Khafizov, A. A. Nurmiev, et al. // BIO Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Т. 37. С. 00138. URL: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf\\_fies2021\\_00138/bioconf\\_fies2021\\_00138.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf_fies2021_00138/bioconf_fies2021_00138.html) (дата обращения:20.05.2023).

25. Energy Justification of the Number of Tractors for Agricultural Operations / K. A. Khafizov, R. N. Khafizov, A. A. Nurmiev, et al. // BIO Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. Т. 37. С. 00136. URL: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf\\_fies2021\\_00136/bioconf\\_fies2021\\_00136.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf_fies2021_00136/bioconf_fies2021_00136.html) (дата обращения:20.05.2023).

26. Хафизов Р.Н. Методика многофакторного эксперимента по определению зависимости давления движителей трактора на почву от параметров трактора, движителя и физико-механических свойств почвы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. № 3 (37). С. 86 – 92.

27. Хафизов К. А., Хафизов Р. Н. Результаты многофакторного эксперимента по определению зависимости максимального давления колес трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Анализ уравнений // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 4(42). С. 99-103. DOI 10.12737/article\_592fc87648e2b5.26544976.

28. Хафизов К. А., Хафизов Р. Н. Результаты многофакторного эксперимента по определению зависимости максимального давления колес трактора на почву от параметров трактора и физико-механических свойств почвы. Статистический анализ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 11. № 4(42). С. 94-98. DOI 10.12737/article\_592fc87eb749e3.30587578.

29. Анилович В.Я., Водолажченко Ю.Т. Конструкция и расчет сельскохозяйственных тракторов: справочное пособие / Изд. 2-ое, переработ. и доп. М.: «Машиностроение», 1976. 456 с.

30. Advancements in Spraying Technology in Agriculture / F. Ahmad, A. Khaliq, B. Qiu, et al. // Technology in Agriculture / ed. F. Ahmad, M. Sultan. IntechOpen, 2021. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/77112> (дата обращения:20.05.2023).

#### Сведения об авторах:

Хафизов Камилль Абдулхакович – доктор технических наук, заведующий кафедрой тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: fts-kgau@mail.ru

Нурмиев Азат Ахиярович – старший преподаватель кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: azat-nurmiev@mail.ru

Хафизов Рамиль Наилевич – кандидат технических наук, доцент кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: ramilajz@mail.ru

Залаков Наиль Ринатович – соискатель кафедры тракторы, автомобили и безопасность технологических процессов, e-mail: Nail.Zalakov@tatar.ru

Казанский государственный аграрный университет, г. Казань, Россия

#### ENERGY MATHEMATICAL MODEL OF A SPRAYER K. A. Khafizov, A. A. Nurmiev, R. N. Khafizov, N. R. Zalakov

**Abstract.** The research was carried out in order to develop an energy mathematical model of a plant protection unit with a trailed sprayer, which makes it possible to optimize the parameters and operating modes, taking into account their influence on the size and loss of crop yield. For comparison with the tendencies of changes in the parameters of sprayers established in practice, computational experiments were performed using the developed mathematical model. The object of study is an analogue of MTZ-82 tractor, the main parameters of which (mass, engine power, kinematic length, etc.) can be changed, an analogue of a trailed sprayer with variable parameters (width, operating speed, tank volume, drawbar length, location of the center of mass, profile width and support wheel diameter, etc.). The optimization criterion was composite and included the sum of direct and indirect energy costs during the operation of the unit, taking into account the energy of the crop lost due to deviations from the optimal parameters and operating modes of the sprayer. Incorrect choice of unit parameters leads to yield losses, resulting from its decrease due to a violation of the deadline for performing a technological operation to protect crops from weeds, trampling down part of the crops by the unit's movers during processing, especially if there is no possibility of turning outside the field, due to soil compaction in the zone of growth and development of plant root systems. Computational experiments carried out using the developed energy mathematical model showed that an increase in sprayer coverage from 16 to 32 m at an aggregate speed of 12 km/h leads to a decrease in total energy costs from 3250 MJ/ha to 1692 MJ/ha, an increase in the unit speed from 7 to 12 km/h, with a working width of 32 m reduces the total energy costs from 1971 to 1692 MJ/ha. Reducing the width of the sprayer wheel tire profile from 0.6 to 0.2 m is accompanied by a decrease in total energy costs from 2793 MJ/ha to 1692 MJ/ha.

**Key words:** machine-tractor unit, sprayer, energy consumption, yield loss, parameter optimization, optimization criterion.

#### References

1. Dorokhov AS, Starostin IA, Eshchin AV. [Technical means for chemical protection of plants: state and development prospects]. *Agroinzheneriya*. 2022; Vol.24. 3. 12-18 p. doi: 10.26897/2687-1149-2022-3-12-18.

2. Biryukov AV, Ponomarev VA. [Boom sprayer for field crops]. Patent № 120852 U1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK A01M 7/00. № 2012126036/13: zayavl. 25.06.2012: opubl. 10.10.2012.

3. Meznikova MV. [Influence of technological parameters of vertical spraying on ensuring environmental safety in the cultivation of tilled crops]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshее professional'noe obrazovanie*. 2022; 4(68). 502-514 p. doi: 10.32786/2071-9485-2022-04-59.

4. Demin EE, Startsev AS, Protasov AA. [Analytical studies of the technical parameters of self-propelled sprayers]. *Agrarnyinauchnyy zhurnal*. 2021; 12. 112-114 p. doi: 10.28983/asj.y2021i12pp112-114.

5. Fedorenko VF. [Optimization of methods and tools for ecological transformation of the use of plant protection products]. 2022; 5(299). 22-26 p. doi: 10.33267/2072-9642-2022-5-22-26.
6. Zyryanov AP, Gulyaev DV. [Theoretical study of the balance of time for changing the work of a sprayer]. Vestnik ChGAA. 2013; Vol.65. 20-23 p.
7. Zakharenko VA. [Economic efficiency of pesticides in agroecosystems of strategically important crops when using equipment with elements of information technology and precision farming]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2022; Vol.36. 2. 4-7 p.
8. Dyachkov AP. [On the issue of determining the carrying capacity of the main tank of a semitrailer sprayer]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; 1 (48). 56-63 p.
9. Konstantinov MM, Petrenko ES. [Feasibility study of the working width of a boom sprayer]. Izvestiya OGAU. 2018; 1(68). 122-125 p.
10. Godzhaev ZA, Pryadkin VI, Kolyadin PA. [Prospective mobile vehicles on ultra-low pressure tires for agricultural production]. Traktory i sel'khoz mashiny. 2022; Vol.89. 4. 277-286 p. doi: 10.17816/0321-4443-115016.
11. Nazarov NN, Yakovlev NS. [Methodical approaches to substantiation of the technological scheme of a sprayer for the protection of grain crops]. Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoy nauki. 2017; Vol.47. 4(257). 66-72 p.
12. Zayats EV, Filippov AI, Lepeshkin ND. [Review of the main sprayer designs in the development of volumetric and tape application of working solutions in the ecological farming system]. Mezhdvedomstvennyy tematicheskiy sbornik "Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogokhozyaistva". Minsk: RUP "NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogokhozyaistva". 2020; Issue 53. 27-33 p.
13. Filippov AI, Autko AA, Kozlov SI. [Development of a hydraulic circuit for a sprayer with telescopic sections for tape or volumetric application of working solutions]. Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo sel'skokhozyaistvennoy akademii. 2022; 3. 150-155 p.
14. Kuznetsov VV. [Consideration of non-linear parameters of the sprayer when setting up computational experiments on Simulink-models]. Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya. 2018; 1 (17). 69-76 p.
15. Fedorov RN, Khafizov KA. [Determination of crop losses and the direction of their reduction from compaction by running systems of machine-tractor units for plant care]. Vestnik Kazanskogo GAU. 2009; 4 (14). 152-155 p.
16. Khafizov KA. [Optimization of parameters and operating modes of MTA based on energy analysis]. Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny. 2006; 7. 32-34 p.
17. Khafizov KA. [Methodology for calculating the MTA according to the criterion "cumulative energy costs"]. Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny. 2006; 3. 46-51 p.
18. Severnev MM. Vremennayametodika energeticheskogo analiza v sel'skom khozyaistve. [Temporary technique of energy analysis in agriculture]. Minsk. 1991; 126 p.
19. Galeev GG, Nurmiev AA, Shiryazdanov RR. [On the calculation of the transport support of harvesting units in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011; Vol.6. 3(21). 75-77 p.
20. Galeev GG, Nurmiev AA, Shiryazdanov RR. [To substantiate the needs of peasant and small farms in tractors]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010; Vol.5. 4(18). 106-107 p.
21. Khafizov KA, Khaliullin FK. [Ways to improve the efficiency of using machine-tractor units]. Tekhnika i obrudovaniye dlya sel'skogo khozyaistva. 2015; 10. 20-22 p.
22. Tulikov AM. [Harmfulness of weeds in field crops]. Izvestiya TSKhA. 2002; Issue 1. 82-107 p.
23. Ksenevich IP, Skotnikov VA, Lyasko MI. Khodovaya sistema – pochva – urozhai. [Running system - soil – harvest]. Moscow: Agropromizdat. 1985; 304 p.
24. Khafizov KA, Khafizov RN, Nurmiev AA. Rationale for measurements to be selected for tractors to perform agricultural activities differing in energy intensity. [Internet]. BIO Web of Conferences. EDP Sciences. 2021; Vol.37. 00138 p. [cited 2023. May 20]. Available from: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf\\_fies2021\\_00138/bioconf\\_fies2021\\_00138.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf_fies2021_00138/bioconf_fies2021_00138.html).
25. Khafizov KA, Khafizov RN, Nurmiev AA. Energy Justification of the number of tractors for agricultural operations. [Internet]. BIO Web of Conferences. EDP Sciences. 2021; Vol.37. 00136 p. [cited 2023. May 20]. Available from: [https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf\\_fies2021\\_00136/bioconf\\_fies2021\\_00136.html](https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2021/09/bioconf_fies2021_00136/bioconf_fies2021_00136.html).
26. Khafizov RN. [Methods of a multifactorial experiment to determine the dependence of the pressure of the tractor propellers on the soil on the parameters of the tractor, propeller and physical and mechanical properties of the soil]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015; 3 (37). 86-92 p.
27. Khafizov KA, Khafizov RN. [Results of a multifactorial experiment to determine the dependence of the maximum pressure of the tractor wheels on the soil on the parameters of the tractor and the physical and mechanical properties of the soil. Analysis of Equations]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; Vol.11. 4(42). 99-103 p. DOI 10.12737/article\_592fc87648e2b5.26544976.
28. Khafizov KA, Khafizov RN. [Results of a multifactorial experiment to determine the dependence of the maximum pressure of the tractor wheels on the soil on the parameters of the tractor and the physical and mechanical properties of the soil. Statistical analysis]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; Vol.11. 4(42). 94-98 p. DOI 10.12737/article\_592fc87eb749c3.30587578.
29. Anilovich VYa, Vodolazhchenk Yu T. Konstruktsiyairaschetsel'skokhozyaistvennykh traktorov: spravochnoeposobie. Izd. 2-oe, pererabot. idop. [Design and calculation of agricultural tractors: a reference guide]. Moscow: Mashinostroeniye. 1976; 456 p.
30. Ahmad F, Khaliq A, Qiu B. Advancements of spraying technology in agriculture. [Internet]. Technology in Agriculture. Edited by F. Ahmad, M. Sultan. IntechOpen. 2021; [cited 2023, May 20]. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/77112>.

**Authors:**

Khafizov Kamil Abdulkhakovich - Doctor of Technical sciences, Head of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: fts-kgau@mail.ru  
 Nurmiev Azat Akhbarovich - senior lecturer of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: azat-nurmiev@mail.ru  
 Khafizov Ramil Nailovich – Ph.D. of Technical sciences, Associate Professor of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: ramilajz@mail.ru  
 Zalakov Nail Rinatovich – an applicant student of Tractors, Automobiles and Safety of Technological Processes Department, e-mail: Nail.Zalakov@tatar.ru  
 Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.