

## Исследование нагрузок планетарно-дискового органа комбайна при работе неполным сечением

Трифанов Г. Д.<sup>1</sup>, Куоза В. Д.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия  
\*e-mail: vladislav.kuoz@gmail.com

### Реферат

**Введение.** Горный комбайн с планетарным органом разрушения занимает доминирующее положение при добыче калийной руды в нашей стране. Около половины рабочих ходов комбайнов выполняется при работе с неполным сечением выработки. Работа комбайна в этом режиме остается малоизученной и недооцененной несмотря на то, что при этом многие узлы комбайна испытывают значительные динамические нагрузки. В настоящей работе представлена теоретическая модель по определению действующих моментов резания на привод планетарного органа в зависимости от высоты обрабатываемого забоя и с учетом общей зоны разрушения. Изучено влияние высоты подрубки пласта на показатели эффективности работы комбайна.

**Цель работы** – определение влияния высоты подрубки на нагруженность привода планетарного органа при работе комбайна неполным сечением, а также оценка эффективности работы в данном режиме.

**Методология.** В работе использовалась совокупность методов, включающих теоретическое исследование процесса отбойки калийной руды планетарным органом комбайна при работе неполным сечением выработки, математическое моделирование, проведена их комплексная оценка. Выявленные зависимости верифицированы экспериментальными исследованиями работы комбайна в условиях калийных рудников.

**Результаты.** Получена зависимость крутящего момента, действующего на привод планетарного органа, от высоты подрубки пласта (с учетом общей зоны разрушения). Максимальное отклонение теоретической от экспериментальной модели составило 10 %. Удельный расход энергии показал низкую эффективность работы комбайна при высоте подрубки пласта до 400 мм. Коэффициент колебания нагрузки принимает максимальные значения в диапазоне 400–1600 мм за счет низкой базы среднего крутящего момента, при этом выявлена экономическая эффективность. Высота подрубки пласта 1300–1900 мм характеризуется интенсивным ростом средних значений крутящего момента и максимальной скоростью изменения момента, что говорит об амплитудных колебаниях малого периода и частоты. Диапазон высоты забоя 1900–2800 мм показывает движение всех параметров в зону нормативных значений. Определен рациональный диапазон высоты подрубки пласта.

**Выводы.** Построенная теоретическая модель работы планетарного органа в режиме подрубки пласта по высоте, с учетом общей зоны разрушения, позволяет добиться достаточной точности в определении действующих моментов на приводную систему. Установленный рациональный диапазон работы планетарного органа при работе неполным сечением может быть рекомендован калийным предприятиям Верхнекамского месторождения.

**Ключевые слова:** горный комбайн; неполное сечение выработки; поперечное сечение выработки; теоретическая модель резания.

**Введение.** Добыча калийной руды в условиях Верхнекамских месторождений калийных солей осуществляется комбайновым способом, с наложением ходов в вертикальной плоскости друг на друга [1–4]. При этом мощность нижних слоев практически всегда меньше высоты исполнительного органа комбайна. На рис. 1 показано положение комбайна в выработке при отработке пласта вторым ходом.

При работе комбайна неполным сечением снижается его производительность. Динамические нагрузки на узлы комбайна существенно возрастают [4, 5].

Режим функционирования комбайна при работе неполным сечением остается до настоящего времени недостаточно изученным. Вместе с тем динамические нагрузки, действующие на приводную систему разрушающего органа, подтверждают необходимость исследования этого режима.

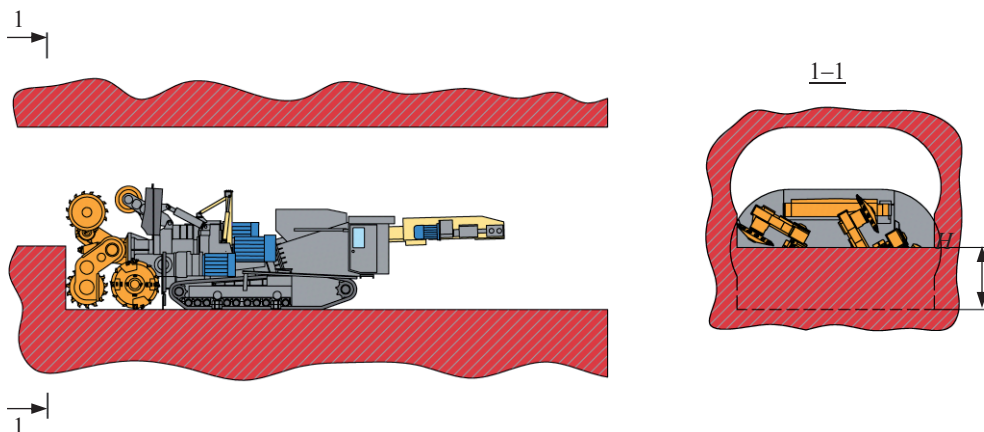


Рисунок 1. Комбайн при отработке пласта вторым ходом:  $H$  – высота подрубки, мм  
Figure 1. The mining machine mining in the second passageway:  $H$  – cutting height, mm

Теоретическое моделирование нагруженности приводной системы является основным этапом в исследовании работы режущего органа комбайна [6–8]. Исследования в области разрушения горного массива режущим инструментом способствуют более точному учету действующих нагрузок. Количественная оценка параметров функционирования комбайна в режиме работы неполным сечением позволит определить влияние высоты подрубки на показатели эффективности работы исполнительного органа комбайна.

В настоящее время отсутствуют исследования по теоретическому определению нагрузок, действующих на приводную систему планетарного органа, при функционировании комбайна в режиме работы неполным сечением. В данном исследовании представлена теоретическая модель отбойки калийного массива при мощности пласта меньшей, чем высота исполнительного органа комбайна.

**Теоретическое исследование. Общая зона разрушения.** Исполнительный орган выемочных комбайнов состоит из двух планетарно-дисковых органов, объединенных приводом переносного движения. Для формирования овально-арочной формы выработки с максимальной выемкой полезного ископаемого главные органы разрушения имеют общую зону разрушения, а подрезание оставшейся части кровли и стенок выработки осуществляется отбойным и бермовым органами [9, 10].

Пересечение тороидальных поверхностей, образованных режущими дисками исполнительного органа, обуславливает отсутствие взаимодействия части режущего инструмента с горным массивом в общей зоне разрушения. Учет такой зоны необходим для определения количества резов, не вовлеченных в процесс отбойки руды.

Расчетная схема для решения поставленной задачи приведена на рис. 2. Буквой  $O_1$  обозначена нижняя точка пересечения контуров, описываемых исполнительными органами. Буквой  $P$  обозначена точка пересечения плоскости режущего диска с линией контура, описываемого вторым исполнительным органом. Конструктивными величинами являются  $L_p$  – расстояние между осями вращения исполнительных органов; отрезок  $MO_1 = R_v$  – радиус контура, описываемого планетарным

исполнительным органом;  $\delta_{об}$  – угол, образованный  $\angle OMO_1$ ;  $\delta$  – угол поворота одного исполнительного органа в общей зоне разрушения, образованный  $\angle OMN$ . Дополнительно введены параметры проекции на плоскость рисунка:  $MN$  – длина исполнительного органа, взаимодействующая с массивом;  $MO = L_r / 2$  – проекция отрезка  $MN$  на горизонтальную плоскость;  $NP$  – длина проекции резцового диска не взаимодействующая с забоем. Отрезок  $NP$  является искомым величиной.

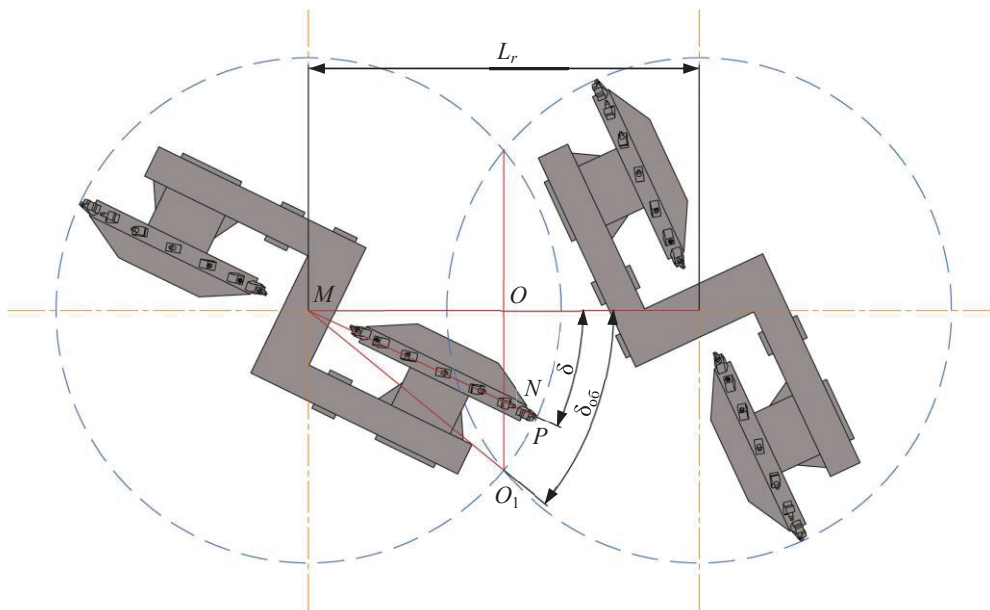


Рисунок 2. Расчетная схема общей зоны разрушения  
Figure 2. Design model of the total fracture zone

Длина проекции резцового диска, не взаимодействующая с забоем, определяется формулой:

$$NP = R_v - \frac{L_r}{2 \cos(\delta)}$$

Для определения длины окружности резцового диска  $L_d$ , не взаимодействующего с горным массивом, используем формулу, предложенную автором ранее [11]:

$$L_d = \begin{cases} R_d \left[ \pi - \arccos \left( \frac{NP - R_d}{R_d} \right) \right], & NP \geq R_d; \\ R_d \arccos \left( \frac{NP - x}{R_d} \right), & NP < R_d, \end{cases}$$

где  $R_d$  – радиус резцового диска, мм

А количество резцов, находящихся в общей зоне разрушения сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа, получим из выражения:

$$Z_{об} = \frac{L_d}{L_{рез}}$$

где  $L_{рез}$  – расстояние между двумя соседними резцами диска, мм.

Выявленные зависимости используем при определении нагруженности приводной системы исполнительного органа.

**Сила резания планетарным органом.** Сила резания на тангенциальном неповоротном резце определяется согласно отраслевой методике [12]:

$$P_z = A_r h K_{t/h} K_b K_\alpha K_z K_\varphi K_\psi,$$

где  $A_r$  – сопротивляемость резанию со стороны горного массива, Н/мм;  $h$  – толщина среза, мм;  $K_{t/h}$  – коэффициент степени блокированности;  $K_b$  – коэффициент ширины режущей кромки резца;  $K_\alpha$  – коэффициент угла резания резцового инструмента;  $K_z$  – коэффициент затупления резцового инструмента;  $K_\varphi$  – коэффициент формы передней грани резца;  $K_\psi$  – коэффициент ориентации резца.

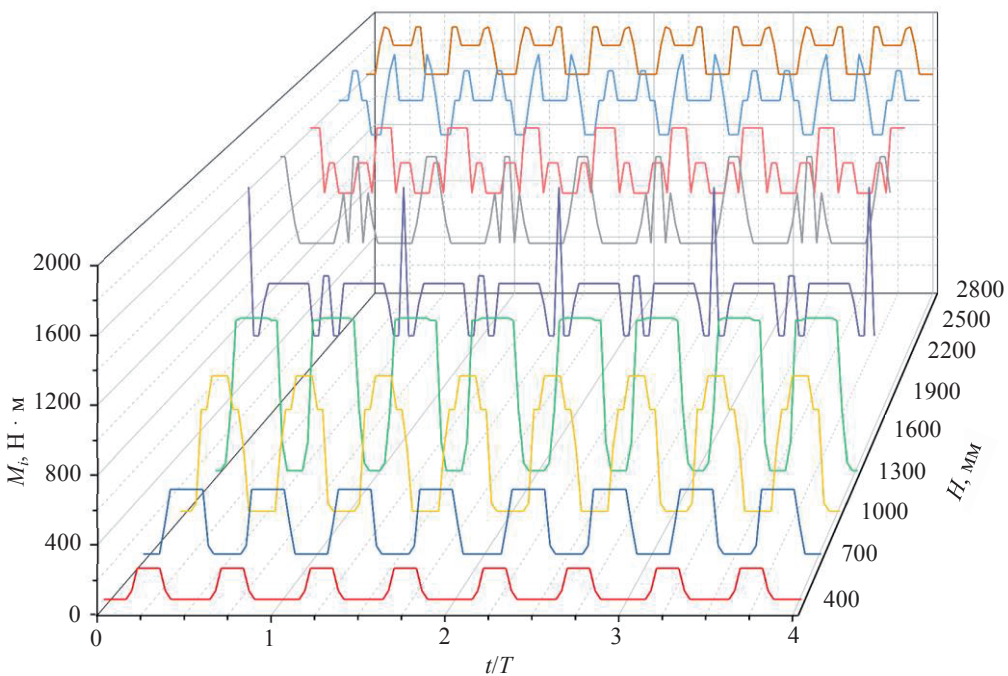


Рисунок 3. Изменение крутящего момента  $M_i$  от количества оборотов исполнительного органа  $t/T$  и высоты подрезки  $H$

Figure 3. Change in torque  $M_i$  depending on the number of revolutions of the operating body  $t/T$  and undercutting height  $H$

**Момент резания планетарным органом.** Момент резания  $M_c$  как силовой показатель разрушения горного массива в общем виде определяется формулой:

$$M_c = \frac{9549 P_z Z_r V_{rez}}{n_n \eta_{но}},$$

где  $Z_r$  – количество резцов, взаимодействующих с горным массивом, шт.;  $V_{rez}$  – скорость резания, м/с;  $\eta_{но}$  – КПД исполнительного органа;  $n_n$  – число оборотов электродвигателя, об/мин.

Силы резания, необходимые для разрушения калийного массива, необходимо рассчитать для каждого резца в зависимости от их положения на резцовом диске. Момент резания определяется как сумма моментов для каждого резца, взаимодей-

ствующего с забоем, в зависимости от угла поворота планетарного органа, высоты подрубки и наличия общей зоны разрушения.

Крутящий момент на валу приводного двигателя исполнительного органа при условии  $H < R_v$  определяется формулой:

$$M_t = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} \varphi < \delta_{об} \text{ and } \varphi > 2\pi - \delta_{об}; \\ \sum_{n=Z_{con}-Z_{об}}^1 M_c + M_{хол}, \quad Z_{con} > 0; \\ M_{хол}, \quad otherwise, \end{array} \right. \\ \pi + \delta_{об} > \varphi > \pi - \delta_{об}; \\ \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=Z_{con}-Z_{об}}^1 M_c + M_{хол}, \quad Z_{con} > 0; \\ M_{хол}, \quad otherwise, \end{array} \right. \\ \sum_{n=Z_{con}}^1 M_c + M_{хол}, \quad otherwise, \end{cases} \quad (1)$$

где  $M_{хол}$  – крутящий момент, затрачиваемый на работу исполнительного органа в режиме холостого хода, Н · м;  $Z_{con}$  – число резцов, контактирующих с забоем, в зависимости от угла поворота исполнительного органа  $\varphi$  и высоты подрубки  $H$  [12].

При условии  $H \geq R_v$ :

$$M_t = \begin{cases} \sum_{n=Z_d/2}^0 M_c + \sum_{n=Z_{con}-Z_d/2-Z_{об}}^0 M_c + M_{хол}, \quad \varphi < \delta_{об} \text{ and } \varphi > 2\pi - \delta_{об}; \\ \sum_{n=Z_d/2}^0 M_c + \sum_{n=Z_{con}-Z_d/2-Z_{об}}^0 M_c + M_{хол}, \quad \pi + \delta_{об} > \varphi > \pi - \delta_{об}; \\ \sum_{n=Z_d/2}^0 M_c + \sum_{n=Z_{con}-Z_d/2}^0 M_c + M_{хол}, \quad otherwise, \end{cases} \quad (2)$$

где  $Z_d$  – количество резцов на диске, шт.

Таблица 1. Замеры отрезков движения комбайна на забой  
Table 1. Measurements of the lengths of the mining machine feed to the stope

Номер замера	Высота подрубки, мм	Время, с	Расстояние, м	Скорость, м/мин
1	400	115	0,370	0,193
2	1000	266	0,910	0,205
3	1300	186	0,630	0,203
4	1600	112	0,385	0,206

Зависимости (1) и (2) позволяют определить нагрузки на привод исполнительного органа при работе комбайна неполным сечением и изменении высоты пласта.

**Результаты.** Зависимости, установленные в результате теоретических исследований, применены для горного комбайна «Урал-20Р», занимающего доминирующее положение в проходке очистных выработок калийных месторождений. Зависимость момента резания  $M_i$  от количества оборотов исполнительного



органа  $t/T$  и высоты подрубки  $H$  представлена на рис. 3. Скорость подачи комбайна на забой принята равной 0,22 м/мин, что соответствует установленной технической производительности [13].

Для определения степени достоверности теоретической модели нагруженности приводной системы разрушающего органа необходимо проводить экспериментальные исследования работы комбайна в режиме отработки неполного сечения забоя.

**Верификация экспериментом. Исходные данные.** Авторами совместно с сотрудниками ООО «Региональный канатный центр» (ООО «РКЦ») проводились испытания горного комбайна «Урал-20Р» производства АО «Копейский машиностроительный завод» (АО «КМЗ») в условиях Верхнекамского калийного месторождения. С помощью аппаратно-регистрирующего комплекса «Ватур» проводились измерения основных показателей нагруженности электродвигателей исполнительного органа, впоследствии преобразованные в крутящий момент [14–16].

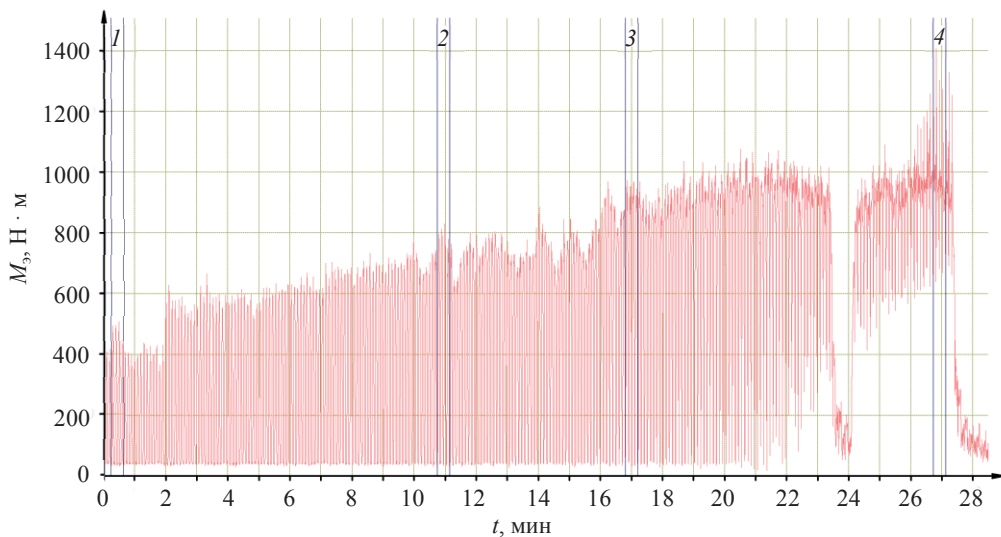


Рисунок 4. Экспериментальные измерения крутящего момента  
Figure 4. Experimental torque measurements

Скорость подачи комбайна на забой определялась путем фиксации пройденных комбайном отрезков пути и соответствующих временных интервалов. Машинист обеспечивал стабильную подачу комбайна на забой, ориентируясь на индикаторы токовых нагрузок. Высота подрубки последовательно увеличивалась от 400 до 1600 мм. В табл. 1 приведены значения скоростей подачи комбайна и высоты подрубки на контрольных отрезках.

Предварительно проводился осмотр режущих инструментов планетарного органа. Все резцы находились в удовлетворительном состоянии.

**Анализ результатов эксперимента.** Обработка данных измерений проводилась в программном обеспечении «Ватур». На рис. 4 показано изменение крутящего момента электродвигателя комбайна при отбойке руды при изменении высоты подрубки. Среднее значение крутящего момента, затрачиваемого на отбойку массива, увеличивается по мере движения комбайна на забой. При этом величина отклонения от среднего значения также повышается, что соответствует представлениям, полученным в теоретической модели. Выделенные участки 1–4 соответствуют высоте неполного забоя от 400 до 1600 мм и использованы для сравнительного анализа с результатами теоретического исследования.

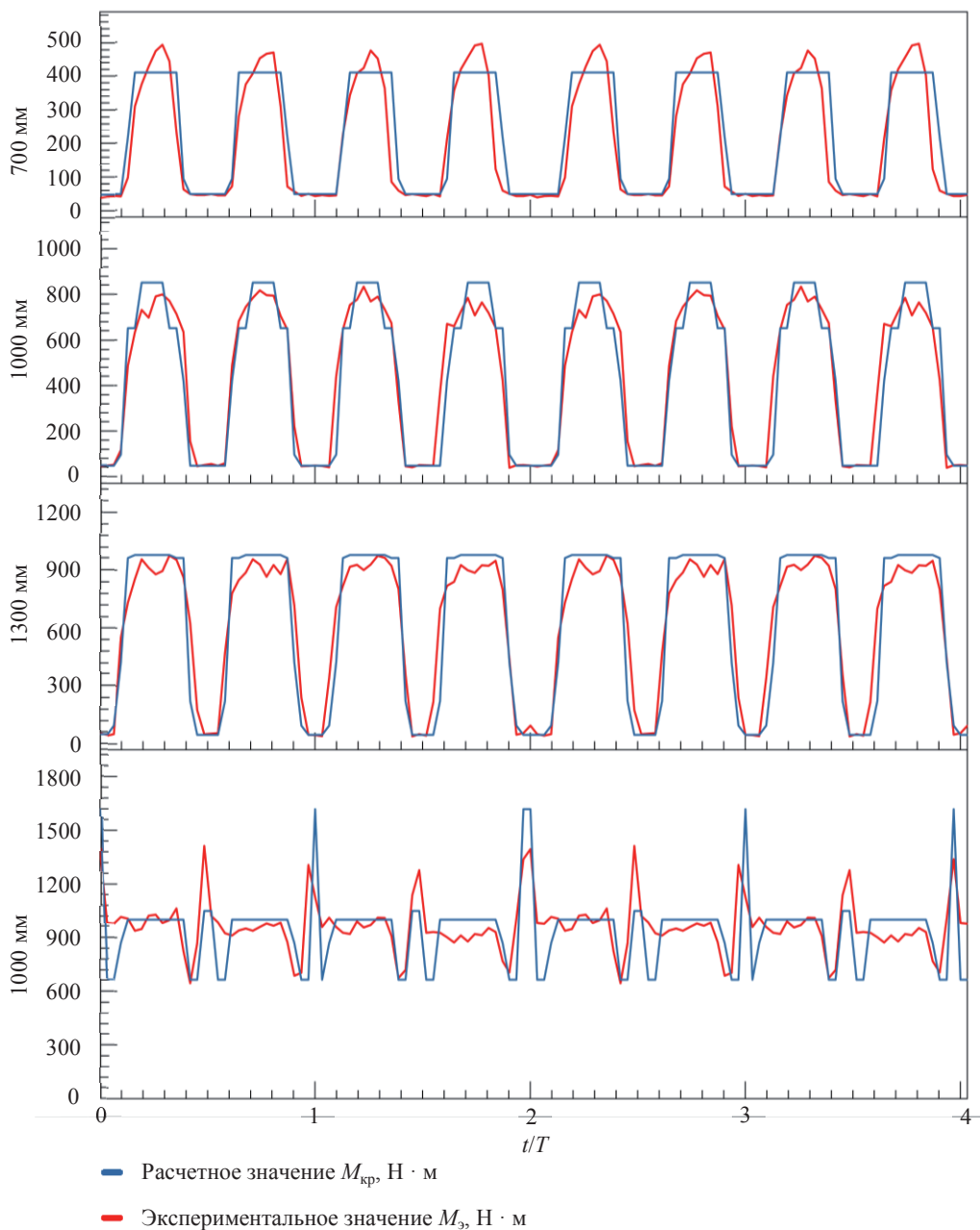


Рисунок 5. Зависимость теоретического и экспериментального момента резания от времени полного оборота исполнительного органа

Figure 5. Dependence of the theoretical and experimental cutting torque on the time of full rotation of the operating body

Как видно из рис. 5, общий характер изменения крутящего момента, зарегистрированного в реальных условиях эксплуатации, совпадает с результатами теоретических исследований. Отличительные особенности в виде превышения пиковых значений или отдельных выраженных пиков нагрузок вблизи максимальных значений объясняются реальными условиями эксплуатации горного комбайна. Одним из факторов может являться неоднородность

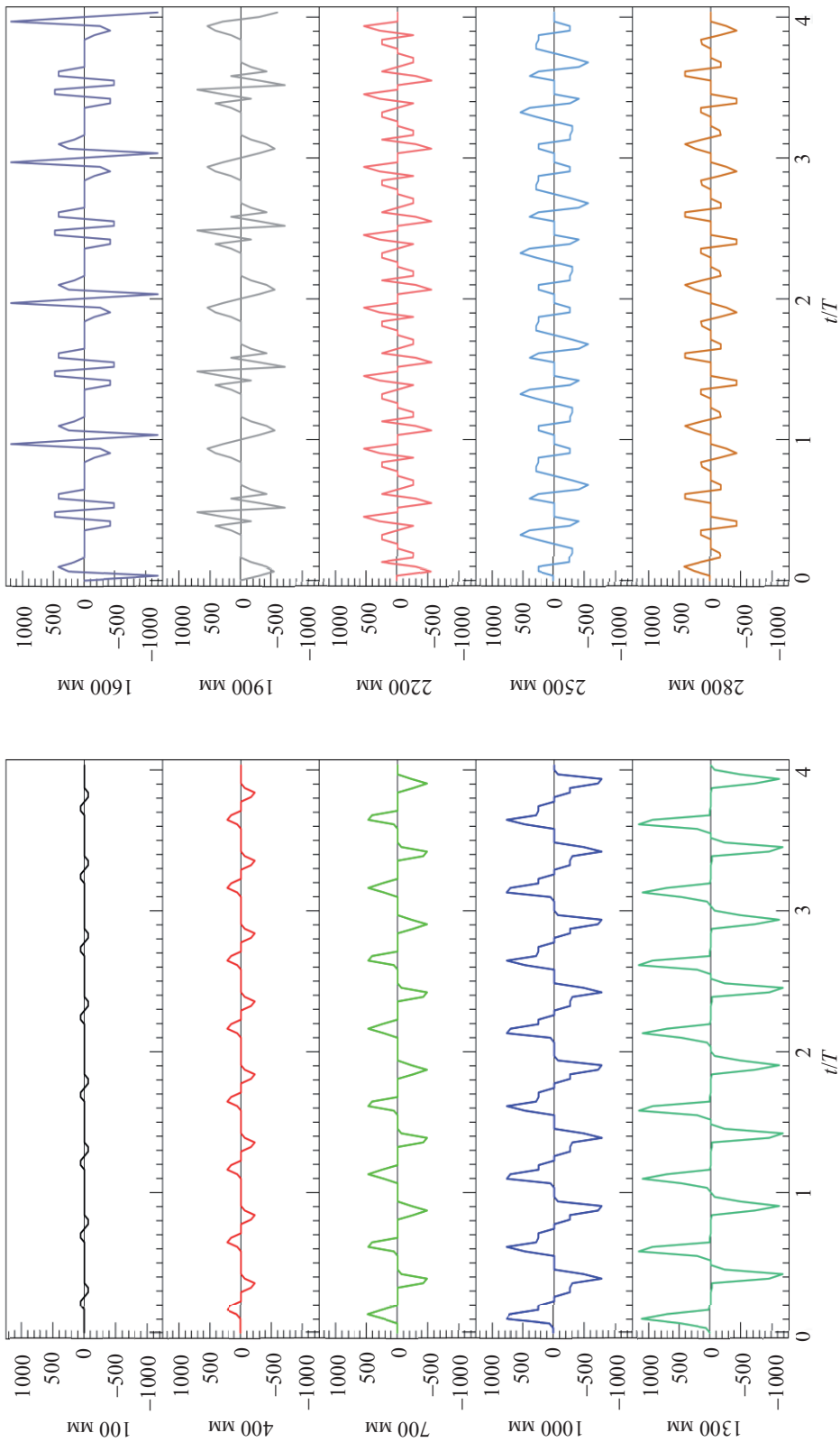


Рисунок 6. Скорость изменения момента резания планетарным органом  
Figure 6. Rate of change of planetary body cutting torque



калийного массива, вследствие чего сопротивляемость резанию может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Максимальное отклонение между значениями теоретической модели и данными измерений составляет 10 %, что говорит о достоверности построенной модели.

**Анализ результатов.** Для оценки работы планетарного органа комбайна в режиме неполного сечения забоя будем использовать основные показатели эффективности, предложенные в работах Qiao и др. [17]. Дополнительно определим скорость изменения момента резания приводной системы.

**Коэффициент колебания нагрузки.** Постоянно изменяющееся количество резцов, взаимодействующих с горным массивом, определяет вариативность в уровне нагрузок, действующих на приводную систему. Данный коэффициент отражает степень колебания момента резания относительно среднего значения, что определяет надежность исполнительного органа. Чем выше значение, тем сильнее колебания нагрузки. Коэффициент колебания нагрузки определяется формулой:

$$\delta_j = \frac{1}{M_{cp}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - M_{cp})^2}{N}},$$

где  $M_i$  – момент резания, Н · м;  $M_{cp}$  – средний момент резания, Н · м;  $N$  – число точек регистрации нагрузки.

**Таблица 2. Показатели работы планетарного органа в зависимости от высоты подрубки**  
**Table 2. Planetary body performance indicators depending on the undercutting height**

Высота подрубки, мм	$M_{cp}$ , Н · м	$\delta_j$	$\max(v_m)$ , Н · м/с	$H_w$ , кВт · ч/т
100	57,6	0,33	61	2,97
400	111,0	0,73	223	0,73
700	232,0	0,78	478	0,69
1000	441,0	0,80	774	0,82
1300	628,0	0,68	951	0,83
1600	933,0	0,22	1194	0,96
1900	1206,0	0,18	713	1,02
2200	1376,0	0,13	549	0,98
2500	1633,0	0,10	551	1,02
2800	1781,0	0,07	419	1,01

**Удельный расход энергии.** Этот показатель используют для определения расхода энергии, необходимой для добычи тонны полезного ископаемого. Удельный расход является важным экономическим показателем эффективности работы горного комбайна. Чем выше значение данного показателя, тем ниже эффективность работы режущего органа. Удельный расход энергии определяется выражением:

$$H_w = \frac{M_{cp} n_n}{9549 F_{\text{ио}} \rho V_k},$$

где  $F_{\text{ио}}$  – площадь поверхности, обрабатываемой исполнительным органом, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность руды в горном массиве, т/м<sup>3</sup>;  $V_k$  – скорость подачи комбайна, м/мин.

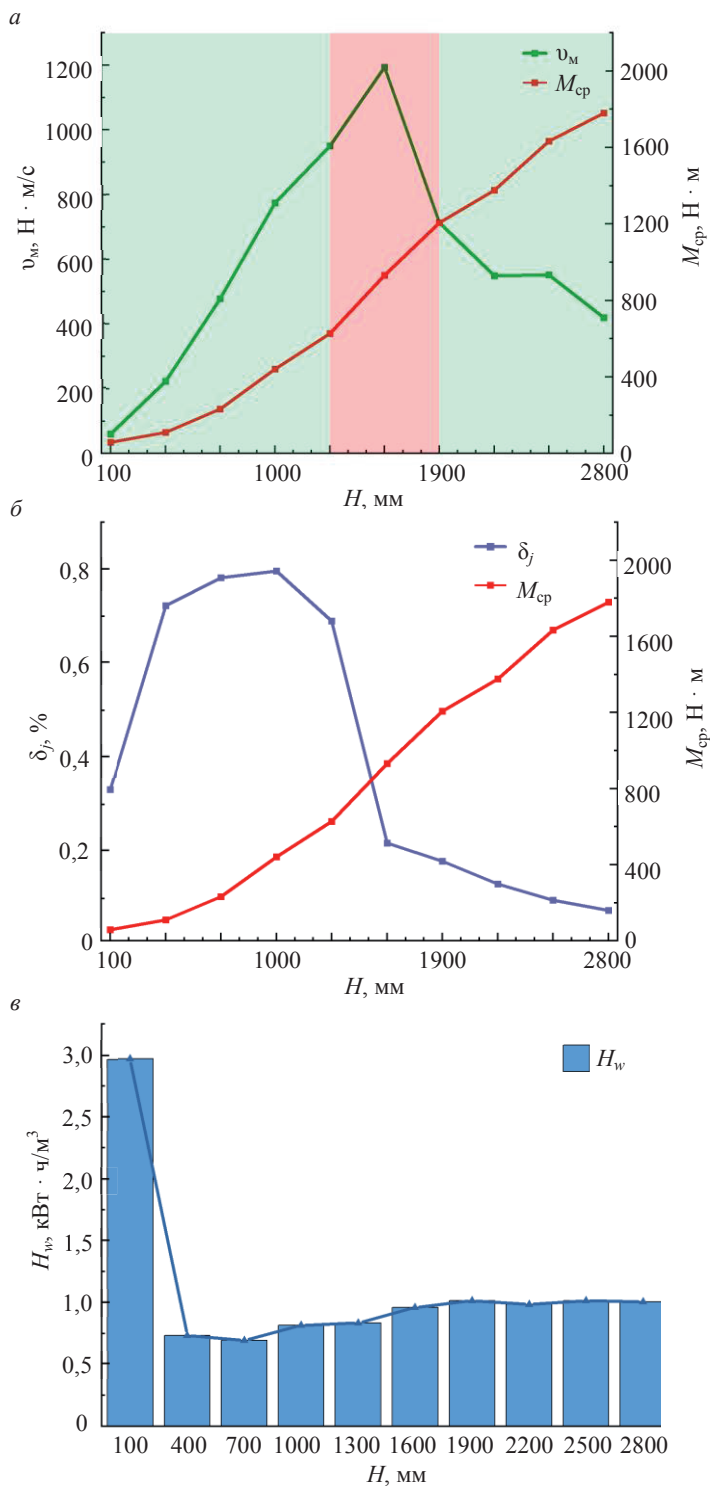


Рисунок 7. Скорость изменения и среднее значение момента резания – а; коэффициент колебания нагрузки и среднее значение момента резания – б; удельный расход энергии от высоты подрубки – в  
 Figure 7. Rate of change and average cutting torque – a; load variation coefficient and average cutting torque – б; specific energy consumption depending on the undercutting height – в

**Средний момент резания.** Данный показатель зависит от многих параметров как режущего органа, так и горного массива, он отражает среднее значение нагрузки. Формула определения среднего момента резания имеет вид:

$$M_{\text{ср}} = \left( \sum_{i=1}^N M_i \right) / N.$$

**Скорость изменения момента резания.** Амплитудные колебания, малые по периоду и частоте, не находят существенного отражения в коэффициенте колебания нагрузки. Для определения таких нагрузок используем показатель скорости изменения момента, определяемый формулой:

$$v_m = \frac{dM_i}{dt}.$$

На рис. 6 видно, что с увеличением высоты подрубки забоя до 1600 мм скорость изменения момента резания увеличивается, а период действия сокращается. После 1600 мм период увеличивается, скорость изменения момента резания стабилизируется. Для дальнейшего анализа выделены максимальные значения скорости изменения момента резания и совместно с другими показателями сведены в табл. 2.

В табл. 2 представлены основные результаты математических расчетов. Максимальные значения скорости изменения момента резания варьируются в широких пределах. Как показано на рис. 7, а, данный показатель увеличивается до высоты забоя 1600 мм, после чего начинает свое снижение и стабилизируется в диапазоне 2200–2800 мм. Средний момент резания показывает рост по мере увеличения высоты забоя. Это объясняется тем, что увеличиваются площадь обрабатываемого забоя и количество взаимодействующих резцов. Период 100–1300 мм сопровождается ростом скорости изменения момента резания, однако это происходит на низких средних значениях. В диапазоне 1300–1900 мм наблюдается ускоренный рост средних значений крутящего момента при высоких скоростях изменения момента резания. Данный фактор определяется нестабильным периодом в районе величины радиуса исполнительного органа, когда режущий орган на короткий промежуток времени контактирует всеми резцами дисков с горным массивом. Период 1900–2800 мм показывает увеличение среднего значения момента резания в зону номинальных значений при снижении скорости изменения момента.

Как показано на рис. 7, б, высокие значения коэффициента колебаний наблюдаются от 400 до 1600 мм. Это означает, что величина колебаний момента растет быстрее, чем средние значения нагрузок. Данное обстоятельство связано с ростом количества резцов, контактирующих с горным массивом, при этом период холостого хода разрушающего органа сокращается. Период 1300–1600 мм связан с резким снижением коэффициента колебаний нагрузки по причине отсутствия моментов холостого хода режущих дисков и увеличением средних значений момента резания. Диапазон 1600–1900 мм отражает движение коэффициента колебаний в зону установившегося режима работы при нарастающем моменте резания.

Согласно зависимости удельного расхода энергии и высоты подрубки забоя, представленной на рис. 7, в, работа комбайна при высоте подрубки до 400 мм сопровождается высоким удельным расходом энергии при низкой эффективности резания. При этом диапазон высоты неполного забоя 400–1300 мм в среднем на 25 % эффективней работы в периоде 1600–2800 мм.

**Выводы.** В данном исследовании создана теоретическая модель определения нагруженности приводной системы планетарного органа горного комбайна при его работе неполным сечением. Учет общей зоны разрушения позволил добиться большей точности в определении действующих моментов. Оценка работы комбайна в режиме неполного сечения забоя проводилась по следующим показателям: коэффициент колебания нагрузки, скорость изменения момента резания, средний момент резания, удельные энергозатраты. Результаты показывают, что максимальные значения коэффициента колебания нагрузки находятся в диапазоне 400–1600 мм, при этом интенсивный рост среднего момента резания происходит в пределе 1300–1900 мм. Также в данном периоде определена максимальная скорость изменения момента. Согласно удельному расходу энергии, работа комбайна до 400 мм высоты подрубки является малоэффективной, при этом зона 400–1300 мм показала высокую рентабельность. Поэтому оптимальный диапазон высоты подрубки пласта –  $H \in [400 \text{ мм}; 1300 \text{ мм}] \cup [1900 \text{ мм}; 2800 \text{ мм}]$ . Достоверность результатов теоретической модели подтверждена экспериментальными исследованиями работы комбайна в реальных условиях эксплуатации. Результаты проделанной работы планируется применить на рудниках калийных предприятий Верхнекамского месторождения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методологическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» // Д. Н. Алыменко [и др.]. Новосибирск: Наука, 2011. 486 с.
2. Озорнин М. С., Шишлянников Д. И., Романов В. А. Определение параметров работы комбайновых комплексов калийных рудников при проходке камер неполным сечением забоя // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 105–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-105-112
3. Пинский В. Л., Брусиловский Д. В. Очистная выемка калийных руд в камерах. М.: НИИТЭХИМ, 1981. 79 с.
4. Куоза В. Д. Режимы работы добычных комбайнов калийных рудников // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XXI междунар. науч.-технич. конф. в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2023. С. 362–368.
5. Трифанов М. Г., Шишлянников Д. И., Иванов С. Л. Оценка нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал» в реальных условиях эксплуатации // ГИАБ. 2018. № 1. С. 166–174. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-166-174
6. Liu Z., Ni F., Wei C., Li H. Experimental and numerical investigation of roadheader for breaking rock containing predrill holes // Energy Science Engineering. 2020. Vol. 8(7). P. 2511–2526. DOI: /10.1002/ese3.682
7. Wang Z., Zeng Q., Wan L., Lu Z., Wang H. Investigation of the influence of cutting parameters on conical pick cutting performance and rock damage // Machines. 2022. Vol. 10(11). DOI: /10.3390/machines10111034
8. Cheluska P. Optimization of the cutting process parameters to ensure high efficiency of drilling tunnels and use the technical potential of the Boom-Type roadheader // Energies. 2020. Vol. 13(24). P. 65–97. DOI: 10.3390/en13246597
9. Старков Л. И., Земсков А. Н., Кондрашев П. И. Развитие механизированной разработки калийных руд. Пермь: ПГТУ, 2007. 522 с.
10. Семенов В. В., Мальчер М. А., Петров В. П., Морозов С. П. Проходческо-очистные комбайны «Урал» для добычи калийной руды и каменной соли // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 8. С. 17–21.
11. Трифанов Г. Д., Куоза В. Д. Взаимодействие планетарно-дискового органа горного комбайна с массивом в режиме подрубки пласта // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 6. С. 50–59. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-50-59
12. Комбайны проходческо-очистные для добычи калийных руд. Выбор показателей назначения и расчет параметров разрушения горных пород. Отраслевая методика / Пинский В. Л. [и др.]. Л.: ВНИИГ, 1986. 54 с.
13. Земсков А. Н., Лискова М. Ю., Заалишвили В. Б., Шамрин М. Ю. Современные технологические и технические решения при ведении горных работ на калийных рудниках // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. Вып. 2 С. 284–296. DOI: 10.46689/2218–5194-2022-2-1-284–296
14. Шишлянников Д. И., Чекмасов Н. В., Трифанов М. Г., Габов В. В., Иванов С. Л., Асонов С. А. Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 4(113). С. 3–10.
15. Shishlyannikov D. I., Pushkarev A. E. Use of heading-and-winning machine parameter loggers to predict gas-dynamic phenomena at potash mines // Journal of Physics: Conference Series. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012046

16. Trifanov G. D., Shishlyannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. No. 9. P. 5722–5726.

17. Qiao S., Xia Y., Liu Z., Liu J., Ning B., Wang A. Performance evaluation of bolter miner cutting head by using multicriteria decision-making approaches // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. 2017. Vol. 11. Iss. 5. DOI: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0059

Поступила в редакцию 25 октября 2023 года

#### Сведения об авторах:

**Трифанов Геннадий Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: 2983723@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7848-7873>

**Куоза Владислав Дмитриевич** – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: vladislav.kuoz@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-1482-8300>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-18-31

### Studying the mining machine planetary-disc body loads when tunneling with stope back partial section

Gennadii D. Trifanov<sup>1</sup>, Vladislav D. Kuoza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

#### Abstract

**Introduction.** A mining machine with a planetary breaking body dominates potash ore mining in our country. About a half of mining machine working operations are carried out with stope back partial section. The mining machine operation in this mode remains understudied and underestimated, even though many components of the mining machine experience significant dynamic loads. The theoretical model is presented for determination of the cutting torques acting on the planetary body drive depending on the working face height considering the total fracture zone. The influence of the undercutting height on the performance indicators of the mining machine is studied.

**Research objective** is to determine the influence of the undercutting height on the planetary body drive load when tunneling with stope back partial section, as well as to evaluate the operating efficiency in this mode.

**Methods of research.** A set of methods was used, including theoretical study of the process of potash ore breaking by the planetary body when working with a stope back partial section, mathematical modelling, and their complex evaluation. The revealed dependencies were verified by experimental studies of the mining machine operation in the potash mine conditions.

**Results.** The dependence of the torque acting on the planetary body drive on the undercutting height was obtained considering the total fracture zone. The maximum deviation of the theoretical model from the experimental one was 10%. The specific energy consumption showed inefficient mining machine operation at the undercutting height of up to 400 mm. The coefficient of load fluctuation takes maximum values in the range of 400–1600 mm due to the low base of average torque, and the economic efficiency of this period was determined. The undercutting height of 1300–1900 mm is characterized by intensive growth of torque average values and maximum rate of torque change, which indicates amplitude oscillations of small period and frequency. The face height range of 1900–2800 mm shows all parameters' progress into the zone of normative values. The rational range of the undercutting height was determined.

**Conclusions.** The theoretical model of the planetary body operation in the mode of undercutting to height, considering the total fracture zone, allows to achieve sufficient accuracy in determining the torques acting on the drive system. The established rational range of planetary body operation when working with stope back partial section can be recommended to potash enterprises of the Upper Kama deposit.

**Keywords:** mining machine; stope back partial section; mine working cross-section; theoretical cutting model.

#### REFERENCES

1. Alymenko D. N. et al. *The methodological guidance on mining at the mines of OAO Salvinit.* Novosibirsk: Nauka Publishing; 2011. (In Russ.)



2. Ozornin M. S., Shishliannikov D. I., Romanov V. A. Determining the operating parameters of machine systems in potash mines when tunneling with stope back partial section. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 1: 105–112. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-1-105-112

3. Pinsky V. L., Brusilovsky D. V. *Cleaning excavation of potash ores in cells*. Moscow: NIITECHEM Publishing; 1981. (In Russ.)

4. Kuoza V. D. Modes of operation of mining shearers of potash mines. In: *Technological equipment for mining and oil and gas industry: Proceedings of the 21st International scient. techn. conf. within the Ural Mining and Industrial Decade*. Ekaterinburg. 2023. P. 362–368. (In Russ.)

5. Trifanov M. G., Shishliannikov D. I., Ivanov S. L. In-situ estimation of drive loads in ural heading-and-winning machines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 1: 166–174. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-166-174

6. Liu Z., Ni F., Wei C., Li H. Experimental and numerical investigation of roadheader for breaking rock containing predrill holes. *Energy Science Engineering*. 2020; 8(7): 2511–2526. Available from: doi: /10.1002/ese3.682

7. Wang Z., Zeng Q., Wan L., Lu Z., Wang H. Investigation of the influence of cutting parameters on conical pick cutting performance and rock damage. *Machines*. 2022; 10(1034). Available from: doi:10.3390/machines10111034

8. Cheluszka P. Optimization of the cutting process parameters to ensure high efficiency of drilling tunnels and use the technical potential of the boom-type roadheader. *Energies*. 2020; 13(24): 65–97. Available from: doi.org/10.3390/en13246597

9. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. *Development of mechanized development of potash ores*. Perm: PSTU Publishing; 2007. (In Russ.)

10. Semenov V. V., Malcher M. A., Petrov V. P., Morozov S. P. The “Ural” tunneling-cleaning combines for potash ore and rock salt mining. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2008; 8: 17–21. (In Russ.)

11. Trifanov G. D., Kuoza V. D. Interaction of the mining machine planetary-disc body with the rock mass in the undercutting mode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 6: 50–59. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-6-50-59

12. Pinski V. L. et al. *Heading and winning machines for potash ore mining. Choice of destination indicators and calculation of rocks destruction parameters. Industry methodology*. Leningrad: VNIIG Publishing; 1986. (In Russ.)

13. Zemskov A. N., Liskova M. Iu., Zaalishvili V. B., Shamrin M. Iu. Modern technological and technical solutions for mining operations potash mines. *Izvestia Tuls'kogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2022; 2: 284–296. (In Russ.) Available from: doi: 10.46689/2218–5194-2022-2-1-284–296

14. Shishliannikov D. I., Chekmasov N. V., Trifanov M. G., Gabov V. V., Ivanov S. L., Assonov S. A. Improving the efficiency of combines potash mines in the analysis of records. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2015; 4(113): 3–10. (In Russ.)

15. Shishliannikov D. I., Pushkarev A. E. Use of heading-and-winning machine parameter loggers to predict gas-dynamic phenomena at potash mines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Available from: doi: 10.1088/1742-6596/1384/1/012046

16. Trifanov G. D., Shishliannikov D. I., Lavrenko S. A. Assessment of URAL-20R machine use efficiency while developing potash salt fields. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; 11(9): 5722–5726.

17. Qiao S., Xia Y., Liu Z., Liu J., Ning B., Wang A. Performance evaluation of bolter miner cutting head by using multicriteria decision-making approaches. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. 2017; 11(5). Available from: doi: 10.1299/jamdsm.2017jamdsm0059

Received 25 October 2023

#### Information about the authors:

**Gennadii D. Trifanov** – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: 2983723@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7848-7873>

**Vladislav D. Kuoza** – PhD student, Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: vladislav.kuoza@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-1482-8300>

**Для цитирования:** Трифанов Г. Д., Куоза В. Д. Исследование нагрузок планетарно-дискового органа комбайна при работе неполным сечением // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 2. С. 18–31. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-18-31

**For citation:** Trifanov G. D., Kuoza V. D. Studying the mining machine planetary-disc body loads when tunneling with stope back partial section. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 2: 18–31 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-18-31