

УДК 622.23:622.26

Критерии оценки технического уровня горной техники

Предложена методика оценки технического уровня горной техники. Сформулирована совокупность технических критериев эффективности для разных типов техники. Методику продемонстрировано на примере сравнения конструкций горнопроходческих комбайнов.

Ключевые слова: горная техника, технический уровень, критерии эффективности, конструкции, проходческие комбайны.

Контактная информация: ligag@ya.ru

В условиях жесткого экономического и кризисного состояния горной промышленности, когда принятие решений о проектировании или приобретении новой техники сопровождается повышенным риском [1], особенно актуальна объективная оценка ее технического уровня. Эта сложная многокритериальная задача не решена как для техники вообще, так и для горной техники в частности. Обычно предпочтение одному из сопоставительного ряда образцов техники отдают на основании нечетко сформулированных противоречивых требований, опыта и интуиции, что нередко становится причиной многих ошибок.

Цель работы – формулирование и обоснование критериев оценки технического уровня горных машин.

Для сопоставления различных видов горной техники необходимо учитывать многочисленные показатели, главные из которых:

- горно-геологические и горнотехнические условия применения;
- требования безопасности, охраны труда, комфортности;
- технико-экономические данные (стоимость, окупаемость, ремонтпригодность и пр.);
- энерготехнические параметры (тип энергии, установленная мощность двигателей общая, исполнительного органа, движителя и др.);
- техническая и эксплуатационная производительность, надежность, коэффициент готовности и др.;
- геометрические параметры (габаритные размеры, объем, клиренс ходовой части и др.);
- технические параметры отдельных систем, условий их эксплуатации и др.

Учитывая многочисленность технических показателей, их противоречивость, нередко отсутствие ряда важных исходных данных в доступной для анализа информации, желательно выбрать минимальное количество их комбинаций, чтобы они охватывали как можно более стабильные и распространенные свойства. Не следует переоценивать и достоверность приво-



Г. Г. ЛИТВИНСКИЙ,
доктор техн. наук

димых разными фирмами данных, поскольку возможны как их неосознанное искажение (например, когда машина еще не запущена в серию), так и целенаправленная дезинформация, диктуемая требованиями рекламы, конкурентной борьбой за рынок и пр. Однако, несмотря на возможный разброс данных, нужно стремиться к тому, чтобы в совокупности эти неточности взаимно компенсировались и серьезно не мешали объективно ранжировать рассматриваемый набор образцов горной техники.

К наиболее доступным техническим данным, которые чаще приводятся в технических характеристиках машин, следует отнести по возможности ограниченный ряд базовых показателей, причем их размерности целесообразно свести к первичным: линейному размеру, массе и времени. Для каждого показателя в квадратных скобках указаны обозначения их размерности посредством первичных: $[l]$ – длина; $[m]$ – масса; $[t]$ – время; тогда для силы, например, $[F] \sim [m] \cdot [l] / [t]^2$. К таким показателям следует отнести: Π – производительность машины, т. е. готовую продукцию за единицу времени (напри-

мер, м³/мин, т/ч и т. д.), чаще $[L] \sim \gamma [l]^3 / [t]$, где $\gamma = \text{const}$ – плотность материала, $[\gamma] \sim [m] / [l]^3$; P – мощность суммарную P_c и рабочего органа P_p , кВт, $[P] \sim [F] \cdot [l] / [t] \sim [m] \cdot [l]^2 / [t]^3$, а поскольку $[m] \sim \gamma [l]^3$, то получим $[P] \sim \gamma [l]^5 / [t]^3$; C – стоимость машины (разную для разных целей оценивания – себестоимость рыночная, остаточная и пр.), грн; M – массу машины, т; $[M] \sim [m] \sim \gamma [l]^3$; V – габаритный объем машины в рабочем состоянии, м³; $[V] \sim [l]^3$ или ее габаритные размеры (длина, ширина, высота, м).

Условно эти данные можно разделить на интенсивные (Π , P), повышающие потребительскую ценность машины, и экстенсивные (C , M , V), понижающие ее, причем значимость и техническое предпочтение последовательно уменьшаются в ряду перечисления.

Рассмотрим подробнее производительность Π оборудования, поскольку к ее определению необходимо подходить, учитывая многочисленные факторы. Наиболее надежная и непосредственно измеряемая – техническая производительность, которая приводится в технической документации на оборудование. Однако этот показатель не отражает степень использования горной машины во времени в технологической цепочке (подготовительно-заключительные операции, наладка, смена режущего инструмента, простои, коэффициент готовности, ремонты и т. д.).

Более важными показателями следует считать сменную или даже месячную производительность, хотя их значение во многом обусловлено уровнем организации технологического процесса. Сопоставление технической и реальной сменной производительности горной машины позволяет судить об эффективности и даже целесообразности ее применения. Если коэффициент машинного времени проходческого комбайна составляет 0,25–0,35, то можно поставить под сомнение стремление повысить его техническую производительность в этих условиях.

Оценивая горную машину, желательно исключить «масштабный» эффект, под которым понимается зависимость показателя машины от пропорционального изменения ее размеров. Так, масса M горной машины при изменении масштаба изменяется пропорционально $[M] \sim [b] \cdot [l]^3$, а мощность P пропорциональна $[P] \sim [a] \cdot [l]^5$, где a , b – постоянные размерные

коэффициенты. Поэтому одно из требований к результативным показателям во время оценки технического уровня – их постоянство (инвариантность) в случае изменения масштаба машины (например, от модели к реальному размеру).

В указанные параметры, характеризующие горную технику, не включены многочисленные экономические показатели (затраты на ремонт и восстановление, сроки окупаемости и др.) и не потому, что ими пренебрегли как малозначимыми. Такая позиция в настоящем исследовании вынуждена, поскольку в рыночной экономике подобная информация обычно относится к коммерческой тайне фирм и приходится ограничиваться сравнением лишь технических данных. Более того, иногда некоторые из этих данных также сомнительные, так как под влиянием рыночной конкуренции в рекламных проспектах или описаниях конструкции они изредка намеренно приводятся не вполне объективно.

Из совокупности наиболее достоверных технических данных целесообразно получить критерии для сравнительной оценки разных образцов техники. Для единообразия надо сформировать эти критерии так, чтобы они при возрастании указывали на повышение потребительских качеств горной техники, т. е., когда первая производная от выбранного результативного показателя по времени положительна, – это отражает положительную тенденцию развития техники. Кроме того, желательно, чтобы изменение масштаба изучаемого образца техники не сказывалось существенно на числовом значении критерия.

Независимо от выбранного способа формирования критерии в многокритериальной задаче должны удовлетворять требованиям [2]:

- измеримости** – оценки интенсивности характеризуемого им свойства;
- декомпозируемости** – разбиения сложной задачи на отдельные, более простые части;
- полноты** – дополнительные критерии не изменяют результаты решения задачи;
- неизбыточности** – разные критерии не учитывают один и тот же аспект последствий;
- минимальности** – число критериев должно быть минимальным.

Формирование набора критериев позволяет выделить те аспекты последствий, которые необходимо принимать во внимание при сравнении разных вариантов горной техники [3].

Перечислим некоторые из наиболее важных критериев и, учитывая правила мнемоники, обозначим их единообразно. Например, для критерия в виде отношения Π/M примем обозначение $\lambda_{\Pi/M}$, где нижние индексы отражают смысл показателя. Как правило, при формировании критериев интенсивные показатели надо помещать в числителе, а экстенсивные – в знаменателе. Предлагаемые параметры представлены в виде простых соотношений, показатели степени которых выбраны на основе теории размерностей так, чтобы обеспечить инвариантность относительно размеров горной машины, т. е. быть постоянными при изменении ее линейных размеров (масштаба), что видно из сравнения размерностей:

1. $\lambda_{\Pi/P} = \Pi/P^{3/5}$ – критерий удельной производительности, отнесенной к установленной мощности машины. Он характеризует насколько эффективно используется установленная мощность, показывает энергоемкость получаемой продукции и является одним из важнейших среди остальных критериев. Чем больше значение этого критерия, тем эффективнее используется энергия для получения конечной продукции, тем менее энергоемка продукция, тем лучше энергомеханическая компоновка машины;

2. $\lambda_{\Pi/M} = \Pi/M$ – критерий эффективности конструкторского решения с точки зрения ее материалоемкости и отражающий производительность, которую дает каждая единица массы. Чем выше этот критерий, тем меньше удельная материалоемкость горной машины, тем выше ее производительность, приходящаяся на единицу массы, тем меньше затраты на материалы при изготовлении, тем ниже ее стоимость при прочих равных факторах;

3. $\lambda_{\Pi/V} = \Pi/V$ – критерий эффективности заполнения объема горного оборудования, отражающий свойство компактности и полноты использования пространства в габаритном объеме горной машины. Чем значение критерия больше, тем машину легче транспортировать, монтировать и обслуживать, тем меньше загромождается выработка;

4. $\lambda_{P/M} = P^{3/5}/M$ – критерий энерговооруженности горной машины, по которому можно судить, какая удельная энергия заключена в единице массы, насколько активно в кон-

струкции использована ее масса. Косвенно показатель отражает применение новых прогрессивных и высокопрочных материалов, силовую сбалансированность машины, приближение привода к рабочим органам, экономию на трансмиссиях и редукторах и т. д.;

5. $\lambda_{P/V} = P^{3/5}/V$ – энергетический критерий, оценивает эффективность пространственного конструкторского решения, ее компактность и энергонасыщение единицы занимаемого объема, косвенно – сложности решения проблемы теплового баланса;

6. $\lambda_{M/V} = M/V$ – критерий концентрации массы машины в единице ее объема (своеобразный показатель «плотности» конструкции), дает оценку соотношения ее экстенсивных характеристик и компактности конструкторских решений, что важно для выработок, где часто экстенсивные параметры машины (габариты, например) выступают как лимитирующий фактор области применения;

7. $\lambda_{\Pi/C} = \Pi/C$ – критерий экономичности, отражает уровень производительности на единицу затрат, что может сказываться на экономической эффективности применения техники.

Чем больше значение каждого из критериев, тем предпочтительнее образец техники в ряду сравниваемых. Многие из приведенных критериев не всегда можно вычислить однозначно, поскольку под входящими параметрами подразумеваются разные смысловые значения (например, производительность может быть максимальной и минимальной, установленная мощность двигателей – общей или только исполнительного органа и т. д.), поэтому в зависимости от цели анализа следует предельно конкретизировать смысл и числовое значение каждого показателя.

Выбранные критерии даже в таком кратком виде многочисленны и в силу своей противоречивости не совсем удобны для суждения о горной машине в целом. Поэтому возникает задача найти обобщенный критерий технической эффективности горной машины, который позволял бы объединять основные технические данные, характеризующие ту или иную конструкцию, что дало бы возможность сравнивать разные горные машины одного и того же назначения, несмотря на их конструктивные различия.

Таким обобщенным критерием может быть простейшая комбинация основных технических данных в виде симплекса

$$\lambda_0 = P / (M^\alpha P^\beta), \quad (1)$$

где α и β – некоторые постоянные величины, которые следует выбрать, исходя из требований независимости критерия от масштабных факторов – линейного и временного.

Поскольку каждый из входящих в симплекс показателей зависит от геометрических размеров $[L]$ и времени $[t]$, то для выполнения сформулированного требования инвариантности критерия от масштаба используем основные положения теории подобия и размерностей, для чего в зависимость (1) подставим размерности всех величин

$$\lambda_0 = [L^3 / t] / \{ [L^3]^\alpha [L^5 / t^3]^\beta \} = [L^{3-3\alpha-5\beta}] / [t^{1-3\beta}].$$

Из полученного соотношения размерностей для обобщенного показателя, чтобы добиться его безразмерного значения, необходимо приравнять к нулю показатели степеней у размерностей $[L]$ и $[t]$: $1 - 3\beta = 0$, $3 - 3\alpha - 5\beta = 0$, откуда после решения системы уравнений находим искомые коэффициенты: $\beta = 1/3$, $\alpha = 4/9$. Окончательно обобщенный критерий (для комбайнов, стругов, погрузочных и бурильных машин, бетономешалок и пр.) будет иметь вид

$$\lambda_0 = P / [M^{4/9} P^{1/3}] = P / \sqrt[3]{M^{4/3} P}. \quad (2)$$

Полученное соотношение степеней в обобщенном критерии обеспечивает его инвариантность по отношению к линейным размерам и относительно масштаба времени (если плотности материала модели и природы равны). Сам критерий в данном виде не является безразмерным и его размерность равна $\gamma^{2/9}$ (если производительность задается в размерности $[P] \sim [L^3/t]$).

Поскольку конкретное выражение для критерия эффективности следует получать с помощью теории подобия и размерностей, то его модификации будут зависеть от принятой размерности производительности того или иного вида техники. Например, для грузового транспорта любых типов (конвейерный, рельсовый, автомобильный, водный и др.), производительность которого измеряется, например, в т-км/ч $[P] \sim [m] \cdot [L]/[t] \sim \gamma [L]^4/[t]$, обобщенный критерий эффективности после

выполнения вычислений согласно требованиям инвариантности принимает значение уже с иными показателями ($\alpha = 7/9$, $\beta = 1/3$), и тогда главную роль начинает играть масса транспортного средства на фоне второго по важности показателя мощности

$$\lambda_0 = P / [M^{7/9} P^{1/3}] = P / \sqrt[3]{M^{7/3} P}. \quad (3)$$

Таким образом, обобщенный критерий технической эффективности λ_0 характеризует, за счет каких затрат энергии и материала достигается конечный результат, отраженный в производительности машины, т. е. цель, ради которой она создана. Косвенно знаменатель отражает возможную стоимость машины, так как включает интенсивный (мощность P) и экстенсивный (масса M) параметры, непосредственно влияющие на стоимость. Чем выше обобщенный критерий, тем экономичнее машина, тем она легче и компактнее, а ее конструкция более совершенна.

Чтобы обобщенный критерий был наполнен более достоверным содержанием, следует входящий в него параметр P (производительность) указывать для заранее заданных одинаковых (например, горно-геологических) условий работы сравниваемых конструкций горной техники. Поэтому необходимо так выбирать типы горных машин по целевому назначению, чтобы производительность выражалась одной и той же размерностью и трактовалась одинаково.

Для сопоставления сравниваемых образцов техники, например нового и базового, с критериями, равными λ_{01} и λ_{02} , целесообразно использовать относительный критерий в виде безразмерного коэффициента технической эффективности, определяемого по формуле

$$K_3 = \lambda_{01} / \lambda_{02}. \quad (4)$$

Чем выше этот коэффициент, тем предпочтительнее новый образец техники. Заметим, что в уравнении (4) для упрощения вычислений допустимо использовать без заметной потери достоверности расчетов менее сложное выражение для обобщенного критерия

$$\lambda_{0i} = P / (M \cdot P) \quad (i = 1, 2). \quad (5)$$

В качестве иллюстративного примера выполним относительное сравнение показателей проходческих комбайнов избирательного действия (рис. 1), для чего воспользуемся дан-

ГОРНОШАХТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Тип комбайна	Технические показатели комбайнов				Критерии эффективности			
	$P, \text{ м}^3/\text{ч}$	$\Sigma_{\text{сж}}, \text{ МПа}$	$M, \text{ т}$	$P, \text{ кВт}$	K_{Σ}	$\lambda_{П/М}$	$\lambda_{П/Р}$	$\lambda_{Р/М}$
КП-25	0,25	90	37	155	1,05	0,82	1,15	0,75
КП-20Б	0,24	80	25	180	1,06	0,98	0,80	1,30
1ГПКС	0,21	50	20	110	0,88	0,53	0,56	0,99
4ПУ	0,18	40	10	74	1,00	0,65	0,51	1,33
4ПП-5	0,29	90	75	340	0,69	0,47	0,61	0,82
4ПП-2М	0,26	80	60	225	0,72	0,44	0,69	0,68
П-160	0,27	100	60	250	0,84	0,64	0,90	0,75
П110	0,25	100	30	165	1,21	1,19	1,26	0,99
КПЗ	0,27	80	45	225	0,85	0,61	0,72	0,90
К20	0,40	120	85	480	0,98	0,88	0,91	1,02

ными каталога [4]. Такого типа комбайны находятся, по мнению автора, на излете развития и применения в горной промышленности. Это обусловлено наличием почти неустранимых недостатков, основные из которых – локальное разрушение породного забоя, использование для разрушения пород резцов, неудовлетворительное регулирование и низкое напорное усилие на забой, малые поперечная и продольная устойчивость, неровный контур выработки, невозможность автоматизации, небольшая сменная производительность и др. На смену комбайнам избирательного действия должны прийти комбайны нового технического уровня, у которых за счет фронтального действия на забой рабочего органа, оснащенного шарошками, эти недостатки будут исключены.

Поскольку области применения проходческих комбайнов различаются по предельной прочности горных пород на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$, в расчетные данные по производительности автором введен поправочный коэффициент K_{σ} , учитывающий изменение производительности при отклонении прочности пород $\sigma_{\text{сж}}$ от нормативного значения 100 МПа по формуле

$$K_{\sigma i} = (\sigma_{\text{сж}} / 100)^{1,8}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – предельная прочность пород на одноосное сжатие, на которую рассчитан комбайн, МПа.

Сравнение проходческих комбайнов избирательного действия по критериям технической эффективности приведено в таблице [4]. Исходя из этих данных, с помощью предложенных формул были вычислены критерии эффективности, нормированные отно-

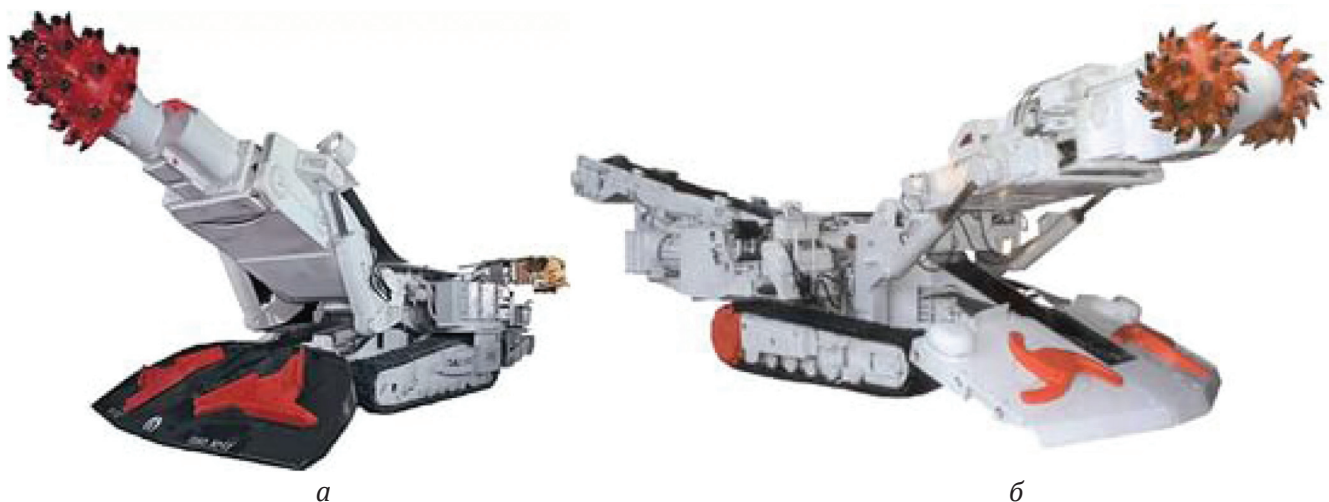


Рис. 1. Горнопроходческие комбайны избирательного действия первого (а) и второго (б) поколений.

сительно среднего уровня по всей выборке, для чего значение каждого частного критерия разделено на средневзвешенное по всей выборке значение.

Обобщенный коэффициент технической эффективности наиболее полно отражает потребительские преимущества каждого комбайна по сравнению со средним уровнем, принятым за единицу. Из таблицы следует, какими преимуществами и недостатками обладает та или иная конструкция комбайна по сравнению со средним уровнем по всей выборке.

Например, комбайн типа 4ПУ по критерию эффективности соответствует среднеотраслевому уровню $K_3 = 1$, однако остальные частные критерии значительно меньше среднего значения по выборке. Так, благодаря малой массе у него самое высокое соотношение установленной мощности к единице массы, но в то же время один из самых низких показателей удельной производительности на единицу мощности.

Относительный диапазон отклонений от среднего уровня показывает, как тот или иной тип комбайна «вписывается» в средневзвешенные показатели данного вида техники. Такой разброс удобно оценивать коэффициентом вариации, который составляет для комбайна 4ПУ 23 %. Аналогичный разброс критериев (23–24 %) наблюдается и у комбайнов 4ПП-2м и 4ПП-5. Наиболее уравновешен по показателям относительно среднего уровня комбайн К20, у которого коэффициент вариации критериев составил всего 4 %.

Наилучшими по техническим характеристикам являются комбайн П110 с коэффициентом эффективности $K_3 = 1,21$ – наибольшим среди рассмотренных типов, за ним следуют КП-25 и КП-20Б с показателями 1,05 и 1,06 соответственно.

Однако представленные данные не претендуют на исчерпывающую доказательность преимуществ комбайнов в силу необходимости проверки достоверности исходных данных,

они приведены, чтобы продемонстрировать методику и технику применения предложенных критериев технической эффективности.

Выводы. Предлагаемая методика оценки технического уровня горной техники основана на использовании набора критериев, которые впервые формируются на базе теории подобия и размерностей и удовлетворяют сформулированным требованиям измеримости, декомпозируемости, полноты, неизбыточности и минимальности. Каждый из критериев дает возможность оценить важное, но лишь одно потребительское свойство конструкции, тогда как обобщенный критерий эффективности позволяет сделать «свертку» этих свойств и оценить конструкцию в целом.

Используя данную методику, производитель, проектировщик и исследователь смогут:

при аналитических обзорах – провести ретроспективный анализ состояния и выявить тенденции и закономерности развития техники;

на стадии проектирования – обоснованно выбрать параметры оборудования;

на этапе формирования стратегии развития отрасли или отдельной компании – опереться на объективные численные критерии эффективности и обосновать предпочтительные варианты сопоставимых образцов техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Garry G. Litvinsky. Problem eksploatacji cienkich pokladow w ukraijskich kopalniach wegla kamiennego Zaglebia Donieckiego / Garry G. Litvinsky // Proceedings of the school of Underground Mining – 2002. International Mining Forum. – Polish Academy of Science. – Krakow: Nauka-Technika, 2002. – P. 347–363.
2. Гафт М. Г. Принятие решений при многих критериях / М. Г. Гафт, М. Г. Матяш. – М.: Знание, 1979. – 64 с.
3. Keeney R. L. Decisions with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoffs / R. L. Keeney, H. Raifla. – New York: John Willey, 1976. – P. 65–76.
4. Горные машины и оборудование: каталог. – Ч. 1. Оборудование для очистных и подготовительных работ. – Донецк: Донгипроуглемаш, 1995. – 87 с.