



УДК 622.23.054

## Переход между заблокированным и полублокированным режимами при резании горных пород тангенциальными резцами

Е.А.АВЕРИН<sup>1</sup>✉, А.Б.ЖАБИН<sup>2</sup>, А.В.ПОЛЯКОВ<sup>2</sup>, Ю.Н.ЛИННИК<sup>3</sup>, В.Ю.ЛИННИК<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>3</sup> Государственный университет управления, Москва, Россия

**Как цитировать эту статью:** Переход между заблокированным и полублокированным режимами при резании горных пород тангенциальными резцами / Е.А.Аверин, А.Б.Жабин, А.В.Поляков, Ю.Н.Линник, В.Ю.Линник // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 329-333. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.1

**Аннотация.** В современной теории резания горных пород в производственных условиях принято выделять два больших класса достижимых режимов резания – заблокированный и полублокированный. Кинематика машин для разрушения горных пород в большинстве случаев обуславливает работу режущего инструмента в обоих режимах за один цикл работы режущего инструмента. Имеющиеся в настоящее время расчетные методы разработаны для стабилизированного, как правило, полублокированного режима резания. В настоящей статье поставлена задача определения условий перехода между режимами резания и модернизации расчетного метода для определения усилий на режущем инструменте. Задача решается за счет применения методов алгебраического анализа, основанного на поиске экстремума функции усилия на резце в зависимости от отношения реального шага резания к оптимальному шагу для текущей толщины стружки. В результате решения задачи получено выражение для определения толщины стружки, для которой при заданных параметрах обеспечивается переход между заблокированным и полублокированным режимами резания. Полученный результат позволил усовершенствовать метод расчета усилий на режущем инструменте на участках движения резца с заблокированным резанием.

**Ключевые слова:** режим резания; заблокированный режим; полублокированный режим; тангенциальный резец; механическое разрушение горных пород

**Введение.** Процесс разрушения горной породы режущим инструментом характеризуется отделением от забоя или породного блока стружки в виде частиц породы [11, 14, 17]. Форма стружки определяется главным образом кинематикой движения инструмента [19]. Большое влияние на показатели процесса резания оказывает соотношение между шириной и глубиной реза, т.е. между шагом резания  $t$  и толщиной стружки  $h$  [3, 13]. По взаимному расположению резов различают виды резания, их число. Определения существенно отличаются у разных исследователей, например, станковое резание осуществляется в условиях так называемого свободного реза с выровненной поверхностью, так как в этом случае легче обеспечиваются необходимые условия для сравнения силовых и энергетических параметров при сопоставляемых вариантах [7, 10, 22]. Однако при непрерывной работе исполнительного органа современных породоразрушающих машин такой вид резания практически невозможен. В целом, как правило, используют разделение классов резания на два обобщенных режима – заблокированное и полублокированное резание.

Важную роль в процессе резания породы играет геометрия режущего инструмента, под которой понимается совокупность характеристик, определяющих форму инструмента и расположение его граней (поверхностей) и режущих кромок относительно поверхностей обрабатываемого забоя [15, 18, 21]. В современных конструкциях породоразрушающих машин режущего действия наибольшее распространение получили так называемые тангенциальные резцы [4, 12], поэтому все дальнейшие изыскания будут выполнены применительно к таким резцам.

**Постановка задачи.** На основании анализа, проведенного в работах [5, 6], выберем исходное уравнение для настоящего исследования:

$$F_z = 19,5\sigma_{сж}^{0,94} K_r K_{тр} K_{хп} K_{об}(0,25 + 0,018th), \quad (1)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие горной породы, МПа;  $K_r$  – коэффициент геометрии резца;  $K_{тр}$  – коэффициент трещиноватости горной породы;  $K_{хп}$  – коэффициент хрупко-пластических свойств горной породы;  $K_{об}$  – коэффициент неоптимальности режима резания;  $t$  – шаг резания (расстояние между соседними линиями резания), мм;  $h$  – глубина резания (толщина срезаемой стружки), мм.

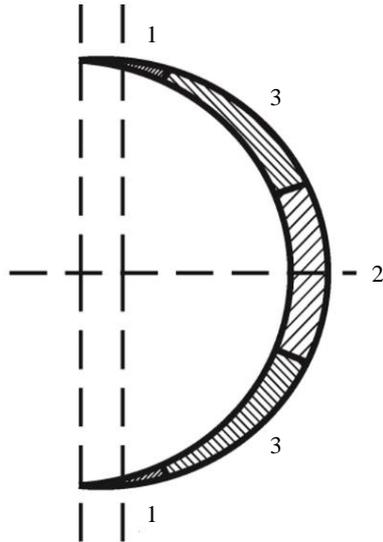


Схема серповидной стружки [3]

Тангенциальными резацами, как правило, оснащаются режущие органы породоразрушающих машин, выполненные в виде тел вращения (фрезы, шнеки, барабаны и т.п.) [1, 3, 4, 13, 19]. Поэтому при резании образуются стружки, имеющие серповидную форму (см. рисунок).

Эффективность разрушения горных пород резацами обеспечивается при определенных сочетаниях шага резания  $t$  и толщины стружки  $h$ , позволяющих оптимизировать процесс резания [13, 20]. Оптимизация заключается в обеспечении минимальной энергоемкости резания горных пород с определенными свойствами при определенных значениях силовых характеристик исполнительного органа горнопроходческой машины.

На схеме серповидной стружки выделено несколько участков: два участка 1 в начале и в конце серпа, у которых  $t > t_{\text{опт}}$ ; один участок 2 в средней части серпа с  $t < t_{\text{опт}}$ ; два промежуточных участка 3, соответствующих  $t \approx t_{\text{опт}}$ . Таким образом, резание любой горной породы тангенциальными резацами при оснащении ими современных режущих органов горнопроходческих машин всегда проходит этапы неоптимальных режимов.

При достаточно большой разнице между реальным и оптимальным шагами резания значение коэффициента  $K_{\text{об}}$  принимает неестественно большие значения на участках 1, стремясь к бесконечности при  $t_{\text{опт}} \rightarrow 0$ , а также ведет к получению неправильных значений усилия на инструменте [3]. То есть имеющаяся математическая модель не адекватна реальному процессу резания при движении резца по участкам 1 стружки, на которых наблюдается блокированное резание. В связи с этим возникает необходимость в определении точки перехода между участками 1 блокированного и 3 полублокированного режимов резания.

**Методика проведения исследования.** Для решения поставленной задачи используем подход, заключающийся в нахождении экстремума функции усилия на резце от глубины резания [9]. Величины  $\sigma_{\text{сж}}$ ,  $K_{\text{г}}$ ,  $K_{\text{тр}}$  и  $K_{\text{хп}}$ , как и константа 19,5, не требуют раскрытия, поскольку не зависят от переменной  $h$  [6]. Эта переменная встречается в коэффициенте  $K_{\text{об}}$  при вычислении оптимального шага резания  $t_{\text{опт}} = 3,65 \text{tg}\varphi K_{\text{в}} \sqrt{h}$ , где  $\text{tg}\varphi$  – критерий хрупко-пластических свойств горной породы, зависящий от значения половины угла развала борозды резания  $\varphi$ ,  $K_{\text{в}}$  – коэффициент, зависящий от диаметра твердосплавной вставки;

$$K_{\text{об}} = 1,334 - 0,7808 \frac{t}{3,65 \text{tg}\varphi K_{\text{в}} \sqrt{h}} + 0,478 \left( \frac{t}{3,65 \text{tg}\varphi K_{\text{в}} \sqrt{h}} \right)^2. \quad (2)$$

Произведем замену переменной  $x = \sqrt{h}$ , а также  $A_2 = t(3,65 \text{tg}\varphi K_{\text{в}})^{-1}$ . Тогда исходное выражение (1) преобразуется в уравнение четвертой степени относительно переменной  $x$ . Уравнения четвертой степени в общем виде решаются методом Феррари. При известном корне кубической резольвенты корни уравнения четвертой степени по методу Феррари могут быть найдены из двух квадратных уравнений, которые в данном случае описываются следующим выражением:

$$x^2 + 0,145x + \frac{y}{2} \pm \sqrt{(0,021 + y)x^2 + (0,145y - 4 \frac{A_2}{t})x + \frac{y^2}{4} + 4,98 \frac{A_2^2}{t}} = 0, \quad (3)$$

где  $y$  – единственный вещественный корень кубической резольвенты, вычисляемый по формуле Кардано,

$$y = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \quad (4)$$

$$q = \frac{A_2^2(0,42t - 16A_2^2)}{t^2} \text{ и } Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2.$$

Решение уравнения (3) позволит определить момент перехода между блокированным и полублокированным режимами резания горных пород тангенциальными резацами.



**Результаты и обсуждение.** Найдем все возможные решения уравнения (3) при различных реально достижимых вариациях исходных данных, а результаты представим в виде таблицы.

**Решения уравнения четвертой степени при различных вариантах допустимых исходных данных**

Исходные данные			Промежуточные расчеты			Решение уравнения 4-й степени			
$\varphi, ^\circ$	$d, \text{мм}$	$t, \text{мм}$	$A_2$	$Q$	$y$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
45	15,5	15	3,56	239,38	0,61	–	–	1,69	–1,04
45		20	4,75	593,09	0,81	–	–	1,85	–1,08
45		25	5,93	1208,56	1,01	–	–	1,98	–1,11
45		30	7,12	2175,11	1,21	–	–	2,09	–1,13
45		35	8,30	3591,70	1,41	–	–	2,19	–1,14
60		15	2,05	8,06	0,19	–	–	1,22	–0,90
60		20	2,74	19,43	0,26	–	–	1,32	–0,94
60		25	3,42	38,57	0,33	–	–	1,42	–0,97
60		30	4,11	67,72	0,40	–	–	1,50	–0,99
60		35	4,79	109,23	0,47	–	–	1,57	–1,01
75		15	0,95	0,08	0,03	–	–	0,77	–0,70
75		20	1,27	0,18	0,04	–	–	0,84	–0,73
75		25	1,59	0,36	0,06	–	–	0,90	–0,76
75		30	1,91	0,63	0,07	–	–	0,94	–0,79
75		35	2,23	1,00	0,09	–	–	0,99	–0,81
45	17,5	15	3,42	185,86	0,56	–	–	1,65	–1,03
45		20	4,56	459,14	0,75	–	–	1,80	–1,07
45		25	5,70	933,07	0,94	–	–	1,93	–1,10
45		30	6,84	1675,10	1,12	–	–	2,04	–1,12
45		35	7,98	2759,67	1,30	–	–	2,14	–1,13
60		15	1,97	6,30	0,18	–	–	1,19	–0,89
60		20	2,63	15,17	0,24	–	–	1,29	–0,93
60		25	3,29	30,08	0,31	–	–	1,38	–0,96
60		30	3,95	52,75	0,37	–	–	1,46	–0,98
60		35	4,60	84,99	0,43	–	–	1,53	–1,00
75		15	0,92	0,06	0,02	–	–	0,75	–0,69
75		20	1,22	0,14	0,04	–	–	0,82	–0,72
75		25	1,53	0,28	0,05	–	–	0,87	–0,75
75		30	1,83	0,49	0,06	–	–	0,92	–0,77
75		35	2,14	0,78	0,08	–	–	0,97	–0,79
45	22	15	3,14	109,15	0,47	–	–	1,57	–1,01
45		20	4,18	268,12	0,63	–	–	1,71	–1,05
45		25	5,23	542,02	0,79	–	–	1,83	–1,08
45		30	6,28	968,31	0,95	–	–	1,94	–1,10
45		35	7,32	1587,98	1,10	–	–	2,03	–1,12
60		15	1,81	3,75	0,15	–	–	1,13	–0,86
60		20	2,42	9,00	0,20	–	–	1,23	–0,90
60		25	3,02	17,81	0,25	–	–	1,31	–0,93
60		30	3,62	31,17	0,31	–	–	1,39	–0,96
60		35	4,23	50,12	0,36	–	–	1,45	–0,98
75		15	0,84	0,04	0,02	–	–	0,71	–0,67
75		20	1,12	0,09	0,03	–	–	0,78	–0,70
75		25	1,40	0,17	0,04	–	–	0,83	–0,73
75		30	1,68	0,29	0,05	–	–	0,88	–0,75
75		35	1,96	0,47	0,06	–	–	0,92	–0,77

В таблице широко представлены возможные варианты реальных комбинаций исходных данных. Выводы, сделанные на основе анализа таблицы, вполне можно принять окончательными. Как видно из таблицы, при любых комбинациях исходных данных корни  $x_1$  и  $x_2$  отсутствуют – на самом деле они являются комплексными числами, но нас интересуют только вещественные корни. Кроме того, при любых комбинациях исходных данных корень  $x_4$  является отрицательным числом. От этого корня также следует отказаться, поскольку ранее мы производили замену  $x = \sqrt{h}$ , а подкоренное выражение не может быть отрицательным вещественным числом.

Таким образом, единственный возможный в контексте настоящей задачи корень находится из выражения, которое при любых допустимых комбинациях исходных данных позволяет получить положительное вещественное число в качестве ответа. Искомое значение глубины резания  $h_6$ , при



которой для заданных условий происходит переход между заблокированным и полублокированным режимами резания, определяется возведением в квадрат значения этого корня:

$$h_6 = \frac{1}{4} \left( \sqrt{0,021 + y} - 0,145 + \sqrt{(0,145 - \sqrt{0,021 + y})^2 - 4 \left( \frac{y}{2} - \sqrt{\frac{y^2}{4} + 4,98 \frac{A_2^2}{t}} \right)} \right)^2. \quad (5)$$

Если текущее значение глубины резания меньше величины, полученной по формуле (5), то резание происходит в режиме заблокированного резания, а если больше – полублокированного.

Моделирование разрушения горного массива с учетом текущего положения резцов, в том числе с учетом различных схем и режимов резания, осуществляется с использованием численных методов, таких как метод конечных элементов [8] и метод дискретных элементов [16]. Для корректного применения полученного результата в решении задач с использованием численных методов необходимо, чтобы значения характерных размерных величин конечных или дискретных элементов не превышали величины  $h_6$ .

Следует отметить, что выражение (5) получено для идеализированной картины разрушения забоя режущим органом, не учитывающей его колебаний. Вместе с тем, как отмечалось в работе [2], размахи колебаний режущего органа могут достигать нескольких сантиметров, существенно увеличивая глубину резания, в том числе на участках 1 и 3, что вносит ошибку в определение режима резания на данных участках. В таком случае целесообразно определять не глубину резания  $h_6$ , а продолжительность участков стружки, на которых наблюдается заблокированное резание. Например, по углу поворота резца внутри стружки относительно точки первоначального контакта. Этот угол  $\phi_6$  определяется как арксинус отношения  $h_6$  к  $h_{\max}$  без учета колебаний режущего органа. Тогда условие перехода между заблокированным и полублокированным режимами резания трансформируется к следующему. Если текущее значение угла поворота  $\phi_i$  резца при движении по стружке резания меньше величины  $\phi_6$  или больше величины  $180^\circ - \phi_6$ , то резание происходит в режиме заблокированного резания, иначе – полублокированного.

**Заключение.** Из проведенного исследования можно сделать основные теоретические выводы:

- переход между заблокированным и полублокированным режимами резания не зависит от прочностных свойств горной породы;
- глубина резания, при которой для заданных условий осуществляется изменение режима резания, определяется хрупко-пластическими свойствами горной породы, а также диаметром твердосплавной вставки и шагом резания.

Практическое использование полученного результата заключается в следующем. Текущее значение глубины резания  $h$  сравнивается со значением  $h_6$ , полученным по формуле (5). В случае  $h < h_6$  в формулу (2) для определения коэффициента  $K_{об}$  подставляется значение  $h_6$ , иначе –  $h$ . Предложенный подход позволяет более точно в сравнении с исходным методом оценивать усилия на резце по формуле (1) на участках 1 стружки резания согласно рисунку, т.е. на участках нерациональных режимов резания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Том 1: Научно-методические основы. Разрушение резцовым инструментом / Л.И.Барон, Л.В.Глатман, Е.К.Губенков. М.: Наука, 1968. 216 с.
2. Кондрахин В.П. Математическая модель процесса стружкообразования, учитывающая осевые перемещения исполнительного органа горного комбайна / В.П.Кондрахин, В.Л.Головин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірнично-механічна. 2004. Вып. 83. С. 142-149.
3. Об учете неоптимальных режимов резания горных пород тангенциальными резцами / А.Б.Жабин, А.В.Поляков, Е.А.Аверин и др. // Уголь. 2019. № 7. С. 20-24. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-20-24
4. Проектирование фрезы стволопроходческого комбайна / Е.А.Аверин, Ю.Н.Наумов, А.Д.Смышник, Е.А.Смышник // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 105-113. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-105-113
5. Пути развития теории разрушения углей и горных пород резцовым инструментом / А.Б.Жабин, А.В.Поляков, Е.А.Аверин и др. // Уголь. 2019. № 9 (1122). С. 24-28. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-9-24-28
6. Состояние научных исследований в области разрушения горных пород резцовым инструментом на рубеже веков / А.Б.Жабин, А.В.Поляков, Е.А.Аверин, В.И.Сарычев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 1. С. 230-247.



7. A new linear cutting machine for assessing the rock-cutting performance of a pick cutter / H.Kang, J.W.Cho, J.Y.Park et al. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. Vol. 88. P. 129-136. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.07.021
8. A study on rock cutting efficiency and structural stability of a point attack pick cutter by lab-scale linear cutting machine testing and finite element analysis / J.Y.Park, H.Kang, J.W.Lee et al. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 103. P. 215-229. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.01.034
9. *Averin E.A.* Approach to Estimate Rational Parameters of Rock Destruction from a Function of a Cutting Force / E.A.Averin, A.B.Zhabin, A.V.Polyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272. Iss. 2. № 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022002
10. *Balci C.* Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines / C.Balci, N.Bilgin // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007. Vol. 3. № 44. P. 468-476. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.001
11. Discrete element simulation of conical pick's coal cutting process under different cutting parameters / J.Liu, C.Ma, Q.Zeng, K.Gao // Shock and Vibration. 2018. Vol. 2018. P. 7975141. DOI: 10.1155/2018/7975141
12. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results / N.Bilgin, M.A.Demircin, H.Copur et al. // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. Vol. 43. Iss. 1. P. 139-156. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.04.009
13. Effect of cutting depth and line spacing on the cuttability behavior of sandstones by conical picks / X.Wang, O.Su, Q.F.Wang, Y.P.Liang // Arabian Journal of Geosciences. 2017. Vol. 10. P. 510-525. DOI: 10.1007/s12517-017-3307-3
14. Experimental investigation of hard rock fragmentation using a conical pick on true triaxial test apparatus / S.Wang, X.Li, K.Du, S.Wang // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 79. P. 210-223. DOI: 10.1016/j.tust.2018.05.006
15. Indentation Characteristics Using Various Indenters: A Study Based on Laboratory and Numerical Tests / J.Liu, W.Wan, S.Xie, J.Wang // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. P. 4919-4931. DOI: 10.1007/s10706-019-00952-8
16. Investigation on the influence mechanism of rock brittleness on rock fragmentation and cutting performance by discrete element method / L.Xuefeng, W.Shibo, G.Shirong, // Measurement. 2018. Vol. 113. P. 120-130. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.07.043
17. *Li H.S.* Numerical simulation on interaction stress analysis of rock with conical picks / H.S.Li, S.Y.Liu, P.P.Xu // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 85. P. 231-242. DOI: 10.1016/j.tust.2018.12.014
18. Loading of coal mining machine tools after change in spatial orientation of picks / V.N.Zakharov, V.Y.Linnik, Y.N.Linnik, E.A.Averin // Eurasian mining. 2018. № 1. P. 40-42. DOI: 10.17580/em.2019.01.10
19. New model for predicting instantaneous cutting rate of axial-type roadheaders / Q.Zhang, Z.Han, M.Zhang, J.Zhang // KSCE Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 21. P. 168-177. DOI: 10.1007/s12205-016-0433-5
20. Numerical simulation of rock cutting in different cutting mode using the discrete element method / Q.Q.Zhang, Z.N.Han, S.H.Ning et al. // Journal of GeoEngineering. 2015. Vol. 10. № 2. P. 35-43. DOI: 10.6310/jog.2015.10(2).1
21. *Prokopenko S.A.* Improvement of cutting tools to enhance performance of heading machines in rocks / S.A.Prokopenko, V.S.Ludzish, I.A.Kurzina // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. P. 153-159. DOI: 10.1134/S1062739116010248
22. *Yasar S.* Rock cutting tests with a simple-shaped chisel pick to provide some useful data / S.Yasar, A.O.Yilmaz // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50. P. 3261-3269. DOI: 10.1007/s00603-017-1303-2

**Авторы:** **Е.А.Аверин**, канд. техн. наук, инженер-конструктор, [evgeniy.averin.90@mail.ru](mailto:evgeniy.averin.90@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3350-331x> (ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод», Тула, Россия), **А.Б.Жабин**, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-5305-4908> (Тульский государственный университет, Тула, Россия), **А.В.Поляков**, д-р техн. наук, профессор, [Polyakoff-an@mail.ru](mailto:Polyakoff-an@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0067-6954> (Тульский государственный университет, Тула, Россия), **Ю.Н.Линник**, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-3968-0026> (Государственный университет управления, Москва, Россия), **В.Ю.Линник**, д-р техн. наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-5130-8222> (Государственный университет управления, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.07.2020.

Статья принята к публикации 29.03.2021.