

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТНО-УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

*Скрипников Д.И., Сладкова Л.А.*

*Российский университет транспорта, Москва*

**Ключевые слова:** механизм поворотно-ударного действия, конструкция механизма, буровые станки, планирование эксперимента, методология проведения эксперимента, моделирование эксперимента, обоснование геометрических характеристик механизма.

**Аннотация.** В статье предложена конструкция механизма поворотно-ударного действия, выполненная в модели в соответствии с полученными расчетными зависимостями его основных конструктивных параметров. в предлагаемой конструкции поворот штанги осуществляется за счет перемещения по ней поворотной муфты в верхней части которой расположен выступ (штырь), свободно входящий в вырезанные на поверхности штанги, чередующиеся вертикальные и наклонные канавки, которые сопряжены между собой дугообразными канавками. При этом высота расположения канавок по верхнему и нижнему уровню неизменна и равна длине хода механизма, обеспечивающего перемещение поворотной муфты. Предложена трехэтапная методика проведения экспериментальных исследований. На первом этапе получены величины коэффициентов трения для различных сочетаний материалов, на основании которых была проведена оценка основных геометрических размеров модели (2 этап). Эксперимент третьего этапа позволил подтвердить целесообразность применения данного механизма на практике.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MECHANISM OF TURN-IMPACT ACTION

*Skripnikov D.I., Sladkova L.A.*

*Russian University of Transport, Moscow*

**Keywords:** rotary impact mechanism, mechanism design, drilling rigs, experiment planning, experiment methodology, experiment modeling, justification of the geometric characteristics of the mechanism.

**Abstract.** The article proposes the design of the rotation-percussion mechanism, made in the model in accordance with the obtained design dependencies of its main design parameters. In the proposed design, the rod is rotated by moving the swivel coupling along it, in the upper part of which there is a protrusion (pin) that freely enters the alternating vertical and inclined grooves cut on the surface of the rod, which are interconnected by arc-shaped grooves. At the same time, the height of the grooves along the upper and lower levels is unchanged and equal to the length of the stroke of the mechanism that ensures the movement of the swivel coupling. A three-stage methodology for conducting experimental studies is proposed. At the first stage, the values of friction coefficients for various combinations of materials were obtained, on the basis of which the main geometric dimensions of the model were evaluated (stage 2). The experiment of the third stage made it possible to confirm the expediency of using this mechanism in practice.

**Введение.** Буровые станки по-прежнему остаются широко востребованными видами техники, используемыми в строительстве, добыче полезных ископаемых и т.д. Существенными недостатками этих машин является то, что, начиная с момента их выпуска, они практически не модернизировались, хотя очевидно, что современные темпы строительства требуют применения буровых станков с усовершенствованными рабочими органами [1-3]. В настоящее время рынок наводнен буровыми машинами производства Германии, Китая, Франции, что в сложившейся геополитической ситуации не является рентабельным.

**Материалы и методы экспериментальных исследований.** Целью работы является подтверждение работоспособности экспериментальной конструкции, защищенной патентом [4], по установленным геометрическим параметрам (количество канавок, их глубина, размеры выступа и др.), которые определялись из исходных данных, принятых на основании существующих конструкций и исследований, проведенных в теории разрушения грунта рабочими органами землеройных машин ударом.



Размеры, приведенные на рисунке 2 являются достаточными для изготовления экспериментальной модели.

Ниже перечислим основные параметры, необходимые для изготовления модели и экспериментальной установки МУПД.

Для обеспечения нормальной работы механизма поворота необходимо, чтобы число канавок  $n$  на штанге определялось из соотношения

$$n \geq \frac{0,0166...1,9480}{S}, \quad (1)$$

где  $S$  – длина хода муфты.

На энергоемкость процесса разрушения грунта ударом значительное влияние оказывает работа единичного удара и его центральность. В меньшей степени эффективность разрушения зависит от частоты ударов. За оптимальное число частоты ударов согласно известным рекомендациям принято 40...100 ударов/мин, что соответствует 2...4 Гц. Учитывая, что предлагаемая конструкция является механизмом ударно-поворотного действия, эту частоту для нанесения ударов по грунту для изготовления модели принимаем за частоту вращения буровой штанги, т.е.  $\omega = 2...4$  Гц.

Также, из [5, 6] известно, что при сколе грунта оптимальное расстояние  $l$  (наиболее удаленная точка разрушенного грунта) принимается по соотношению:  $l = 2b$ , где  $b$  – ширина рабочего органа клинового типа. В нашем случае это будет диаметр штанги, следовательно, на характер разрушения грунта будет оказывать влияние тип и размеры рабочего органа (буровой коронки), которым разрушается грунт и коэффициент трения между выступом и канавкой (заметим, что размер буровой коронки принимается равным диаметру штанги).

Расчетные значения величин размеров МУПД, которые являются объектом исследования с учетом самой конструкции приведены в таблице 1. При исследовании конструктивных параметров МУПД было выявлено, что отправной точкой для обеспечения работоспособности конструкции является коэффициент трения штыря по направляющей штанге, который позволяет определить остальные параметры предлагаемой конструкции.

Табл. 1. Расчетные значения размеров экспериментальной установки МУПД

Параметры		Величина
Диаметр направляющей штанги, м	$d$	0,048
Диаметр штыря, м	$d_0$	0,0131
Длина хода муфты, м	$S$	0,182
Угол между вертикальной и наклонной канавками, град	$\alpha$	39,640
Угол выбега штыря при повороте штанги, град	$\varphi$	88,28

Используя значение  $S$  из таблицы 1 и расчетную формулу (1), с учетом масштаба моделирования 1:10 определим, что число канавок на поворотной штанге должно быть равно:  $((0,0166/10)...(1,9480/10))/0,182 = 0,01...1,07$ . Принимаем, что число канавок  $n = 2$ , так как наличие одной канавки нерационально.

Эксперимент предполагается проводить в 3 этапа:

1) уточнение величины коэффициента трения при перемещении штыря по канавкам для различного сочетания конкретно используемых при проведении эксперимента материалов;

2) изготовление модели;

3) оценка работоспособности модели после уточнения, в частности, угла выбега штыря  $\varphi$  с вертикальной части на наклонную (рис. 2).

Анализ теоретических исследований предлагаемой конструкции МУПД показал, что угол наклона, обеспечивающий «выбег» выступа с вертикальной части на наклонную, определяется углом  $\varphi$  ( $\varphi = \arctg f$ ), который является определяющим для выбора остальных параметров модели. Его значения можно получить по величинам коэффициента трения покоя  $f$  между различными поверхностями. Выбор параметров проводился, исходя из динамических

и кинематических особенностей работы предлагаемой конструкции МУПД. Угол  $\varphi$  показан на рисунке 3.

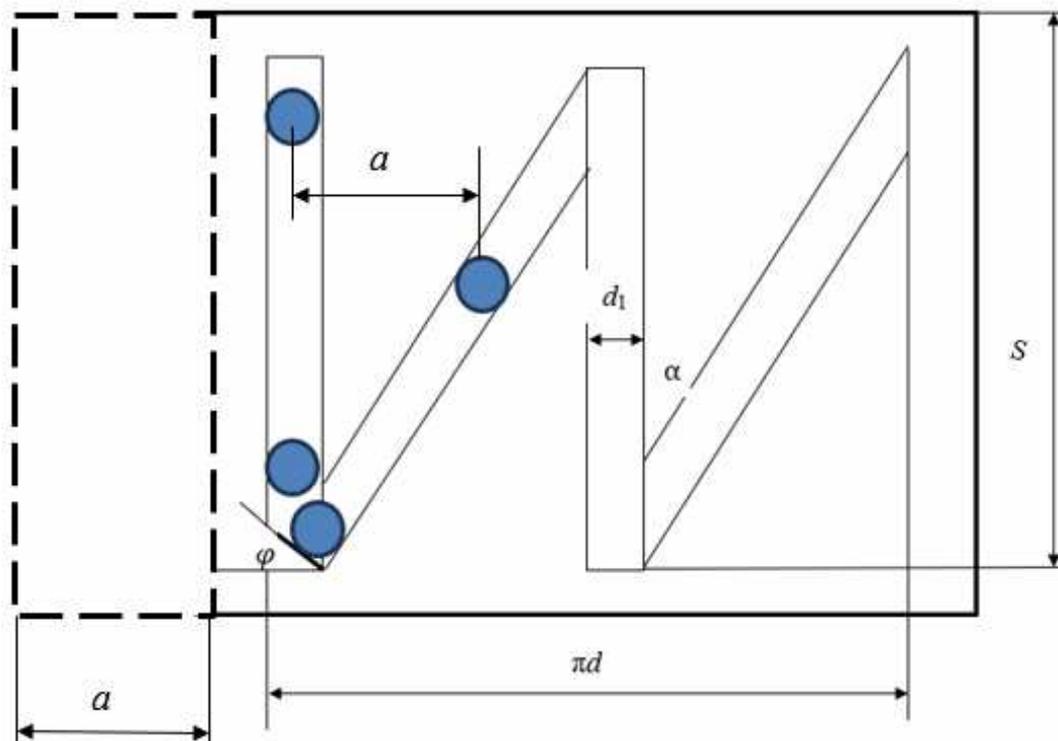


Рис. 3. Модель экспериментальной установки

Значения коэффициента трения покоя  $f$  между контактирующими поверхностями выступа и канавки для различных видов материалов приведены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента трения покоя  $f$

Коэффициент трения, $f$	Материал				
	Дерево по дереву (1 – 1)	Стекло по стеклу (2 – 2)	Картон по дереву (3 – 1)	Картон по стеклу (3 – 2)	Дерево по стеклу (1 – 2)
	0,282	0,238	0,301	0,298	0,259

При изготовлении модели МУПД на первом были уточнены коэффициенты трения между различными поверхностями. Такой подход обусловлен тем, что, несмотря на большое количество научных исследований, проведенных в этом направлении [7], результаты отличаются друг от друга почти на порядок, а для сочетаний отдельно взятых материалов они отсутствуют. Нами была подобрана комбинация материалов, имеющих различные коэффициенты трения покоя  $f$ .

Согласно [8-10] количество проведенных экспериментов должно быть не менее 5, при доверительной вероятности 0,95 и ошибке, не превышающей 0,05. Поэтому в качестве моделей для проведения экспериментальных исследований на первом этапе были взяты три вида материалов с различными коэффициентами трения в различном их сочетании (табл. 2). Результаты полученных исследований использовались для определения расчетных параметров модели.

На третьем этапе проводилась оценка достоверности выбора геометрических параметров модели предлагаемого (МУПД). Очевидно, что на силу трения и долговечность тела, перемещающегося внутри направляющей влияют: состояние и вид взаимодействующих поверхностей (материал, шероховатость); расстояние от стенок канавки до поверхности выступа  $\Delta S_1$  и  $\Delta S_2$ , определяемое технологическими особенностями взаимодействующих

поверхностей, которые определяются из условия эксцентриситета  $e$ , обуславливающего переход с прямолинейной части канавки на наклонную;  $m$  – масса тела (поворотной шайбы), перемещающегося внутри направляющей;  $F$  – площадь соприкосновения поверхностей канавки и штыря;  $\alpha$  – угол наклона канавки к вертикальной части.

Таким образом, имеем 4-х факторный эксперимент, где входными параметрами являются эксцентриситет  $e$ , масса тела  $m$ , площадь соприкасающихся тел  $F$ , угол наклона  $\alpha$  (рис. 2 и 3); угол выбега штыря  $\varphi$ .

Целью третьего этапа экспериментальных исследований является: подтверждение достоверности теоретических исследований по определению геометрических параметров МПУД и получение поправочных коэффициентов для их корректировки.

Правильный выбор геометрических размеров вырезанной канавки обеспечивается рабочим процессом МПУД:

- перемещение поворотной муфты в направлении удара по вертикальной канавке на расстояние равное длине хода приводного механизма;

- перемещение выступа поворотной шайбы в обратном направлении по наклонной канавке, где за счет составляющих сил, направляющая штанга поворачивается на угол  $\varphi$ , преодолевая силу трения  $F_{mp}$  покоя между штангой и поворотной шайбой, определяемую по зависимости:

$$F_{mp} = P \operatorname{tg}(\alpha + \operatorname{arctg} f),$$

где  $P$  – сила, развиваемая на приводе перемещения поворотной шайбы механизмом ее передвижения (гидро-, пневмоцилиндр).

Учитывая сложность изготовления модели из различных материалов на круглом образце в лабораторных условиях, была создана развернутая модель контактирующих тел вращения с соблюдением масштабных коэффициентов в соответствии с описанием рабочего процесса МПУД. Экспериментальная модель представляла собой пластину длиной, превышающей размер развертки направляющей штанги  $\pi d$  (см. рис. 3), и шириной не менее длины хода штока привода  $S$ , выполненную из материалов, указанных в таблице 2, и их сочетаний. Толщина пластины определялась в зависимости от геометрических параметров высоты штыря на направляющей штанге.

При проведении эксперимента использовался кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение кривошипа в возвратно-поступательное движение ползуна. Длина шатуна  $l_2$  определялась из условия хода  $S$  ползуна. Для оценки воспроизводимости опытов использовался критерий Кохрена [8, 10] при доверительной вероятности 0,95, числе степеней свободы 4 и числе опытов 16.

Для определения размеров шатуна воспользуемся рекомендациями [11, 12]. При смещении ползуна, имитирующего штырь, величина  $\lambda_2$  – это масштабный коэффициент, определяемый в зависимости от средней рабочей скорости  $V_{p,cp}$  перемещения ползуна при частоте вращения кривошипа  $n_1$ . Принимается  $\lambda_2 = 4$ .

В результате несложных математических преобразований были определены величины  $l_2$  и рабочей скорости  $V_{p,cp}$  перемещения поворотной шайбы.

$$l_2 = \frac{l_2}{\lambda_2};$$

$$V_{p,cp} = \frac{l_2 \cdot 4}{\lambda_2 T} = \frac{l_2 \cdot 4 n_1}{\lambda_2 \cdot 60} = \frac{l_2 n_1}{60},$$

где  $n_1$  – частота вращения кривошипа, об/мин;  $T$  – время (с) вращения кривошипа, совпадающее с частотой.

Таким образом, регулируя длины кривошипа и шатуна, можно регулировать скорость перемещения ползуна по пазу.

Во время эксперимента штырь, закрепленный на ползуне, неподвижно крепится к кривошипно-шатунному механизму. При проведении эксперимента частота вращения

кривошипа выбиралась из диапазона  $\omega_1 = 2...6 \text{ с}^{-1}$ . Ползун при этом совершал поступательное движение, заставляя ее перемещаться пластину по направляющим, на которых она установлена на расстоянии  $a$  (см. рис. 3).

Предлагаемая методика проведения экспериментальных исследований конструкции МПУД позволяет подтвердить правильность проведенных теоретических исследований.

**Результаты эксперимента.** Обработка результатов эксперимента по определению коэффициентов трения покоя, приведенная в таблице 1 показала, что для исследуемых материалов он отличается на величины сотых долей, которые дадут незначительные погрешности при выборе параметров модели МПУД (табл. 3).

Табл. 3. Значения углов  $\varphi$  «выбега» с вертикальной канавки на наклонную

Сочетание материалов	Значения коэффициента трения $f$ по вариантам	Угол $\varphi$ «выбега», $\varphi = \arctg f$ , град
Дерево по дереву	0,282	15,3484
Стекло по стеклу	0,238	13,3873
Картон по дереву	0,300	16,6992
Картон по стеклу	0,294	16,3833
Дерево по стеклу	0,258	14,4668

Анализ данных из таблицы 3 показал, что при проведении экспериментальных исследований соблюдено условие воспроизводимости результатов исследований при величине среднеквадратической ошибки равной 0,00591 при доверительной вероятности 0,95 и величине относительной ошибки не более 6,48%.

В процессе проведения эксперимента оценивались: траектория перемещения выступа шайбы по направляющим; правильность выбора угла выбега  $\varphi$ , работоспособность конструкции по заданным параметрам.

**Заключение.** Изготовленная модель, представленная на рисунке 1, выполненная по расчетным параметрам, подтверждает работоспособность предлагаемой конструкции МПУД и ее работоспособность при разработке грунтов (поворот буровой штанги при прещении по ней выступа поворотной шайбы). Трехэтапная методика проведения эксперимента позволила подтвердить изменение траектории движения штыря по канавкам в месте перехода с вертикальной канавки на наклонную, что свидетельствует о достоверности методики расчета геометрических параметров предлагаемого МПУД и позволяет скорректировать параметры элементов конструкции МПУД.

#### Список литературы

1. Дворников Л.Т., И.А. Жуков. Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии. // Материалы конференции по проблемам механики и машиностроения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 225-229.
2. Растегаев И.К. Машины для вечномерзлых грунтов. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
3. Доброборский Б.С. Теоретический анализ работы ударного механизма пневматического молотка системы «корпус-ударник» // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13930>.
4. Патент №2232858 РФ. Механизм ударного действия / Л.А. Сладкова, А.Н. Петров, Н.В. Артюх, В.А. Сладков, В.А. Петров, В.В. Федосеев. – Заявка №2002128948 от 29.10.2002; опубл. 20.07.2004, Бюл. №20.
5. Зеленин А.Н., Баловнев В.И., Керов И.П. Машины для земляных работ. – М.: Машиностроение, 1975. – 423 с.
6. Жуков И.А. Научно-методические основы определения физико-механических свойств горной породы при исследовании разрушения хрупких сред ударом // Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009 – С. 96-100.
7. Енохович А.С. Справочник по физике и технике. – М.: Высш. шк., 1976. – 288 с.
8. Сладкова Л.А. Исследования и испытания наземных транспортно-технологических машин: учебное пособие. – М.: МГУПС (МИИТ), 2016. – 275 с.
9. Зорин В.А. Надежность механических систем. Техническая диагностика. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2021. – 380 с.

10. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л.: Химия. Ленингр. отделение, 1975. – 48 с.
11. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 2015. – 586 с.
12. Сараханова Е.В., Жуков И.А. Модель синтеза геометрии стержней при продольном ударе. // XIX Международная Интернет-ориентированная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2007): – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2007 – С. 230.

#### References

1. Dvornikov L.T., Zhukov I.A. Analysis and generalization of the regularities of tool penetration into rocks under impact impact // Proceedings of the Conference on the Problems of Mechanics and Mechanical Engineering. – Novokuznetsk: SibSIU, 2006. – P. 225-229.
2. Rastegaev I.K. Machines for permafrost soils. – М.: Mechanical Engineering, 1986. – 216 p.
3. Dobrobrsky B.S. Theoretical analysis of the work of the shock mechanism of the pneumatic hammer of the "hull-udarnik" system. – 2014. – № 4. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13930>.
4. Patent No. 2232858 RU. Impact mechanism / L.A. Sladkova, A.N. Petrov, N.V. Artyukh, V.A. Sladkov, V.A. Petrov, V.V. Fedoseev. – Appl. No. 2002128948 from 29.10.2002; publ. 20.07.2004, Bul. №20.
5. Zelenin A.N., Balovnev V.I., Kerov I.P. Machines for earthworks. – М.: Mechanical Engineering, 1975. – 423 p.
6. Zhukov I.A. [Scientific and methodological foundations of determining the physical and mechanical properties of the rock in the study of the destruction of fragile environments by a blow // High-tech technologies for the development and use of mineral resources: a collection of scientific articles. – Novokuznetsk: SibSIU, 2009. – P. 96-100.
7. Enohovich A.S. Handbook of Physics and Technology. – М.: Higher School, 1976. – 288 p.
8. Sladkova L.A. Research and testing of ground transport and technological machines: textbook. – М.: MGUPS (МИТ), 2016. – 275 p.
9. Zorin V.A. Reliability of mechanical systems. Technical diagnostics. – М.: REC INFRA-M Publ., 2021. – 380 p.
10. Sautin S.N. Planning of Experiment in Chemistry and Chemical Technology. – Л.: Chemistry. Leningrad Branch, 1975. – 48 p.
11. Artobolevsky I.I. Theory of Mechanisms and Machines. – М.: Mechanical Engineering, 2015. – 586 p.
12. Sarakhanova E.V., Zhukov I.A. Model of Rod Geometry Synthesis at Longitudinal Impact // XIX International Internet-Oriented Conference of Young Scientists and Students on the Problems of Mechanical Engineering (MIKMUS-2007). – М.: Publ. house of IMASH RAS, 2007 – P. 230.

#### *Сведения об авторах:*

#### *Information about authors:*

<b>Сладкова Любовь Александровна</b> – доктор технических наук, профессор	<b>Sladkova Liubov Aleksandrovna</b> – doctor of technical sciences, professor
<b>Скрипников Дмитрий Иванович</b> – аспирант rich.cat2012@yandex.ru	<b>Skripnikov Dmitry Ivanovich</b> – postgraduate student

Получена 25.09.2024