

**Ю. Н. Каманин, Л. С. Ушаков**

Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева

## **РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОХОДКИ ТУННЕЛЕЙ В ТВЕРДЫХ ПОРОДАХ**

Дата поступления 19.04.2016

Решение о публикации 12.12.2016

Дата публикации 26.12.2016

**Аннотация:** В статье рассказано о планетарном исполнительном органе проходческого комбайна.

**Введение:** Ведение работ по проходке крепких скальных пород всегда связано с колоссальными энергозатратами. В частности из-за того, что в большинстве современных проходческих комбайнах разрушение производится резанием. А резание скальных пород процесс очень энергозатратный и требовательных к качеству режущего инструмента. В силу специфики этого способа комбайны должны иметь очень большую массу и габариты. Приведенные недостатки не являются критичными при прохождении длинных прямых туннелей. Но для проходки коротких технологических участков требуется технологическая машина значительно меньших габаритов. Таким инструментом может стать проходческий комбайн с планетарным ударно-скалывающим исполнительным органом.

**Цель:** Разработка концепции проходческого комбайна с планетарным ударно-скалывающим исполнительным органом.

**Метод:** Для достижения поставленной цели использовались такие общенаучные методы, как анализ и синтез, обобщение, аналогия, сравнение, системный подход. Аналитическая часть работы была проведена посредством исследования кинематики исполнительных органов с последующей оптимизацией их траекторий по методу SQP.

### **Результаты:**

4. описана принципиальная конструкция планетарного ударно-скалывающего органа проходческого комбайна;
5. проведено исследование кинематики исполнительных органов;
6. получены оптимальные значения некоторых параметров планетарно ударно-скалывающего органа.

### **Заключение:**

В результате проведенных исследований была обоснована необходимость в разработке компактных проходческих комбайнов, основанных на разрушении скальных пород ударно-механическим способом, позволяющим точно и, в тоже время, равномерно высвобождать энергию удара по всей поверхности забоя. Для равномерности распределения нагрузки на обрабатываемую поверхность были рассчитаны оптимальные скорости вращения исполнительных органов комбайна (метод SQP). Представленная статья является отправной точкой для дальнейшей разработки проходческих комбайнов с планетарным ударно-скалывающим исполнительным органом.

**Ключевые слова:** траектория движения, проходческий комбайн, рабочий орган, частота ударов, планетарный исполнительный орган, скорость движения, критерий оптимизации, методы оптимизации.

**Y. N. Kamanin, L. S. Ushakov**

I. S. Turgenev Orel State University

## DEVELOPMENT OF NEW TECHNOLOGIES IN TUNNELING IN HARD ROCK

**Annotation:** The article talked about planetary executive body of miner combine.

**Introduction:** Doing work on the sinking of the strong rock is always associated with huge energy consumption. In particular due to the fact that in most modern roadheader destruction produced by cutting. A cutting rocks process is very energy-intensive and demanding to the quality of the cutting tool. Due to the nature of this method combines must have a very large mass and dimensions. These shortcomings are not critical during the passage of the long straight tunnel. But for sinking short process areas required technological machine considerably smaller dimensions. Such an instrument can be a roadheader with planetary shock the shearing executive body.

**Objective:** Development of miner combine the concept of planetary shock the shearing executive body.

**Method:** In order to achieve this goal have been used such scientific methods as analysis and synthesis, generalization, analogy, comparison, system approach. The analytical part of the work was carried out by examining the kinematics of the executive bodies for further optimization of their trajectories by SQP method.

**Results:**

1. Describe the basic structure of the planetary shock-shear body heading machine;
2. a study of the kinematics of the executive bodies;
3. The obtained optimal values of some parameters of planetary impact-shear body.

**Conclusion:**

As a result of the research has been the necessity to develop compact tunneling machines, based on the destruction of rock shock-mechanical process that allows point-and, at the same time, uniformly release the impact energy across the bottom surface. For uniform load distribution on the surface to be treated the optimum rotational speed of the executive bodies of the combine were calculated (SQP method). Presented article is a starting point for further development of the tunneling machines with planetary shock the shearing executive body.

**Keywords:** trajectory of movement, roadheader, actuator, speed bumps, planetary executive body, speed, optimization criterion, optimization techniques.

## Введение

Ведение работ по проходке крепких скальных пород всегда связано с колоссальными энергозатратами. В частности, из-за того, что в большинстве современных проходческих комбайнах разрушение производится резанием. А резание скальных пород процесс очень энергозатратный [8, 9, 13, 14] и требовательных к качеству режущего инструмента [10]. В силу специфики этого способа комбайны должны иметь очень большую массу и габариты. Приведенные недостатки не

являются критичными при прохождении длинных прямых туннелей. Но для проходки коротких технологических участков требуется технологическая машина значительно меньших габаритов. Таким инструментом может стать проходческий комбайн с планетарным ударно-скалывающим исполнительным органом.

## 1. Основная концепция

Основная идея применения планетарного ударно-скалывающего исполнительного органа заключается в максимально полном использовании способа импульсного разрушения применительно к проходческим комбайнам [15].

Для реализации этой идеи была разработана концепция планетарного ударно-скалывающего исполнительного органа, предназначенного для проведения горных выработок (тоннелей) по крепким породам (рис. 1) [11]. Планетарный ударно-скалывающий исполнительный орган состоит из вращающейся первичной планшайбы (2), установленной на мобильной базе, в которой встроено несколько несущих вторичных планшайб (1), на которых смонтированы ударно-скалывающие рабочие органы. Они отличаются тем, что исполнительную (ударную) часть представляют несколько соосно расположенных унитарных гидравлических устройств (молотов) (3). Молоты совершают вместе с рабочим органом относительные, и с планшайбой, переносное движение для нанесения ударов по груди забоя и производят разрушение массива со свободной поверхности.

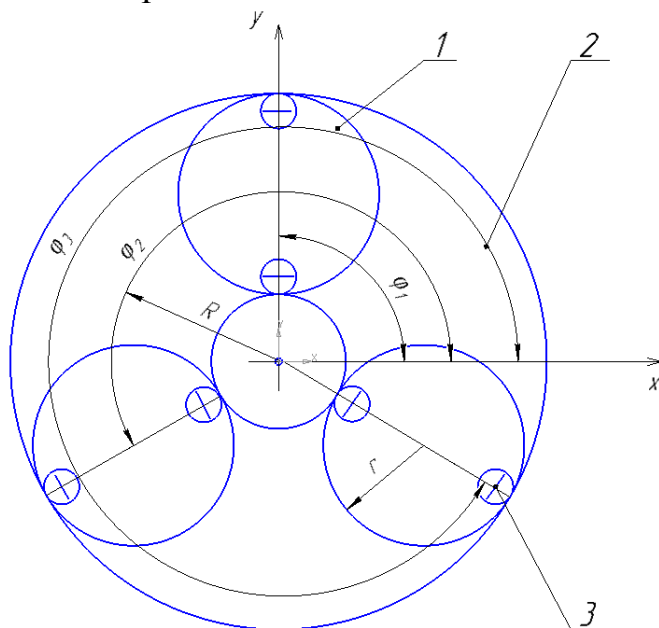


Рис. 1. Схема планетарного ударно-скалывающего исполнительного органа  
 $R$  – радиус вращения вторичных планшайб,  $r$  – радиус вторичной планшайбы,  
 $\varphi_i$  – угол положения  $i$ -ой вторичной планшайбы

## 2. Описание кинематики планетарного исполнительного органа

Одной из задач, требующих решения на этапе разработки основной концепции планетарного ударно-скалывающего исполнительного органа является определение оптимальных траекторий перемещения гидромолотов, которые являются совокупностью точек, соответствующих лунке или засечке, образующейся от удара инструментом по массиву породы. Под оптимальными траекториями здесь понимаются такие наборы точек, которые наиболее равномерно заполняют область обработки.

Используя разработанную расчетную схему, были составлены уравнения движения каждого из ударников (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} = R \cos(\omega_1 t) + r \cos(\omega_2 t + \varphi_1); \\ y_{11} = R \sin(\omega_1 t) + r \sin(\omega_2 t + \varphi_1); \\ x_{12} = R \cos(\omega_1 t) + r \cos(\omega_2 t + \varphi_1 + \pi); \\ y_{12} = R \sin(\omega_1 t) + r \sin(\omega_2 t + \varphi_1 + \pi); \\ x_{21} = R \cos(\omega_1 t) + r \cos(\omega_3 t + \varphi_2); \\ y_{21} = R \sin(\omega_1 t) + r \sin(\omega_3 t + \varphi_2); \\ x_{22} = R \cos(\omega_1 t) + r \cos(\omega_3 t + \varphi_2 + \pi); \\ y_{22} = R \sin(\omega_1 t) + r \sin(\omega_3 t + \varphi_2 + \pi); \\ x_{31} = R \cos(\omega_1 t) + r \cos(\omega_4 t + \varphi_3); \\ y_{31} = R \sin(\omega_1 t) + r \sin(\omega_4 t + \varphi_3); \\ x_{32} = R \cos(\omega_1 t) + r \cos(\omega_4 t + \varphi_3 + \pi); \\ y_{32} = R \sin(\omega_1 t) + r \sin(\omega_4 t + \varphi_3 + \pi), \end{array} \right.$$

где  $\omega_i = 2\pi n_i$  - угловая скорость вращения оснований,

$x_{ij}, y_{ij}$  - абсцисса и ордината положения ударника,

$i$  – номер вторичной планшайбы,

$j$  – номер ударника на вторичной планшайбе,

$R$  – радиус переносного движения,

$r$  - радиус относительного движения,

$r_n$  - радиус лунки,

$n_i$  - частота вращения оснований,

$\varphi_i$  - угол, определяющий начальное положение ударников.

Зададимся необходимыми исходными значениями геометрических параметров исследуемой системы:  $R=1\text{м}$ ,  $r=0,4\text{м}$ ,  $r_n=0,05\text{м}$  и необходимыми начальными значениями частот вращения  $n_i$  и частоты ударов ударников:

$$n_1 = 1 \frac{\text{уд.}}{\text{с}}, n_2 = 4 \frac{\text{уд.}}{\text{с}}, n_3 = 4 \frac{\text{уд.}}{\text{с}}, n_4 = 4 \frac{\text{уд.}}{\text{с}}, n_{\text{уд.}} = 60 \frac{\text{уд.}}{\text{мин}}.$$

Стоит отметить, что эти значения не были получены в результате инженерно-конструкторских изысканий и приведены для того, чтобы оценить эффективность разрабатываемой проходческой машины.

### 3. Решение задачи оптимизации траекторий ударных инструментов

Картина распределения лунок по груди забоя показана на рис. 2.

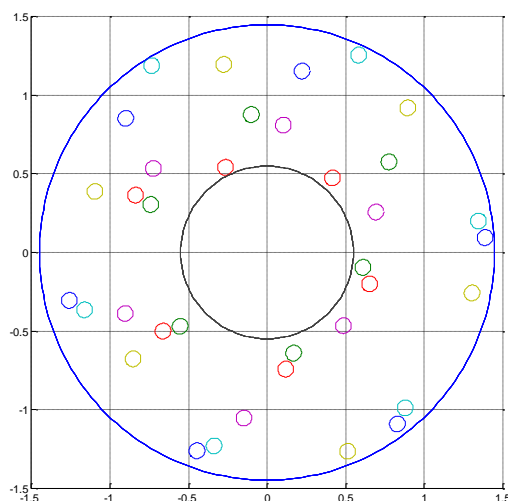


Рис. 2. Распределение лунок по груди забоя

Для решения задачи об оптимальном распределении лунок по поверхности забоя в зависимости от выбранных угловых скоростей вращения первичного и вторичных оснований  $\omega_i$ , а также частоты ударов ударников  $n$  были выбраны следующие целевые функции:

$$f(n, n_1, n_2, n_3, n_4) = \sum_{i=1}^N S_i,$$

$$f(n, n_1, n_2, n_3, n_4) = N,$$

где  $N$  – число лунок

где  $S_i$  – площадь перекрытия двух лунок, которая определяется по формулам:

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2},$$

$$F = 2a \cos\left(\frac{D}{2r_{\text{л}}}\right),$$

$$S_i = r_{\text{л}}^2 \cdot F \cdot (1 - \sin(F)),$$

где  $D$  – расстояние между двумя окружностями,

$x_i, x_j, y_i, y_j$  – абсциссы и ординаты двух пересекающихся окружностей.

Таким образом, задача сводится к нахождению параметров  $n$  и  $\omega_i$ , при которых функции (1) и (2) будут минимальными. Также необходимо учесть естественные ограничения накладываемые на  $n_{y0}$  и  $n_i$ . Частоты ударов не должны быть слишком большими (свыше 40 уд/мин) или слишком маленькими (менее 0,5 уд/мин).

$$n_{y0} \in [20; 200], \quad n_1 \in [0,5; 5], \quad n_2 \in [2; 40], \quad n_3 \in [2; 40], \quad n_4 \in [2; 40].$$

Обычно, общий подход к решению оптимизационных задач с ограничениями состоит в замене исходной задачи с ограничениями на другую более легко реализуемую задачу без ограничений. Такая задача в дальнейшем используется как базис для итерационных процессов [3, 4]. В настоящее время такой подход считается относительно малоэффективным и был заменен на методы решения, основанными на формулировке и последующем решении так называемых уравнений Куна-Такера [5, 12]. В которых вводятся дополнительные предположения о характере ограничений и понятии оптимальности для задачи оптимизации при наличии ограничений. Если поставленная задача является так называемой задачей выпуклого программирования, то эти уравнения являются необходимыми и достаточными условиями для общей постановки задачи [7].

Метод последовательного линейного приближения (SQP) был выбран для решения поставленной задачи, т.к. является одним из отлично зарекомендовавших себя современных методов в области нелинейного программирования. Шитковский [6] успешно реализовал и провел тестовые расчеты по данной версии оптимизации и получил всестороннее превосходство, по сравнению с другими тестовыми методами, в части эффективности, точности и процента успешного решения задачи для большого числа тестовых задач. Основанный на работах Бигса [1] и Хана [2] данный метод позволяет достаточно точно имитировать метод Ньютона для оптимизации при наличии ограничений, как это сделано для оптимизации без наличия ограничений.

## 4. Результаты

Реализация этого метода была проведена при помощи пакета программ Matlab и его модуля Optimization toolbox [12]. Проведенная серия вычислений подтвердила применимость выбранного метода оптимизации к поставленной задаче и его высокую эффективность.

При заданных ранее исходных параметрах были получены следующие результаты для частоты ударов  $n_{уд}$  и  $\omega_i$ :

Таблица 1. Результаты решения оптимизационной задачи

Оптимизируемый параметр,	$n_{уд.}$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
Значения, 1/мин	80	1.1	10	9.5	9.5

Соответствующая картина распределения лунок приведена на рисунке 3.

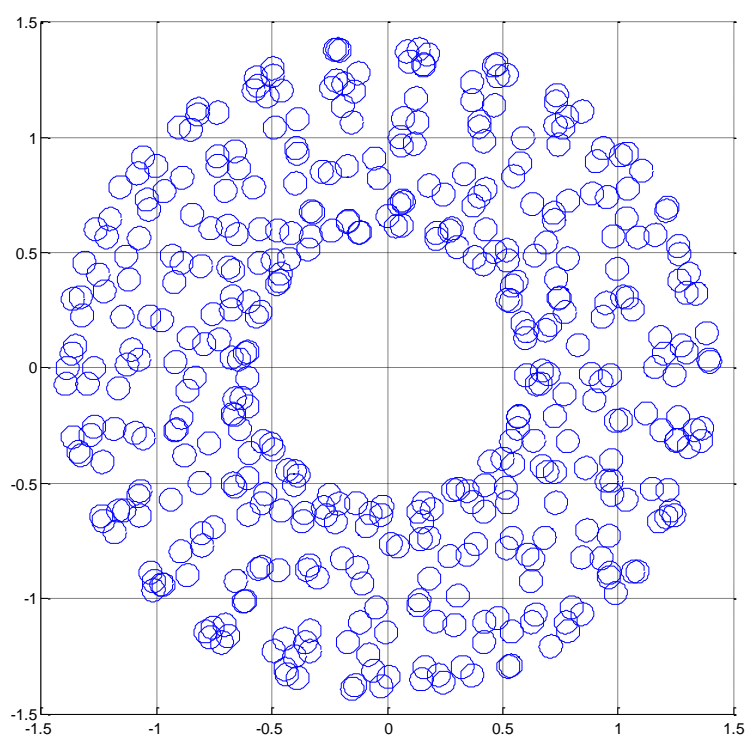


Рис. 3. Распределения лунок на поверхности забоя в результате решения оптимизационной задачи

## Заключение

В результате проведенных исследований была обоснована необходимость в разработке компактных проходческих комбайнов, основанных на разрушении скальных пород ударно-механическим способом. Этот способ позволяет точно и, в тоже время, равномерно высвобождать энергию удара по всей поверхности забоя. Для равномерности распределения нагрузки на обрабатываемую поверхность были рассчитаны оптимальные скорости вращения исполнительных органов комбайна (метод SQP).

Рассмотренную задачу можно и нужно расширять, т.к. необходимо привязываться к реальным физическим условиям, конструкционным параметрам ударно-скалывающего инструмента, учитывать мощность удара и связанную с ней площадь лунки и т.д. Представленная статья

является отправной точкой для дальнейшей разработки проходческих комбайнов с планетарным ударно-скалывающим исполнительным органом.

### Библиографический список

1. Biggs M. C. Towards Global Optimization (L.C.W. Dixon and G.P. Szergo, eds.). – 1975. – pp. 341-349.
2. Han S. P. Optimization Theory and Applications – 1977. – Т. 22. – 297 p.
3. Kwon R. H. Introduction to Linear Optimization and Extensions with MATLAB®. - Boca-Raton: CRC Press, 2014. – 337 p.
4. Nocedal J., Wright S. Numerical Optimization. – New-York: Springer Science & Business Media, 2006. – 664 p.
5. Pillo G., Ginnessi F. Nonlinear Optimization and Applications. - New-York: Springer Science & Business Media, 2013. – 367 с.
6. Schittkowski K. Annals of Operations Research, Vol. 5. 1985. – pp. 485-500.
7. Бате К. Ю. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – Москва: Стройиздат, 1982. – 448 с.
8. Васильченко В. А. Особенности эксплуатации горных машин с гидроприводом при низких температурах / Горная промышленность №2. 2006. – С. 111-117.
9. Кантович Л. И. Горные машины. – Москва: Недра, 1989. – 304 с.
10. Пивень Г. Г. Из опыта создания гидравлических ударных и вибрационных машин в Карагандинском регионе. – Орел: ОрелГТУ, 2000. – С. 22-24
11. Способ проведения горной выработки. Заявка #2015113260/03(020727) от 09.04.2015. / заявитель Ушаков Л.С. RU.
12. Трифонов А. Г. / Сайт "Экспонента". – URL: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/) (дата обращения: 08.12.2015).
13. Ушаков Л. С. Гидравлические ударные механизмы: опыт расчета и проектирования. – Москва: Palmarium academic publishing, 2013. – 157 с.
14. Ушаков Л. С. Перспективы применения гидроударников в качестве рабочих органов технологических машин / Л. С. Ушаков, Ю. Н. Каманин, Н. Д. Фабричный // Мир транспорта и технологических машин. – 2014. – №4. – С. 91-93.
15. Ушаков Л. С. Гидравлические машины ударного действия / Л. С. Ушаков, Ю. Е. Котылев, В. А. Кравченко. – М.: Машиностроение, 2000. – 416 с.



## References

1. Biggs M. C. Towards Global Optimization. 1975, vol. 5, pp. 341–349.
2. Han S. P. *Mathematical Programming*, 1976, vol. 11, pp. 243–282.
3. Kwon R. H. Introduction to Linear Optimization and Extensions with MATLAB. Boca-Raton, 2014. 337 p.
4. Nocedal J. & Wright S. Numerical Optimization. New-York, 2006. 664 p.
5. Pillo G. & Ginnessi F. Nonlinear Optimization and Applications. New-York, 2013. 367 p.
6. Schittkowski K. *Annals of Operations Research*, 1985, vol. 5, pp. 485–500.
7. Bate K. Yu. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh ehlementov [Numerical methods and finite element method]. Moskow, 1982. 448 p.
8. Vasil'chenko V. A. *Gornaya promyshlennost' – Mining*, 2006, no. 2, pp. 111–117.
9. Kantovich L. I. Gornye mashiny [Mining machinery]. Moskow, 1989. 304 p.
10. Piven' G. G. Iz opyta sozdaniya gidravlicheskih udarnykh i vibracionnykh mashin v Karagandinskom regione [From the experience of the creation of the Karaganda region of hydraulic shock and vibration machines]. Orel, 2000, pp. 22–24.
11. Sposob provedeniya gornoj vyrabotki (The method of excavation). Request #2015113260/03(020727) from 09/04/2015 applicant Ushakov L. S. RU.
12. Sajt “Ehksponenta” [Site “Exponenta”]. URL: [http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book\\_2/](http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/).
13. Ushakov L. S. Gidravlicheskie udarnye mekhanizmy: opyt rascheta i proektirovaniya [Hydraulic percussion mechanisms: experience in calculating and designing]. Moskow, 2013. 157 p.
14. Ushakov L. S., Kamanin Yu. N. & Fabrichnyj N. D. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin - World of transport and technological machines*, 2014, no. 4, pp. 91–93.
15. Ushakov L. S., Kotylev Yu. E. & Kravchenko V. A. Gidravlicheskie mashiny udarnogo dejstviya [Hydraulic machines Impact]. Moskow, 2000. 416 p.

### Сведения об авторах:

КАМАНИН Юрий Николаевич, к.т.н., доцент кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Орловского государственного университета имени И. С. Тургенева  
E-mail: kamanichi22@mail.ru

УШАКОВ Леонид Семенович, д.т.н., профессор кафедры «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины» Орловского государственного университета имени И. С. Тургенева  
E-mail: oushakov2007@mail.ru

**Information of authors:**

KAMANIN YUrij Nikolaevich, Cand. Sc. (Tech.), associate professor of I. S. Turgenev OSU Lifting and Transport, Construction and Road Machines Department

E-mail: kamanchi22@mail.ru

USHAKOV Leonid Semenovich, Doct. Sc. (Tech.), professor of I. S. Turgenev OSU Lifting and Transport, Construction and Road Machines Department

E-mail: oushakov2007@mail.ru