МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖНЫХ КАТКОВ

Г. В. Кустарев

Московский Автомобильно-Дорожный Институт
Кафедра Дорожно-строительных машин

Поступило 30 июля 1986 г.
Представлено Проф. Др. А. Пришгьяк

Abstract

This paper presents a determination method of optimum parameters of road-building rollers on the basis of minimum level of generalized efficiency criterion, which is as a product of specific energy and specific material utilization.

Given an expression for determination of this criterion as a function of two parameters — mass and velocity of roller — using regression model. Performed a mathematic analysis to get the minimum of above-mentioned criterion.

Определение основных параметров дорожного катка — двигателя, трансмиссия, гидропривода, рабочих органов — производится по известным зависимостям, которые в общем случае можно представить следующей функцией

$$y_i = \varphi_i(m,\ v), \tag{1}$$

где y_i — искомый параметр,
m — масса катка,
v — скорость катка.

Так, например, мощность двигателя при установившемся движении определяется по формуле:

$$N = \frac{fg}{\eta_T} mv = \frac{f}{\eta_T} Gv, \tag{2}$$

где f — коэффициент сопротивления перекатыванию;
η_r — к. п. д. трансмиссии;
g — ускорение свободного падения;
G — вес катка.

Крутящий момент в j-ом элементе трансмиссии:

$$Mj = \frac{fgR_b}{i_n \eta_n} m,$$

где i_n, η_n — передаточное отношение и к. п. д. трансмиссии от ведущего вальца до j-го элемента;
R_b — радиус ведущего вальца.

Таким образом, зная величину главного параметра — массы катка, а также величину скорости, можно определить другие основные параметры.

Следовательно, для определения оптимальных параметров катков необходимо прежде всего найти оптимальное значение массы и скорости.

Оценка эффективности параметров машины может быть произведена по обобщенному ктитерию $П_{NG}$ [1], который определяется из соотношения:

$$П_{NG} = \frac{NG}{П^2}, \tag{3}$$

где N — мощность машины;

G — вес машины;

$П$ — производительность машины.

Параметры, обеспечивающие минимум критерия будут оптимальным.

Следовательно, задача сводится к составлению зависимости изменения данного критерия от массы и скорости, то есть функции:

$$П_{NG} = \varphi (m, v),$$

а затем к определению минимума данной функции

$$П_{NG} = \varphi(m, v) \to \min.$$

Последнее можно выполнить путем определения частных производных по массе и скорости и решения следуюшей системы уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \varphi}{\partial m} = 0 \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial v} = 0 \end{cases}$$

Составим данную систему.

Производительность катка определяется выражением:

$$П = \frac{L(B-d)H_0}{\left(\frac{L}{v} - t_p\right) n} \tag{4}$$

где L — длина прохода катка;

B — ширина уплотняемой полосы;

d — ширина перекрытия полос;

t_p — время реверсирования;

H_0 — толщина уплотняемого слоя;

n — количество необходимых просодов по одному следу.

Следует отметить, что данная зависимость справедлива для каждого определенного типа катков с постоянными (фиксированными) значениями массы.

С изменением массы катка, при прочих равных условиях, количество проходов n будет изменяться.

Следовательно число проходов можно выразить функцией двух параметров (m, v)

$$n = f(m, v)$$

Теоретически определить эту функцию достаточно сложно. Она может быть определена на основе экспериментальных данных. Эти данные целесообразно получать путем планирования и проведения экспериментов. Используем наиболее общий и достаточно простой метод планирования — центральный композиционный план [2] (ЦКП).

Опуская общеизвестные принципы обработки экспериментальных данных, на основе ЦКП получаем численные значения коэффициентов c_0 c_1 c_2, c_{12}, c_{11}, c_{22} в регрессионном уравнении

$$n = c_0 + c_1 v + c_2 m + c_{12} m v + c_{11} v^2 + c_{22} m^2 \qquad (5)$$

Для получения этого уравнения, то есть для нахождения коэффициентов, потребуется не менее 9 опытов в следующих условиях определяемых таблицей:

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Уровни факторов: массы x_1	+1	+1	−1	−1	+1	−1	0	0	0
Скорости x_2	+1	−1	−1	+1	0	0	+1	−1	0

x_1, x_2 — кодированные значения переменных
$X_{1,2} = -1, 0, +1$ означает минимальное, среднее, максимальное значение

После получения значений коэффициентов проверяют их значимость по критерию Стьюдента и адекватность уравнения по критерию Фишера. Некоторые коэффициенты могут оказаться незначимыми, что приводит к упрощению уравнения регрессии.

Используем уравнение регрессии в общем виде для получения окончательного выражения

$$П_{NG} = \varphi(m, v).$$

Подставляя выражения (2) и (4) в соотношение (3) получим

$$П_{NG} = \left(\frac{\dfrac{fv(mg)^2}{L(B-d)H_0}}{\left(\dfrac{L}{v} + t_p\right) n(m, v)} \right)^2$$

Принимая f, L, B, d, H_0, $g \approx$ const, можно записать, что

$$\Pi_{NG} = \nu m^2 \left[\left(\frac{a}{\nu} + b\right) n(m, \nu) \right]^2 \tag{6}$$

где

$$a = \frac{g\sqrt{f}}{(B-d)\,H_0}; \qquad b = \frac{t_p g\sqrt{f}}{L(B-d)H_0}.$$

Принимая также для упрощения $n(m, \nu)$ непрерывной функцией с корректировкой величин n после вычислений до целого числа определим $\Pi_{NG} = \varphi(m, \nu)$ min. Для этого составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \varphi}{\partial m} = 0 \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial \nu} = 0 \end{cases}$$

После подстановки (5) в выражение (6) и упрощения получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 2\nu(a + b\nu(\ (c_1 + c_{12}m + 2c_{11}\nu) + (a + b\nu)\ (c_2 + c_{12}\nu + 2c_{22}m)m = 0 & (7) \\ m(c_2 + c_{12}\nu + 2c_{22}m) + (c_0 + c_1\nu + c_2 m + c_{12}\nu m + c_{11}\nu^2 + \nu c_{22}m^2) = 0 & (8) \end{cases}$$

Из уравнения (7), в частности следует, что $(a + b\nu)$, $(a - b\nu)$ удобнее заменить на соответственно $\left(1 + \dfrac{b}{a}\nu\right)$, $\left(1 - \dfrac{b}{a}\nu\right)$ где величина $\dfrac{b}{a} = \dfrac{t_p}{L} = k$

Тогда

$$\begin{cases} 2\nu(1 + \varkappa\nu)\,(c_1 + c_{12}m + 2c_{11}\nu) + (1 - \varkappa\nu)\,(c_2 + c_{12}\nu + 2c_{22}m)m = 0 & (9) \\ (c_0 + c_1\nu + c_{11}\nu^2) + 2(c_2 + c_{12}\,\nu)m + 3c_{22}m^2 = 0 & (10) \end{cases}$$

Уравнение (10) при $c_{22} \neq 0$ можно решать как квадратичное уравнение относительно m, затем методом последовательного приближения определить значения m и ν удовлетворяющие уравнению (9).

Полученные значения m и ν обеспечивают экстремум функции Π_{NG} и в случае ее минимума являются оптимальными. Если будет наблюдаться не минимум, а максимум, то эти значения будут являться наиболее невыгодными.

Рассмотрим некоторые частные случаи, которые могут возникнуть при решении данной задачи. Так, возможен случай, когда в определенном интервале скоростей число проходов не будет зависеть от скорости, т. е.

$$n = f(\nu) = \text{const}$$

тогда $c_1 = 0$; $c_{12} = 0$; $c_{11} = 0$

Из уравнения (9) находим, что

$$(1-\varkappa v)\,(c_2+2c_{22}m)m=0 \tag{11}$$

Если при этом зависимость $n=f(m)$ линейна, т. е. $c_{22}=0$, $c_2\neq 0$, то получим зависимость

$$1-\varkappa v=0 \quad \text{или} \quad v=\frac{1}{k}=\frac{L}{t_p} \tag{12}$$

Следовательно, экстремум функции Π_{NG} по параметру v в этом случае зависит от режимов работы катка: длины прохода и времени реверсирования.

При этих же условиях из уравнения (10) находим, что

$$c_0+2c_2m=0 \quad \text{или} \quad m=-\frac{c_0}{2c_2} \tag{13}$$

Рассмотрим графическую зависимость $n=f(m, v)$ этого случая (рис. 1). Из графика находим, что

$$c_0=m_{\max}\ \operatorname{tg}\ \varphi+n_{\min},$$

где

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{n_{\max}-n_{\max}}{m_{\max}-m_{\min}}=-C_2.$$

следовательно зависимость (13) можно представить в виде

$$m=\frac{m_{\max}}{2}+\frac{n_{\min}}{2}\left(\frac{m_{\max}-m_{\min}}{n_{\max}-n_{\min}}\right). \tag{14}$$

Таким образом при линейной зависимости n от m и при незначительном изменении n от v т. е. $n=f(v)=\text{const}$ параметры $m_э$, $v_э$ обеспечивающие экстремум функции можно определить по соотношениям (12, 14)

$$v_э=\frac{L}{t_р},$$

$$m_э=\frac{m_{\max}}{2}+\frac{n_{\min}}{2}\left(\frac{m_{\max}-m_{\min}}{n_{\max}-n_{\min}}\right).$$

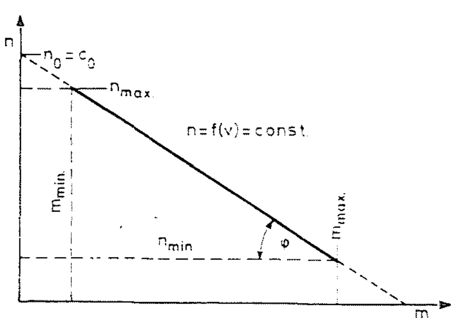

Рис. 1

Рассмотрим пример, иллюстрирующий применение методики для данного случая.

Поставлена задача: определить оптимальные параметры дорожного катка с возможными значениями массы $m = 4 \ldots 10$ (т) и значениями скорости $v = 1 \ldots 5$ (м/с)

а) Проводили эксперимент с использованием ЦКП

$$m_{\min} = 4; \quad m_{\max} = 10; \quad m_c = 7 \quad (\text{т})$$

$$v_{\min} = 1; \quad v_{\max} = 5; \quad v_c = 3 \quad (\text{м/с})$$

Опыты проводим в следующих условиях:

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m\,(m)$	10	10	4	4	10	4	7	7	7
$v\,(M/c)$	5	1	1	5	3	3	5	1	3

После обработки экспериментальных данных имеем $c_0 = 22$; $c_1 = 0$; $c_2 = 2$; $c_{12} = 0$; $c_{11} = 0$; $c_{22} = 0$ или $n = 22—2m$

График данной функции представлен на рис. 2.

б) Используя зависимость (13) получим

$$m_э = -\frac{c_0}{2c_2} = \frac{22}{2 \cdot 2} = 5{,}5\,(m)$$

Используя зависимость (14) проверим полученный результат

$$m_э = \frac{m_{\max}}{2} + \frac{n_{\min}}{2}\left(\frac{m_{\max}-m_{\min}}{n_{\max}-n_{\min}}\right) = \frac{10}{2} + \frac{2 \cdot 6}{2 \cdot 12} = 5{,}5\,(m)$$

Таким образом результаты совпадают.

Определим значение скорости, дающее экстремум функции Π_{NG}.
Возможный интервал скорости:

$$\mathrm{V}_{\min} = 1,$$
$$v_{\max} = 5$$

При этом известно, что каток будет использоваться в городских условиях на небольших участках с длиной прохода $L = 10 \ldots 14$ м, а время реверсирования составит

$$t_p = 3 \ldots 5 \text{ с.}$$

Следовательно используя зависимость (12) получим для средних значений L и t_p

$$v_e = \frac{L}{t_p} = \frac{12}{4} = 3(\text{м}/c)$$

Т. к. a, $b = \mathrm{const}$ функцию Π_{NG} удобнее заменить на Π^*_{NG}

$$\Pi^*_{NG} = \frac{\Pi_{NG}}{b^2}$$

тогда

$$\Pi^*_{NG} = m^2 n^2 v \left(\frac{3}{v} + 1\right)^2.$$

Проверим полученные значения $m_э$ и $v_э$ на минимум. Взяв крайние точки $v = 1$ и 5 (м/с) и $n = 4$ и 10 (т), получим, что значению $m_э$ соответствует максимум функции Π^*_{NG} при фиксированных значениях v (рис. *3*, кривая 1).

Значению $v_э$, соответствует минимум функции Π^*_{NG} при фиксированных значениях n (рис. 3, кривая 2).

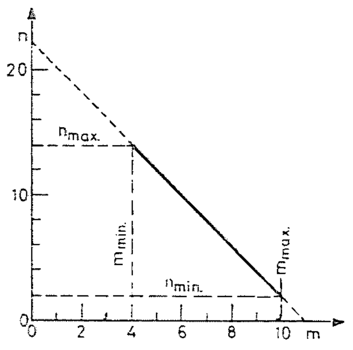

Рис. 2

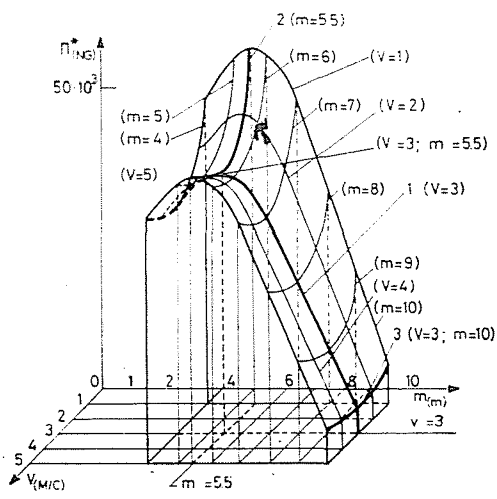

Рис. 3

Таким образом оптимальные значения нужно искать на кривой 2. При этом при $m_{max} = 10$, значения $П^*_{NG}$ будут наименьшими. Следовательно точке 3 соответствует минимум функции $П^*_{NG}$, а ее координаты соответствуют оптимальным параметрам массы и скорости:

$$m_{опт} = m_{max} = 10 \text{ (т)}$$
$$v_{опт} = v_э = 3 \text{ (м/с)}$$

При этом $n = 22—20 = 2$, является целым числом и корректировка не требуется.

Задачу можно считать решенной, далее расчеты ведем на основе традиционных зависимостей.

Представляется возможным использование данной методики и для других строительных и дорожных машин, например, бульдозер, автогрейдер и др. Для этого необходимо, конечно преобразование формул производительности и обобщенного критерия как функций определяющих параметров, свойственных для этих машин.

Резюме

В статье изложена методика определения оптимальных параметров дорожных катков по минимуму обобщенного критерия эффективности, представляющего произведение удельной энергоемкости и удельной материалоемкости. Составлено общее выражение определения критерия как функции двух параметров — массы и скорости катка. При этом в выражении используется регрессионная модель, получаемая экспериментально с использованием методов планирования по центральному композиционному плану. Проведен математический анализ для получения минимума критерия. Рассмотрены некоторые частные случаи, приводится пример определения оптимальных параметров катка.

Литература

1. Баловнев В. И.: Проектирование дорожно-строительных машин с использованием оборудования САПР/МАДИ, М-1980.
2. Митков, А. Л.—Кардашевский С. В.: Статистические методы в сельхозмашиностроении. — М.: Машиностроение, 1978.

Кустарев Геннадий Владимирович, Московский Автомобильно-дорожный Институт, Москва, 125829 Ленинградский проспект 64