

УДК 621.878 622.23.05

DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-17-25

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВОГО И ГОРНОГО МАССИВА****FACTORS AFFECTING THE PROCESS OF SOIL AND ROCK MASSIF DESTRUCTION**

**Ю. А. Геллер**, Забайкальский государственный университет, г. Чита  
gelleryua@gmail.com

**Yu. Geller**, Transbaikal State University, Chita



**Р**абота посвящена анализу процесса ударного разрушения прочных и мёрзлых грунтов, горных пород. Представлена классификация факторов, влияющих на энергоэффективность ведения земляных и горных работ. Основное внимание при исследовании уделено анализу разрушения массива одиночными и сдвоенными ударными инструментами. Рассмотрены схемы развития деформаций в массиве в результате воздействия на него одним или двумя инденторами при ударном воздействии. Поэтапно рассмотрены схемы развития фаз разрушения грунтового и горного массива, как при одиночном, так и спаренном воздействии ударных инструментов. Отмечено, что при воздействии на разрушаемую среду сдвоенным ударным инструментом эффективность разрушения массива повышается благодаря интенсивному образованию общего поля напряжений, заключённому между инденторами, что приводит к образованию в этой зоне ядра уплотнения с последующим разрушением монолита. Установлено, что оптимальное расстояние между инденторами, работающими в паре, есть величина постоянная для каждой породы и не зависит от диаметра индентора. Представлены схемы распространения динамических нагрузок от источников к оператору при жёсткой связи рабочего органа и рабочим органом, снабжённым дополнительной связью. Анализ разрушения массива ударными инструментами позволил предложить конструктивные решения исполнительных органов землеройных машин, обеспечивающих перераспределение реактивных сил, возникающих при ударном воздействии, в зону разрушения грунтового или горного массива, что значительно снижает воздействие динамических нагрузок на базовую машину и оператора. На примере рыхлителя ударного действия с балансировочным грузом представлена аналитическая зависимость, при которой энергия удара перераспределяется в зону разрушения массива

**Ключевые слова:** энергоэффективность; динамическое нагружение; дополнительная связь; грунтовый массив; четырёхфазная среда; упругие деформации; ядро уплотнения; предельное напряжённое состояние; фазы разрушения; индентор; взаимное влияние

**T**he article is devoted to the analysis of the process of impact destruction of solid and frozen soils and rocks. The classification of factors influencing the energy efficiency of excavation and mining is presented. The main attention in the study is paid to the analysis of rock mass destruction by single and double percussion tools. The schemes of the deformations development in the massif as a result of the impact on it with one or two indenters under impact action are considered. The schemes of the destruction phases' development of soil and rock massif, both with single and paired impact of percussion instruments, are considered step by step. It is noted that when a double percussion tool is applied to a destructible medium, the efficiency of rock mass destruction increases due to the intensive formation of a general stress field between the indenters, which leads to the formation of a compaction core in this zone with the subsequent destruction of the monolith. It was found that the optimal distance between indenters operating in pairs is a constant value for each rock and does not depend on the indenter diameter. The schemes of dynamic loads propagation from the sources to the operator with the rigid connection of the working body and the working body equipped with an additional connection are presented. Analysis of rock mass destruction by percussion tools made it possible to propose constructive solutions for the

executive bodies of earth-moving machines that ensure the redistribution of the reactive forces arising from the impact into the zone of destruction of the soil or rock mass, which significantly reduces the effect of dynamic loads on the base machine and the operator. On the example of a percussion ripper with a balancing weight, an analytical dependence is presented in which the impact energy is redistributed to the zone of destruction of the massif

**Key words:** energy efficiency; dynamic loading; additional connection; soil massif; four-phase medium; elastic deformations; compaction core; ultimate stress state; fracture phases; indenter, mutual influence

**В**ведение. Одним из направлений повышения эффективности ведения земляных и горных работ является интенсификация рабочих процессов, которая невозможна без изучения механизма разрушения грунтового или горного массива. Это вызвано динамическим характером взаимодействия рыхлительного оборудования с разрушаемой средой.

**Актуальность.** При разработке горных пород, прочных и мёрзлых грунтов, вскрытии дорожного полотна, разрушении бетонных конструкций широко используются технические системы технологического назначения с активным приводом исполнительного органа. Энергоэффективность такого оборудования зависит от множества факторов, анализ которых необходим для оптимизации параметров динамического нагружения как самого оборудования, так и исполнительного органа, участвующего в непосредственном контакте с внешней средой.

**Объект исследования** – грунтовой и горный массив.

**Предмет исследования** – факторы, способствующие развитию деформаций при взаимодействии с ударным инструментом.

**Цель исследования** – систематизация и синтез информации в области взаимодействия разрушающего инструмента ударного действия с прочным или мёрзлым грунтом, горной породой с целью создания энергоэффективных машин технологического назначения.

**Задачи исследования.**

1. Обобщить и систематизировать данные, влияющие на энергоэффективность разрушения грунтового или горного массива рабочим инструментом ударного действия.

2. Провести анализ схем развития деформаций грунтового или горного массива при воздействии на него ударным инструментом.

3. Установить схемы передачи динамических нагрузок при взаимодействии удар-

ного инструмента с грунтовым или горным массивом.

4. Предложить конструктивные решения рыхлительного оборудования ударного действия, обеспечивающего перераспределение динамических нагрузок в зону разрушения массива.

**Способы аргументации** – сравнительная оценка эффективности разрушения грунтового или горного массива одиночным и спаренным инструментами ударного действия

**Методология** базируется на комплексном и системном подходах к объекту исследования как сложной среде, развитие деформаций в которой зависит от физико-механических свойств среды, технологических и конструктивных факторов, влияющих на энергоэффективность процесса ведения земляных и горных работ.

**Методы исследования.** Основным методом исследования является анализ и систематизация знаний в области описания процесса взаимодействия разрушающего инструмента с грунтовым или горным массивом.

**Разработанность темы.** Динамические процессы, происходящие в зоне контакта разрушающего инструмента с грунтовым или горным массивом, привлекали внимание многих учёных. Фундаментальные результаты по решению этих вопросов достигнуты М. М. Крыловым, А. А. Дубровским, Н. Д. Лучинским, Д. Д. Барканом и др.

Разработка и внедрение новых машин, дающих возможность использовать энергию отдачи, возникающую при воздействии разрушающего инструмента на разрушаемый массив, является одним из направлений повышения энергоэффективности при подготовке прочного грунтового или горного массива перед его выработкой. В этих условиях снижается вибрационная нагруженность базовой машины, улучшаются условия труда оператора, снижается риск появления профзаболеваний, что повышает произво-

дительность труда. Отсутствие научных рекомендаций, конструкторской проработки, экспериментальных исследований создаёт определённые проблемы по их широкому использованию в дорожном, строительном и горном деле.

*Результаты исследования и их обсуждение.* Исследование направлено на изучение факторов, влияющих на энергоэффективность процесса разрушения грунтового или горного массива при воздействии на него одиночным или спаренным разрушающими инструментами. Определена схема расположения разрушающих инструментов, при которой инструменты должны располагать-

ся попарно. Предложены конструктивные решения рабочего оборудования, которые, благодаря своей компоновке, способствуют не только увеличению объёма разрушаемого массива за один цикл, но и перераспределению динамических нагрузок в зону разрушения массива.

При взаимодействии ударного инструмента с грунтовым или горным массивом, факторы, влияющие на эффективность процесса разрушения, можно разделить на три группы: физико-механические свойства среды, технологические и конструктивные. Развёрнутая схема факторов представлена на рис. 1.



Рис. 1. Факторы, определяющие энергоэффективность ударного разрушения /  
Fig. 1. Factors determining the energy efficiency of impact failure

Грунтовой массив, подвергаемый воздействию внешних нагрузок, можно рассматривать как четырёхфазную среду, включающую:

- твёрдые минеральные частицы;
- лёд, цементирующий массив;
- незамёрзшие и прочно связанные воды;
- газообразную среду, заполняющую полости.

Энергия удара в области контакта одиночного инструмента с прочным или мёрзлым грунтом приводит к смятию прилегающей области. Дальнейшее внедрение инструмента в массив сопровождается разрушением последнего с образованием уплотненного ядра и интенсивным вытеснением разрушаемого материала на дневную поверхность [2].

Схема развития деформаций и перемещения грунта представлена на рис. 2.

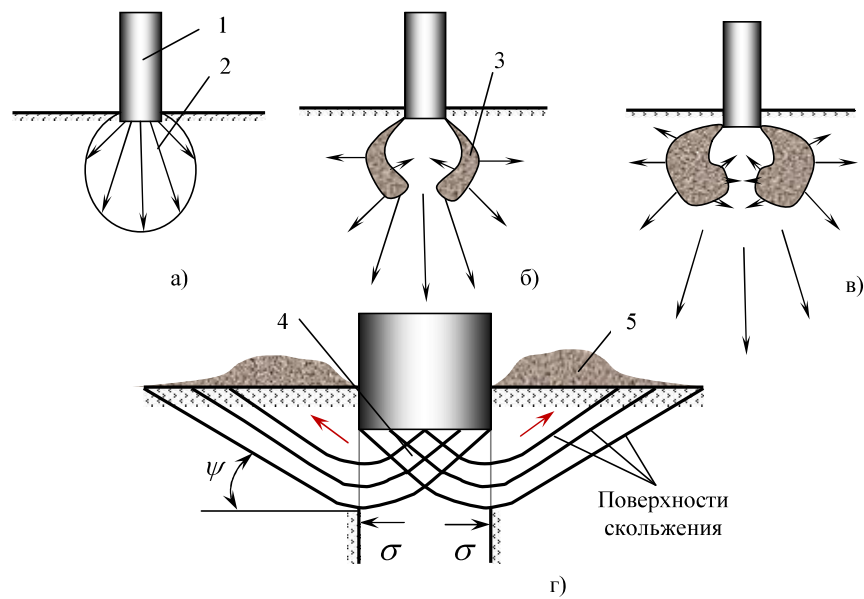


Рис. 2. Схема развития фаз: а) фаза упругих деформаций; б) фаза уплотнения и местных сдвигов; в) фаза развития сдвигов и начала бокового уплотнения; г) фаза образования уплотнённого ядра и вытеснение разрушаемого материала на дневную поверхность: 1 – индентор; 2 – зона упругих деформаций; 3 – зона сдвиговых деформаций; 4 – ядро уплотнения; 5 – вынос раздробленного грунта / Fig. 2. The phase development scheme is (a) the phase of elastic deformations; (b) the phase of compaction and local shifts; (c) the phase of development of shifts and the beginning of lateral compaction; (d) the phase of formation of the compacted core and the wiping of the destroyed material onto the day surface: 1 – indenter; 2 – zone of elastic deformations; 3 – zone of shear deformations; 4 – compaction core; 5 – removal of crushed soil

При ударном воздействии одиночного индентора на твёрдый горный массив разрушение, в первую очередь, сопровождается образованием на поверхности круговых трещин [8]. Впоследствии трещины распространяются вглубь массива, образуя поверхности в форме усечённого конуса. В этот момент начинает формироваться ядро уплотнения, вызванное возникновением предельных упругих деформаций. При достижении нагрузок, превышающих допустимые, происходит выкол породы с выбросом раздробленного материала на поверхность. Фазы разрушения породы представлены на рис. 3.

Эффективность разрушения массива повышается при внедрении в разрушаемую среду одновременно двух инденторов с соблюдением расчётного расстояния между ними [1; 4; 9]. В образованном общем поле напряжений происходит интенсивное развитие конусных трещин [4]. Это, в свою очередь, приводит к скалыванию монолита, заключённого между инденторами. Эксперименты, проводимые Л. И. Бароном, Л. Б. Гал-

тманом и Ю. Н. Козловым [3] по вдавливанию одиночных и сдвоенных инденторов, позволили установить снижение усилия вдавливания на 45 % в сравнении с вдавливанием одиночного индентора. Установлено, что оптимальное расстояние между сдвоенными инденторами есть величина постоянная для каждой породы и не зависит от диаметра индентора. Значимость эффекта спаренных инденторов при разрушении породы подтверждается в работах учёных [5–7; 10; 12] (рис. 4).

Важным фактором при ведении земляных и горных работ техническими системами с активным приводом исполнительного инструмента является динамика процесса. При традиционном приводе исполнительного органа ударного действия динамические нагрузки передаются на ударный инструмент и корпус, например, отбойного молотка или базовую машину. Возникающие реактивные силы циклического действия приводят к преждевременному выводу деталей и узлов машины. Вибрация оказывает негативное

воздействие на здоровье оператора и при превышении допустимого уровня амплитудно-частотных значений приводит к необратимым процессам в организме человека,

приводящим к инвалидности. Схема распространения динамических нагрузок на примере навесного оборудования, монтируемого на базовой машине, представлена на рис. 5.

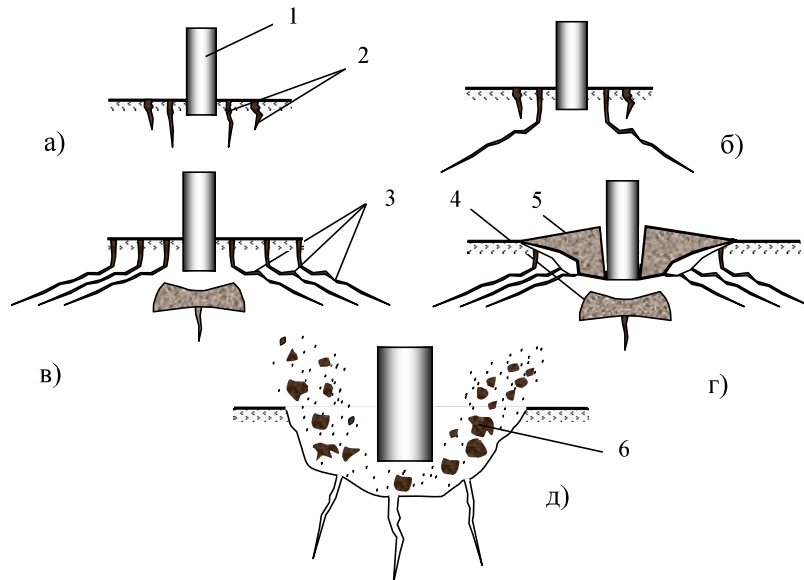


Рис. 3. Схема развития фаз: а) фаза начального разрушения породы; б) фаза развития конических трещин вглубь массива; в) фаза формирования ядра уплотнения; г) фаза откола консольной части разрушаемого материала на дневную поверхность; д) фаза выкола породы и формирования лунки:

1 – индентор; 2 – круговые трещины; 3 – конические трещины; 4 – ядро уплотнения; 5 – выкол консольной части породы; 6 – вынос раздробленной породы на поверхность /

Fig. 3. The phase development scheme is (a) the phase of initial rock destruction; (b) the phase of development of conical cracks deep into the massif; (c) the phase of formation of the compaction core; (d) the phase of breakaway of the cantilever part of the material to be destroyed to the day surface; (e) the phase of rock punching and well formation: 1 – indenter; 2 – circular cracks; 3 – conical cracks; 4 – compaction core; 5 – puncture of cantilever part of rock; 6 shows the removal of the fractured rock to the surface

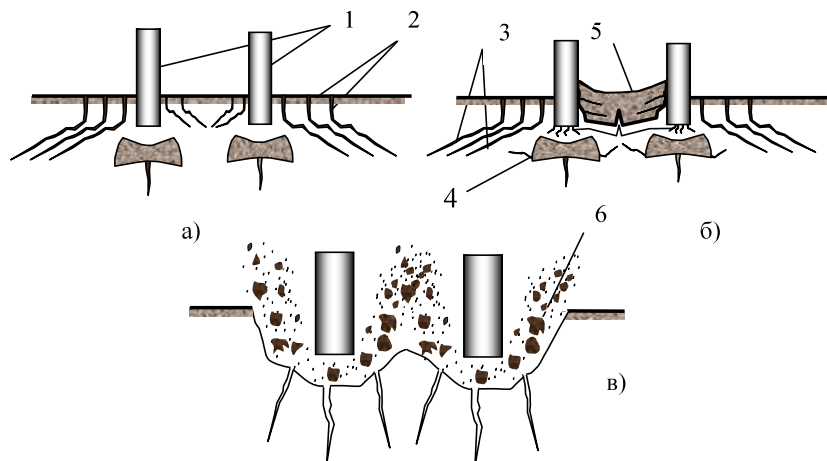


Рис. 4. Схема развития фаз сближенных инденторов: а) фаза формирования ядер уплотнения; б) фаза откола монолита между инденторами; в) фаза выкола породы и формирования лунки: 1 – индентор; 2 – круговые трещины; 3 – конические трещины; 4 – ядро уплотнения; 5 – выкол породы между инденторами; 6 – вынос раздробленной породы на поверхность / Fig. 4. The scheme of development of phases of close indentors is (a) the phase of formation of compaction nuclei; (b) the phase of breakaway of the monolith between indentors; (c) the phase of rock puncture and well formation: 1 – indenter; 2 – circular cracks; 3 – conical cracks; 4 – compaction core; 5 – rock puncture between indentors; 6 – shows the removal of the fractured rock to the surface

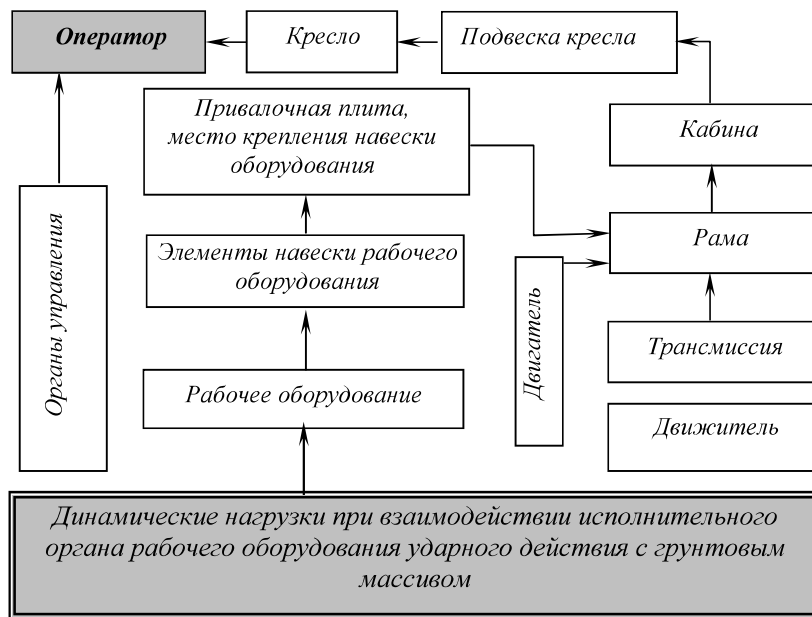


Рис. 5. Сема распространения динамических нагрузок от источников к оператору при жёсткой связи рабочего органа / Fig. 5. Diagram of dynamic loads propagation from sources to the operator at rigid communication of the working element

При введении в кинематическую цепь привода исполнительного органа дополнительных связей появляется возможность перераспределения энергии отдачи в зону

разрушения массива [11]. Схема распространения динамических нагрузок на примере навесного оборудования ударного действия представлена на рис. 6.

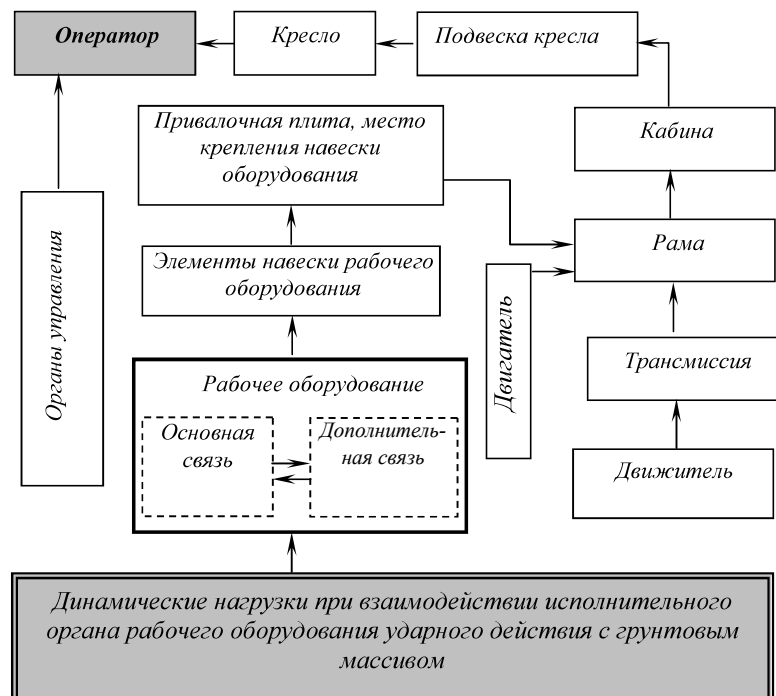


Рис. 6. Схема распространения динамических нагрузок от источников к оператору при воздействии на разрушаемую среду активным рабочим органом с наличием дополнительной связи / Fig. 6. Diagram of dynamic loads propagation from point-to-operator under action on the destroyed medium by active working element with additional communication

Примером конструктивных решений использования дополнительных связей могут служить схемы рыхлительного оборудования ударного действия, представленные на рис. 7 [11].

Дополнительная связь, используемая в рыхлительном оборудовании ударного действия, обеспечивает создание концентраторов напряжения в массиве, расположенном между стойками. Кроме того, такое конструктивное решение защищает техническую систему и оператора от воздействия реактивных сил, возникающих в зоне контакта инструмента с массивом. Например, в рыхлителе ударного действия с балансировочным грузом снижение реактивных сил, передаваемых на корпус базовой машины, обеспечивается расположением пневмо-гидромола и

балансировочного груза на балке с соблюдением условия [11]:

где  $L$  – расстояние от центра вращения балки до оси симметрии пневмомола;

$J_{o1}$  – момент инерции балки относительно оси вращения;

$J_{o2}$  – момент инерции балансировочного груза относительно оси вращения;

$J_{c3}$  – момент инерции пневмомола относительно центра масс;

$m_1$  – масса балки;

$m_2$  – масса балансировочного груза;

$l_{c1}$  – расстояние от оси вращения до центра масс балки;

$l_{c2}$  – расстояние от оси вращения балки до центра масс балансировочного груза.

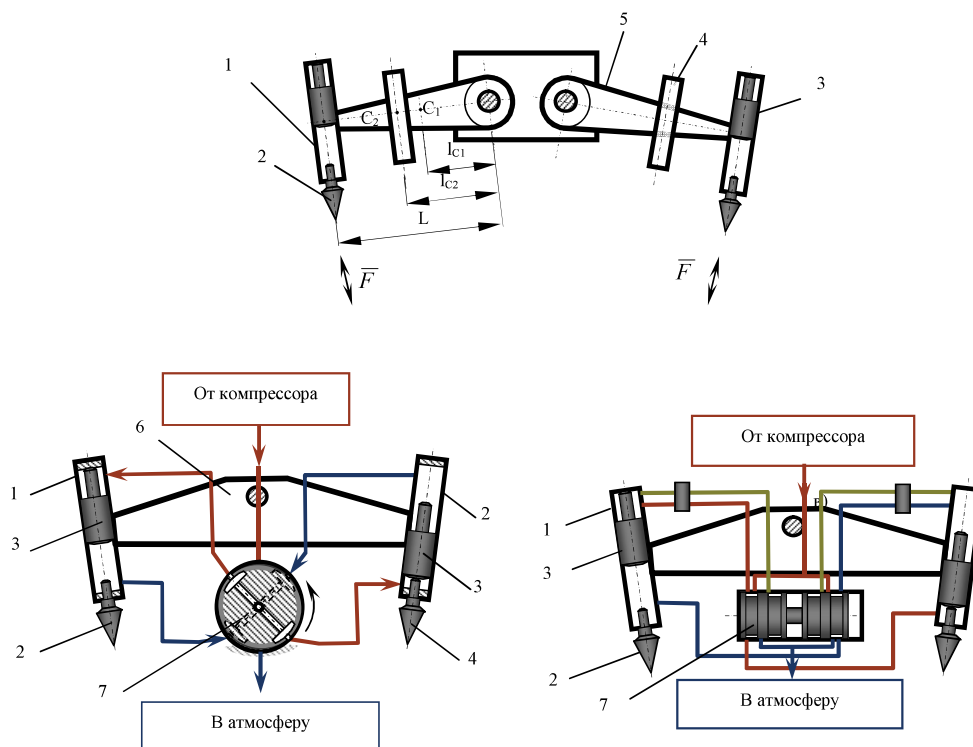


Рис. 7. Рыхлители ударного действия с рабочим оборудованием, имеющие дополнительную связь: а) с балансировочным грузом; б; в) с дополнительным пневмо-гидромолом:

1 – пневмо-гидромолот; 2 – зуб; 3 – поршень-боёк; 4 – балансировочный груз; 5 – балка; 6 – равноплечный рычаг; 7 – распределитель подачи воздуха или жидкости (Пат. № 2380489, Пат. № 2372447, А.с. № 889805) / Fig. 7. Impact rippers with operating equipment having additional communication: a) with balancing load, (b, c) with additional pneumatic-hydraulic hammer: 1 – pneumatic-hydraulic hammer; 2 – tooth; 3 – piston-striker; 4 – balancing load; 5 – beam; 6 – equal-arm lever; 7 – air or liquid supply distributor (Patent. 2380489, Patent. No. 2372447, copyright certificate No. 889805)

**Заключение.** Обобщая результаты анализа, можно сказать: как для прочных и мёрзлых грунтов, так и крепких пород внедрение ударного инструмента в массив приводит к образованию ядра уплотнения и последующему вытеснению разрушаемого материала на дневную поверхность. Удельные затраты энергии снижаются при одновременном воздействии двух ударных инструментов за счёт увеличения объёма разрушаемого материала в области, расположенной между

разрушающими инструментами. Введение дополнительных связей в кинематическую цепь исполнительного оборудования машин для ведения земляных и горных работ обеспечивает перераспределение динамических нагрузок в зону разрушаемого массива, способствует снижению энергоёмкости ведения земляных и горных работ и защите оператора и базовой машины от вибрационных нагрузок.

### Список литературы

1. Арцимович Г. В. Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. Новосибирск: Наука, 1985. 286 с.
2. Бабенков И. С., Иванов К. И., Хесин Г. Л. Исследование взаимодействия бурового инструмента и породы методом фотоупругости. М.: Изд-во Недр, 1970. 128 с.
3. Барон Л. И., Глатман Л. Б., Козлов Ю. Н. Об эффекте совместности при разрушении горных пород групповым инструментом // Физика горных пород и процессов. М.: Недр, 1971. С. 215–216.
4. Мавлютов М. Р. Разрушение горных пород при бурении. М.: Недр, 1978. 215 с.
5. Реготунов А. С. К вопросу о разработке рациональных параметров инструментов коронок штыревого типа и его воздействие на породу при бурении взрывных скважин // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 5. С. 37–42.
6. Смоляницкий Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяжных скважин в природных массивах. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2013. 204 с.
7. Шадрин А. В., Саруев Л. А. Экспериментальное исследование влияния параметров ударной системы на разрушение гранита // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журн). 2013. № 4. С. 276–280.
8. Шрейнер Л. А. Твердость хрупких тел. М.: Изд. АН СССР, 1949. 144 с.
9. Эйгелес Р. М., Стрекалова Р. В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин. М.: Недр, 1977. 200 с.
10. Dvornikov L. T., Korneyev V. A., Korneyev P. A., Krestovozdvizhensky P. D., Nikitenko S. M. Main development trends and some technical decisions on minig tools equipped with super-hard composite inserts // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, "All-Russian Conference on Challenges for Academician Mikhail Kurlenye". 2017. P. 012031.
11. Geller U.A. Energy-saving class of the machines, which work according to the principle of closing dynamic loads on the loosening equipment // China Science and Technology Review. 2011. Vol. 10. p. 29.
12. Oparin V. N., Timonin V.V., Karpov V. N. Quantitative estimate of rotary-percussion drilling efficiency in rocks // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52, Issue 6. P. 1100–1111.

### References

1. Artsimovich G. V. *Mehanofizicheskiye osnovy sozdaniya porodorazrushayuschego burovogo instrumenta* (Mechanophysical foundations of creating a rock-cutting drilling tool). Novosibirsk: Nauka, 1985, 286 p.
2. Babenkov I. S., Ivanov K. I., Khesin G. L. *Issledovaniye vzaimodeystviya burovogo instrumenta i porody metodom fotouprugost* (Study of the drilling tools and rocks interaction by the method of photoelasticity). Moscow: Nedra Publishing House, 1970. 128 p.
3. Baron L. I., Glatman L. B., Kozlov Yu. N. *Fizika gornyh porod i protsessov* (Physics of rocks and processes). Moscow: Nedra, 1971, pp. 215–216.
4. Mavlyutov M. R. *Razrusheniye gornyh porod pri burenii* (Destruction of rocks during drilling). Moscow: Nedra, 1978, 215 p.
5. Regotunov A. S. *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika* (Mining equipment and electromechanics), 2014, no. 5. pp. 37–42.
6. Smolyanitsky B. N., Repin A. A., Danilov B. B. *Povysheniye effektivnosti i dolgovechnosti impulsnyh mashin dlya sooruzheniya protyazhnykh skvazhin v prirodnykh massivah* (Increase of efficiency and durability of



impulse machines for construction of broaching wells in natural massifs). Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS. 2013, 204 p.

7. Shadrina A. V., Saruyev L. A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauch.-tekhn. zhurn)* (Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)), 2013, no. 4, p. 276–280.

8. Shreyner L.A. *Tverdost hrupkih tel* (The hardness of fragile bodies). Moscow: Ed. AN SSSR, 1949, 144 p.

9. Eygeles R. M., Strekalova R. V. *Raschet i optimizatsiya protsessov bureniya skvazhin* (Calculation and optimization of drilling wells processes). Moscow: Nedra, 1977. 200 p.

10. Dvornikov L. T., Korneyev V. A., Korneyev P. A., Krestovozdvizhensky P.D., Nikitenko S. M. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, "All-Russian Conference on Challenges for Academician Mikhail Kurlenye"* (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, "All-Russian Conference on Challenges for Academician Mikhail Kurlenye"), 2017, p. 012031.

11. Geller U.A. Geller U.A. *China Science and Technology Review* (China Science and Technology Review), 2011, vol. 10. p. 29.

12. Oparin V. N., Timonin V.V., Karpov V. N. *Journal of Mining Science* (Journal of Mining Science), 2016, vol. 52, issue 6, p. 1100–1111.

### Информация об авторе

### Information about the author

Геллер Юрий Александрович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и механики, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: динамика машин и систем машин

gelleryua@gmail.com

Yury Geller, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Strength of Materials and Mechanics department, Transbaikal State University, Chita, Russia. Scientific interests: dynamics of machines and machine systems

### Для цитирования

Геллер Ю. А. Факторы, влияющие на процесс разрушения грунтового и горного массива // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 5. С. 17–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-17-25.

Geller Yu. Factors affecting the process of soil and rock massif destruction // Transbaikal State University Journal, 2021, vol. 27, no. 5, pp. 17–25. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-17-25.

Статья поступила в редакцию: 27.05.2021 г.

Статья принята к публикации: 04.06.2021 г.