

А.Ю. Примычкин

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО КЛАПАНА В ПНЕВМОУДАРНЫХ МАШИНАХ

Аннотация. Описан пример применения кольцевого упругого клапана (КУК) для пневматических ударных машин в качестве запорно-регулирующего элемента. Неоспоримые конструктивные достоинства такого воздухораспределительного устройства — простота и компактность. Важно также, что при малых перемещениях он способен управлять большим проходным сечением. Приведены базовые формулы, определяющие условия открытия и закрытия. Получены выражения, определяющие закономерность изменения сил, действующих в процессе срабатывания. Описываются результаты стендовых и расчетных экспериментов по определению влияния параметров кольцевого упругого клапана на изменение среднего давления в клапанной щели при срабатывании КУК. Полученная информация позволяет уточнить расчетную модель КУК и скорректировать форму поперечного сечения упругого кольца с учетом установленных закономерностей. Результаты физического и математического моделирования в программном продукте ITSimulationX подтверждают адекватность расчетной модели и достоверность найденных экспериментально коэффициентов среднего давления и конфигурации клапанной щели.

Ключевые слова: пневмоударная машина, упругий клапан, система воздухораспределения, математическое моделирование, физическое моделирование.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-156-162

Внимание к кольцевому упругому клапану (КУК) как элементу системы управления автоколебательным режимом работы пневмоударного привода обус-

ловлено его конструктивными достоинствами — простотой, компактностью, высокой пропускной способностью при малом ходе.

Принцип работы клапанного устройства (рис. 1) заключается в перекрытии клапаном 2 кольцевой щели 4 при возникновении перепада давлений $\Delta p = p_1 - p_2$ между камерами А и Б. При $p_1 > p_2$ кольцо 2, преодолевая силы упругости, растягивается и перекрывает клапанную щель 4. При выравнивании давлений p_1 и p_2 кольцо упругого клапана сжимается, и клапанная щель 4 открывается.

Такой клапан хорошо вписывается в конструкцию машины [1–3].

К началу данной работы отсутствовала обоснованная расчетная модель КУК.

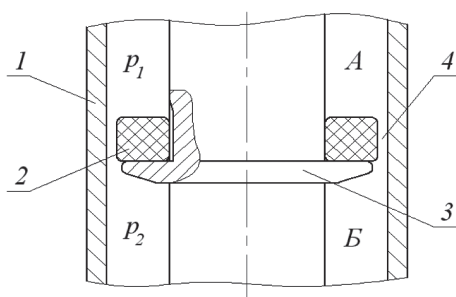


Рис. 1. Схема клапанного устройства: 1 — цилиндр; 2 — упругий клапан; 3 — оправка; 4 — клапанная щель

Fig. 1. Valve schematic: 1—cylinder; 2—elastic valve; 3—workholder; 4—valve port

Это являлось препятствием для правильного выбора его параметров на стадии проектирования и более широкого применения КУК в современных устройствах. Между тем, использование такого клапана при совершенствовании разнообразных пневмоударных машин, эффективно реализующих значимые для производства технологические процессы [4–7], может быть весьма эффективным. В этой связи обоснование расчетной модели кольцевого упругого клапана является актуальным.

В работе [8] рассмотрена задача построения расчетной модели КУК, совместимой с расчетной моделью пневмоударного привода. Специфика в том, что все элементы механической системы привода описываются уравнениями динамики материальной точки, т.е. центров масс подвижных звеньев, тогда как центр масс КУК при его срабатывании остается неподвижным. Разработанная базовая расчетная модель КУК снимает это противоречие и описывает движение с учетом действующих на него сил и основных параметров клапана (масса, упругость, размеры и т.д.).

Согласно ей, уравнение движения клапана с приведенной массой m имеет вид:

$$m\ddot{x} = S_1 p_1 - S_2 p^* - k(x - x_H) - F_T \operatorname{sign} \dot{x}$$

$$m = r_0 s_0 \rho, S_1 = br(1 - Z), S_2 = br(1 + Z),$$

$$k = Es / r, F_T = (p_1 - p_2) r h f, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала клапана; r — средний радиус сечения клапана;

f — коэффициент трения в паре «клапан — опорный бурт»; x_H — предварительный натяг; F_T — сила трения клапана о бурт; $s = bh, Z = h/2r$ — для клапана прямоугольного сечения; $s = \pi r_k^2, Z = \pi r_k/4r$ — для клапана круглого сечения; если КУК полностью открыт, то $x = 0$, если закрыт, то $x = \delta$.

Полученные соотношения соответствуют элементарной механической схеме, изображенной на рис. 2, где клапан представлен подвижной массой m . Ее перемещение обеспечивается безынерционной пружиной с жесткостью k , демпфером с вязкостью μ и двухсторонним пневмоцилиндром с закрывающей рабочей площадью S_1 и открывающей S_2 .

Представленная схематизация кольцевого упругого клапана позволяет встраивать его в расчетную модель пневмоударного привода. Текущее значение координаты x определяет площадь клапанной щели $S(x)$:

$$S(x) = \pi R^2 - \pi[r(1 + Z) + x]^2, \quad (2)$$

где R — радиус цилиндра.

Система уравнений базовой модели (1), дополненная полученными зависимостями [9], отражающими влияние параметров пневмосистемы на величину p^* , позволяет достаточно достоверно описать движение КУК под действием активных сил. Для проверки адекватности разработанной модели КУК и достоверности найденных экспериментально зависимостей были проведены исследования.

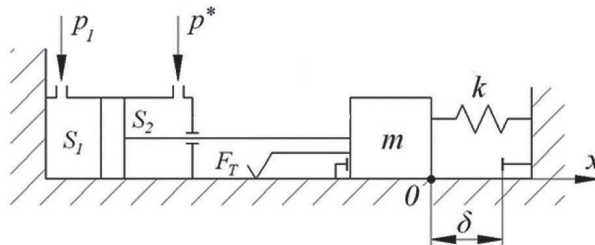


Рис. 2. Расчетная схема упругого клапана

Fig. 2. Design model of elastic valve

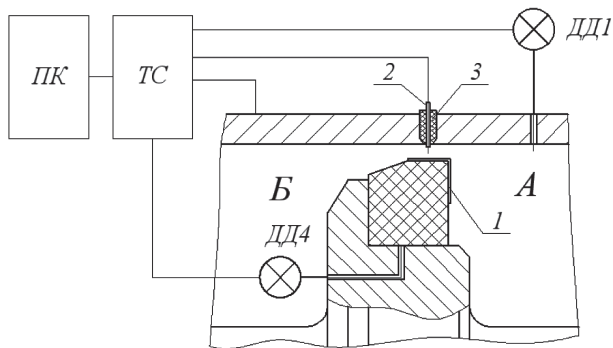


Рис. 3. Схема экспериментальной установки
Fig. 3. Experimental unit schematic

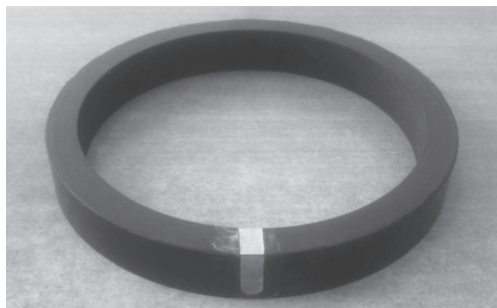


Рис. 4. КУК с наклеенным лепестком из фольги
Fig. 4. REV with pasted foil leaf

Натурный эксперимент проводился на стенде (рис. 3). Устанавливался специальный поршень со ступенькой под КУК (рис. 4).

Давление подавалось в полость Б и КУК работал на закрытие, отсекая вход сжатого воздуха через клапанную щель в полость Б, сообщающуюся с атмосферой. Момент закрытия, т.е. упора растянутого КУК в стенку цилиндра, регистрировался механическим замыканием электрической цепи.

Одним контактом являлась стенка цилиндра, другим — электрод 2, который имел боковую изоляцию 3 и был закреплен в отверстии этой стенки. Электрод выходил во внутреннюю полость цилиндра с выступанием на $\approx 0,2$ мм. Замыкание этих контактов обеспечивалось лепестком тонкой фольги 1, который был наклеен на наружную цилиндрическую поверхность КУК (рис. 4). Момент от-

рыва от поршня регистрировался с помощью датчика давления ДД4 в канале, который был выполнен в поршне и выходил на наружную поверхность ступени, куда с предварительным натягом садился КУК. В момент отрыва клапана от поршня давление в канале повышалось, что и регистрировал датчик. Давление в камере А контролировалось датчиком давления ДД1. Сигналы датчиков обрабатывались тензостанцией ТС и в цифровом виде передавались на ноутбук ПК.

Нулевые показания датчика давления ДД4 с момента начала заполнения камеры вплоть до отрыва КУК от поршня можно объяснить тем, что до подачи сжатого воздуха в камеру упругое кольцо в силу предварительного натяга плотно обжимает поршень и в податливый материал кольца вдавливается кромка входного отверстия канала в поршне, связывающего его поверхность с рабочей полостью датчика. Вдавливание кромки отсекает эту полость от микрощели между КУК и поршнем. Так в полости «консервируется» атмосферное давление. «Откупоривание» полости происходит лишь в момент, когда нарастающее давление в микрощели между КУК и поршнем станет достаточным для отрыва клапана от поршня.

Вычислительный эксперимент [10, 11] выполнялся в программе ITI SimulationX. Схема для расчета показана на

рис. 5. КУК, цель которого моделирует переменным дросселем (throttle4), установлен на выходе из камеры постоянного объема (volume4). Зафиксированы начало процесса заполнения камеры сжатым воздухом и момент запираания клапаном выхода из нее в атмосферу.

На рис. 6 представлены реальные и вычислительные осциллограммы срабатывания КУК. Осциллограммы иллюстрируют приемлемое совпадение расчетного и реального значений давления начала закрытия КУК, момента окончания его движения, а также длительности процесса (расхождение менее 2%). На графиках перемещения и скорости КУК видно, что с середины пути перемещение клапана замедляется и скорость его посадки в момент полного запираания канала вдвое меньше максимальной, наблюдаемой в середине хода, что от-

ражает присутствие отрицательной обратной связи, влияющей на характер взаимодействия движущих сил, описываемых расчетной моделью [9].

В приведенном примере рассматривался весь процесс движения клапана начиная с его отрыва от поршня и заканчивая упором в стенку цилиндра. Ввиду малой массы КУК и больших значений действующих на него активных сил длительность процесса срабатывания КУК составляет миллисекунды. По сравнению с длительностью рабочего цикла пневмоударной машины срабатывание клапана происходит почти мгновенно. Поэтому для практических целей во многих случаях можно не рассматривать весь процесс перемещения клапана детально. При проектировании машин достаточно рассчитать параметры клапана, обеспечивающие начало его срабатывания на открытии и на закры-

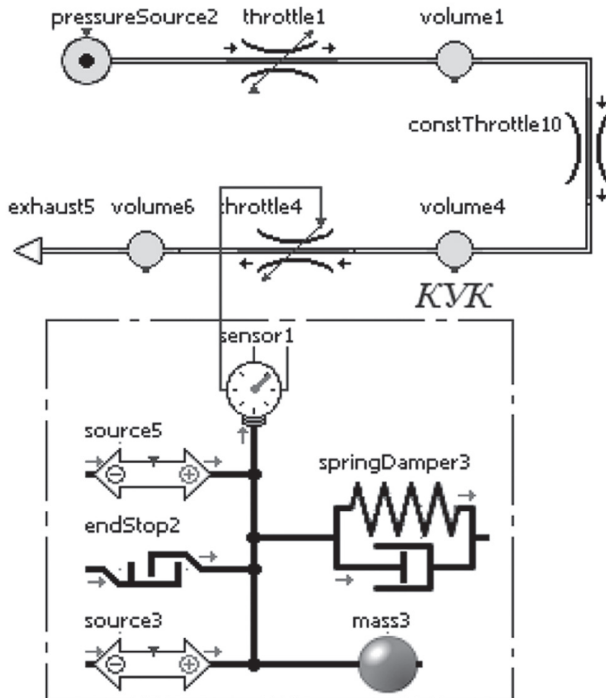


Рис. 5. Схема эксперимента в программе ITISimulationX
Fig. 5. Scheme of experiment in ITISimulationX environment

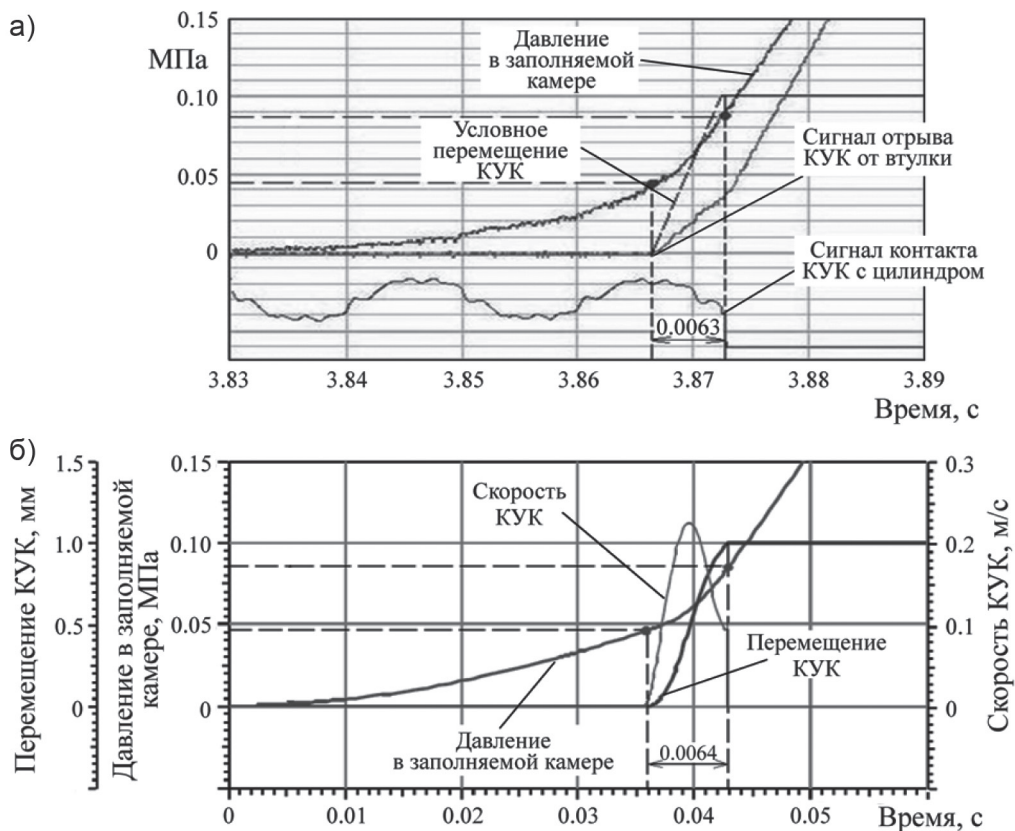


Рис. 6. Экспериментальная (а) и вычислительная (б) осциллограммы, отражающие процесс закрытия КУК

Fig. 6. Experimental (a) and calculated (b) oscillograms of REV closure process

тие при требуемых для данного случая значениях давлений p_1 и p_2 в рабочих камерах по обе стороны КУК, опуская сам процесс перемещения, и считая переброску КУК мгновенной [12].

На основании разработанной модели упругого клапана с учетом полученных экспериментально зависимостей была разработана методика расчета КУК. Исходными данными являются требуемые давления срабатывания. Результатом являются геометрические параметры упругого кольца и клапанного устройства.

Выводы

Кольцевой упругий клапан, все точки которого при срабатывании перемеща-

ются радиально относительно его оси, может быть представлен в расчетной модели пневмоударного привода в виде динамически эквивалентного одномассового блока, включающего упругий элемент, результирующую сил давления сжатого воздуха, действующего на наружную и внутреннюю поверхности, а также силы трения.

Длительность срабатывания КУК составляет 1...5 мс, что занимает 1...3% от продолжительности рабочего цикла пневмоударной машины. Во многих случаях для практических целей можно не рассматривать процесс движения и считать, что переброска клапана происходит мгновенно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаун В.А. А.с. 848615 СССР. Пневматический ударный механизм. Оpubл. в БИ. 1981. № 27.
2. Червов В.В., Трубицын В.В., Смоляницкий Б.Н., Вебер И.Э. Патент 2105881 РФ. Устройство ударного действия. Оpubл. в БИ. 1998. № 6.
3. Патент 2232242 РФ. Пневматическое ударное устройство. Патентообладатель ООО НПО «Грундомаш», СПб. Оpubл. в БИ. 2004. № 19.
4. Cao P. L., Chen, Y.W., Liu M. M., Chen B. Y., Wang J. S. Analytical and experimental study of a reverse circulation drill bit with an annular slit // *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 7. No 9. pp. 1203–1211.
5. Кондратенко А.С., Тимонин В.В., Патутин А.В. Перспективы направленного бурения прочных горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 1. — С. 124–131
6. Тимонин В.В., Кондратенко А.С. О коэффициенте полезного действия погружных пневмоударников // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2014. — № 1. — С. 182–185.
7. Тимонин В.В., Карпов В.Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — С. 172–176.
8. Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Влияние типа системы воздухораспределения на энергетические показатели пневмоударного узла кольцевой ударной машины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 3. — С. 117–123.
9. Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Работа кольцевого упругого клапана в пневмоударном приводе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 1.
10. Fuertes-Miquel V. S., Lopez-Jimenez P. A., Martinez-Solano F. J., Lopez-Patino, G. Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 43. No 12. pp. 1052–1061.
11. Liu Q. Y., Tang Y., Wang D. G., Xie C. Numerical simulation on the impact dynamics of a novel rotation air hammer and experimental research // *Journal of Vibroengineering*. 2015. Vol. 17. No 5, pp. 2260–2271.
12. Примычкин А.Ю., Кондратенко А.С., Тимонин В.В. Определение параметров системы воздухораспределения с упругим клапаном для погружного пневмоударника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — Т.2. — С. 141–145. **ТИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Примычкин Александр Юрьевич — научный сотрудник, e-mail: 808@nn.ru, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН (ИГДСОРАН).

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 10, pp. 156–162.

Modeling operation of ring-shape elastic valve in pneumatic percussion machines

Primychkin A.Yu., Researcher, e-mail: 808@nn.ru, Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia.

Abstract. The article describes application of ring-shaped elastic valve (REV) as a shut-off and regulating element in pneumatic percussion machines. Undisputable structural advantages of such air-distribution device are simplicity and small size. Furthermore, the valve is capable to control large open flow areas at short displacements. The basic formulas to calculate opening and closure conditions are given. The expressions of variation mechanisms in forces in process of valve actuation are obtained. The results of the benchmark trials and computational experiments aimed to determine effect of REV design on average pressure in valve port upon REV actuation are described. The obtained information allows amending REV design model and adjusting REV sectional shape with regard to the found regularities. The physical simulation and mathematical modeling ITISimulationX environment prove appropriateness of the design model and reliability of experimental factors of average pressure and the valve port geometry.

Key words: pneumatic percussion machine, elastic valve, air distribution system, mathematical modeling, physical simulation.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-156-162

REFERENCES

1. Gaun V. A. *Copyright certificate no 848615 USSR*. Pnevmaticheskiy udarnyy mekhanizm. 1981.
2. Chervov V. V., Trubitsyn V. V., Smolyanitskiy B. N., Veber I. E. *Patent RU 2105881*. 1998.
3. *Patent RU 2232242*. 2004.
4. Cao P. L., Chen, Y. W., Liu M. M., Chen B. Y., Wang J. S. Analytical and experimental study of a reverse circulation drill bit with an annular slit. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 7. No 9. pp. 1203–1211.
5. Kondratenko A. S., Timonin V. V., Patutin A. V. Perspektivy napravlennoy bureniya prochnykh gornykh porod [Prospects of directional drilling in hard rocks]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016, no 1, pp. 124–131. [In Russ].
6. Timonin V. V., Kondratenko A. S. O koeffitsiente poleznogo deystviya pogruznykh pnevmoudarnikov [DTH hammer efficiency]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2014, no 1, pp. 182–185. [In Russ].
7. Timonin V. V., Karpov V. N. Otsenka protsessa razrusheniya gornykh porod pri udarno-vrashchatel'nom burenii skvazhin [Estimation of rock destruction in rotary percussive drilling]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2016, no 3, pp. 172–176. [In Russ].
8. Petreev A. M., Primychkin A. Yu. Vliyaniye tipa sistemy vozdukhoraspredeleniya na energeticheskie pokazateli pnevmoudarnogo uzla kol'tsevoy udarnoy mashiny [Effect of air distribution type on energy characteristics of air percussion assembly of a ring-type percussive machine]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no 3, pp. 117–123. [In Russ].
9. Petreev A. M., Primychkin A. Yu. [Rabota kol'tsevoy uprugogo klapana v pnevmoudarnom privode] [Operation of ring-type elastic valve in air-percussion drive]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016, no 1. [In Russ].
10. Fuertes-Miquel V. S., Lopez-Jimenez P. A., Martinez-Solano F. J., Lopez-Patino, G. Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 43. No 12. pp. 1052–1061.
11. Liu Q. Y., Tang Y., Wang D. G., Xie C. Numerical simulation on the impact dynamics of a novel rotation air hammer and experimental research. *Journal of Vibroengineering*. 2015. Vol. 17. No 5, pp. 2260–2271.
12. Primychkin A. Yu., Kondratenko A. S., Timonin V. V. Opredeleniye parametrov sistemy vozdukhoraspredeleniya s uprugim klapanom dlya pogruzhnogo pnevmoudarnika [Determination of parameters for air distribution system with elastic valve for DTH hammers]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*. 2016, no 3. vol. 2, pp. 141–145. [In Russ].



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТАДИАЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ С ПОСЛЕДУЮЩИМ РАЗРУШЕНИЕМ КУСКОВ ДРОБИМОГО МАТЕРИАЛА В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ КОНУСНОЙ ИНЕРЦИОННОЙ ДРОБИЛКЕ СО СВОБОДНО-ПОВОРОТНЫМ РОТОРОМ

(2018, № 7, СВ 36, 12 с.)

Романова Виктория Сергеевна¹ — аспирант, e-mail: vica_00281@mail.ru,

Габов Виктор Васильевич¹ — доктор технических наук, профессор, e-mail: gv40@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Рассмотрена модель процесса разрушения породы в высокочастотных конусных инерционных дробилках со свободно-поворотным ротором. Учтены отличия анализируемой дробилки: меньшая амплитуда и повышенная частота силовых воздействий на дробимый материал, избирательность и стадийное ослабление с последующим разрушением дробимого материала с поверхности на глубину структурного слоя, а также межстадийный вывод мелких фракций из зоны контактного взаимодействия. Приведены результаты экспериментального исследования разрушения образцов породы на прессе с ограниченным силовым воздействием.

Ключевые слова: порода, дезинтеграция, дробилка, селективность, избирательность, послойное разрушение, моделирование.

MODELING OF THE PROCESS OF STADIAL WEAKENING WITH FUTURE DESTRUCTION OF MATERIALS IN HIGH-FREQUENCY CONE CRUSHER WITH A FREE-TURNING INNER CONE

Romanova V.S.¹, Graduate Student, Gabov V.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

¹ Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

A model of process of rock destruction in high-frequency cone inertial crushers with a free-rotor rotor is considered. Model takes into account the differences of the analyzed crusher in particular smaller amplitude and an increased frequency of force impacts on the crushing material, selectivity and stadal weakening with subsequent destruction of the crushing material from the surface on the depth of the structural layer, as well as interstage withdrawal of fine fractions from the zone of contact interaction. Results of an experimental research of the destruction of rock samples on a press with limited force are given.

Key words: rock, disintegration, crusher, selectivity, discrimination, layer-by-layer destruction, modeling.