

УДК 631.3

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ ТРАКТОРОВ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Р. Ш. ХАБАТОВ

(Кафедра тракторов, автомобилей и ЭМТП)

В статье излагаются теоретические предпосылки, математические модели и алгоритмы прогнозирования параметров конструкций тракторов и сельскохозяйственных машин. В качестве оптимального принимается решение, обеспечивающее ритмичное, непрерывное и согласованное выполнение работ в агротехнически целесообразных сроках при минимальных текущих и приведенных затратах. При обосновании параметров конструкций машин используется закономерность — максимум коэффициента тягового КПД устойчиво достигается при определенном коэффициенте использования сцепления. Для аналитического решения проблемы используются оригинальные алгоритмы линейного, нелинейного и целочисленного программирования.

Оптимизация параметров тракторов и сельскохозяйственных машин — одно из основных направлений технического прогресса в сельском хозяйстве.

Цель настоящих исследований заключается в разработке теоретических предпосылок, математических моделей и алгоритмов обоснования

оптимальных параметров конструкций тракторов и сельскохозяйственных машин.

Решение проблем наиболее эффективных направлений развития конструкций тракторов и сельскохозяйственных машин требует применения современных экономико-математических методов и в частности методов нелиней-

ного целочисленного программирования [4—6].

Наиболее эффективным направлением аналитического решения рассматриваемой проблемы является применение экономико-математического моделирования постановки задачи; разработка и применение современных алгоритмов, программ и вычислительной техники.

Учитывая большие размеры задачи: не менее 1000 ($i=1 \dots 1000$) операций (видов работ) порядка 50 мобильных энергетических средств ($j = 1 \dots 50$), календарный год по срокам выполнения работ можно представить 75 пятнадцатидневками ($k=1 \dots 75$), решение задачи оптимизации структуры машинно-тракторного парка по типичным хозяйствам региона будет иметь размерность $1000 \times 50 \times 75$.

Опыт наших работ показал, что проблему нужно решать в 2 этапа. На первом этапе, решая задачу оптимизации параметров агрегатов, формируем исходные типоразмерные ряды машин; на втором — при решении задачи оптимизации состава машинно-тракторного парка по типичным хозяйствам региона получаем прогноз перспективной системы машин.

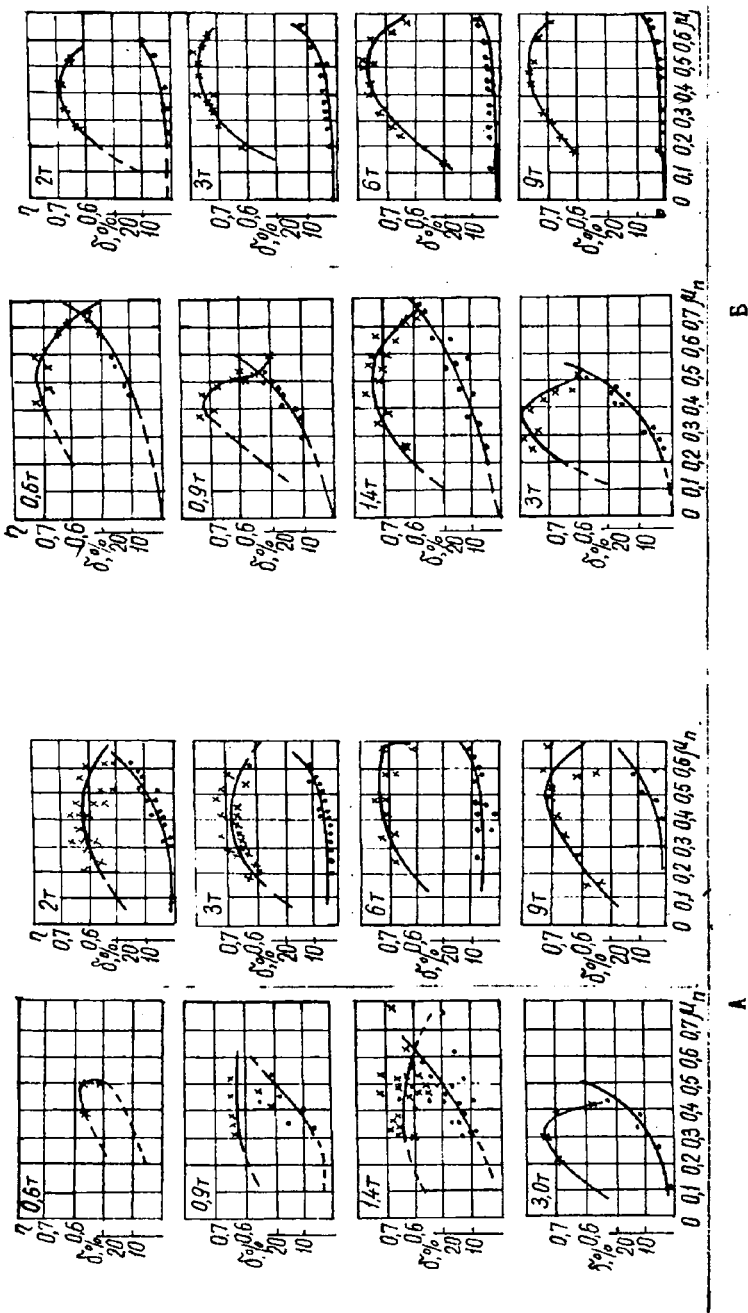
Такой подход с 1960 г. нами разрабатывался совместно с ВИМ и другими научно-исследовательскими института-

ми и вузами страны. Разработанная нами методика прогнозирования параметров агрегатов и оптимального состава машинно-тракторного парка для комплексной механизации сельскохозяйственного производства [1] была утверждена Госпланом СССР и нашла широкое применение в ведущих научно-исследовательских организациях страны при формировании «Системы машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 1986—1995 гг.» [3].

Настоящая методика дополняет ранее утвержденную, обеспечивает целочисленность решения [7], что оказывает влияние не только на количественную потребность в технике, но и на структуру расчетного машинно-тракторного парка.

При прогнозировании оптимальных параметров агрегатов следует исходить из диапазона рабочих скоростей, обеспечивающих качественное выполнение операций в режиме максимума тягового КПД в функции коэффициента использования сцепления ($P_{кр}/G_{сц}$) (рисунок), по данным НАТИ [1].

Алгоритм прогнозирования оптимальных параметров агрегатов заключается в вычислении тяговых усилий трактора, входящих в диапазон



Тяговый коэффициент полезного действия тракторов класса от 0,6 до 9 т в функции коэффициента использования сцепления: А — на поле под посев; Б — на стерне.

агротехнически целесообразной скорости движения; определении эксплуатационной производительности и прямых эксплуатационных затрат на единицу выполненной работы по вариантам скорости и ширины захвата агрегата и в выборе варианта решения по принятому критерию оптимизации (1) — минимум эксплуатационных затрат на единицу выполняемой работы.

Расчет оптимальных параметров тракторов и сельскохозяйственных машин для отдельных операций не дает полного ответа, особенно по тракторам, так как в данном случае учитываются универсальность тракторов, размеры и структура посевных площадей, величина приведенных затрат, зависящая от годовой загрузки машин, эффективность тракторов на различных операциях и ряд других инженерных, экономических и организационных факторов.

Вычисление оптимальных параметров по операциям позволяет сформировать исходный ряд мобильных энергетических средств и машинно-тракторных агрегатов.

Второй этап методики, который заключается в обосновании оптимального состава машинно-тракторного парка, обеспечивающего выполнение технологической операции в агротехнически обоснованные сроки с минимальными

приведенными затратами на выполнение всего комп-лекса работ, состоит в следующем.

Определяются оптимальный состав и план использования машинно-тракторных агрегатов x_{ijk} , обеспечивающих выполнение всех механизированных работ b_{ijk} в лучшие агротехнически целесообразные сроки:

$$\sum_j x_{ijk} \cdot w_{ijk} \geq b_{ik} \quad (1)$$

$$(i=1 \dots m; j=1 \dots n; k=1 \dots N),$$

где i — шифр вида работ; j — шифр мобильных энергетических средств (тракторов, самоходных уборочных машин); k — номер календарного периода.

Имеют смысл только неотрицательные переменные.

$$x_{ijk} \geq 0. \quad (2)$$

Решение должно быть целочисленным:

$$\max_k \sum_i x_{ijk} \equiv x_j, \quad (3)$$

$$(i = 1 \dots m).$$

Методика обеспечивает оптимизацию сводного плана механизированных работ по двум критериям:

— минимум приведенных затрат:

$$\sum_{ijk} C_{ijk} \cdot x_{ijk} \cdot t_k + \sum_j \max_j \sum_j x_{ijk} (\alpha_j + \sum_j) \zeta_j \rightarrow \min; \quad (4)$$

— минимум прямых эксплуатационных затрат:

$$\sum_{ijk} C_{ijk} \cdot x_{ijk} \cdot t_k + \quad (4a)$$

$$+ \sum_j \max \sum_j x_{ijk} (\alpha_j \cdot \zeta_j) \rightarrow \min.$$

В связи со сложностью дифференцирования второго слагаемого мы используем формулу аппроксимации не дифференцируемых функций [1]

$$\max_j x_j = \left(\sum_j x_j^p \right)^{1/p} \quad (5)$$

Используя эту аппроксимацию, функцию цели можно представить в следующем виде:

$$\sum_{ijk} C_{ijk} \cdot x_{ijk} \cdot t_k + \quad (6)$$

$$+ \sum_j \left(\sum_j x_j^p \right)^{1/p} (d_j + E)\zeta_j \rightarrow \min,$$

$$\sum_{ijk} C_{ijk} \cdot x_{ijk} \cdot t_k + \quad (6a)$$

$$+ \sum_j \left(\sum_j x_j^p \right)^{1/p} d_j \cdot \zeta_j \rightarrow \min.$$

Формулы (6) и (6a) моделируют дифференцируемые функции цели: минимум приведенных затрат (6) и минимум прямых эксплуатационных затрат (6a).

Исходная информация для решения поставленных задач включает: структуру посевных площадей в хозяйстве и рекомендуемые типовые тех-

нологии для рассматриваемой природно-климатической зоны. С помощью прикладного программного обеспечения формируется сводный план (объем и сроки) механизированных работ, при этом учитываются научно-организационные принципы, сформулированные С. Г. Колесневым [2]: полевые работы должны выполняться согласованно, ритмично и непрерывно в пределах научно обоснованных агрономических сроков.

В исходную информацию входят также варианты состава машинно-тракторных агрегатов для выполнения технологических операций; таблицы эксплуатационной производительности машинно-тракторных агрегатов и прямых эксплуатационных затрат по вариантам МТА, цены на тракторы, нормативные коэффициенты отчислений на реновацию, планируемые коэффициенты, нормы эффективности капиталовложений, нормы расхода топлива и отчисления на текущий ремонт и техническое обслуживание, планируемые тарифы оплаты труда механизаторов.

Алгоритм оптимизации состава МТП состоит из трех частей.

Первая часть алгоритма обеспечивает вычисление оптимального нецелочисленного состава МТП путем решения задачи нелинейного

программирования в соответствии с ограничениями (1), (2), (3) и целевой функцией (5) — минимум приведенных затрат.

Вторая часть алгоритма обеспечивает вычисление потенциалов (множителей Лагранжа).

Обозначим x_{ijk} — состав парка энергетических средств, тогда математическая модель задачи оптимального распределения мобильных энергетических средств по видам работ и по периодам можно описать с помощью следующих формул:

$$\sum_j x_{ijk} \cdot w_{ijk} \leq b_{ik} \quad (\text{II1})$$

$$(i=1 \dots m; k=1 \dots N),$$

$$\max_k \sum_i x_{ijk} \leq A_j \quad (j=1 \dots n) \quad (\text{II2})$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad (\text{II3})$$

$$(i=1 \dots m; j=1 \dots n; k=1 \dots N),$$

$$L = \sum C_{ijk} \cdot x_{ijk} \rightarrow \min. \quad (\text{II4})$$

Алгоритм решения задачи оптимизации состава МТП в соответствии с математической моделью (1, 1, 4).

1. Находим начальный допустимый план.

$$r_{ijk} = C_{ijk} / w_{ijk},$$

$$L_{ijk} = \max_j (r_{ijk}; 0),$$

$$P_{ijk} = L_{ijk} / C_{ijk},$$

$$x_{ijk} = P_{ijk} \cdot b_{ik} =$$

$$\left[\min_j (C_{ijk} / w_{ijk}; 0) \right] / C_{ijk}.$$

2. Вычисляем компоненты обобщенного градиента к гиперповерхности целевой

функции в точке x_{ijk}^0 .

$$C_{ijk}^* = dL / dx_{ijk}^0 = C_{ijk}^* \cdot t_k + x_{ijk}^0 / \left(\left(\sum_k x_{ijk} \right)^{p-1} \right)^{1/p} \cdot (d_j + E) \cdot c_j.$$

3. Вычисляем допустимый план, лежащий на направлении градиентного спуска:

$$x_{ijk} =$$

$$= \left(\min_j \left[\left(C_{ijk}^* / w_{ijk} \right) \cdot b_{ik} \right] \right) / C_{ijk}$$

$$(i=1 \dots m; j=1 \dots n; k=1 \dots N).$$

4. Путем пропорционального спуска вычисляем промежуточные значения между

x_{ijk}^0 и x_{ijk}^1 , двигаясь по направлению градиента:

$$x_{ijk}^\tau = x_{ijk}^0 - \tau (x_{ijk}^0 - x_{ijk}^1),$$

где $0 \leq \tau \leq 1$; $i=1 \dots m$; $j=1 \dots n$; $k=1 \dots N$.

5. Двигаясь от x_{ijk}^0 к x_{ijk}^τ

для значений $x_{ijk}^{\tau_1}$, $x_{ijk}^{\tau_2}$, вычисляем значение функции цели и находим значение

$x_{ijk}^{\tau_0}$, при котором функция цели минимальна. Делаем

вывод, что дальнейшее движение не приводит к уменьшению функции цели.

6. Используя локальный оптимальный план в качестве нового исходного, продолжаем решение, при этом если

$$\left(x_j^{np} - x_j^{посл} \right) / x_j^{np} \leq \alpha_1$$

$$\text{или } (L^{np} - L^{посл}) / L^{np} \leq \alpha_2,$$

т. е. изменения количества машин или функции цели незначительны, то задача решена. Это решение в качестве исходного плана используется на втором этапе при переходе к целочисленному решению.

Принимая в качестве исходного оптимальный нецелочисленный состав энергетических средств, решаем распределительную задачу (III, 112, ИЗ, 114) с помощью оригинального алгоритма методом градиентного спуска в пространстве двойственных переменных.

Задача оптимального использования техники при данных объемах работ математически формулируется с помощью следующей математической модели.

Найти значение x_{ij} удовлетворяющее следующим ограничениям: $\sum_j w_{ij} = b_i$ (III1);

$$\sum_j x_{ij} \leq a_j \text{ (III2); } x_{ij} \geq 0 \text{ (III3)}$$

($i = 1 \dots m$; $j = 1 \dots n$; $k = 1 \dots N$) и минимизирующие функции цели:

$$L = \sum_i \sum_j C_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min \text{ (III4),}$$

где a_j — количество j машин; b_i — заданные i объемы работ; w — производительность j агрегата на i виде работ; C_{ij} — затраты, связанные с использованием ij агрегатов на i видах работ.

В соответствии с общей теорией линейного программирования смежная задача записывается следующим образом.

Найти U_i и λ_j , максимизирующие следующую функцию: $L = U_i \cdot b_j - \sum \lambda_j \cdot \alpha \rightarrow \max$ при ограничениях: $\sum \lambda_j \geq 0$; $w_{ij} \cdot U_i - \lambda_j$ ($i = 1 \dots m$; $j = 1 \dots n$), отсюда $U_i = \min_j (C_{ij} + \lambda_j) / W_{ij}$, $i = 1 \dots m$.

При такой постановке алгоритм решения задачи оптимального плана использования машинно-тракторных агрегатов по видам работ может быть представлен следующим образом.

Вычисляем начальные значения потенциалов строк по видам работ

$$U_i^0 = C_{ij} / W_{ij}$$

$$(i = 1 \dots m; j = 1 \dots n).$$

Определяем потенциалы столбцов (энергетических средств):

$$U_i^0 \cdot W_{ij} - C_{ij} = r_{ij},$$

$$(i = 1 \dots m; j = 1 \dots n)$$

$$\max_j r_{ij} = \lambda_j (i = 1 \dots m).$$

Находим по всем календарным периодам потенциалы строк U_{ik} , оптимальный план использования техники по календарным периодам и потенциалы столбцов X_{jk} .

Экономический смысл потенциалов строк U_{jk} — на сколько увеличатся (или уменьшатся) затраты с увеличением объема работ в k периоде. Потенциалы столбцов λ_{jk} показывают, на сколько уменьшатся (или увеличатся) затраты с увеличением количества машин j марки на единицу.

Сумма потенциалов столбцов по периодам: $\sum_k \lambda_{jk} = \lambda_j$ позволяет определить годовой экономический эффект от увеличения λ_j (снижения прямых эксплуатационных затрат).

С другой стороны, увеличение количества машин означает необходимость увеличения затрат на приобретение техники. Если цена j энергетического средства равна c_j , а a_j — дробная часть, на которую необходимо увеличить a_j , чтобы получить целое решение, то целесообразность увеличения (округления a_j до целого чис-

ла) можно определить по соотношению: $\lambda_j \cdot a_j > c_j \cdot (j = 1 \dots n)$.

После каждой корректировки повторяются решения распределительной задачи и проверка целесообразности продолжения корректировок.

Корректировка количества наиболее эффективной техники приводит к уменьшению количества менее эффективной техники.

Применение современных экономико-математических методов прогнозирования параметров тракторов и сельскохозяйственных машин обеспечивает ускоренную разработку и выпуск перспективной сельскохозяйственной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куртбая Ю. К., Хабатов Р. Ш. и др. Методика прогнозирования параметров агрегатов и оптимального состава машинно-тракторного парка для комплексной механизации сельскохозяйственного производства. М.: Госплан СССР, 1973.— 2. Колесное С. Г. Организация социалистических сельскохозяйственных предприятий. М.: Сельхозгиз, 1947.— 3. Система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 1986—1995 гг. / Под ред. В. А. Кубышева, Н. А. Столбушки-

на, Р. Ш. Хабатова и др. М.: Госагропром СССР, 1988. — 4. Хабатов Р. Ш. Прогнозирование оптимальных параметров агрегатов и состава МТП. Киев: ЦНИИТЭИ, 1969. — 5. Хохлюк В. И. Параллельные алгоритмы целочисленной оптимизации. М.: Радио и связь, 1987. — 6. Шор Н. З. Применение обобщенного градиентного спуска в блочном программировании. — Кибернетика, 1967, № 3. — 7. Эксплуатация машинно-тракторного парка. / Под ред. Р. Ш. Хабатова. М.: ИНФРА-М, 1999.

Статья поступила

10 июля 2000 г.

SUMMARY

The paper presents theoretical preconditions, mathematical models and algorithms of forecasting parameters of tractors and farm machines constructions. A decision which provides rythmical, continuous and coordinated works at agrotechnically expedient dates with minimum current and presented costs is taken as an optimum one. As a basis of parameters of machines constructions the regularity is used — maximum coefficient of propulsive efficiency is achieved only with certain coefficient of using coupling. For analytical solving the problem original algorithms of linear, nonlinear and integer programming are used.