

13. Wright S., Bice S. *Beyond social capital: A strategic action fields approach to social licence to operate* // *Resources Policy*. 2017. Т. 52. С. 284 – 295.

14. Prno J., Slocombe D.S. *Exploring the origins of 'social licence to operate' in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories* // *Resources Policy*. 2012. Т. 37. № 3. С. 346-357.

15. Owen J.R., Kemp D. *Social licence and mining: A critical perspective* // *Resources policy*. 2013. Т. 38. № 1. С. 29 – 35.

16. Bice S. *What gives you a social licence? An exploration of the social licence to operate in the Australian mining industry* // *Resources*. 2014. Т. 3. № 1. С. 62 – 80.

17. Thomson I., Boutilier R.G. *Social licence to operate* // *SME mining engineering handbook*. 2011. Т. 1. С. 1779 – 1796.

18. Boutilier R.G., Thomson I. *Modelling and measuring the social licence to operate: fruits of a dialogue between theory and practice* // *Queensland, Australia: International Mine Management*. 2011.

19. Zandvliet L., Anderson M.B. *Getting it Right: Making Corporate-Community Relations Work*. Greenleaf Publishing Limited, Sheffield, UK. 2009.

20. Moffat K., Zhang A. *The paths to social licence to operate: An integrative model explaining community acceptance of mining* // *Resources Policy*. 2014. Т. 39. С. 61 – 70.

21. Walsh B., van der Plank S., Behrens P. *The effect of community consultation on perceptions of a proposed mine: A case study from southeast Australia* // *Resources Policy*. 2017. Т. 51. С. 163 – 171.

УДК 622.062

## **МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА НА ПРОЕКТЕ**

**Аверин Е.А.<sup>1</sup>, Жабин А.Б.<sup>2</sup>, Поляков А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод»

<sup>2</sup> Тульский государственный университет

Приведена методика для предварительной оценки технико-экономического эффекта от применения проходческого комбайна на проекте, основанная на показателях эквивалентной прочности горных пород и интегральной оценки сложности походки горной выработки. Для указанной методики приведен пример расчета с обоснованием выбора комбайна для конкретного проекта.

## Введение

Обеспечение высоких темпов горнопроходческих работ позволяет получить более ранний доступ к основным залежам полезного ископаемого, если речь идет о добыче минеральных ресурсов, или раньше завершить строительство социально значимых объектов инфраструктуры (метро, тоннели, инженерные коммуникации и пр.) [1, 2]. Одним из наиболее широко распространенных технических средств ведения горнопроходческих работ являются проходческие комбайны. Выбор конкретного проходческого комбайна является критически важным шагом в планировании работ по проекту или какому-либо из его этапов. При этом номенклатура машин, выпускаемых различными производителями в настоящее время, необычайно велика, что делает нецелесообразным тщательный анализ каждой модели комбайна с точки зрения его адекватности требуемым для успешной реализации проекта параметрам. Таким образом, возникает необходимость в достаточно простой и быстро проводимой предварительной оценке машин уже на предпроектной стадии.

## Методика

Представленная методика основана на широко известной и неоднократно апробированной модели Колорадского горного университета [4], позволяющей определять теоретическую производительность разрушения горного массива. Модель основана на многочисленных лабораторных испытаниях, а в ее основе лежит следующая формула:

$$Q_m = k_e \cdot \frac{P_{uo}}{Hw_{opt}}, \quad (1)$$

где  $Q_m$  – теоретическая производительность, м<sup>3</sup>/ч;

$P_{uo}$  – установленная мощность исполнительного органа проходческого комбайна, кВт;

$Hw_{opt}$  – оптимальная энергоемкость разрушения, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

$k_e$  – коэффициент передачи энергии.

Значение коэффициента  $k_e$  следует принимать равным 0,45 для комбайнов, оснащенных продольно-осевым режущим органом, и 0,55 для комбайнов с поперечно-осевым режущим органом.

Для определения значения  $Hw_{opt}$  существуют эмпирические формулы, связывающие данную величину с прочностными ха-

рактическими горных пород [5, 6]. Например, можно воспользоваться формулой из работы [6]:

$$Hw_{opt} = 0,37 \cdot \sigma_{сж}^{0,86}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности горной породы на сжатие, МПа.

В представленных выражениях (1) и (2) отсутствуют показатели, которые бы учитывали не только прочностные показатели, но и трещиноватость горных пород. Вместе с тем известно, что этот трещиноватость оказывает существенное влияние на производительность разрушения горного массива [7]. Таким образом, необходим расчетный метод (или подход), основанный на достаточно простом, интуитивно понятном, легко интерпретируемом показателе, адекватно отражающем сложность ведения горнопроходческих работ и зависящим от физико-механических свойств горных пород, слагающих месторождение. К числу прочностных характеристик и факторов нарушенности горного массива должны, как минимум, относиться прочности горных пород на сжатие и показатель их трещиноватости [8]. Последняя в российской практике, как правило, выражается не количественно, а качественно.

Решение поставленной задачи возможно за счет использования интегральных показателей, объединяющих в себе прочностные и ослабляющие свойства горных пород. К таким показателям относится интегральная оценка сложности проекта проходки горных выработок.

Для начала определяем совокупную сложность проекта, для чего вся выработка (или все выработки на горном предприятии) разбивается на относительно однородные по горно-геологическим условиям участки, каждому из которых присваивается категория числом от 1 до 10 согласно таблице 1.

Таблица 1 – Разбиение на категории сложности по пределу прочности на сжатие [8]

Кат.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_{сж}$ , МПа	0-30	30-60	60-90	90-120	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	>270

Затем осуществляется поправка категории по критерию трещиноватости горных пород на участке выработки [8]:

Монолитные породы.....+1

- Слаботрещиноватые породы.....+1
- Трещиноватые породы.....±0
- Сильнотрещиноватые породы.....-1
- Весьма и исключительно трещиноватые породы.....-1

Оценка сложности всей выработки определяется как средне-взвешенная по относительной протяженности сложности всех ее участков

$$C_{Int} = \sum_{i=1}^n \frac{l_i \cdot c_i}{L}, \quad (3)$$

где  $C_{Int}$  – интегральная оценка сложности проходки всей выработки;

$i$  – номер участка;

$n$  – количество участков;

$l_i$  – протяженность  $i$ -го участка;

$c_i$  – оценка сложности проходки  $i$ -го участка;

$L$  – протяженность всей выработки.

Чем больше значение показателя  $C_{Int}$ , тем сложнее осуществление проекта и выше ожидаемые затраты на его реализацию.

Разделив показатель интегральной сложности проекта проходки горной выработки на оценку максимально сложного ее участка  $c_{max}$ , получим:

$$C_d = \frac{C_{Int}}{c_{max}}. \quad (4)$$

Чем ближе значение  $C_d$  к единице, тем более однородные горно-геологические условия наблюдаются на объекте. Данное обстоятельство следует рассматривать как оказывающее положительное влияние, поскольку в неоднородных горно-геологических условиях повышается вероятность дополнительных простоев оборудования, связанных с его переоснащением в соответствии с текущими требованиями технологии ведения работ на конкретном участке горной выработки, что снижает вероятность своевременного завершения проекта.

Значения показателя интегральной сложности могут иметь разброс от 0 до 11. В первом случае весь проект реализуется в слабых, прочностью до 30 МПа, сильно и весьма трещиноватых горных породах. Во втором – проект состоит исключительно из

весьма крепких, предел прочности на сжатие больше 270 МПа, монолитных или слаботрешиноватых пород.

Если умножить полученное по формуле (3) значение интегральной оценки сложности на 30 (величину, на которую мы изначально делили значение  $\sigma_{сж}$ ), то получим усредненный прочностной показатель всей выработки с учетом степени индивидуального состояния (трешиноватости массива) отдельных ее участков, то есть показатель эквивалентной прочности горных пород [9] на всем проекте

$$\sigma_{сж}^{экв} = 30 \cdot C_{Int} . \quad (5)$$

После вычислений по уравнению (5) следует последовательно воспользоваться выражениями (2) и (1), что позволит получить приблизительное значение теоретической производительности проходческого комбайна на проекте [10]. Зная значение теоретической производительности, можно определить объем разрушенной горной породы в кубометрах за день работы

$$V = Q_m \cdot k_m \cdot N_{см} \cdot T_{см} , \quad (6)$$

где  $k_m$  – коэффициент использования машинного времени, %/100;

$N_{см}$  – количество рабочих смен в день;

$T_{см}$  – продолжительность рабочей смены в часах.

Коэффициент использования машинного времени  $k_m$  показывает часть времени от общих временных затрат на ведение работ, затрачиваемого только на горнопроходческие работы. Данный коэффициент зависит от множества факторов и обычно составляет 0,25-0,5.

Дневная эксплуатационная производительность по проходке (темпы походки в сутки) определяется по формуле

$$Q_{эн} = \frac{V}{S_{выр}} , \quad (7)$$

где  $S_{выр}$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>.

#### **Пример расчета по методике**

Предположим, что существует необходимость в проведении выработки длиной 120 м и площадью поперечного сечения 15,9 м<sup>2</sup>,

составленной из четырех различных участков, сложенных относительно однородными горными породами в пределах одного участка.

В таблице 2 представлены некоторые сведения из геологических справоч, касающиеся свойств и характеристик горных пород в рассматриваемой выработке для каждого участка, включающие описание пород с учетом трещиноватости и диапазон пределов прочности на сжатие для пород на участке, а также протяженность каждого участка.

Присвоим каждой породе класс сложности в зависимости от прочности согласно таблице 1 и сделаем поправку на трещиноватость согласно геологическому описанию из таблицы 2, в результате чего получим оценку сложности проходки каждого участка. Результаты отобразим в таблице 3.

Отметим, что согласно таблице 3 максимальная оценка сложности для рассматриваемой выработки  $C_{\max}$  составляет 3.

Кроме того, более прочная порода известняк имеет меньшую оценку сложности, чем менее прочные алевролит и песчаник вследствие того, что последние являются монолитными или слаботрещиноватыми, в то время как известняк сильно трещиноват.

По формуле (3) определим интегральную оценку сложности проходки всей выработки

$$C_{int} = \frac{42,5 \cdot 3 + 23,9 \cdot 2 + 37,8 \cdot 2 + 15,6 \cdot 3}{120} = 2,48.$$

По формуле (4) получим значение коэффициента однородности сложности проходки для рассматриваемой выработки

$$C_d = \frac{2,48}{3} = 0,83.$$

По формуле (5) определим показатель эквивалентной прочности горных пород для рассматриваемой выработки

$$\sigma_{сж}^{экв} = 30 \cdot 2,48 = 74,4.$$

С учетом эквивалентной прочности горных пород определим средневзвешенную для выработки энергоемкость разрушения

$$Hw_{opt} = 0,37 \cdot 74,4^{0,86} = 15,1.$$

Таблица 2 – Геологическое описание выработки

Порода	Геологическое описание породы	Длина участка $l_{ij}$ , м	Прочность породы $\sigma_{сж}$ , МПа
Алевролит	Серый с бурыми пятнами и прослоями мощностью 2-7 см песчаника серого, мелкозернистого. Плотный, крепкий, слаботрещиноватый.	42,5	35-47
Аргиллит	Тёмно-серый с бурыми и желтоватыми пятнами с примесью алевритового материала, известковистый, комковато-слоистый, плотный, крепкий. Трещиноватый.	23,9	31-38
Известняк	Известняк серый, скрытокристаллический, слоистый, местами плитчатый. С прослоями песчаника серого, тонкозернистого, мелкозернистого мощностью до 5-10 см. Сильнотрещиноватый.	37,8	59-71
Песчаник	Песчаник серый, подмиктовый, тонко- и мелкозернистый, известковистый. Массивный, плотный, крепкий, видимых трещин нет.	15,6	42-55

Таблица 3 – Оценка сложности каждого участка выработки

Порода	Класс по $\sigma_{сж}$	Поправка на трещиноватость	Оценка сложности $c_i$
Алевролит	2	+1	3
Аргиллит	2	$\pm 0$	2
Известняк	3	-1	2
Песчаник	2	+1	3

Предположим, что для проходки пород на данном проекте рассматриваются три варианта комбайнов разных производителей: MT340 (Sandvik), EBZ160 (SANYHE), ET210 (Eickhoff).

Для каждого комбайна по формуле (1) определим теоретическую почасовую производительность, а затем по формулам (6) и (7) соответственно суточную эксплуатационную производительность по разрушению и суточную эксплуатационную про-

изводительность по проходке. Для расчета примем, что работа ведется в три смены по 8 часов, а коэффициент использования машинного времени находится в пределах 0,25-0,5.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение прогнозной производительности комбайнов для рассматриваемой выработки

Комбайн	MT340 (Sandvik)	EBZ160 (SANYHE)	ET210 (Eickhoff)
Тип коронки	Поперечно-осевая	Продольно-осевая	Продольно-осевая
$P_{\text{ио}}$ , кВт	200	160	200
$Q_m$ , м <sup>3</sup> /ч	7,3	4,8	6,0
$V$ , м <sup>3</sup> /сутки	43,8-87,7	28,7-57,4	35,9-71,7
$Q_{\text{эл}}$ , м/сутки	2,8-5,5	1,8-3,6	2,3-4,5

Выбор конкретного комбайна зависит от множества факторов. Однако из таблицы 4 очевидно, что при необходимости обеспечения темпов проходки на уровне, например, не менее 3,5 м/сутки от варианта покупки комбайна EBZ160 (SANYHE) следует отказаться, поскольку заданные темпы он может выдерживать только при высоком значении коэффициента использования машинного времени.

### **Заключение**

Представленная методика, учитывающая обобщенный международный опыт в области ведения горнопроходческих работ при помощи проходческих комбайнов с рабочим органом стреловидного типа, может служить в качестве предварительного научно обоснованного способа отбора техники для конкретного проекта в горнодобывающей отрасли или подземном строительстве по критерию производительности. Ее основным достоинством является простота и понятность.

Однако стоит отметить, что рассмотренную методику не следует применять на этапе окончательного технико-экономического обоснования проекта, тем более в отрыве от других производственных факторов (совместимость с прочим оборудованием, наличие персонала с необходимой для эксплуатации и обслуживания комбайна квалификацией и т.д.).



### Библиографический список

1. Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А. Краткий анализ проблем и путей решения при обеспечении горнодобывающего предприятия современными техническими средствами ведения горных работ //Уголь. 2018. №. 1. С. 13-16.
2. Seker S. E., Ocak I. Performance prediction of roadheaders using ensemble machine learning techniques //Neural Computing and Applications. 2017. С. 1-14.
3. Ozfirat K.M., Malli T., Ozfirat P.M., Kahraman B. The performance prediction of roadheaders with response surface analysis for underground metal mine //Kuwait Journal of Science. 2017. Т. 44. №. 2. С. 112-120.
4. Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M. Performance prediction: A key issue in mechanical hard rock mining //Mining Engineering. 1994. № 11. С. 1263-1267.
5. Copur H., Tuncdemir H., Bilgin N., Dincer T. Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish mines //Mining Technology. 2001. Т. 110. №. 3. С. 149-157.
6. Balci C., Demircin, M.A., Copur, H., Tuncdemir, H. Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance //The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. Т. 104. №. 11. С. 633-642.
7. Bilgin N., Yazici S., Eskikaya S. A model to predict the performance of roadheaders and impact hammers in tunnel drivages // Proceedings of the International Eurock '96 Symposium, Torino. 1996. С. 715-720.
8. Жабин А.Б., Аверин Е.А., Поляков А.В. Интегральная оценка сложности проекта проходки горных выработок //Уголь. 2017. № 11 (1100). С. 60-63.
9. Жабин А.Б., Аверин Е.А., Поляков А.В. Показатель эквивалентной прочности горных пород // Горная промышленность. 2018. № 5. С.
10. Averin E., Zhabin A., Polyakov A., Linnik Y., Linnik V. Preliminary Assessment of Roadheaders Efficiency Based on Empirical Methods and Index of Equivalent Rock Strength //Mining of Mineral Deposits. 2019. Т. 13. № 3. С. 113-118.