

УДК 631.3.07:631.17:528.855

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ И ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Кушнарєв А.С., чл. – кор. НААНУ, д.т.н.,

Сербий В.К., асп.

*УкрНИИПИТ им.Л.Погорєлого*

Кушнарєв С.А., к.т.н.

*НАТИ НУБИП*

***Аннотация*** - рассмотрена новая возможность применения спутниковой информации в планировании и организации выполнения сельскохозяйственных операций на основе моделирования операционных технологий.

***Ключевые слова*** - операционная технология, операционно-технологическая карта, имитационное моделирование, МТА, МТП, комплекс машин, спутниковая информация, растениеводство.

*Постановка проблемы.* Организационной основой производства продукции растениеводства является технология.

Технология состоит из системы технологических операций, проектирование которых обеспечивает обоснование как состава Машино-тракторного парка, так и поиск путей снижения затрат на производство конечной с.х. продукции.

В данной работе расчет операционной технологии основан на использовании имитационной модели работы агрегата. Цифровой прототип агрегата составлен по параметрам, хранящимся в базе данных. Проводя симулирование реальности движения цифровой модели МТА по местности, характерной для конкретного хозяйства, берутся высотные точки рельефа из базы данных SRTM3, а недостающие значения точек интерполируются методом ординарного кригинга по опорным точкам.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработке новых методик по расчету оптимальной структуры машино-тракторного парка сегодня практически мало уделяется внимания как в Украине так и за рубежом. Появление отдельных статей не несет в себе, каких-либо, серьезных новаторских идей или научной новизны, позволяющие уточнить алгоритмы оптимизации или подбора машино-

тракторних агрегатів. Одной из последних работ в этом направлении является статья Н.П. Копика [2]. Результатом работы программы являются рекомендації в определении параметров агрегата, где под требуемую площать и в рамках агросрока вычисляется оптимальная ширина с.х. машини и требуемая мощность трактора. Для полей нестандартной конфигурации решение не предусмотрено, не учитывается влияние конструктивных характеристик агрегата, рельеф поля в определении его параметров. Созданная модель по сути является всего лишь решением задачи нахождения минимальной ширины агрегата, обеспечивающей наименьшую, но достаточную производительность агрегата для завершения выполнения работы в агросрок.

Результаты исследований. Структурная схема математической модели расчета операционных технологий главным элементом, которой является имитационная модель работы агрегата, выглядит следующим образом.

$$\begin{aligned}
 F_1(\alpha, x, y) &= 0 \\
 F_2(L_k, r, B_{с.х.м.}, B_{мп}, \alpha, x, y, APx, APy) &= 0 \\
 F_3(B, x, y, APx, APy, \alpha, drx, dry) &= 0 \\
 F_4(drx, dry) &= 0 \\
 F_5(L_k, r, B, drx, dry, сх.дв., опх, опу) &= 0 \\
 F_6(drx, dry, опх, опу, БД\_рельеф, БД\_тяг.х-к, БД\_с.х.м) &= 0 \\
 F_7(APx, APy, Q, e) &= 0 \\
 F_8(e, Z, A, TO, TP, E) &= 0 \\
 F_9(E, KM) &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $F_1$  – выбор направления движения агрегата;  $F_2$  – построение активной зоны;  $F_3$  – построение рабочего хода;  $F_4$  – построение холостого хода;  $F_5$  – оптимизация рабочих ходов;  $F_6$  – расчет эксплуатационно-технологических показателей;  $F_7$  – расчет приведенного расхода топлива;  $F_8$  – расчет приведенных энергетических затрат;  $F_9$  – ранжирование и составление технологического набора машин по критерию наименьших приведенных затрат;  $\alpha$  – направление движения МТА;  $x, y$  – координаты контуров поля;  $L_k$  – кинематическая длина агрегата;  $r$  – радиус поворота трактора;  $B_{с.х.м.}$  – ширина с.х. машини;  $B_{мп}$  – ширина трактора;  $APx, APy$  – координаты активной зоны;  $drx, dry$  – координаты рабочего хода;  $сх.дв.$  – принятая схема движения;  $опх, опу$  – массива значений координат холостых ходов;  $БД\_рельеф$  – база данных рельефа;  $БД\_тяг.х-к$  – база данных тяговых характеристик тракторов;  $БД\_с.х.м$  – база данных сельхозмашин;  $Q$  – затраты топлива;  $e$  – приведенный расход топлива;  $E$  – приведенные энергетические затраты;  $KM$  – подобранный комплекс машин.

Создание имитационной модели и методология расчета операционно-технологической карты складываются из следующих этапов:

Рассмотрим вкратце эти этапы:

1. Формирование поворотной полосы;
2. Расчет рабочих ходов;
3. Расчет холостых ходов;
4. Интерполяция высотных точек;
5. Алгоритм расчета операционно – технологической карты.

1. Формирование разворотной полосы. Петлевой способ движения включает ряд процедур проведения операции разворота. Первая процедура -агрегат должен полностью выехать за пределы рабочей зоны, т.е. последний рабочий орган агрегата должен находиться на границе конца рабочего хода и начала разворотной полосы, назовем эту процедуру выездом из рабочей зоны, на величину  $L_k$ . Вторая процедура включает в себя два элемента – повороты в разные стороны, что бы в сумме, по оси перпендикулярной к направлению движения, создалось условие обеспечивающее поворот и вхождение в следующую загонку с такими же маневрами. Третья процедура включает в себя поворот на угол  $g$  с радиусом  $r$ , обозначим эту процедуру поворотом, на величину  $C$ .

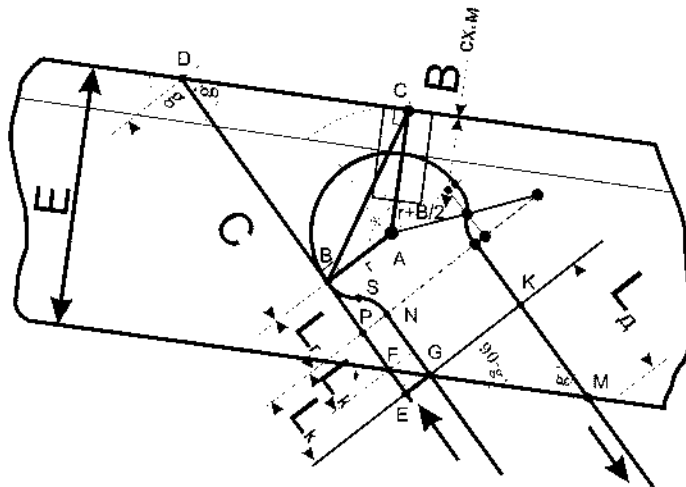


Рис.1. Схема движения агрегата при выполнении петлевого поворота.

Итак, длина разворотной полосы в направлении движения имеет вид:

$$e = C + L_r + L_k \quad (2)$$

Окончательный вид ширина разворотной полосы примет следующий:

$$E = e \cdot \sin(g) \quad (3)$$

После ряда преобразований получим выражение для определения ширины поворотной полосы

$$E = \sin \left( \frac{\pi}{2} - \arccos \left( \frac{r + \frac{B}{2} - r \cdot \cos(\gamma)}{\sqrt{\left(\frac{r+B}{2}\right)^2 + r^2 - 2 \cdot \left(\frac{r+B}{2}\right) \cdot r \cdot \cos(\gamma)}} \right) \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{r+B}{2}\right)^2 + r^2 - 2 \cdot \left(\frac{r+B}{2}\right) \cdot r \cdot \cos(\gamma)} + \left( 2 \cdot \sqrt{r^2 - \left(\frac{B+r}{4}\right)^2} + L_n - \left(r - \frac{B}{2}\right) \cdot \left| \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi}{2} - g' \right) \right| \right) \cdot \sin(g) \quad (4)$$

При условии  $\angle g \leq 90 \Rightarrow \angle \gamma = 180 - g, \angle g' = \angle g$  .  
 $\angle g > 90 \Rightarrow \angle \gamma = \angle g, \angle g' = 180 - \angle g$

Построение активной зоны поля заключается в нахождении разворотных полос для каждой стороны поля (рис.2).

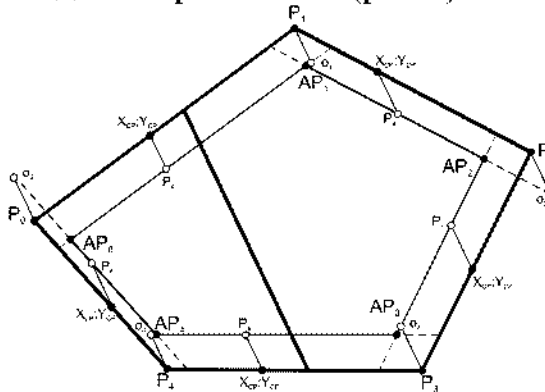


Рис.2. Схема построения активной зоны.

2. Расчет рабочих ходов. Для расчета рабочих ходов, используется следующий алгоритм:

2.1. построить описанный прямоугольника в направлении движения

2.2. произвести расчет координат отрезков, построенных в направлении движения агрегата с шагом равным ширине сагрегатированной с.х. машины, в области описанного прямоугольника.

2.3. произвести отсечение концов отрезков выходящих из зоны рабочей области.

1. Найдем вершины многоугольника, через которые проходят эти опорные прямые. Рассмотрим вектор  $\vec{q}(-n, m)$  единичной длины и перпендикулярный вектору  $\vec{q}$ . Найдем проекции векторов  $\overline{OM_1}, \overline{OM_2}, \dots, \overline{OM_n}$  на вектор  $\vec{q}$ :  $P_n = \overline{OM_n} = -n \cdot x_n + m \cdot y_n$  (рис.3)

Найдем максимальную  $P_n \rightarrow \max(P)$  и минимальную  $P_n \rightarrow \min(P)$  проекции. Через вершины многоугольника проведем опорные линии соответственно  $l_n$  и  $l_n$  в точках  $P_n = P_2(x_n, y_n)$  и  $P_n = P_0(x_n, y_n)$ .

Аналогично найдем проекции векторов  $\overline{OM_1}, \overline{OM_2}, \dots, \overline{OM_n}$  на вектор  $\vec{q}$ :  $P_n = \overline{OM_n} = m \cdot x + n \cdot y$

Найдем наибольшую и наименьшую проекции. Через вершины многоугольника, проведем опорные линии  $l_0$  и  $l_n$ , соответственно в точках  $P_0 = P_1(x_0, y_0)$  и  $P_n = P_3(x_n, y_n)$ .

На пересечении линий  $l_n, l_n, l_n, l_n$  образуются точки  $M1, M2, M3, M4$  – вершины описанного прямоугольника  $\Pi$ .

Обозначим  $M1 = l_n \cap l_n, M2 = l_n \cap l_n, M3 = l_n \cap l_n, M4 = l_n \cap l_n$ .

Для нахождения их координат  $M_n(x, y)$  воспользуемся следующим выражением:

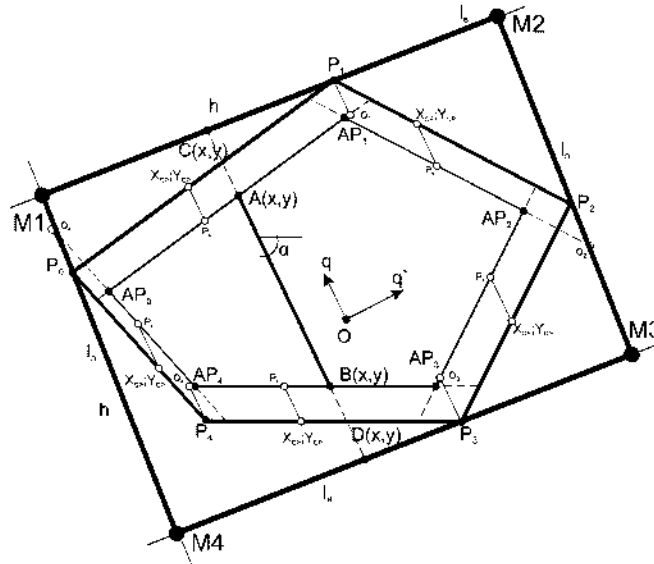


Рис.3. Построение рабочего хода.

Для нахождения их координат  $M_n(x, y)$  воспользуемся следующим выражением [3]:

$$\begin{aligned}
 M1 & (x_B + [(x_n - x_B) \cdot m + (y_n - y_B) \cdot n] \cdot t, y_B + [(x_n - x_B) \cdot m + (y_n - y_B) \cdot n] \cdot n), \\
 M2 & (x_B + [(x_n - x_B) \cdot m + (y_n - y_B) \cdot n] \cdot t, y_B + [(x_n - x_B) \cdot m + (y_n - y_B) \cdot n] \cdot n), \\
 M3 & (x_H + [(x_n - x_H) \cdot m + (y_n - y_H) \cdot n] \cdot t, y_H + [(x_n - x_H) \cdot m + (y_n - y_H) \cdot n] \cdot n), \\
 M4 & (x_H + [(x_n - x_H) \cdot m + (y_n - y_H) \cdot n] \cdot t, y_H + [(x_n - x_H) \cdot m + (y_n - y_H) \cdot n] \cdot n).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $n = \sin(\alpha), m = \cos(\alpha)$ .

Ширина прямоугольника равна:

Для  $\alpha > 0$

$$w = \sqrt{(x_{M1} - x_{M2})^2 + (y_{M1} - y_{M2})^2} \tag{6}$$

Для  $\alpha \leq 0$

$$w = \sqrt{(x_{M1} - x_{M4})^2 + (y_{M1} - y_{M4})^2} \tag{7}$$

Параметрические уравнения начальных точек по ширине прямоугольника:

Для  $\alpha > 0$

$$x_w = x_{M1} + n \cdot k, y_w = y_{M1} - m \cdot k \tag{8}$$

Для  $\alpha \leq 0$

$$x_w = x_{M1} + n \cdot k, y_w = y_{M1} + m \cdot k \tag{9}$$

где  $k$  изменяется от 0 до  $w$  с шагом  $b$ .

Высота прямоугольника равна:

Для  $\alpha > 0$

$$h = \sqrt{(x_{M1} - x_{M4})^2 + (y_{M1} - y_{M4})^2} \tag{10}$$

Для  $\alpha \leq 0$

$$h = \sqrt{(x_{M1} - x_{M2})^2 + (y_{M1} - y_{M2})^2} \quad (11)$$

Параметрические уравнения конечных точек по ширине прямоугольника:

$$\text{Для } \alpha > 0 \quad x_h = x_w - m \cdot h, \quad y_h = y_w - n \cdot h \quad (12)$$

$$\text{Для } \alpha \leq 0 \quad x_h = x_w + m \cdot h, \quad y_h = y_w - n \cdot h \quad (13)$$

3. Расчет холостых ходов. Этапы формирования траектории холостого хода для беспетлевого способа движения в разворотной полосе рассмотрены ранее при рассмотрении формирования разворотной полосы. Наша задача найти координаты точек всех элементов разворотной фигуры.

Рассмотрим рисунок 4.

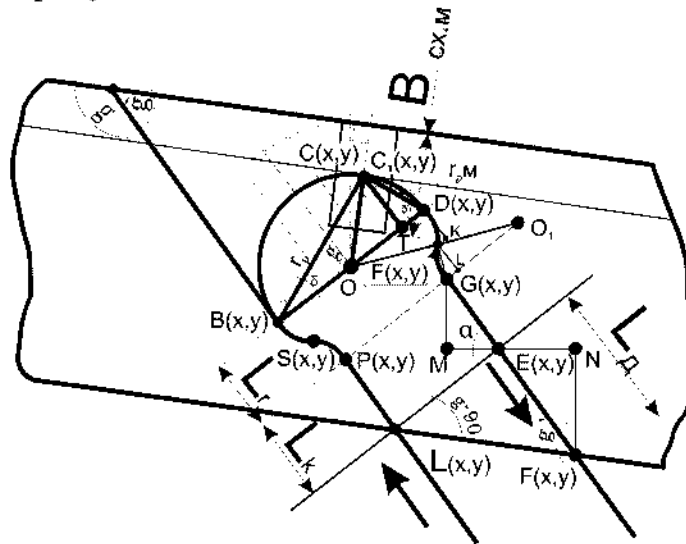


Рис.4. Координаты для петлевого способа движения.

Нам точка  $P(x, y)$  образована, перемещением кинематического центра трактора на значение кинематической длины  $L_k$  за пределы активной зоны. Необходимо определить  $S$  и  $C$

Координаты точки  $S$  определяются как:

$$x = \left( \frac{r-b}{2} \right) \cdot \cos(\alpha') - \left( \sqrt{r^2 - \left( \frac{B}{4} + \frac{r}{2} \right)^2} \right) \cdot \sin(\alpha') \quad (14)$$

$$y = \left( \frac{r-b}{2} \right) \cdot \sin(\alpha') + \left( \sqrt{r^2 - \left( \frac{B}{4} + \frac{r}{2} \right)^2} \right) \cdot \cos(\alpha')$$

Координаты точки  $C$  определяются как:

$$x = 2 \cdot r \cdot \sin^2 \left( \frac{g}{2} \right) \cdot \operatorname{ctg}(\delta') \cdot \cos(\alpha') - 2 \cdot r \cdot \sin^2 \left( \frac{g}{2} \right) \cdot \sin(\alpha') \quad (15)$$

$$y = 2 \cdot r \cdot \sin^2 \left( \frac{g}{2} \right) \cdot \operatorname{ctg}(\delta') \cdot \sin(\alpha') + 2 \cdot r \cdot \sin^2 \left( \frac{g}{2} \right) \cdot \cos(\alpha')$$

4. Интерполяция высотных точек. Расход топлива увеличивается на полях с неровной поверхностью. При подъеме на горку, увеличивается сопротивление и падает скорость агрегата, теряется производительность. Требуется правильное маневрирование передачами, что бы выбрать ту передачу, которая позволит работать в оптимальных условиях расход топлива – производительность. Соответственно необходима методика, позволяющая моделировать работу агрегата, которая учитывала бы колебания сопротивления с.х. машины и силы затрачиваемой трактором на самопередвижение. Алгоритм расчета высотных точек методом ординарного кригинга[5]:

#### 4.1. Расчет эмпирической вариограммы

Кригинг, как и большинство способов интерполяции, построен на предположении, что объекты, расположенные поблизости, более похожи друг на друга, чем удаленные друг от друга объекты (это предположение определено как пространственная автокорреляция). Эмпирическая вариограмма – это средство для исследования связей между точками. Пары, расположенные на близком расстоянии, должны иметь меньшую разницу в измеренных значениях, чем те опорные точки, которые удалены друг от друга. То, насколько это предположение верно, может быть изучено по эмпирической вариограмме.

Первый шаг в создании эмпирической вариограммы – вычисление расстояния и квадрата разности между значениями для каждой пары точек [6].

Эмпирическая дисперсия – это половина квадрата разности:

$$\text{Дисперсия} = \frac{1}{2} \cdot (Z_i - Z_j)^2 \quad (16)$$

где  $Z_i, Z_j$  – среднее значение высоты в точке  $i, j$

#### 4.2. Подбор модели

Осуществляется путем подбора линии, которая наилучшим образом проходит через точки на графике эмпирической вариограммы. То есть, мы должны определить линию таким образом, чтобы (взвешенный) квадрат разности между каждой точкой и линией был как можно меньше. Такой способ носит название подбора по методу (взвешенных) наименьших квадратов. Эта линия и будет моделью, количественно определяющей пространственную автокорреляцию в наших данных.

Угловой коэффициент линии регрессии, проходящей через ноль:

$$S = \frac{D - D_{д.с.}}{L_{ср.} - L_{р.с.}} \quad (17)$$

где  $D$  – дисперсия для значений высот опорных точек

$D_{д.с.}$  – усредненная половина квадрата разности между ближайшими соседями

$L_{ср.}$  – среднее расстояние между опорными точками

$L_{p.c.}$  – среднее расстояние к ближайшему соседу

#### 4.3. Создание матрицы значений дисперсий $G$

Угловой коэффициент определяет наклон подобранной прямой. Расстояние – это расстояние между парами точек, оно обозначается как  $l$ . В матрицу заносятся расчетные значения дисперсии для каждой пары точек. Единицы и нули в нижней строке и крайнем правом столбце определены в соответствии с условием несмещенности.

Формула для расчета элементов матрицы:

$$D_{i,j} = S \cdot l_{i,j} \quad (18)$$

$$G = \begin{vmatrix} D_{1,1} & D_{1,2} & \dots & D_{1,j} & 1 \\ D_{2,1} & D_{2,2} & \dots & D_{2,j} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ D_{i,1} & D_{i,2} & \dots & D_{i,j} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad (19)$$

#### 4.4. Вычисление вектора $g$ для искомой точки

Определяется аналогично. Расстояние определяется от искомой точки ко всем остальным.

$$g = \begin{vmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_i \end{vmatrix} \quad (20)$$

#### 4.5. Расчет вектора весов кригинга

Формула значений матрицы для ординарного кригинга следующая:

$$G \cdot p = g \quad (21)$$

$$p = G^{-1} \cdot g \quad (22)$$

где  $p$  – вектор весов;  $G^{-1}$  – обратная матрица  $G$ .

#### 4.6. Вычисление значения высоты в искомой точке

Общая формула кригинга:

$$Z(M) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Z_i \quad (23)$$

где  $Z(M)$  – высота в искомой точке

$Z_i$  – значение высоты в опорных точках

#### 4.7. Расчет стандартной ошибки кригинга

Дисперсия кригинга:

$$D = \sum_{i=1}^n (g_i \cdot p_i) \quad (24)$$

где  $g_i$  –  $i$ -тое значение вектора дисперсии

$p_i$  –  $i$ -тое значение веса

#### 4.8. Стандартная ошибка:

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (25)$$



### 5. Алгоритм расчета операционной технологии.

При построении моделирующего алгоритма в первую очередь выбираем основные операторы для имитации процесса движения, которые должны быть связанные между собой в соответствии с формализованной схемой выполняемого процесса:

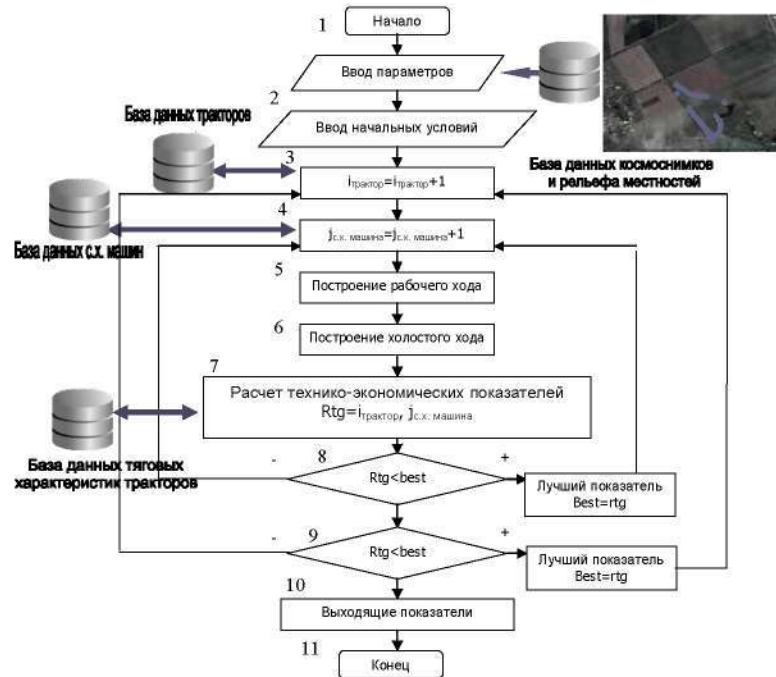


Рис.5. Блок-схема моделирующего алгоритма расчета операционной технологии.

$A_1$  - начало моделирования;  $A_2$  - введение начальных условий (полет, культура, технология);  $A_3$  - счетчик тракторов способных выполнять технологическую операцию за агровиногами;  $A_4$  - счетчик с.х. машин способных выполнять технологическую операцию за агровиногами;  $A_5$  - построение рабочих ходов;  $A_6$  - построение холостых ходов;  $A_7$  - расчет технико-экономических показателей;  $P_8$  - проверка на лучший вариант агрегата по критерию наименьших приведенных энергозатрат среди с.х. машин;  $P_9$  - проверка на лучший вариант агрегата по критерию наименьших приведенных энергозатрат среди тракторов;  $A_{10}$  - исходные показатели.  $A_{11}$  - конец моделирования.

### 6. Алгоритм выбора технологического набора машин

Результат работы программы (рис.8) – операционно-технологическая карта на каждую операцию технологического процесса и подобранный технологический комплекс машин .

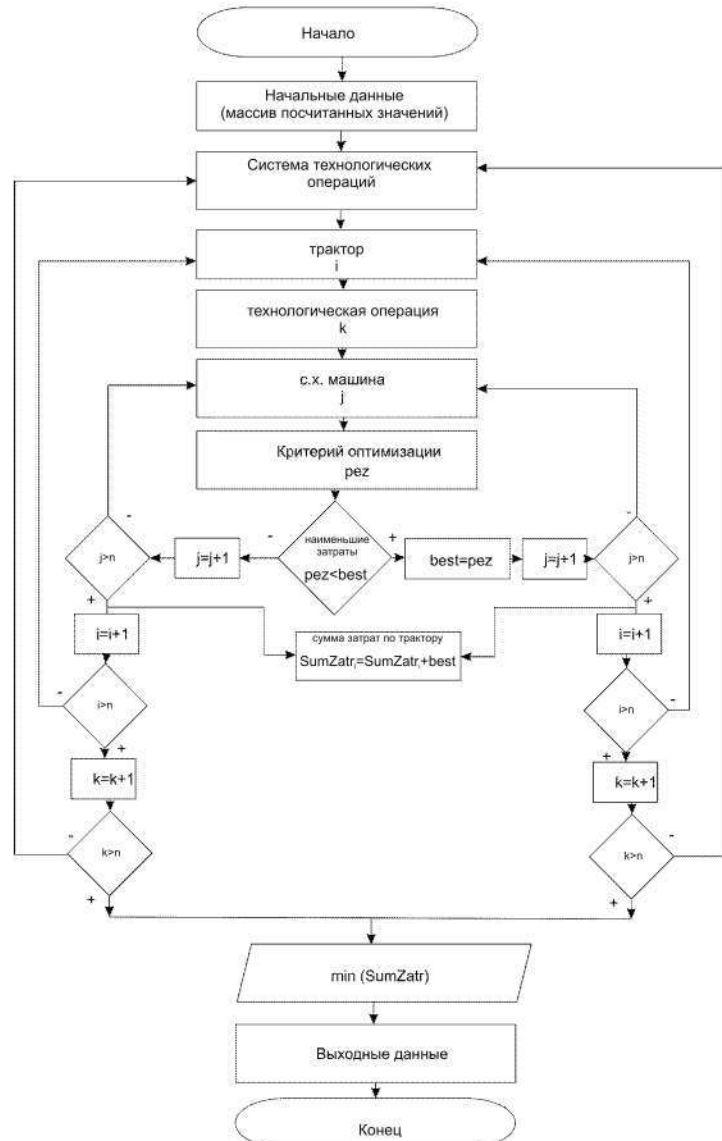


Рис.6. Блок-схема моделирующего алгоритма выбора технологического набора машин.

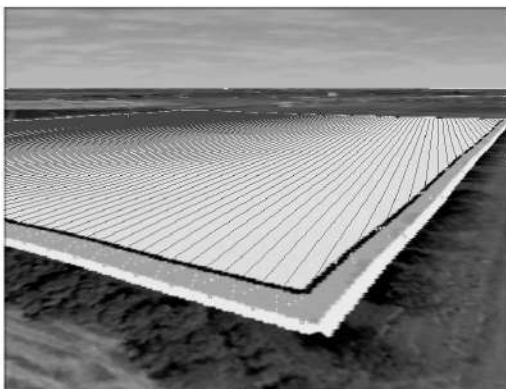


Рис. 7. Внешний вид смоделированной операционной технологии.  
**Выводы.** Определена структурная схема математической модели работы МТА, формализован процесс движения МТА. Разработана ме-

тодика и алгоритмы расчета операционных технологий с использованием имитационной модели работы МТА на основе спутниковой информации, что позволяет оптимизировать структуры МТП. Отличительной особенностью этой методики является применение спутниковых изображений для указания контуров полей и использование информации полученной спутниковой радарной топографической съемкой в качестве рельефа поля.

#### Литература

1. Колесник Г.О. Планування оптимального складу тракторного парку / Г.О. Колесник, Л.Н. Піддубна, П.І. Голубенко. – К. : «Урожай», 1977. - 144 с.
2. Материалы 6-й международной научно-практической конференции. Экология и сельскохозяйственная техника, ТОМ II, Санкт-Петербург, 2009.
3. Совертков П.И. Штриховка замкнутого многоугольника. Учебная мастерская /Совертков П.И., Хохлов Д.Н. – 2003, 73-79 с.
4. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике/ *М.Я. Выгодский.* - М.: Наука, 1977. – 872 с.
5. ARCGIS 9 Geostatistical analyst.Руководство пользователя – Esri, 2001

### ИМИТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В РОСЛИННИЦТВІ З ВИКОРИСТАННЯМ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТА ГЕОДЕЗІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

А.С. Кушнар'єв, В.К. Сербій , С.А.Кушнар'єв

*Анотація* – у статті розглянута нова можливість застосування спутникової інформації в плануванні та організації виконання сільськогосподарських операцій на підставі моделювання операційних технологій.

### METHOD OF CALCULATION OF OPERATING TECHNOLOGIES ON BASIS OF SIMULATION MODEL OF MOTION OF CTA WITH THE USE OF SATELLITE INFORMATION

A. Kushnarev, S. Kushnarev, V. Serbiy

#### *Summary*

**New possibility of application of satellite information is considered in planning and organization of implementation of agricultural operations on the basis of design of operating technologies.**