

УДК 631.17: 004.9

UDC 631.17: 004.9

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

IMITATION MODELING WHEN ANALYSING THE EFFICIENCY OF AGGREGATES FOR TILLAGE

Оськин Сергей Владимирович
д.т.н., профессор

Osykin Sergei Vladimirovich
Doctor of Technical Science, professor

Тарасенко Борис Фёдорович
к.т.н., доцент

Tarasenko Boris Fedorovich
Candidate of Technical Science, associate professor

Плешаков Вадим Николаевич
д.т.н., профессор
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Pleshakov Vadim Nikolaievich
Doctor of Technical Science, professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Выбор наиболее оптимального состава почвообрабатывающего агрегата для работы в конкретном хозяйстве очень затруднителен из-за многих детерминированных и случайных факторов. В связи с чем предлагается исследования проводить с использованием логики предикатов и кванторной алгебры. Также необходимы минимальные воздействия на экологию, характеризующиеся предикатом «минимум затрат на компенсацию эрозионных потерь почвы». Для сельскохозяйственной техники, России, стран СНГ и дальнего зарубежья с известными нормами выработки (производительностью) и расходом топлива применено имитационное моделирование, по методу Монте-Карло (Monte-Carlo Simulation), позволяющее построить математическую модель для прогнозирования необходимого количества агрегатов при различных нормативных агросроках при соответствующих ущербах

The choice of the most optimal composition of aggregates for tillage for work in a certain economy is very difficult from many determined and casual factors. In connection with what, it is suggested to conduct researches with the use of quantificational and quantifier algebra logic. Also we need minimum influences on ecology, being characterized as a predicate of "minimum of expenses on indemnification of erosive losses of soil". For the agricultural technique of Russia, countries of the CIS and distant foreignness with the well-known norms of making (by the productivity) and expense of fuel imitation modeling is applied, on the method of Monte Carlo (Monte - Carlo Simulation), allowing to build a mathematical model for prognostication of necessary amount of aggregates at different normative agrotterms with corresponding damages

Ключевые слова: ОБРАБОТКА ПОЧВЫ, АЛГЕБРА ЛОГИКИ, ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, КВАНТОР, ПРЕДИКАТ, ФУНКЦИИ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИЕ АГРЕГАТЫ, ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ, РАСХОД ТОПЛИВА, МИНИМАЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА, МИНИМАЛЬНАЯ ЭРОЗИЯ ПОЧВ, МИНИМАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ УЩЕРБ, УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВЫ, ОПТИМАЛЬНЫЙ СОСТАВ, ПРОГНОЗ

Keywords: TILLAGE, ALGEBRA OF LOGIC, LOGIC PROGRAMMING, QUANTUM, PREDICATE, FUNCTIONS, IMITATION MODELING, AGGREGATES FOR TILLAGE, PRODUCTIVITY, FUEL, MINIMUM FUEL, MINIMUM SOIL EROSION, MINIMUM ECOLOGICAL LOSSES, MINIMUM COMPRESSION OF SOIL, OPTIMAL COMPOSITION, PROGNOSIS

Известно, что процесс обработки почвы относится к самым трудоёмким и энергоёмким операциям с.-х. производства: на неё расходуется от 30 до 40 % всех энергозатрат в сельском хозяйстве. В то же время от качества обработки почти на 25 % зависит урожайность с.-х. культур [1]. Анализи-

румя существующие методы обработки почвы технические характеристики средств, рабочие органы, общий вид машины, параметры, показатели качества видно, что результатом операций сплошной обработки почвы является качественный показатель X от которого зависит урожайность [2]. Однако имеются трудности установить функциональные зависимости между параметрами рабочих органов, силами сопротивления почвы, физико-механическими свойствами почвы, её структуры и плодородия. В связи с чем, для упрощения предлагаем дальнейшие исследования проводить с использованием логики предикатов и кванторной алгебры [2]. Логика предикатов – это раздел современной логики, изучающей рассуждения и другие языковые контексты с учетом внутренней структуры входящих в них простых высказываний, при этом выражения языка трактуются функционально, т. е. как знаки некоторых функций или же знаки аргументов этих функций. Другой отличительной чертой логики предикатов является использование особого типа логических символов — кванторов и связываемых ими (квантифицируемых) переменных для воспроизведения логических форм множественных высказываний. Добавление к аппарату исчисления предикатов различных постоянных и переменных термов с характеризующими полученную предметную область конкретными аксиомами и схемами аксиом приводит к различным видам прикладных исчислений предикатов.

Логика предикатов начинается с анализа строений высказывания, которые выражают тот факт, что объекты обладают некоторыми свойствами, или находятся между собой в некоторых отношениях. Обозначения логи-

ческих переменных и основные параметры процесса обработки почвы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сплошной обработки почвы

№-№, п-п	Наименование параметров	Обозначения логических переменных x_i
1	Глубина обработки	x_1
2	Ширина корпуса (лапы рабочего органа)	x_2
3	Масса плуга	x_3
4	Производительность	x_4
5	Затраты энергоресурсов на обработку почвы (рыхление)	x_5
6	Затраты на компенсацию потерь урожая из-за эрозии почвы	x_6
7	Затраты на компенсацию потерь урожая из-за срыва агротехнических сроков обработки	x_7
8	Затраты энергоресурсов на дополнительные обработки (боронование, культивация и т.д.)	x_8
9	Затраты энергоресурсов на заделку не зерновой части урожая и пожнивных остатков	x_9
10	Затраты энергоресурсов на влагосбережение (дренирование)	x_{10}
11	Общие затраты на обработку почвы	x_{11}

Логическое программирование начнем с установления предметных переменных x_1, x_2, \dots, x_{11} , принимающих значения из некоторой предметной области предметных констант a_1, a_2, \dots, a_m для x_1 ; обозначим предметные константы следующими буквами для остальных переменных соответственно b для x_2 , $c - x_3$, $d - x_4$, $e - x_5$, $k - x_6$, $l - x_7$, $m - x_8$, $n - x_9$, $o - x_{10}$, $p - x_{11}$.

В качестве предиката возьмем «**минимум общих затрат на обработку почвы**» $A(x_1... x_{11})$. Таким образом, данный многоместный предикат с дополнительными функциональными связями переменных будет выглядеть следующим образом:

$$A(x_1... x_{11}): \quad x_5=f(x_1, \dots, x_4), \quad x_{11}= x_5+ x_7+ x_8+ x_9+ x_{10}. \quad (1)$$

В результате подстановки вместо переменных предметных констант получаются высказывания. Наряду с образованием из предикатов высказываний в результате таких подстановок в логике предикатов рассматриваются еще и операции, которые превращают предикат в высказывание. Эти операции называются операциями квантификации (или связыванием кванторами, или навешиванием кванторов).

Произведем навешивание квантора «существования»; **существует такое почвообрабатывающее орудие и тяговая машина**, которые приводят к минимальным общим затратам: $\exists x_{11} \cdot A(x_1, \dots, x_{11})$.

Переменная x_{11} является связанной, а остальные переменные – свободными. Полученное выражение также можно представить в следующем виде:

$$\exists x_{11} \cdot A(x_1, \dots, x_{11}) \equiv A(a_1, b_1, \dots, p_1) \vee A(a_2, b_2, \dots, p_2) \vee \dots \vee A(a_w, b_w, \dots, p_w) \quad (2)$$

Вторым многоместным предикатом может стать минимум затрат энергоресурсов на обработку почвы при рыхлении $B(x_1... x_{11})$. Соответственно с квантором существования можно получить выражение – **существует такое почвообрабатывающее орудие и тяговая машина**, которые приво-

дят к минимальным затратам энергоресурсов на обработку почвы при рыхлении: $\exists x_5 \cdot B(x_1, \dots, x_{11})$.

Существование такого агрегата, включающего почвообрабатывающее орудие и тяговую машину, которые имеют одновременно минимальные затраты энергии при рыхлении и приводят минимуму общих затрат можно представить в виде:

$$\exists x_{11} \cdot A(x_1, \dots, x_{11}) \wedge \exists x_5 \cdot B(x_1, \dots, x_{11}) \rightarrow \exists x_{11} \exists x_5 C(x_1, \dots, x_{11}). \quad (3)$$

Таким образом появляется новый предикат C , который говорит, что на данной области определения имеются агрегаты с минимальными общими затратами и затратами энергоресурсов на рыхление. Это высказывание принимает значение «истина», только при тех значениях переменных при которых каждый из предикатов A и B принимали значение «истина». Таким образом, не факт, что области определения предикатов пересекутся.

Все работы на земле необходимо проводить с минимальными воздействиями на экологию [3]. Для данного вида работ можно выразить предикатом «**минимум затрат на компенсацию эрозионных потерь почвы**» - $D(x_1 \dots x_{11})$. В соответствии с операцией квантирования можно получить следующее выражение – существует такой почвообрабатывающий агрегат, приводящий к минимуму эрозионных потерь почвы: $\exists x_6 \cdot D(x_1, \dots, x_{11})$. Наличие такого почвообрабатывающего агрегата, который имеет одновременно минимальные общие затраты и приводящий к минимальным затратам на эрозионные потери выразим следующим образом:

$$\exists x_{11} \cdot A(x_1, \dots, x_{11}) \wedge \exists x_6 \cdot D(x_1, \dots, x_{11}) \rightarrow \exists x_{11} \exists x_6 E(x_1, \dots, x_{11}). \quad (4)$$

Множество всех элементов $x_1, \dots, x_{II} \in M$, при которых предикаты принимают значения “истина” (1), называется множеством (областью) истинности предиката, так например множество истинности предиката $A(x)$ - это множество $\Psi = \{x_1, \dots, x_{II} : x_1, \dots, x_{II} \in M, A(x) = 1\}$.

Указанные выше характеристики почвообрабатывающих орудий хорошо систематизированы, совместно с тяговыми агрегатами, в сборнике [4]. В результате авторы представили нормативную информацию для всей сельскохозяйственной техники, производимой в России, странах СНГ, а также нормы и нормативы на работы, выполняемые сельскохозяйственной техникой производства фирм стран дальнего зарубежья. В данном сборнике указываются нормы выработки и расхода топлива на основные виды механизированных полевых и тракторно-транспортных работ, выполняемых машинно-технологическими станциями (МТС). Механизированные полевые работы дифференцированы по классам основных показателей технологических свойств угодий: длина гона, угол склона, изрезанность препятствиями, сложность конфигурации, сопротивление почвообрабатывающей техники; технологических факторов (требований) выполнения полевых (глубина почвообработки, нормы высева семян, внесения удобрений, расхода ядохимикатов) и транспортных операций; урожайность и машинно-тракторные агрегаты (марка и количество машин, ширина захвата). Представленные нормы выработки (производительность механизированного агрегата в смену) представляют собой произведение рабочей ширины захвата (B_p), рабочей скорости движения (U_p) и чистого времени работы агрегата (T_p) [5].

Таким образом, ключевыми показателями эффективности работы машины являются две характеристики – норма выработки (производительность) и расход топлива, которые, в свою очередь, зависят от сложности работ, глубины обработки и состава машины (тип трактора и плуга) [5].

Выбор наиболее оптимального состава почвообрабатывающего агрегата для работы в конкретном хозяйстве очень затруднителен из-за многих детерминированных и случайных факторов. Если принимать в качестве критерия минимальное количество топлива, то это может оказаться не самым лучшим вариантом, так как если большая вероятность получит малопродуктивный агрегат. В связи с этим необходимо получить целевую функцию с двумя критериями оптимизации: расход топлива и норма выработки (производительность). Производительность агрегатов влияет на их количество при выполнении полевых работ, так как существуют определенные нормативные агротехнические сроки. Агротехнические сроки характерны для всех видов работ и зависят от культуры, предшественника и района выполнения полевых работ. Превышение таких агротехнических сроков приводит к снижению урожайности возделываемых культур. В сборнике [4] даны показатели интенсивности потерь урожая при отклонении сроков выполнения полевых работ от агротехнических. Чем больше будет работать агрегатов, тем в более короткие сроки закончится данный вид работ. Нужно также отметить, что себестоимость производства зерновых культур включает затраты на топливо. Как правило, топливо закупается заранее и после реализации урожая хозяйства компенсируют затраты на энергоресурсы. Если обработка почвы будет производиться малопродуктивными агрегатами, то будет наблюдаться ущерб от снижения урожайности и соответственно недополучение финансовых средств, которые могли бы пойти на компенсацию энергетических затрат. Если на предприятии нет значительных средств на замену парка для высокопродуктивного проведения почвообработки и оно имеет ограничения по количеству тракторов и сельхозорудий, а также оно готово идти на снижение урожайности из-за срыва агротехнических сроков полевых работ, то максимально допустимый размер ущерба, который может позволить себе хозяйство, будет равен затратам на топливо. Такое предприятие будет искать другие источ-

ники финансирования компенсации затрат на топливо или недополучит часть прибыли от реализации урожая. Следовательно, можно сформулировать следующую целевую функцию по оптимизации количества агрегатов для почвообработки:

$$\Phi = Z_{ГСМ} - Y_{АСР} \Rightarrow 0, \quad (5)$$

где $Z_{ГСМ}$ – затраты на ГСМ, руб.;

$Y_{АСР}$ - ущерб от срыва агросроков, руб.

Используя известные зависимости входящих параметров, можно также записать:

$$\Phi = C_T \cdot q_a \cdot S_{П} - y_k \cdot C_k \cdot k_u \cdot S_{П} \cdot \Delta n_{дн} \Rightarrow 0, \quad (6)$$

где C_T - удельная цена топлива, руб./л;

q_a - удельный расход топлива конкретного агрегата, л/га;

$S_{П}$ - площадь пахотного участка, га;

y_k - урожайность культуры, ц/га;

C_k - цена реализации данной зерновой культуры, руб./ц;

k_u - коэффициент интенсивности потерь урожая при отклонении сроков выполнения полевых работ от агротехнических;

$\Delta n_{дн}$ - количество дней или смен превышающих нормативное значение.

Переведем целевую функцию на удельный вид, разделив обе части на площадь пахотного участка $S_{П}$. Количество дней или смен превышающих нормативное значение можно определить по формуле:

$$\Delta n_{\text{дн}} = n_{\text{факт}} - n_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{п}}}{Q_a \cdot N_a} - n_{\text{норм}}, \quad (7)$$

где $n_{\text{факт}}$ - фактическое количество дней или смен необходимое для обработки данным агрегатом;

$n_{\text{норм}}$ - нормативное количество дней или смен для обработки участка;

Q_a - сменная норма выработки данного агрегата, га/смену;

N_a - количество работающих агрегатов.

С учетом новых выражений целевая функция (руб./га) примет вид:

$$\phi = C_T \cdot q_a - y_k \cdot C_k \cdot k_u \cdot \left(\frac{S_{\text{п}}}{Q_a \cdot N_a} - n_{\text{норм}} \right) \Rightarrow 0 \quad (8)$$

В качестве критерия оптимизации принимаем количество агрегатов. Как уже отмечалось, многократные проходы по полю приводят к чрезмерному уплотнению и ухудшению физических свойств почвы и в итоге к снижению урожая. Различные тяговые машины имеют различное давление на грунт, и значит, производят разную степень уплотнения почвы. Проводилось много исследований [4] по определению параметров и их значения, влияющих на уплотнение почвы. Все они хорошо согласуются с установленным в литературном источнике [4] таким определением: повышение плотности на 0,1 г/см³ приводит к недобору 6-8% урожая. Статистическая обработка таблиц исследований [4], связывающих степень уплотнения почвы в зависимости от ее исходной влажности и плотности, а также от давления агрегата, показала: при однократном проходе агрегата с давлением около 80 кПа (гусеничные тракторы), в среднем плотность повыша-

ется на $0,106 \text{ г/см}^3$, при стандартном отклонении $0,008 \text{ г/см}^3$; при однократном проходе агрегата с давлением около 180 кПа (колесные тракторы), в среднем плотность повышается на $0,205 \text{ г/см}^3$, при стандартном отклонении $0,024 \text{ г/см}^3$.

По данным литературы [4] за восемь проходов техники по полю можно допустить, что вся поверхность почвы подвергается однократному воздействию сельскохозяйственного агрегата. Следовательно, однократный проход агрегата, с повышением плотности почвы по проходу на $0,1 \text{ г/см}^3$, снижает общую урожайность с поля на 0,8-1%. Уточним целевую функцию (4) с учетом уплотнения почвы пахотным агрегатом:

$$\phi = \Pi_T \cdot q_a - y_k \cdot \Pi_k \cdot \left[k_u \cdot \left(\frac{S_{II}}{Q_a \cdot N_a} - n_{норм} \right) + k_y \cdot (0,008 - 0,01) \right] \Rightarrow 0 \quad (9)$$

где k_y - коэффициент уплотнения почвы.

Коэффициент уплотнения почвы k_y рассчитывается следующим образом:

$$k_y = \frac{\Delta \rho_{факт}}{0,1}, \quad (10)$$

где $\Delta \rho_{факт}$ - фактическое увеличение плотности почвы, г/см^3 ;

0,1 - фиксированное превышение плотности почвы, г/см^3 .

Целевая функция принимает вид, с учетом выражения (6):

$$\phi = \Pi_T \cdot q_a - y_k \cdot \Pi_k \cdot \left[k_u \cdot \left(\frac{S_{II}}{Q_a \cdot N_a} - n_{норм} \right) + \Delta \rho_{факт} \cdot k_{cy} \right] \Rightarrow 0 \quad (11)$$

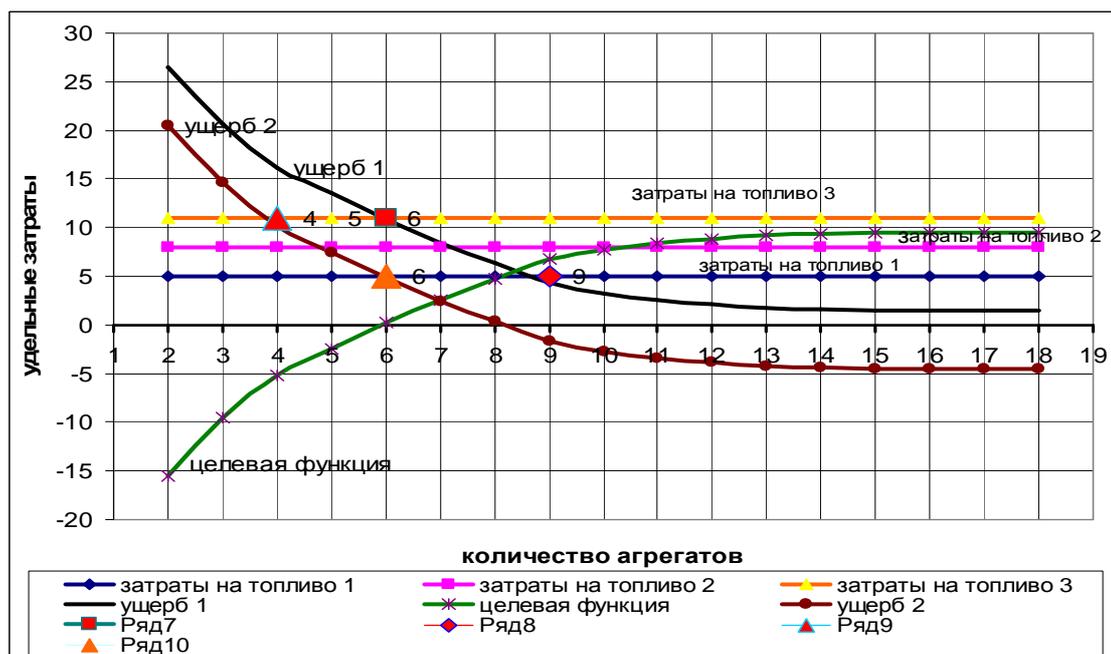


Рисунок 1 – Вид целевой функции и ее составляющих при изменении количества агрегатов

Пересечение графиков зависимостей ущерба и затрат на топливо от количества агрегатов дает точку оптимума. Так пересечение «ущерб 1» и «затраты на топливо 3» происходит при количестве агрегатов равному 6. Если агрегат будет работать в более экономичном режиме или снабжен более экономичным тяговым устройством, то точка б (маркер «квадрат») перейдет в точку 9 (маркер «ромб»). Оптимальное количество таких агрегатов будет равно 9. При этом суммарные затраты на энергоресурс и компенсацию ущерба (от срыва агротехнических сроков и уплотнения почвы), будут гораздо меньше. Это связано с тем, что уменьшаются обе составляющие затрат – на топливо и компенсацию ущербов. Однако увеличивается количество почвообрабатывающих агрегатов. Если не будет такого количества агрегатов в наличии можно обрабатывать меньшим составом и при этом сократятся общие затраты (за счет затрат на топливо). Если будет использоваться новый агрегат, который имеет большую производительность и (или) меньшее давление на почву, то точка б «квадрат» перейдет в точку

4 «треугольник», на кривую «ущерб 2». Таким образом, можно будет использовать 4 агрегата при тех же значениях ущерба. Если будет работать другой агрегат, имеющий большую производительность с меньшим расходом топлива, точка оптимума будет 6 «треугольник». Это будет наиболее эффективная реализация, так как одновременно уменьшаются все затраты и количество агрегатов. Таким образом при поиске оптимума необходимо стремиться к меньшему количеству агрегатов и иметь минимальные затраты на топливо и компенсацию ущербов, что можно представить следующим выражением:

$$\begin{cases} \Phi = Z_{ГСМ} - Y_{ОБЩ} \Rightarrow 0 \\ Z_{ГСМ} + Y_{ОБЩ} \Rightarrow \min \end{cases} \quad \text{или}$$

$$\begin{cases} \phi = \Pi_T \cdot (a_n \cdot H + b_n \cdot Q_{ан} + c_n \cdot \Gamma_{сл}) - y_k \cdot \Pi_k \cdot \left[k_u \cdot \left(\frac{S_{II}}{Q_a \cdot N_a} - n_{норм} \right) + \Delta \varphi_{факт} \cdot k_{cy} \right] \Rightarrow 0 \\ \Pi_T \cdot (a_n \cdot H + b_n \cdot Q_{ан} + c_n \cdot \Gamma_{сл}) + y_k \cdot \Pi_k \cdot \left[k_u \cdot \left(\frac{S_{II}}{Q_a \cdot N_a} - n_{норм} \right) + \Delta \varphi_{факт} \cdot k_{cy} \right] \Rightarrow \min \end{cases}$$

(14)

Сложность дальнейших исследований по целевой функции заключается в наличии большого количества входящих параметров изменяющихся (чаще всего случайно) по объективным и субъективным причинам. В этом случае анализ полученной зависимости нужно вести только с помощью имитационного моделирования. Среди математических моделей наряду с аналитическими, стохастическими, матричными, многомерными, оптимизационными, эволюционными выделяется особый тип – имитационные модели, связанные с использованием ЭВМ. Обычно под имитационной моделью понимают программу, которая в процессе ее реализации на ЭВМ позволяет имитировать поведение реальной системы в разных условиях.

Существует определение: имитационная модель – логико-математическое описание системы, которое может быть исследовано в ходе проверочных экспериментов на цифровой ЭВМ и ... может считаться лабораторной версией системы (Прицкер, 1987, с. 14 [6]). Имитационные модели представляют собой наиболее гибкий метод моделирования систем любой сложности, линейных и нелинейных, с обратной связью и сетями управления. Для построения имитационных моделей часто используют стохастический и автоматный способы математического описания. Стохастические модели исследуют сложное поведение случайных величин и для расчетов используют формулы принятых законов распределения. Объектами настройки в таких моделях выступают параметры распределений – средние, дисперсии, объемы выборок. Автоматные модели, отражающие дискретные события и поведение, должны содержать логические функции, в первую очередь функцию листа Excel =ЕСЛИ (12). Эта функция определяет смену состояний моделируемой системы в соответствии с изменившимися внешними условиями. При этом динамика состояния внешних воздействий может быть описана алгебраическими моделями. Цель автоматного моделирования состоит в определении критических уровней переменных. В нашем случае используется стохастическое и автоматное моделирование. В таблице 2 приведен список переменных, законы распределения случайных величин с основными статистическими характеристиками для случая, когда агрофон представляет собой пласт многолетних трав. Значения переменных (диапазон, среднее, стандартное отклонение) принимаются в зависимости от состава агрегата, статистических данных по урожайности в конкретном регионе и сложившихся рыночных цен на топливо и зерно. Расчеты ведутся на площадь пашни в 1000 га.

Таблица 2 – Список переменных целевой функции и соответствующие характеристики

Переменная, ед. измерения	Группа по составу агрегата, состав агрегата, значения коэффициентов уравнения регрессии				
	1; K701+ПТК9-35; $a=1,07$; $b=0,0082$; $c=1,93$				
	Вид	Закон распределения	Диапазон изменения	Среднее	Стандартное отклонение
1	2	3	4	5	6
C_T , руб/л. (цена топлива)	Стохастическая	Равномерный	24,5-29,8	-	-
H , см, (глубина вспашки)	Стохастическая	Равномерный	25-27	-	-
$Q_{ан}$, га/смену, (норма выработки)	Стохастическая	Нормальный	8-14	11	1
$\Gamma_{сл}$, о.е. (группа сложности)	Стохастическая	Равномерный	1-4	-	-
$У_K$, ц/га, (урожайность культуры)	Стохастическая	Нормальный	42-72	57	5
C_K , руб./ц	Стохастическая	Равномерный	610-675	-	-
k_i , (коэффициент интенсивности потерь урожая при отклонении агро-сроков)	Дискретная			0,0011	
N_a , (количество агрегатов)	Дискретная			2-19	
$n_{норм}$, (нормативное количество смен)	Дискретная			5-15	
$\Delta\rho_{факт}$, г/см ³ , (фактическое увеличение плотности почвы)	Стохастическая	Нормальный	0,133-0,277	0,205	0,024
k_{cy} , см ³ /г (коэффициент снижения урожайности с учетом уплотнения почвы)	Стохастическая	Равномерный	0.08-0,1	0,09	

Таким образом, мы имеем 11 переменных параметров. Дальнейшее имитационное моделирование будем вести по методу Монте-Карло (Monte-Carlo Simulation), которое позволяет построить математическую модель с неопределенными значениями параметров, и, зная вероятностные их распределения, а также связь между изменениями параметров (корреляцию) получить вероятностное значение нужного параметра. Укрупненная блок-схема имитационного моделирования с использованием метода Монте-Карло представлена на рисунке 2.

Основой всей схемы моделирования является блок «Имитационные прогнозы». Алгоритм работы этого блока выглядит следующим образом (рис. 3). На имеющуюся модель со случайными параметрами подаются входные сигналы от генератора случайных чисел ГСЧ через преобразователь закона случайных чисел ПЗСЧ. Модель отрабатывает входной сигнал x по некоторому закону $y = \varphi(x)$ и выдает выходной сигнал y , который также является случайным. Естественно, если входных сигналов несколько, то каждый сигнал отрабатывается и формируется общий.



Рисунок 2 – Укрупненная блок-схема имитационного моделирования

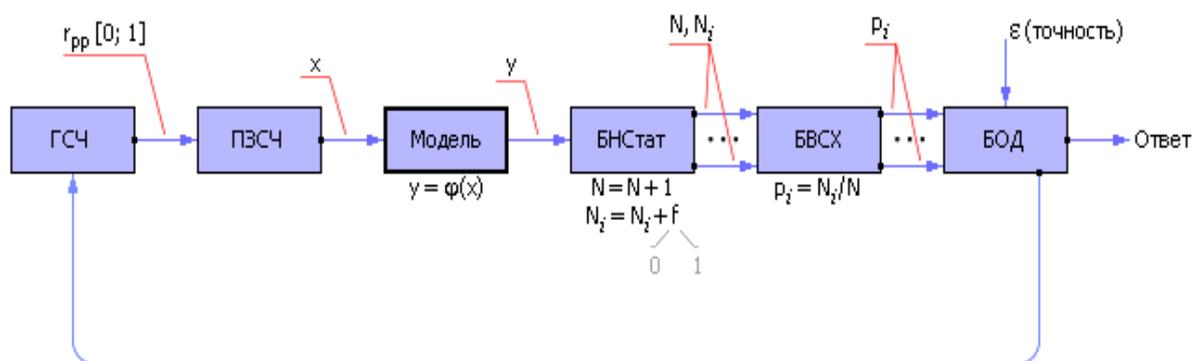


Рисунок 3 – Блок-схема работы «Имитационные прогнозы».

Выходной сигнал модели поступает на блок накопления статистики БНСат, где производится счет количества экспериментов и сортировка накопленных данных. Здесь также проверяется условие реализации событий: если условие реализовалось, то счетчик события увеличивается на 1. При нескольких событиях устанавливается несколько счетчиков N_i . Далее

рассчитывается отношение N_i к N в блоке вычисления статистических характеристик БВСХ с использованием метода Монте-Карло и оценивается вероятности p_i появления события i , то есть определяется на частота его выпадения в серии из N опытов. При большом количестве опытов N частота появления события, полученная экспериментальным путем при помощи ЭВМ, стремится к значению теоретической вероятности появления события. В блоке оценки достоверности (БОД) анализируют степень достоверности статистических экспериментальных данных, снятых с модели (точность результата ε , заданную пользователем) и определяют необходимое для этого количество статистических испытаний. Если колебания значений частоты появления событий относительно теоретической вероятности меньше заданной точности, то экспериментальную частоту принимают в качестве ответа, если нет - генерацию случайных входных воздействий продолжают, и процесс моделирования повторяется.

Реализацию моделирования по методу Монте-Карло будем проводить с использованием специальной надстройки в Excel. Отдельные итоги моделирования по 1-й группе агрегатов (K701+ПТК9-35) представлены на рисунке 4. Первый график (рис.4, а) показывает зависимость общего удельного ущерба от срыва агросроков и уплотнения почвы от количества агрегатов. Также на всех графиках наносится вероятностный 95% уровень значений. На втором графике (рис.4, б) показана целевая функция и точка пересечения с осью абсцисс (оптимальное значение количества агрегатов). Третий график (рис.4, в) показывает вероятность наступления события целевой функции с зоной доверительной вероятности. Четвертое изображение (рис.5, г) представляет как изменяются затраты на топливо и общие ущербы от количества агрегатов. Программа также позволяет выводить гистограммы моделирования по каждой переменной, так например, на изображениях (рис.4, д, е) показаны виды изменения целевой функции и общего удельного ущерба от срыва агросроков и уплотнения почвы в зависимо-

сти от количества агрегатов. Кроме того все данные выводятся в табличной форме, с указанием количества экспериментов (обычно 10 тыс. шт.) и времени моделирования (80-120 с).

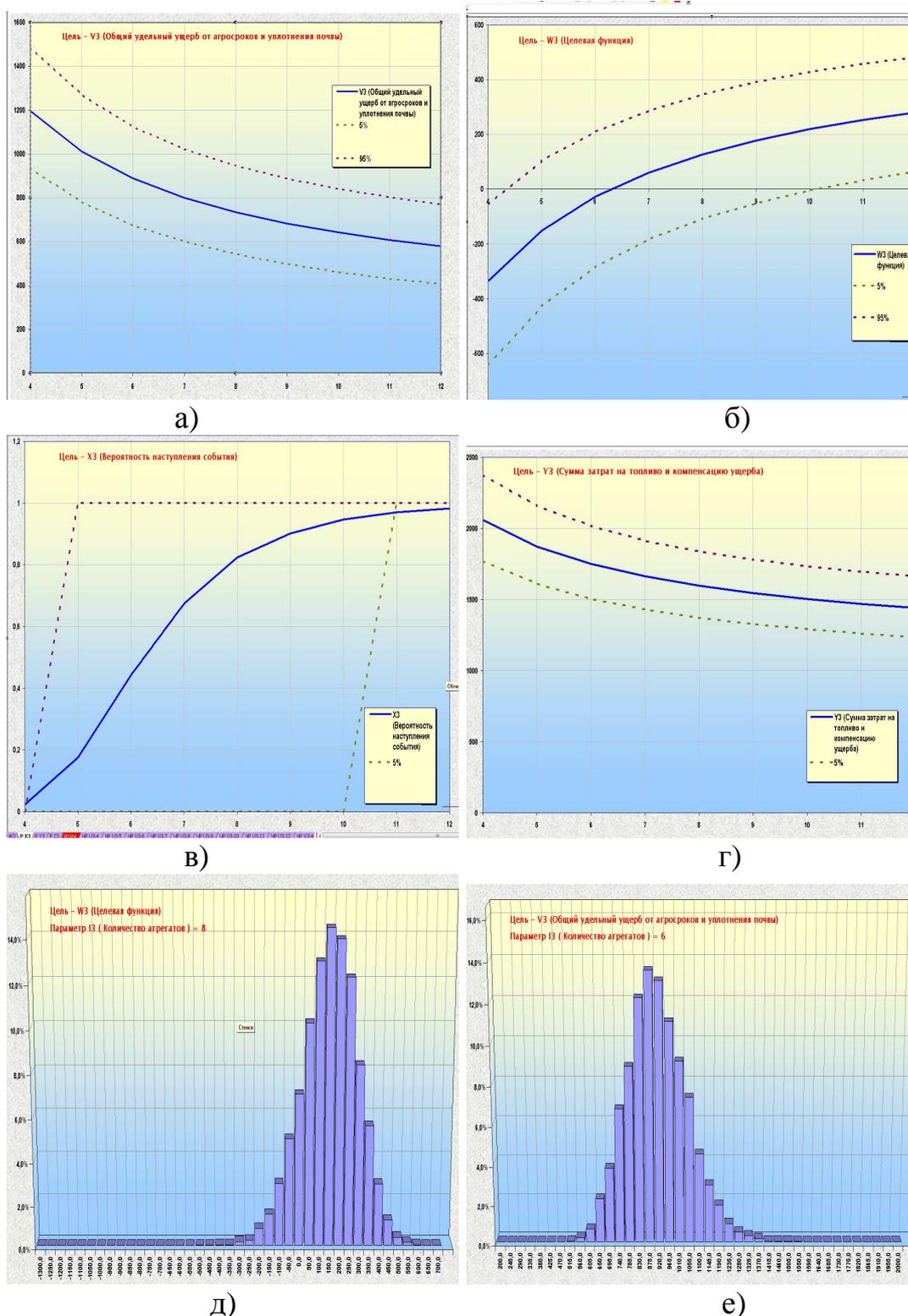


Рисунок 4 – Изображения результатов моделирования по 1-й группе агрегатов (K701+ПТК9-35)

По каждому агрегату проводилось моделирование для трех нормативных значений агросроков 5, 10, 15 дней. В таблице 3 приведены данные по результатам моделирования первой группы (К701+ПТК9-35).

Таблица 3 – Данные по результатам моделирования целевой функции по первой группе

Переменные, ед. измерения	Группа по составу агрегата, состав агрегата, значения коэффициентов уравнения регрессии								
	1; К701+ПТК9-35; $a=1,07$; $b=0,0082$; $c=1,93$								
Входные	Диапазон изменения			Среднее			Ст. отклонение		
$Q_{ан}$, га/смену	8-14			11			1		
$\Delta\rho_{факт}$, Г/см ³	0,133-0,277			0,205			0,024		
$n_{норм}$	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Выходные									
$Z_{ГСМ}$, руб/га	684-1053	684-1053	684-1053	862	862	862	68	68	68
Y , руб/га	462-1415	487-1420	390-1351	883	890	811	128	127	130
$Z_{ГСМ} + Y$	1294-2376	1256-2332	1198-2306	1745	1752	1673	139	144	147
$N_{a\text{ опт}}(Z_{ГСМ} + Y)$				9 (1745)	6 (1752)	5 (1673)			
$N_{a\text{ мин}}(Z_{ГСМ} + Y)$				6 (1950)	4 (2060)	4 (1858)			
$N_{a\text{ макс}}(Z_{ГСМ} + Y)$				16 (1566)	10 (1505)	6 (1550)			
$n_{факт}$				10;15;6	15;23;9	18;23;15			

Из таблицы 3 можно получить информацию по оптимальному значению количества агрегатов при различных нормативных агросроках при соответствующих ущербах, а также сроках превышающих данные нормативы. Такие данные получены по всем 16-ти группам.

На основе сводных данных моделирования получено геометрическое место оптимального количества агрегатов с соответствующими общими удельными затратами (для нормированного значения агросроков равное

пяти дням), для всех 16 групп (рис.5). Аналогичные графики можно получить и для другого значения агросроков.

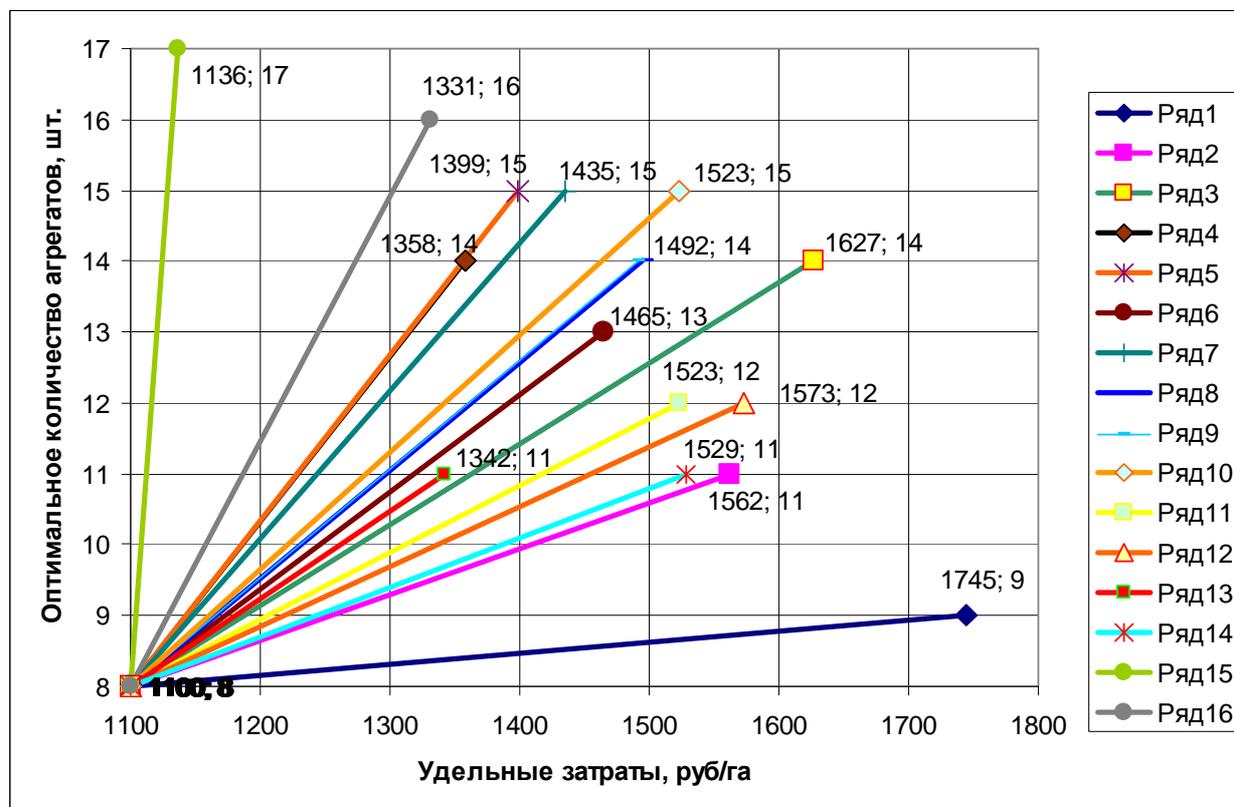


Рисунок 5 – Геометрическое место оптимального значения количества агрегатов и соответствующие общие удельные затраты

Из данного графика можно определить наиболее эффективную группу агрегатов по значениям количества агрегатов и значению удельных затрат. Эффективность следует определять, начиная с минимального значения удельных затрат. Так по графику видно, что наиболее эффективной будет 15, затем 13 группа и так далее. Расположение по эффективности в порядке убывания представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Ранжирование групп агрегатов по оптимальному количеству агрегатов и уровню удельных затрат

Группа	15	13	4	16	5	7	6	8	9	11	10	14	2	12	3	1
место	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Однако наблюдая графики можно увидеть, что при малых затратах иногда наблюдается высокое значение количества агрегатов. Поэтому

лучше сравнивать графики зависимостей количества агрегатов от затрат по каждой группе (рис.6). Чем ближе график к началу координат, тем эффективней группа.

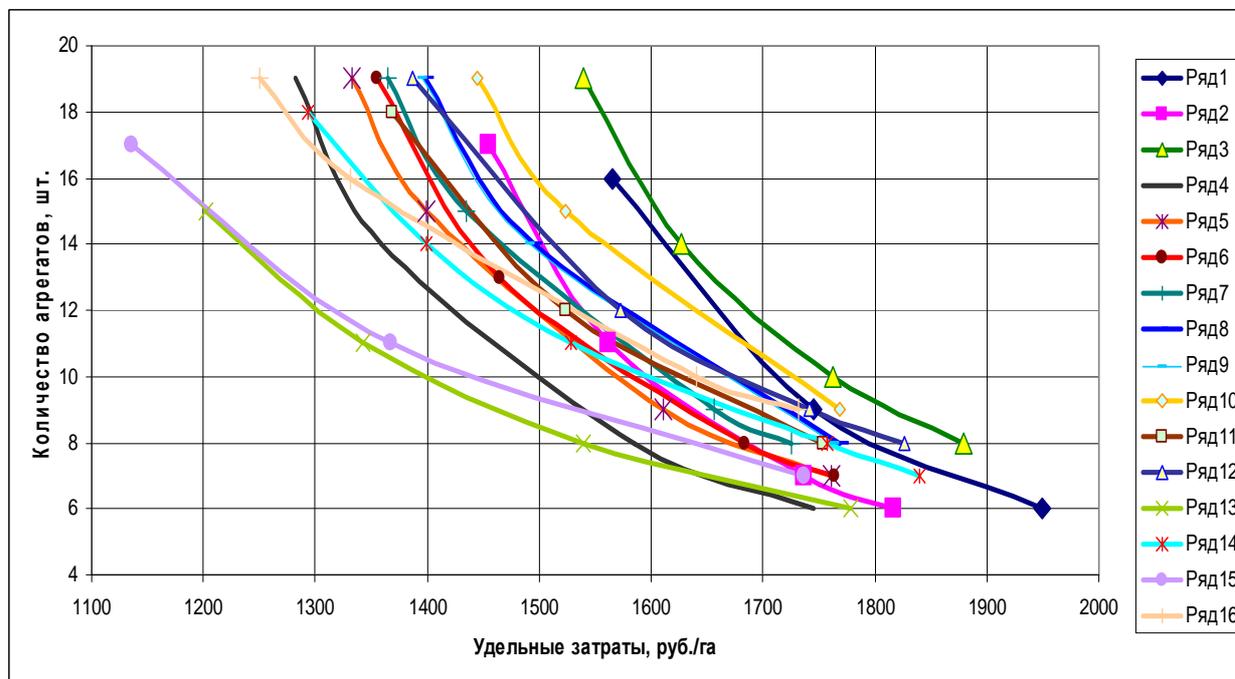


Рисунок 6 – Графики зависимостей количества агрегатов от затрат по каждой группе

Все агрегаты можно разделить по эффективности при оптимальном их количестве на 4 группы (таблица 5). Первая группа – «Агрегаты высокой эффективности» (удельные затраты 1136-1342 руб/га): тракторы Т4-А, ДТ-75М, «Агромаш-90ТГ» с плугами ПН6-35; вторая группа – «Агрегаты повышенной эффективности» (удельные затраты 1358-1465 руб/га): тракторы фирм Джон Дир”, “Нью Холланд”, “Денц-Фар” с 4-х корпусными плугами фирмы “Джон Дир”, а также с 6-ю корпусными плугами фирм “Кивонь” и “Лемкен” мод. 160-6 и сюда же относятся тракторы Т4-А, Т-150К с плугами ПН4-35 и ПЛН6-35; третья группа – «Агрегаты умеренной эффективности» (удельные затраты 1492-1529 руб/га): тракторы Т-150К с плугами ПЛН6-35, ПЛН5-35, ПН4-40, и “Кивонь” и «Лемкен»; четвертая группа – «Агрегаты низкой эффективности» (удельные затраты 1562-1745 руб/га): тракторы К701 с плугами ПТК9-35, ППП7-40, ППП8-35 и трактор Т-150К с

плугами ПЛН4-35, а также тракторы МТЗ-1221 с плугами ПН4-35. Нужно также отметить, что внутри группы тракторы МТЗ-1221, имеют большее преимущества перед тракторами Т-150К.

Таблица 5 – Ранжирование групп агрегатов по графикам эффективности

Группа	13 (Т4-А+ ПН6-35), 15 (ДТ-75М (Аг- ромаш 90ТГ) + ПН6-35; 16 (ДТ-75М (Аг- ромаш 90ТГ) + ПН4-35)	4 (ITr-220+ IP1-4 - “Джон Дир” мод. 8100, “Нью Холланд” мод. G-210, “Фент” мод. Фаворит 822 + плуги IP1-4 — четырех- корпусные фирмы “Джон Дир”;);); 5 (ITr-180+ IP1-4 - “Джон Дир” мод. 7810, “Денц-Фар” мод. Агротрон 175, “Нью Холланд” мод. 8560); 6 (ITr-180+ IP1-6 - плуги шестикорпусные фирм “Кивонь” и “Лемкен” мод. 160-6); 7 (Т-150К + ПЛН6-35), 14 (Т4-А + ПН4-35)	8 (Т-150К + ПЛН5-35), 9 (Т-150К + ПН4-40), 11 (МТЗ-1221 + IP1-6); 10 (Т-150К + ПЛН4-35),	1 (К701+ ПТК9-35), 2 (К700+ ППП7-40), 3 (К700+ ПП8-35), 12 (МТЗ-1221 + ПН4-35),
место	1	2	3	4

Несмотря на то, что для отдельных групп оптимальное значение количества агрегатов кажется высоким, нужно больше обращать внимание на общие затраты. Так для 4-й группы если нанести точку оптимума количества агрегатов на график зависимости количества агрегатов от удельных затрат (рис.6), точка 14 (маркер «квадрат»), то мы видим что затраты составляют 1350 руб./га. Если предприятие не может вывести столько агрегатов, то можно спуститься по графику вниз – в более высокое значение затрат точки 12, 10, 8, 6. В конечной точке мы имеем значение 6 агрегатов при удельных затратах 1750 руб./га. Для сравнения первая группа (трактор К701) при таком ущербе имеет значение количества агрегатов равное 9. В зависимости от нормативного количества дней на обработку почвы и состава агрегата сформирована таблица 6, в которой приведены данные по количеству агрегатов и фактическому необходимому количеству дней на обработку почвы при общем ущербе на уровне 1750 руб./га. Так, напри-

мер, для первой группы (К701+ПТК9-35) при норме обработке почвы равной 5 дня необходимо иметь 9 агрегатов и обработка пройдет за 10 дней, соответственно при норме 10 дней – 6 агрегатов и 15 дней, при 15 днях – 5 агрегатов и 18 дней. При таком общем значении затрат для 13 группы (Т4-А + ПН6-35), соответственно для 5 дней – 6 агрегатов и 24 дня, для 10 дней - 5 агрегатов и 29 дней, для 15 дней - 4 агрегата и 36 дней. Отсюда видно, что для более эффективных агрегатов требуется меньше их количество и можно позволить себе произвести задержку нормативных сроков обработки.

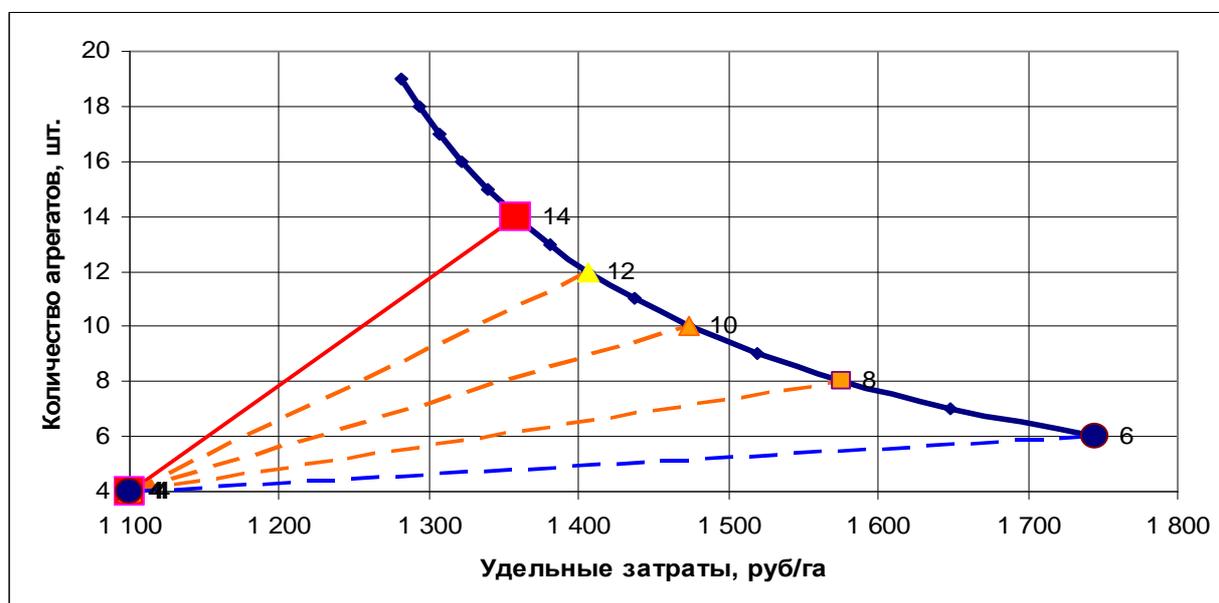


Рисунок 6 – График зависимости количества агрегатов от удельных затрат для 4-й группы с нанесением точки оптимума

Таблица 6 – Сводные данные по количеству агрегатов и необходимому фактическому количеству дней на обработку почвы

Группа по составу агрегата, состав агрегата	Количество агрегатов/фактическое количество дней на обработку		
	Нормативное количество дней на обработку почвы		
	5	10	15
1	2	3	4
1; К701+ПТК9-35	9/10	6/15	5/18
2; К700+ ППП7-40	7/12	5/17	4/21
3; К700+ ПП8-35	10/12	7/17	6/19
4; ITr-220+ IP1-4	6/17	5/20	4/25
5; ITr-180+ IP1-4	7/17	6/20	5/24
6; ITr-180+ IP1-6	7/16	6/19	5/22
7 Т-150К + ПЛН6-35	8/16	6/21	5/25
8 Т-150К + ПЛН5-35	8/16	6/21	5/25
9 Т-150К + ПН4-40	8/16	6/21	5/25
10 Т-150К + ПЛН4-35	9/16	7/20	5/25
11 МТЗ-1221 + IP1-6	8/17	6/23	5/28
12 МТЗ-1221 + ПН4-35	9/17	7/25	6/25

продолжение таблицы 6

1	2	3	4
13 Т4-А + ПН6-35	6/24	5/29	4/36
14 Т4-А + ПН4-35	8/21	7/22	6/28
15 ДТ-75М (Агромаш 90ТГ)+ ПН6-35	7/25	6/30	5/36
16 ДТ-75М (Агромаш 90ТГ)+ ПН4-35	9/23	8/26	6/34

Список использованной литературы

1. Тарасенко, Б. Ф. Конструктивно-технологические решения энергосберегающего комплекса машин для предупреждения деградации почв в Краснодарском крае: монография / Б. Ф. Тарасенко; КубГАУ – Краснодар, 2012. – 280 с.
2. Тарасенко, Б. Ф. Комплексный подход к технологии производства зерновых колосовых культур / Б. Ф. Тарасенко, С. В. Оськин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета 2013. – №87(03). – 14 с.
3. Оськин, С.В. Надежность технических систем и экологический, экономический ущерб в сельском хозяйстве. / С. В. Оськин, Б. Ф. Тарасенко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета 2014. – №85(01). – 18 с.

4. Сборник нормативных материалов на работы, выполняемые машинно-технологическими станциями (мтс). — М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. — 190 с.
5. Маслов, Г.Г. Комплексное проектирование механизированных производственных процессов в растениеводстве / Г.Г. Маслов, О.Н. Дидманидзе, В.В. Цыбулевский / Учебное пособие для студентов сельскохозяйственных высших учебных заведений / М., Триада, 2006. — 255 с.
6. Алан, Б., Прицкер, А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ 2. / Б. Алан, А. Прицкер / М., Издательство «Мир», 1987, 644 с.

References

1. Tarasenko, B. F. Konstruktivno-tehnologicheskie reshenija jenergosberegajushhego kompleksa mashin dlja preduprezhdenija degradacii pochv v Krasnodarskom krae: monografija / B. F. Tarasenko; KubGAU – Krasnodar, 2012. – 280 s.
2. Tarasenko, B. F. Kompleksnyj podhod k tehnologii proizvodstva zernovyh kolosovyh kul'tur / B. F. Tarasenko, S. V. Os'kin // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta 2013. – №87(03). – 14 s.
3. Os'kin, S.V. Nadezhnost' tehniceskix sistem i jekologicheskij, jekonomicheskij ushherby v sel'skom hozjajstve. / S. V. Os'kin, B. F. Tarasenko // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta 2014. – №85(01). – 18 s.
4. Sbornik normativnyh materialov na raboty, vypolnjaemye mashinno-tehnologicheskimi stancijami (mts). — М.: FGNU «Rosinformagroteh», 2001. — 190 с.
5. Maslov, G.G. Kompleksnoe proektirovanie mehanizirovannyh proizvodstvennyh processov v rastenievodstve / G.G. Maslov, O.N. Didmanidze, V.V. Cybulevskij / Uchebnoe posobie dlja studentov sel'skohozjajstvennyh vysshih uchebnyh zavedenij / М., Triada, 2006. — 255 с.
6. Alan, B., Pricker, A. Vvedenie v imitacionnoe modelirovanie i jazyk SLAM 2. / B. Alan, A. Pricker / М., Izdatel'stvo «Mir», 1987, 644 s.