

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭНЕРГИИ В УДАРНОЙ СИСТЕМЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПЕРФОРАТОРОВ

Т.Ж. АННАКУЛОВ, Б.О. ОТАЖОНОВ, Ж.Ф. ЮНУСОВ

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан.

Doi: 10.5281/zenodo.21590356

АННОТАЦИЯ	В статье проведён анализ деформаций, возникающих в процессе передачи энергии в ударной системе пневматических перфораторов. Механизм локальных контактных деформаций, формирующихся в момент удара, а также продольных упругих волн, распространяющихся вдоль волнового стержня, исследован с позиций теоретического, экспериментального и численного моделирования. Полученные результаты позволяют оценить возможности повышения эффективности передачи ударной энергии горной породе.
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА	пневматический перфоратор, ударная система, упругая деформация, волновая передача, энергетический баланс.

Введение

В результате освоения новых месторождений и расширения производственных мощностей предприятий объёмы добычи непрерывно возрастают. Добыча и переработка твёрдых полезных ископаемых, строительство подземных сооружений, а также получение строительных материалов связаны с необходимостью разрушения значительных объёмов горных пород, что, в свою очередь, требует больших затрат труда, времени, энергии и финансовых ресурсов. В настоящее время основная часть горной массы перерабатывается буровзрывным способом, одним из ключевых этапов которого является бурение шпуров и скважин. Данный процесс представляет собой крайне трудоёмкий и тяжёлый цикл горно-проходческих работ при добыче полезных ископаемых. В связи с этим вопросы совершенствования буровой техники являются исключительно актуальными и имеют важное практическое значение.

Наибольшая эффективность разрушения горных пород достигается за счёт ударного воздействия. Именно на этом принципе основано создание многих горных машин, в частности оборудования, применяемого для бурения шпуров и скважин.

Повышение эффективности бурения шпуров с помощью перфораторов в массивах крепких горных пород возможно за счёт совершенствования применяемых методов разрушения породного массива. Ударно-поворотный способ бурения попрежнему является универсальным способом, при котором возможно бурение самых крепких пород, хотя и с небольшой скоростью бурения. Увеличение производительности перфораторов позволит не

только снизить себестоимость буровых работ за счёт уменьшения затрат времени на бурение шпуров, но и в целом повысит эффективность горнопроходческих работ [1,7,12].

Основные требования к современным пневматическим перфораторам заключаются в следующем: обеспечение максимальной передачи ударной энергии поршня-ударника на штангу, увеличение количества ударов до максимального уровня за короткий промежуток времени, а также конструктивная удобство для оператора. Перфоратор должен быть легким по весу, обладать низким уровнем шума и вибрации. Для устранения данных недостатков используются такие методы, как оснащение перфораторов дополнительными конструкциями для гашения вибрации и регулирования давления воздуха.

Экспериментальные исследования

Актуальность совершенствования ударных систем, предназначенных для технологических целей, обусловлена значительными экономическими преимуществами, связанными с повышением производительности буровых работ и снижением энергетических затрат на бурение.

Схема типовой ударной системы приведена на рисунке 1. Принцип работы такой системы заключается в следующем. Энергия привода преобразуется в кинетическую энергию ударного элемента 1 (поршня-ударника), совершающего возвратно-поступательное движение. В конце своего хода он соударяется с хвостовой частью волновода 2, выполненного в виде стержня. В результате кинетическая энергия ударника частично преобразуется в полезную энергию продольных колебаний волновода, а частично — в другие виды энергии [7,8].

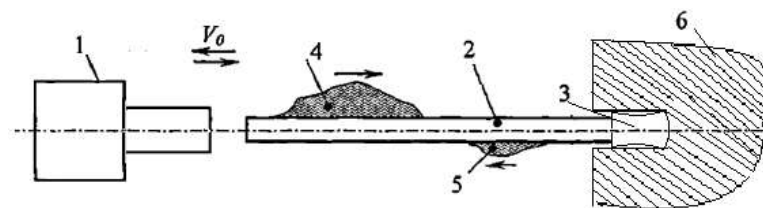


Рис.1. Схема ударной системы технологического назначения.

Продольные колебания, формируемые поршнем-ударником, называются падающим ударным импульсом 4 и, как правило, распространяются вдоль волновода, заканчивающегося рабочим инструментом. Амплитуда и длительность импульса зависят от материала, формы и размеров соударяющихся тел.

Под действием импульса инструмент смещается, в результате чего создаются условия для разрушения обрабатываемой среды 6, и инструмент проникает в неё на определённую глубину. При этом значительная часть энергии возвращается в ударную систему в виде отражённого импульса 5, который, как правило, поглощается самой системой.

Расчёт ударных систем, предназначенных для технологических целей, включает решение задач формирования и распространения импульсов упругой деформации в процессе соударения поршня-ударника с волноводом, а также передачи ударного импульса по волноводу к обрабатываемой среде и преобразования его энергии в работу разрушения. Решение данной задачи позволяет определить действующие в системе нагрузки, выполнить расчёты на прочность, а также оценить производительность системы [1,3].

Ударная система пневматического перфоратора рассматривается как механическая система, состоящая из поршня-ударника и волноводного стержня. Кинетическая энергия, накопленная в результате движения поршня-ударника, через бойок передаётся стержню [13,14]:

$$E_k = \frac{m_p v_p^2}{2} \quad (1)$$

Здесь: m_p — масса поршня, v_p — скорость поршня в момент удара.

В ударной системе пневматических перфораторов процесс передачи энергии характеризуется высокоскоростными динамическими воздействиями, при которых вследствие изменения формы и направления механической энергии возникают различные виды

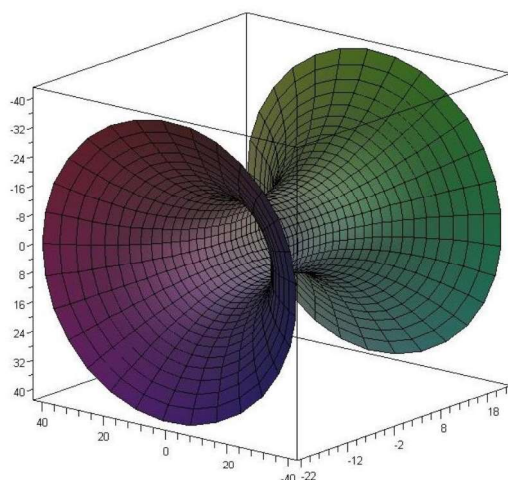
деформаций. В момент удара кинетическая энергия ЕЕЕ, создаваемая поршнем, через поршень-ударник передаётся волноводному стержню, при этом данный процесс сопровождается одновременным возникновением контактных и волновых деформаций.

На начальной стадии удара в результате соударения поршня-ударника в зоне контакта формируются локальные упругие деформации сжатия. Эти деформации характеризуются возникновением значительных напряжений за очень короткий промежуток времени и проявляются в зависимости от упруго-механических свойств материалов, геометрии контактных поверхностей и скорости удара. Локальные контактные деформации временно аккумулируют определённую часть ударной энергии в виде упругой потенциальной энергии и оказывают существенное влияние на формирование ударного импульса.

После контактной стадии основная часть энергии E_1 распространяется вдоль стержня в виде продольных упругих волн. Эти волны формируют в материале стержня чередующиеся деформации сжатия и растяжения, передавая энергию от точки удара к рабочей среде. Скорость распространения и амплитуда упругих волн определяются плотностью материала стержня и модулем упругости. В то же время в результате взаимодействия волн с граничными условиями на конце стержня возникают отражённые волны, что ещё более усложняет процесс деформирования. При неоптимальном выборе характерных параметров деформаций значительная часть энергии может расходоваться на внутренние потери.

К настоящему времени проведено большое количество научных исследований, посвящённых изучению конструкции ударных бойков и поршней-ударников, а также их влияния на процесс формирования ударного импульса. Одним из наиболее эффективных и фундаментальных исследований в данном направлении является

работа И.А. Жукова, в которой был исследован ударник (бойок) с геометрической формой полукатеноида, обеспечивающей формирование оптимальной формы ударного импульса.



Образующая линия формы катеноида в прямоугольной системе координат выражается через функцию гиперболического косинуса [4,6];

$$y = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right) = a \cdot \operatorname{ch} \frac{x}{a}, \quad (2)$$

Здесь a — параметр катены.

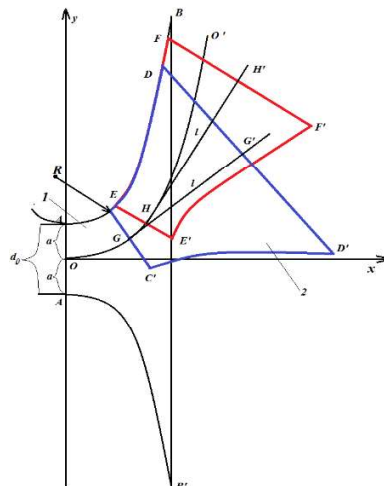


Рис. 2. Образование катеноидальных форм в координатной системе: а) Катеноид вращения; б) Способы образования различных катеноидных фигур.

Следует отметить, что практическое применение ударников геометрической формы полукатеноида (полу-катеноида), описываемых на основе заданного математического выражения, в ударных системах технологического назначения до настоящего времени не получило широкого развития. Это обусловлено тем, что при непосредственном использовании данного уравнения для формирования геометрии ударника наблюдается резкое увеличение его радиальных размеров. В результате формируются крупногабаритные конструкции, неприемлемые для применения в горной и строительной отраслях.

Вместе с тем существует возможность устранения указанного конструктивного ограничения при реализации ударников полукатеноидной формы. Сущность данного подхода заключается в использовании в качестве образующей криволинейных поверхностей ударников отдельных сегментов катены, определённой в прямоугольной системе координат, смещённой относительно начального положения и повернутой на заданный угол (рис. 2б).

В результате формируемые ударники, даже при условии задания одинаковой массы, различаются по геометрической форме и длине. Это, в свою очередь, приводит к формированию в волноводах упругих ударных импульсов, отличающихся по форме и длительности. Каждый из таких импульсов может быть адаптирован (оптимизирован) для эффективного разрушения

сред с различными прочностными характеристиками.

В исследованиях, выполненных И.А. Жуковым, сравнительный анализ ударных импульсов, формируемых ударниками различной геометрической формы, позволил получить следующие существенные результаты:

- ударный импульс, формируемый ударником полукатеноидной формы, обладает возрастающей во времени интенсивностью на переднем фронте, что полностью соответствует основным требованиям, предъявляемым к оптимальному ударному импульсу;
- отношение максимальной амплитуды ударного импульса к амплитуде импульса, формируемого ударником с поперечным сечением, равным сечению штанги, превышает 2, при этом установлено, что данное значение существенно превосходит показатели, полученные для ударников другой геометрической формы.

Исходя из полученных результатов, теоретически предполагается, что ударный импульс, формируемый ударником полукатеноидной формы, обладает возрастающей во времени интенсивностью, а его максимальная амплитуда может быть выше по сравнению с ударными импульсами, создаваемыми ударниками другой формы, аналитически описанными на основе модели штанг (волноводных стержней) в ударном процессе.

Результаты исследований

Данное обстоятельство указывает на целесообразность применения полукатеноидной формы не только в бойках, но и в ударных поршнях пневматических перфораторов. С целью проверки и обоснования данной гипотезы с использованием программного комплекса **ANSYS** было выполнено численное моделирование процессов передачи



Рис.3. Общий вид поршневого ударника пневматических перфораторов: а) ПП-63, б) УТ-29, в) Предлагаемый поршень-ударник, выполненный в виде полукатеноида

В процессе моделирования для всех вариантов были приняты одинаковые начальные условия, а именно: скорость соударения с буром — 8 м/с, одинаковый материал — металл Ст45, а также одинаковые геометрические размеры: общая длина 200 мм, диаметр ударной части 44 мм и максимальный диаметр 75 мм. Различалась лишь форма поршней-ударников.

В результате с использованием программного комплекса **ANSYS** были определены распределения деформаций, возникающих в процессе передачи ударной энергии, а также их изменения во времени (рис. 4а–в) [3,8].

В данном исследовании был проведён анализ с целью определения влияния геометрической формы ударников, применяемых в ударной системе пневматических перфораторов, на деформационные состояния, возникающие в процессе удара [8,9,15].

На графиках зелёные линии соответствуют упругой деформации бура после соударения, синие линии — деформации горной породы, красные линии — упругой деформации поршня-ударника.

Оценка деформационного состояния ударников проводилась по нескольким основным критериям. В качестве первого критерия было принято максимальное значение эквивалентной упругой деформации (ϵ). Данный показатель характеризует уровень упругих напряжений, возникающих в материале ударника в момент удара, и позволяет оценить запас прочности конструкции.

Вторым критерием являлся анализ характера изменения деформаций во времени. Это позволило выделить стадии начала ударного процесса, достижения максимального деформационного состояния и последующего затухания, а также сопоставить динамический отклик ударников различной формы.

Плавность временной диаграммы деформаций либо наличие резких колебаний имеет важное значение при оценке устойчивости ударного процесса.

энергии для цилиндрического поршня-ударника перфоратора **ПП-63** (рис. 3а), конического поршня-ударника перфоратора **УТ-29** (рис. 3б), а также для предлагаемого поршня-ударника полукатеноидной геометрической формы (рис. 3в) [2].

В качестве третьего критерия было рассмотрено распределение деформаций вдоль ударника. Данный критерий позволяет определить участки концентрации ударных нагрузок в конструкции ударника. Неравномерное распределение деформаций может приводить к концентрации напряжений и, как следствие, к снижению конструктивной надёжности.

Четвёртый критерий связан с устойчивостью деформационных колебаний и предусматривает оценку амплитуды и скорости затухания упругих колебаний, возникающих в процессе удара. Устойчивые и быстро затухающие колебания повышают эффективность передачи энергии, а также способствуют увеличению срока службы ударника и сопряжённых с ним элементов.

Если обратиться к анализу результатов для цилиндрического ударника, то графики эквивалентных упругих деформаций и цветные контурные карты, полученные для ударника цилиндрической формы, показали следующие особенности [10,13]:

- амплитуда деформаций в буре находилась в диапазоне ($\epsilon = 3.4 \div 3.9 \cdot 10^{-4}$ м/м, что свидетельствует о концентрации значительной части ударной энергии непосредственно в рабочем инструменте;

- деформация в горной породе (ϵ) (синяя линия) была существенно ниже по сравнению с буром, что указывает на наличие потерь при передаче энергии;

- деформация в поршне-ударнике (ϵ) (красная линия) имела очень малые значения, что конструктивно подтверждает достаточную прочность ударника.

Из изложенного можно сделать вывод, что цилиндрическая форма обеспечивает резкую передачу ударной энергии, однако не позволяет в полной мере активизировать деформации в горной породе. Данное обстоятельство объясняется плоскостностью контактной поверхности и относительно равномерным распределением

напряжений. Высокая локализация напряжений и деформаций с точки зрения конструктивной надёжности ограничивает эффективность такого решения.

Анализ результатов для ударника конической формы позволил получить следующие научно значимые выводы, свидетельствующие о более сложном и принципиально ином динамическом

характере деформационного процесса. На графиках отчётливо прослеживается изменение соотношения деформаций бура и горной породы по сравнению с цилиндрическим вариантом.

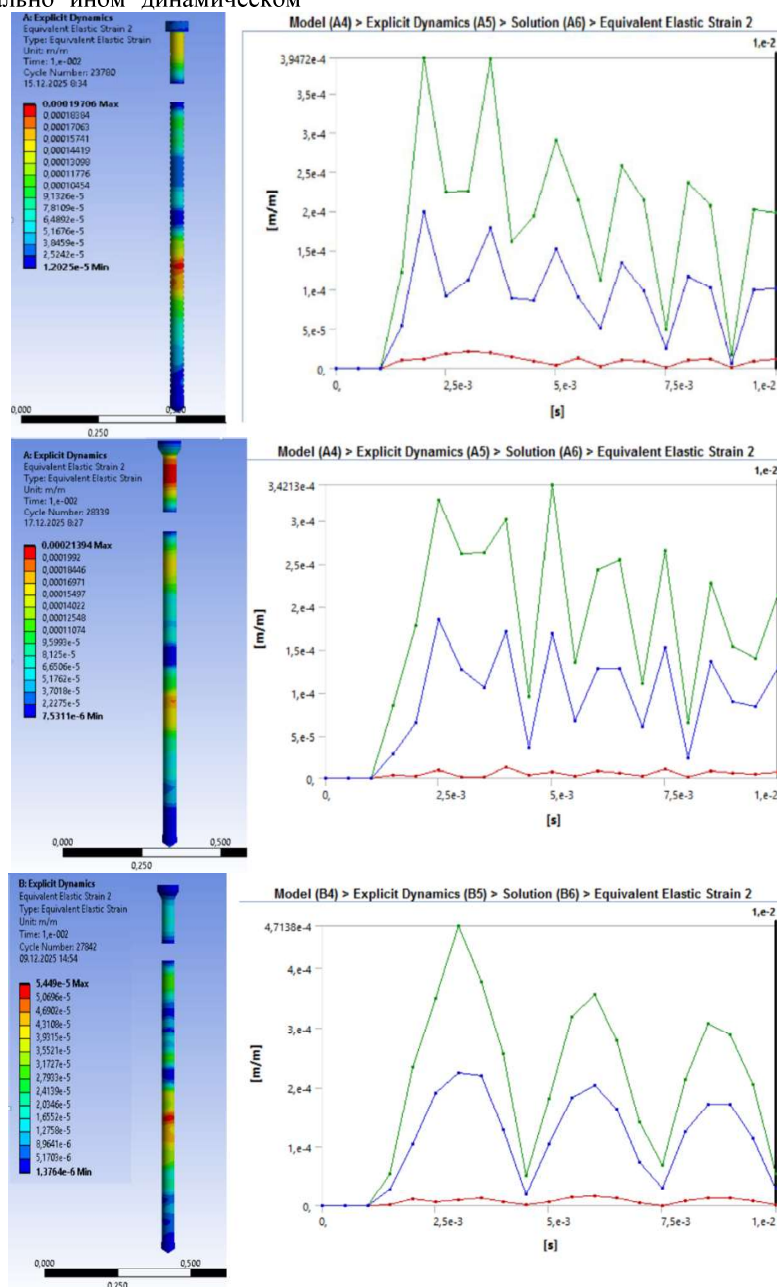


Рис. 4. Деформации, возникающие в результате удара, создаваемого поршневыми ударниками различной формы, а именно: а) цилиндрическим; б) коническим; в) полуктеноидальным.

– максимальное значение эквивалентной упругой деформации в буре составило $(\varepsilon=3.0\div 3.2)\cdot 10^{-4}$ м/м, что является наименьшим показателем среди рассмотренных вариантов, при

этом характер колебаний отличался большей резкостью;

– значения деформации ε в горной породе оказались выше по сравнению с цилиндрическим

ударником, что свидетельствует о более эффективной передаче энергии породе;

- деформация ε вдоль поршня-ударника распределялась относительно равномерно, а локальная концентрация напряжений была минимальной.

По сравнению с цилиндрическим ударником конический ударник обеспечивает более эффективную передачу ударной энергии горной породе, в результате чего уровень деформаций в породе оказывается выше. При этом оптимальное формирование ударного импульса обеспечивает равномерное распространение упругих волн и повышает общую механическую устойчивость ударника [1,7,8,15].

Результаты деформационного анализа для предлагаемого поршня-ударника полукатеноидной формы характеризуются следующими особенностями:

- деформации в буре достигают наибольших максимальных значений ($\varepsilon = 4.5 \div 4.7 \cdot 10^{-4}$ м/м, при этом импульсы распространяются в относительно более сглаженной форме;

- деформация в горной породе существенно превышает показатели двух других вариантов, что

свидетельствует о реализации наиболее рационального режима передачи энергии именно для данной геометрической формы;

- деформации в поршне-ударнике остаются минимальными, что подтверждает механическую надёжность предложенной формы.

Полукатеноидная геометрия обеспечивает оптимальное направление ударной энергии посредством волновых процессов, снижает отражение упругих импульсов и позволяет максимально аккумулировать деформационную энергию в горной породе. В результате создаются наиболее благоприятные условия для образования и развития микротрещин в породе.

Выводы

Обобщённый график, построенный в среде Excel, позволяет сравнить временные изменения эквивалентных упругих деформаций, возникающих в буре под воздействием ударников трёх различных геометрических форм. Как видно из графика, ударный процесс во всех случаях носит импульсный характер, а значения деформаций во времени характеризуются повторяющимися пиковыми значениями.

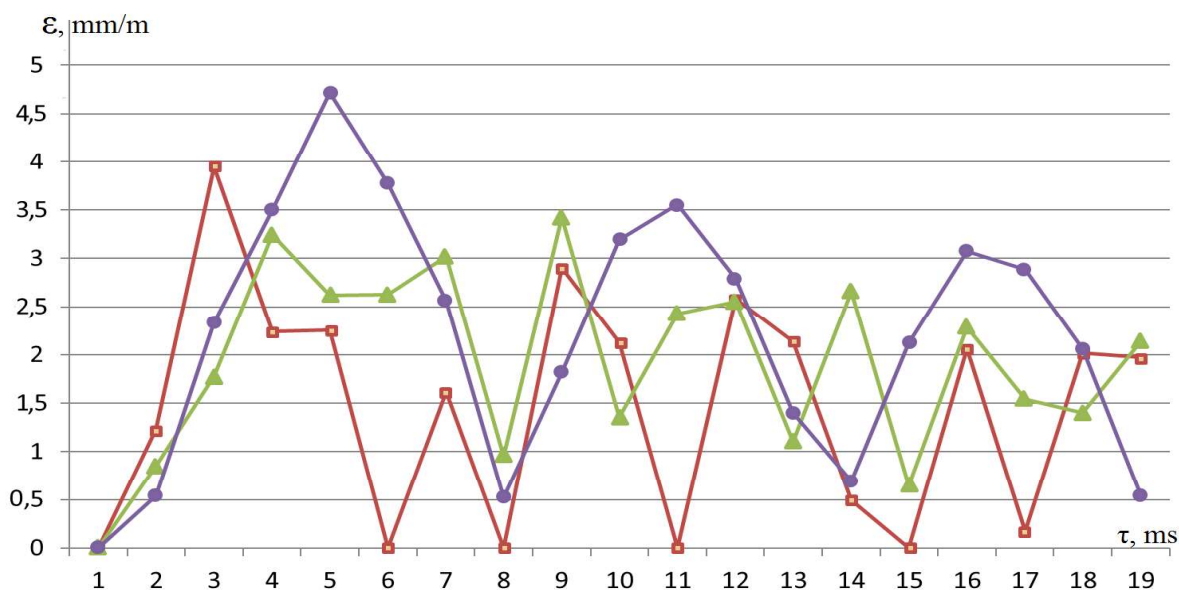


Рис. 5. Временное изменение эквивалентной упругой деформации в буре под воздействием поршней-ударников различной геометрической формы: зелёная линия — цилиндрическая; красная — коническая; фиолетовая — полукатеноидная.

Анализ, выполненный на основе средних значений, показал, что максимальная эквивалентная упругая деформация в буре для цилиндрического и полукатеноидного ударников имеет более высокие значения по сравнению с коническим ударником. При этом полукатеноидный ударник, в сравнении с

цилиндрическим, характеризуется увеличением уровня деформаций. Результаты детального количественного сравнения приведены в таблице 1.

Результаты моделирования, выполненного с использованием модуля ANSYS Explicit Dynamics, показали, что максимальная эквивалентная

упругая деформация в буре по сравнению с коническим ударником для цилиндрического ударника выше примерно на 18%, а для ударника полукатеноидной формы — на 48%. В свою очередь, полукатеноидный ударник по сравнению

с цилиндрической формой обеспечивает увеличение уровня деформаций на 26 %.

Таблица 1.

Средние значения деформаций в буре и их процентные различия.

Тип поршня-ударника	Среднее значение упругой деформации ε	Базы сравнения средних значений упругих деформаций	Процентная разница
Цилиндрический	$3.65 \cdot 10^{-4}$	Цилиндрический $\leftrightarrow$ конический	18 %
Конический	$3.10 \cdot 10^{-4}$	Полукатеноидный $\leftrightarrow$ цилиндрический	26%
Полукатеноидный	$4.60 \cdot 10^{-4}$	Полукатеноидный $\leftrightarrow$ конический	48%

Таким образом, локальные контактные упругие деформации сжатия, возникающие в ударной системе пневматических перфораторов, а также продольные упругие волны, распространяющиеся вдоль стержня, являются основными факторами, определяющими механизм передачи ударной энергии к рабочей среде. Глубокий анализ количественных и качественных характеристик указанных деформаций служит важной научной

основой для совершенствования ударных систем, снижения энергетических потерь и повышения эффективности процесса разрушения горных пород.

В связи с этим полукатеноидная форма рекомендуется как наиболее перспективное геометрическое решение для горной и буровой техники, а также ударных механизмов.

PNEVMATIK PERFORATORLARNING ZARB BERISH TIZIMIDA ENERGIYA UZATILISHI JARAYONIDA YUZAGA KELADIGAN DEFORMATSION JARAYONLARNI TADQIQ ETISH

T.J. ANNAQULOV, B.O. OTAJONOV, J.F.YUNUSOV

Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, O'zbekiston.

ANNOTATSIYA Maqolada pnevmatik perforatorlarning zarb berish tizimida energiya uzatish jarayonida vujudga keladigan deformatsion holatlar tahlil qilinadi. Zarb ta'sirida yuzaga keluvchi lokal kontakt deformatsiyalari hamda to'liq uzatuvchi sterjen bo'ylab tarqaladigan bo'ylama elastik to'liqlarning shakllanish va tarqalish mexanizmlari nazariy tahlil, eksperimental tadqiqotlar va sonli modellash tirish usullari asosida o'rganilgan. Olingan natijalar zarb energiyasini tog' jinsiga uzatish samaradorligini oshirish yo'llarini baholash imkonini beradi.

KALIT SO'ZLAR pnevmatik perforator, zarb berish tizimi, elastik deformatsiya, to'liq uzatish, energiya balansi.

ANALYSIS OF DEFORMATION PROCESSES ASSOCIATED WITH ENERGY TRANSFER IN PNEUMATIC PERFORATOR IMPACT SYSTEMS

T.J. ANNAKULOV, B.O. OTAJONOV, J.F.YUNUSOV

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

ABSTRACT This article examines the deformation processes occurring during energy transfer in the impact system of pneumatic rock drills. Local contact deformations arising at the moment of impact, as well as the mechanisms of longitudinal elastic wave propagation along the wave-transmitting rod, are analyzed using theoretical, experimental, and numerical modeling approaches. The obtained results provide a basis for assessing potential ways to improve the efficiency of impact energy transfer to the rock.

KEYWORDS pneumatic perforator, impact system, elastic deformation, wave transmission, energy balance.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li J., Yang Z., Yu G. Influence of Piston Mass and Working Pressure on the Impact Performance of a Hydraulic Rock Drill Using the Stress Wave Method // *Machines*. 2023. Vol. 11, No. 11. Article 987. <https://doi.org/10.3390/machines11110987>.
2. Li D., Tong L., Huang Z., et al. Influence of drilling incidence angle on the drilling force distribution of pneumatic impactor // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 2098.
3. Numerical Analysis and Experimental Research on the Impact Characteristics of Hydraulic Impact Hammers Based on Stress Wave Theory // *Results in Engineering*. 2026. Vol. 29. Article 109155.
4. Жуков И.А., Молчанов В.В. Rational Designing Two-Stage Anvil Block of Impact Mechanisms // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1040. P. 699–702.
5. Дворников Л.Т., Жуков И.А. Продольный удар полукатеноидальным бойком. — Новокузнецк: СибГИУ, 2006. — 79 с.
6. Жуков И.А., Дворников Л.Т. Анализ форм бойков ударных систем графоаналитическим методом // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2009. № 1. С. 15–19.
7. Аннакулов Т.Ж., Отажонов Б.О. Конструктивное развитие ударно-поворотных буровых пневматических перфораторов и анализ процессов совершенствования их поршне-ударного механизма // *Горные машины и технологии*. 2025. № 2(12). С. 15–21.
8. Отажонов Б.О., Аннакулов Т.Ж., Юнусов Ж.Ф. Математическое моделирование и разработка поршней-ударников поликатеноидной формы для пневматических перфораторов с использованием компьютерных программ // *Горные машины и технологии*. 2026. № 1(15). С. 20–26.
9. Annaqulov T.J., Otajonov B.O. Zarbli burg'ilash tizimlaridagi deformatsiyalar tahlili // *Материалы Международной научно-технической конференции «Рациональное использование ресурсов недр на основе применения цифровых технологий и инновационных методов», посвящённой памяти профессора Т.Г. Акбарова*. — Ташкент: ТашГТУ, 2026. — С. 404–407.
10. Отажонов Б.О., Симакина А.С. Причины вибрации ручных пневматических перфораторов и способы борьбы с ней // *Роль интеллектуальной молодежи в развитии промышленных и технологических инноваций: материалы международной научно-практической конференции*. — Ташкент: ТашГТУ, 2025. — С. 625–631.
11. Аннакулов Т.Ж., Отажонов Б.О., Юнусов Ж.Ф. Исследование деформационных процессов при передаче энергии в ударной системе пневматических перфораторов // *Кончилик машиналари ва технологиялари*. 2026. № 2(16). DOI: 10.5281/zenodo.21590356.
12. Wang J., Yan H., Zhang X., et al. Optimal Clearance Design Between Impact Piston and Cylinder of Dual-Chamber Controlled Hydraulic Rock Drill // *Chinese Hydraulics & Pneumatics*. 2025.
13. Liu L., Zhou J., Kong L., et al. Analysis of the Dynamic Response and Impact Parameters of Pneumatic Down-the-Hole Hammer Drilling Rescue Holes // *Geoenery Science and Engineering*. 2023.
14. Zheng Y., Su Z., Li J., et al. Energy Transfer Efficiency and Rock Damage Characteristics of Hydraulic Impact Hammer with Different Tool Shapes // *International Journal of Impact Engineering*. 2024.
15. Correlation of Damage in Rocks Dynamically Loaded by Percussive Tools Using Piston Coefficient of Restitution // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2025.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Annakulov Tulkin Jovbekovich	— PhD, Associate professor of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan E-mail: a.tulkin1275@yandex.ru ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3106-144X ,
Otajonov Bahrom Otaboevich	— Senior lecturer of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan. E-mail: bahrom9097@yandex.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8871-7724
Yunusov Jasurbek Farxod o'g'li	— Assistant of the department of Mining Electromechanics; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Uzbekistan E-mail: jasurbekyunusov@tdtu.uz ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-5126-0059