

Х. А. Фасхиев

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Описана методика многопараметрической однокритериальной оптимизации технико-экономических параметров грузового автомобиля на этапе разработки технического задания. Оптимизация ведется с точки зрения потребителя по критерию суммарные удельные эксплуатационные затраты за срок службы автомобиля. Приведен пример выбора двигателя для проектируемого грузового автомобиля с оптимальными параметрами. *Автомобиль, технико-экономические параметры, разработка, оптимизация, удельные эксплуатационные затраты.*

### ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация технико-экономических параметров (ТЭП) на ранних этапах разработки изделия – самый эффективный инструмент обеспечения их качества и конкурентоспособности. Под качеством изделия здесь подразумевается оцененное потребителем в конкретный момент времени в каком-либо сегменте рынка превосходство товара по технико-экономическим показателям аналогов за жизненный цикл, достигаемое за счет максимального удовлетворения потребностей человеческого общества при минимальном для него и природе ущербе. Что касается категории «конкурентоспособность», то она интегрирует качество товара и цену, и ее уровень является решающим фактором при выборе товара. Ключевая задача любого производителя обеспечить превосходство своих товаров на рынке по критерию качество/цена.

Несмотря на глубокую разработанность методов обеспечения качества изделий на этапах разработки, наиболее эффективный инструмент обеспечения качества изделий – оптимизация принимаемых организационно-технических решений – на практике используются недостаточно [1]. Причины тому носят как объективный, так и субъективный характер. В частности, в критериях оптимизации не учитываются коммерческие аспекты эксплуатации проектируемых моделей, методы оптимизации недостаточно полно приспособлены к специфике эксплуатации конкретных видов машин, сложность установления аналитических зависимостей ТЭП изделий, их многофакторность, неопределенность точных значений ТЭП на ранних этапах проектирования и неопределенность условий нагружения деталей, агрегатов машины в эксплуатации. Ча-

сто к вопросу оптимизации ТЭП машин подходят чисто технически, тогда как любая машина в эксплуатации должна не только выполнить какую-то технологическую операцию, но и приносить потребителю максимальный доход при минимальных затратах в определенных условиях эксплуатации. Благоразумный потребитель коммерческой техники всегда предпочтению будет отдавать более конкурентоспособной. Конкурентоспособность изделия – это оцененное потребителем его превосходство по качеству и цене над аналогами в определенный момент времени, в конкретном сегменте рынка достигнутое без ущерба производителю. Другими словами, «экология» конкурентоспособного товара наиболее полно соответствует в рассматриваемый период «экологии» конкретных потребителей, поэтому продается больше, чем аналоги на этом рынке. Под «экологией» здесь подразумевается совокупность объективных особенностей объекта, характеризующих индивидуальными технико-коммерческими показателями.

Эффективность оптимизации ТЭП в существенной степени зависит от правильного выбора критерия оптимизации и установления обоснованных ограничений. Эффективность технологических машин определяется, прежде всего, наиболее полным соответствием их ТЭП эксплуатационным требованиям, поэтому критерии оптимизации должны приниматься с точки зрения потребителя. Практически вся совокупность технических параметров машины сказываются на ее экономичности, т.е. в интегральном показателе, который наиболее важен с точки зрения потребителя.

Разработчику необходимо установить зависимость экономичности проектируемой модели от его технико-эксплуатационных показателей. При наличии функции зависимости экономичности машины от его ТЭП уже на этапе разработки

технического задания на изделие рациональным подбором их можно обеспечить его экономичность на уровне аналогов. Для этого с использованием математической модели зависимости критериального показателя от ТЭП изделия методом итераций производится выбор таких параметров изделия, которые обеспечивали бы ему значение критерия оптимизации не ниже, чем у конкурентных моделей.

### 1. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ

В работе предложен основанный на экономико-математических моделях однокритериальный многопараметрический метод оптимизации ТЭП разрабатываемой модели автомобиля. Предложенный алгоритмический метод основан на принципе Парето-оптимальности, согласно которому любые решения, улучшающие какие-либо параметры объекта, считаются оптимальными, если при этом они не ухудшают другие параметры объекта. Процесс Парето-оптимизации правильнее было бы назвать рационализацией параметров объекта. В роли критериального технико-экономического показателя предлагается принять интегральный показатель экономичности – удельные эксплуатационные затраты (УЭЗ) за жизненный цикл грузового автомобиля, рассчитываемые по формуле

$$УЭЗ = \sum_{t=1}^{T_{\text{сл}}} [S_{\text{экс}t} \cdot (1+i)^{-t}] / W_t \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $S_{\text{экс}t}$ ,  $W_t$  – эксплуатационные затраты и производительность автомобиля в  $t$ -м году;  $T_{\text{сл}}$  – срок службы автомобиля;  $i$  – прогнозируемый годовой темп инфляции. Годовая производительность автомобиля  $W_t$  рассчитывается по предложенному в работе [1] алгоритму (рис. 1) с использованием 32-х ТЭП автомобиля, входящих в состав параметров технического задания на изделие. Новизна алгоритма расчета  $W_t$  в том, что расчет коэффициента технической готовности автомобиля проводится по четырехфакторному регрессионному уравнению расчета удельных эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и ремонт (ТОР). Эксплуатационные затраты  $S_{\text{экс}t}$   $t$ -го периода рассчитываются по формулам (рис. 2), с использованием более 70 параметров, входящих в техническое задание, с учетом физических явлений перевозочного процесса грузового автомобиля [1].

Преимущества УЭЗ как критерия оптимизации в том, что он интегральный технико-экономический показатель, играющий ключевую роль в формировании прибыли хозяйствующего субъекта, комплексно сочетающий технические, эксплуатационные, производственные и экономические характеристики автомобиля. Кроме того, УЭЗ охватывают весь срок службы изделия, учитывают инфляцию, временной фактор, динамику параметров по мере старения автомобиля. Все ТЭП, входящие в формулу расчета УЭЗ, включены в техническое задание. Ни один из технических интегральных критериев (КПД, удельная мощность, годовой пробег, коэффициент эффективности и пр.) не обладают такой степенью обобщения и значимости, какой обладает технико-экономический критерий УЭЗ. Динамика производительности и эксплуатационных затрат по мере старения автомобиля учтены коэффициентом темпа роста затрат  $g$  (см. рис. 1) и выпуска автомобиля на линию [2]

$$\alpha = (D_{\text{к}} - D_0 - D_{\text{ТОР}}) / D_{\text{к}}, \quad (2)$$

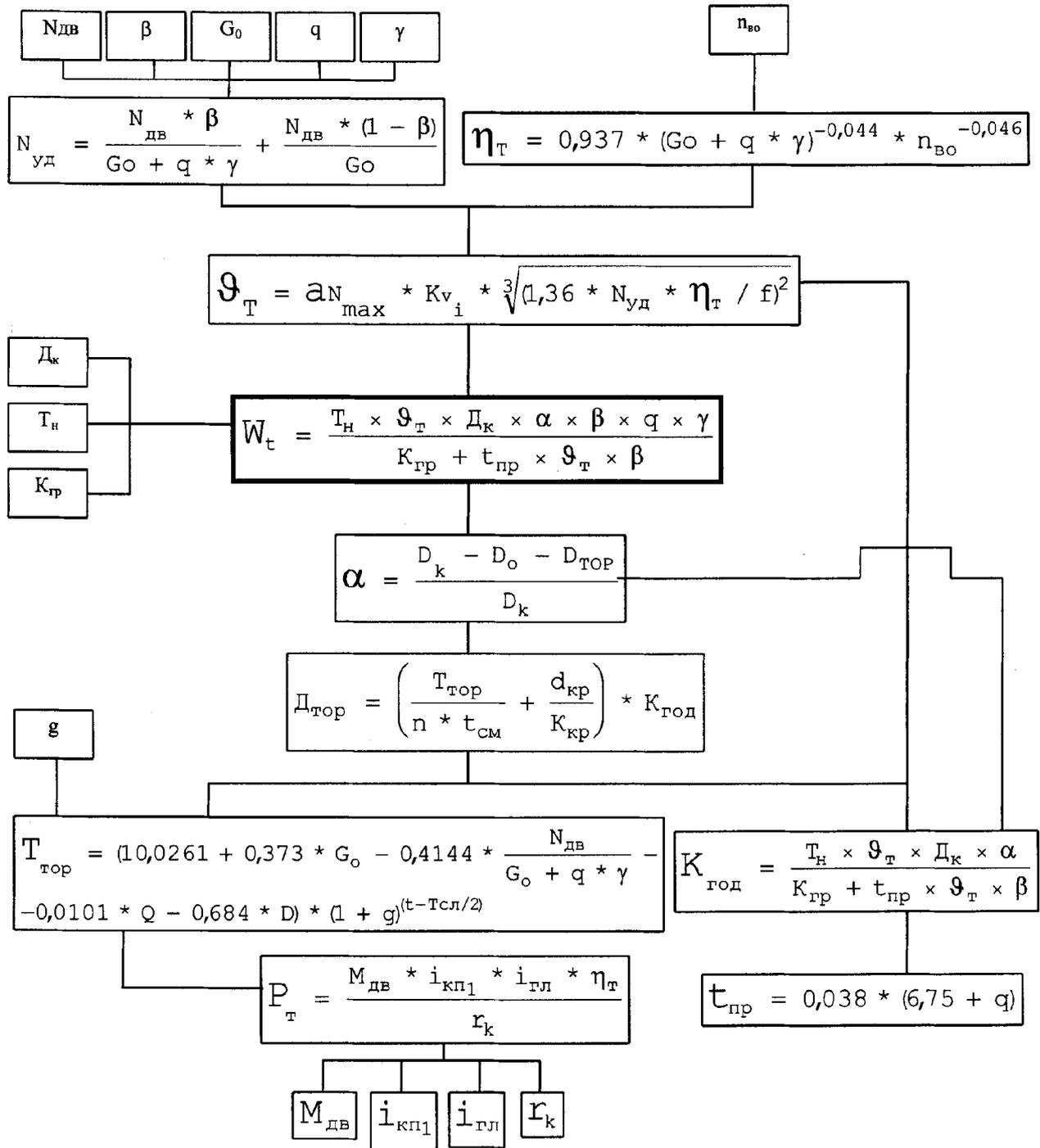
где  $D_{\text{к}}$  – число календарных дней в году;  $D_0$  – число дней простоя по организационным причинам;  $D_{\text{ТОР}}$  – дни простоя автомобиля под техническим обслуживанием и ремонтом (ТОР), определяемые по соотношению [2]

$$D_{\text{ТОР}} = [T_{\text{ТОР}t} / (n \cdot t_{\text{см}}) + d_{\text{кр}} / K_{\text{кр}}] K_{\text{год}}, \quad (3)$$

где  $n$  – число ремонтников, одновременно обслуживающих автомобиль;  $t_{\text{см}}$  – продолжительность рабочей смены у ремонтных рабочих, час;  $d_{\text{кр}}$  – дни простоя в капитальном ремонте;  $K_{\text{год}}$  – годовой пробег автомобиля, тыс. км;  $K_{\text{кр}}$  – пробег автомобиля до капитального ремонта, тыс. км.  $T_{\text{ТОР}t}$  – удельная трудоемкость ТОР  $t$ -го периода в чел. · час/1000 км, которая для большегрузных автомобилей общетранспортного назначения рассчитывается по разработанному авторами работы [1] четырехфакторному регрессионному уравнению

$$T_{\text{ТОР}t} = [10,0261 + 0,3738G_0 - \frac{0,4144N_{\text{дв}}}{G_0 + \gamma q} - 0,0101Q - 0,684D](1+g)^{(t-T_{\text{сл}}/2)}, \quad (4)$$

где  $G_0$  – снаряженная масса автомобиля, т;  $N_{\text{дв}}$  – мощность двигателя, кВт;  $q$  – грузоподъемность автомобиля, т;  $\gamma$  – коэффициент класса груза;  $Q$  – контрольный расход топлива, л/100 км;  $D$  – динамический фактор на I передаче;  $g$  – темп роста удельных затрат на ТОР в год,  $t$  – порядковый номер года эксплуатации.



**Рис. 1.** Схема расчета производительности грузового автомобиля:  $N_{уд}$  – удельная мощность двигателя;  $q$  – грузоподъемность;  $\gamma$  – коэффициент класса груза;  $n_{во}$  – число ведущих осей;  $\eta_T$  – КПД трансмиссии;  $D_k$  – число календарных дней;  $D_0$  – дни простоя по организационным причинам;  $D_{ТОР}$  – дни простоя в техническом обслуживании и ремонте;  $d_{кр}$  – дни простоя в капитальном ремонте;  $g$  – годовой темп роста эксплуатационных затрат;  $t$  – текущий период;  $t_{пр}$  – время на погрузку и разгрузку автомобиля;  $K_{год}$  – годовой пробег;  $T_{ТОР}$  – время, затраченное на техобслуживание и ремонт;  $n$  – количество ремонтных рабочих;  $t_{см}$  – продолжительность смены;  $V_T$  – средняя техническая скорость автомобиля;  $Q$  – линейный расход топлива;  $D$  – динамический фактор на I передаче;  $P_T$  – сила тяги;  $P_v$  – ветровая нагрузка;  $M_{дв}$  – максимальный крутящий момент двигателя;  $i_{кп1}$  – передаточное число на I передаче КП;  $i_{гл}$  – передаточное число главной передачи;  $r_k$  – динамический радиус колеса;  $\beta$  – коэффициент использования пробега;  $T_{сл}$  – срок службы автомобиля;  $T_H^k$  – время в наряде;  $K_{гр}$  – длина грузовой ездки;  $a_{Nmax}$  – коэффициент использования мощности;  $K_v$  – коэффициент рельефа местности

$$S_T = \frac{1,01 * K_{зим} * K_{год} * f * [\beta(G_0 + \gamma q) + (1 - \beta)G_0] * \left( \frac{1,05 * \vartheta_T}{\vartheta_H} - 0,05 \right) * 10^4 * C_T}{\rho * H * \eta_{дв} * \eta_{тр} * \eta_{ав}} * (1 + g_T)^t$$

$$S_{см} = K_{год} * \left( \frac{\sum \vartheta_{1,i} * C_i}{\Pi_{ТО-1}} + \frac{\sum \vartheta_{2,i} * C_i}{\Pi_{ТО-2}} \right) + 2 * \sum \vartheta_{C_i} * C_i + \frac{V_m * \alpha * C_M * (1 + g_{см})^t}{100}$$

$$S_{тор} = \left[ T_{тор_t} * C_{тар} * \left( 1 + K_H * K_{зч} + \frac{\alpha}{100} + \frac{\beta}{100} + \frac{\alpha + \beta}{10000} \right) * \frac{K_{год}}{1000} \right] * (1 + g_{зч})^t$$

$$S_{ш} = \frac{1,02 * C_{ш} * n_{ш} * K_{год} * U * \theta * \vartheta_T}{1000 * (2 - \beta) * (h - h_g) * \vartheta_H}$$

$$S_{ам} = \frac{(m_{ан} + m''_{ам}) * Ц * K_{год} * K_{ам}}{100000}$$

$$S_{экс} = S_T + S_{см} + S_{тор} + S_{ш} + S_V + S_{ам} + S_H + S_D$$

$$S_V = K_{доп} * C_{тар} \left[ \frac{W}{q} * \left( \frac{t_{пр}}{K_{гр}} + \frac{1}{\vartheta_{э} * \gamma * \beta} \right) + K_{орг} * K_{год} * \left( \frac{T_{тор}}{n * t_{см}} + \frac{d_{кр}}{K_{кр}} \right) * \frac{40}{n_p} \right]$$

$$S_H = \frac{\phi_2 * n_{мех} * C_{тар}}{K_{авт}} * \left( 1 + \frac{\alpha}{100} + \frac{\beta}{100} + \frac{\alpha * \beta}{10000} \right) * \frac{\varphi}{100} * (1 + g_H)^t$$

$$S_q = N_e * C_H + C_D * \frac{W}{L} * T_{тар} + C_{стр} * Ц$$

**Рис. 2.** Схема расчета годовых эксплуатационных затрат грузового автомобиля:  $K_{зим}$  – коэффициент повышения расхода топлива в зимний период;  $\eta_{дв}$  – КПД двигателя;  $\eta_{ав}$  – коэффициент учета наличия устройств уменьшающих расход топлива;  $C_T$  – стоимость топлива, руб;  $\rho$  – плотность топлива, кг/л;  $H$  – теплота сгорания топлива, Дж/кг;  $V_{1p}$ ,  $V_{2i}$  – объем  $i$ -й смазки, применяемой при ТО-1 и ТО-2, л или кг;  $\Pi_{ТО-1}$ ,  $\Pi_{ТО-2}$  – периодичность ТО-1 и ТО-2, км;  $C_i$  – стоимость  $i$ -го вида смазки, руб/л или руб/кг;  $V_m$  – годовой расход топлива, л;  $\alpha_m$  – расход масла на угар, %;  $g_{см}$  – темп роста затрат на смазку по мере старения автомобиля;  $C_{тар}$  – тариф ремонтных рабочих, руб/час;  $K_H$  – коэффициент накладных затрат;  $K_{зч}$  – коэффициент учета запчастей на ремонт;  $\alpha$  – коэффициент дополнительной зарплаты, %;  $\beta$  – коэффициент учета выплат в социальные фонды;  $g_{зч}$  – темп роста затрат на запчасти;  $n_{ш}$  – число шин;  $C_{ш}$  – стоимость шины, руб;  $U$  – удельный износ шин, мм/1000 км;  $\theta$  – коэффициент учета условий эксплуатации шины;  $h$  – высота протектора новой шины, мм;  $h_g$  – минимально допустимая глубина протектора шины, мм;  $m_{ам}$  – норма амортизации, %/1000 км;  $Ц$  – цена автомобиля;  $K_{ам}$  – коэффициент повышения нормы амортизации;  $K_{доп}$  – коэффициент учета дополнительной зарплаты;  $W$  – годовая производительность автомобиля, т·км;  $V_3$  – средняя эксплуатационная скорость, км/ч;  $n_p$  – число рабочих дней в неделю;  $n_{мех}$  – число механиков в гараже;  $K_{авт}$  – число автомобилей в гараже;  $g_H$  – темп роста накладных расходов;  $C_H$  – ставка налога с владельцев транспортных средств, руб/л.с.;  $C_D$  – ставка налога с пользователей автомобильных дорог;  $C_{стр}$  – страховой тариф

Оценки формулы (4) и множественного коэффициента корреляции по критерию Фишера-Снедекора, а коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  показали, что они значимы. Множественный коэффициент корреляции результативного и факторных признаков равнялся 0,81 и по  $F$ -критерию Фишера для уровня достоверности  $\alpha = 10\%$  был значим. Регрессионная модель адекватна, так как средняя ошибка аппроксимации очень мала – 0,24%, что позволяет рекомендовать эту формулу для применения в расчетах удельной трудоемкости ТОР и производительности на этапах проектирования грузового автомобиля.

Оптимизация параметров изделия на ранних этапах проектирования по интегральному показателю осуществляется по нижеприведенному алгоритму:

- для заданных условий эксплуатации определяется функция  $УЭЗ = f(A_{\text{опт}})$ , где  $A_{\text{опт}}$  – оптимизируемый параметр.

- по полученной функции определяется предельное значение оптимизируемого параметра, соответствующее интегральному показателю  $УЭЗ$  конкурентного автомобиля, вычисленного для тех же условий эксплуатации.

- с учетом других, не учтенных при вычислении интегрального показателя факторов (например, экологических, нормативных, социальных и др.), принимается величина оптимизируемого параметра, обеспечивающая конкурентные возможности новой модели по критерию  $УЭЗ$ .

Оптимизация технико-экономических параметров изделия на этапе разработки технического задания сводится к обеспечению значения  $УЭЗ$  новой модели на уровне аналога путем индивидуального итерационного подбора ТЭП новой модели. Интегральный показатель  $УЭЗ$  грузового автомобиля включает в себя 64 ТЭП, включенных в техническое задание. Принимая переменным один из ТЭП новой модели, при условии постоянства его остальных ТЭП, можно определить влияние данного фактора на многопараметрическую функцию

$$УЭЗ = f(N_{\text{дв}}, \eta_{\text{дв}}, \eta_{\text{тр}}, G_0, q, M_{\text{дв}}, P_{\text{то}}, \beta, f, V_{\text{т}} \dots).$$

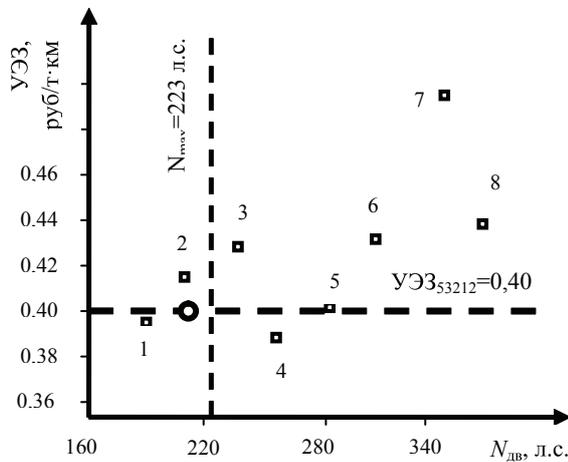
В дальнейшем, приравняв значение  $УЭЗ$  нового автомобиля величине  $УЭЗ$  конкурентной модели, можно выбрать такие значения ТЭП, которые обеспечивают экономическую эффективность новой модели автомобиля не хуже, чем конкурентный автомобиль.

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ

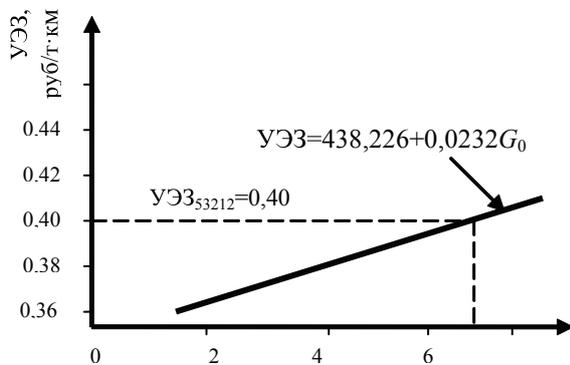
Особенностью оптимизации ТЭП грузового автомобиля является то, что практически все его ТЭП каким-либо образом связаны с грузоподъемностью, а грузоподъемность в свою очередь, для большегрузных автомобилей, например, ограничивается либо законодательными нормативами на осевые нагрузки, либо максимальной нагрузкой на шины. Оптимизируемые параметры тесно взаимосвязаны с грузоподъемностью, часто принимают только дискретные значения. Например, в современном автомобилестроении двигатель, сцепление, коробка перемены передач, главные передачи и другие ряд крупных агрегатов, как правило, специально не проектируются для каждой новой модели, а выбираются из имеющегося ряда ныне выпускаемых моделей, или планируемых к освоению в будущем. При этом на агрегаты предъявляются специфические требования. Например, максимальная мощность двигателя должна быть не меньше мощности, рассчитанной из условия обеспечения максимальной скорости автомобиля, т.е.  $N_{\text{дв.опт}} \geq N_{\text{макс}}$ . Характеристики двигателя в свою очередь определяют конструктивные параметры элементов трансмиссии. Принятые характеристики двигателя, как и другого любого агрегата, лучшим образом проявляются на интегральном показателе  $УЭЗ$ . На рис. 3 приведены результаты расчета  $УЭЗ$  грузового автомобиля общетранспортного назначения с полной массой 18 т с потенциальными 7-ю вариантами двигателей и конкурентного автомобиля – КАМАЗ-53212. Поле координат с осями  $N_{\text{дв}}$  –  $УЭЗ$  вертикаль  $N_{\text{макс}} = 223$  л.с., определенной из условия  $N_{\text{дв.опт}} \geq N_{\text{макс}}$  и горизонталью  $УЭЗ = 0,40$  руб/т·км конкурентного автомобиля распределяется на 4 зоны. Проектируемый грузовой автомобиль будет более экономичным, чем конкурентная модель только с двигателями попадающими в IV-ю зону. Находящийся в этой зоне двигатель, во-первых, соответствует требованиям по мощности для обеспечения максимальной скорости, во-вторых, автомобиль с двигателем, попадающим в эту зону, имеет меньшие  $УЭЗ$ , чем конкурентная модель, т.е. более экономичен в эксплуатации. Таким двигателем в рассматриваемом примере является только один дизель – КАМАЗ-7403.10.

При оптимизации параметра, входящего в критерий УЭЗ, например А, принятого в ТЗ, относительно А решается уравнение вида

$$УЭЗ_{\text{конк}} = f(A = \text{var}, B, C, D \dots Z = \text{const}). \quad (5)$$



**Рис. 3.** УЭЗ автомобилей: ○ – КАМАЗ-53212; ■ – КАМАЗ-5360 с двигателем: 1 – КАМАЗ-740 Э; 2 – КАМАЗ-740; 3 – КАМАЗ-740.11-240; 4 – КАМАЗ-7403.10; 5 – ЯМЗ-238 ПМ; 6 – ЯМЗ-238 ФМ; 7 – Камминз М11-350Е; 8 – КАМАЗ-740.50



**Рис. 4.** Зависимость УЭЗ опытного автомобиля КАМАЗ-5360 от снаряженной массы

Здесь  $УЭЗ_{\text{конк}}$  – удельные эксплуатационные затраты конкурентного автомобиля, рассчитанные для тех же условий эксплуатации, что и для новой модели. Например, в работе [1] авторами было получено однофакторное уравнения регрессии УЭЗ от снаряженной массы  $G_0$ , удельной трудоемкости  $T_{\text{ТОР}}$  на техническое обслуживание и ремонт проектируемого автомо-

биля КАМАЗ-5360

$$УЭЗ = f(G_0) = 438,226 + 0,0232 \cdot G_0; \quad (6)$$

$$УЭЗ = f(T_{\text{ТОР}}) = 339,24 + 4,4 \cdot T_{\text{ТОР}} \quad (7)$$

Аналогичные регрессионные уравнения могут быть получены по всем ТЭП, входящим в состав УЭЗ. В уравнениях (6)–(7) интегральный показатель проектируемой модели, приравняв интегральному показателю конкурентной модели, т.е. при  $УЭЗ_{5360} = УЭЗ_{\text{конк}}$ , можно определить значение факторного признака, обеспечивающее конкурентоспособность новой модели по интегральному признаку (рис. 4).

## ВЫВОД

Описанный метод многопараметрической оптимизация ТЭП автомобиля способствуют достижению экономической эффективности проектируемой модели с ранних этапов разработки. Формирование технического задания на новую модель с рациональными ТЭП способствует обеспечению ее конкурентоспособности с минимальными материальными и временными затратами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фасхиев Х. А., Костин И. М. Обеспечение конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки. Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2001. 349 с.
2. Ипатов М. И. Техничко-экономический анализ проектируемых автомобилей. М.: Машиностроение, 1982. 272 с.
3. Фасхиев Х. А. Оценка экономической эффективности, качества и конкурентоспособности изделий машиностроения // Машиностроитель. 2000. №5. С. 2–12.

## ОБ АВТОРЕ

**Фасхиев Хакимзян Амирович**, проф. каф. прикладной гидромеханики. Дипл. инж.-мех. (Марийский политех. ин-т, 1982), дипл. экономист (Казанский финан.-экон. инс-т, 1999). Д-р техн. наук по колесным и гусеничным машинам (ФГУП ГНЦ РФ «НАМИ», 1999). Иссл. в обл. проектирования транспорт. средств, управления конкурентоспособностью технических и соц.-экономических систем.