УДК 622.831:550.3

Я.О. Куткин, М.Н. Красилов, Р.Р. Насибуллин

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

Проведен обзор работ, посвященных взаимосвязям между акустической добротностью и прочностью горных пород при различных скоростях нагружения. Выявлено, что при динамических нагрузках эти взаимосвязи исследованы недостаточно. Разработана экспериментальная установка, выполненная на базе разрезных стержней Гопкинсона, для изучения взаимосвязи акустических и механических свойств горных пород при импульсных динамических нагружениях. Проведено компьютерное моделирование и представлены результаты прохождения волны сжатия через стержни, изготовленные из горных пород. Проведена оценка увеличения длительности ударного импульса и уменьшения его амплитуды при распространении через нагружной стержень и образец горной породы.

Ключевые слова: горные породы, прочность, акустическая добротность, скорость нагружения, динамическое воздействие, экспериментальная установка, стержени Гопкинсона.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-146-152

Введение

В настоящее время остро стоит вопрос разработки новых методов оперативного контроля прочности массива горных пород вокруг подземных горных выработок и конструктивных элементов систем разработки таких, как целики и кровля. В работах [1, 2, 3, 4, 5] подробно рассмотрены связи кинематических акустических характеристик с деформационными и прочностными свойствами горных пород. В работе [6] показано, что акустическая добротность является более информативной характеристикой по сравнению со скоростями распространения упругих волн при оценке степени поврежденности геоматериала при его разрушении.

Использование акустической добротности в качестве информативного параметра контроля позволяет выявлять процессы разрушения на их ранних стадиях, неразличимые по кинематическим характеристикам — скоростям продольных и поперечных упругих волн. Это подтверждается работами других исследователей [7]. В работах [8, 9, 10] приведены результаты экспериментальных исследований взаимосвязей акустической добротности и прочности горных пород различного генезиса при многоцикловых механических усталостных испытаниях.

В проведенных исследованиях использовались сравнительно низкие скорости нагружений. В то же время известно, что свойства горных пород изменяются при различных скоростях нагружений [11, 12, 13]. Многие связи между свойствами горных пород при динамических

* Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Фонда поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие» в рамках научного проекта № 17-35-80028 «мол_эв_а».

© Я.О. Куткин, М.Н. Красилов, Р.Р. Насибуллин. 2017.

нагрузках достаточно хорошо исследованы, однако, взаимосвязи акустической добротности с прочностью горных пород при данном виде нагружения, по имеющимся данным, исследованы недостаточно. Целью данной работы является исследование указанных зависимостей при динамических воздействиях на образцы горных пород. Для этого в работе предполагается на основании последующих экспериментов получить зависимости между прочностью и акустической добротностью при динамических нагружениях и сравнить их с аналогичными, полученными при статическом нагружении.

Для изучения взаимосвязи акустических и механических свойств горных пород при больших скоростях нагружения была сконструирована установка, предложенная в работе [14]. В работе [15] описывается суть метода и конструкция установки, которая основана на разрезных стержнях Гопкинсона.

Конструкция установки и анализ волновых процессов в ней

Экспериментальная установка состоит из трех основных узлов. Первый узел — это гранитный ударник с пневматическим цилиндром, управляемым ручным пневмоклапаном. Второй узел состоит из двух гранитных стержней, между которыми закрепляется образец горной породы. Третий узел включает в себя тензорезисторы, соединенные в мостовую схему, которые крепятся к стержням в трех точках, и регистрирующую аппаратуру.

Перед разработкой конструкции для выбора оптимального размера ударника в среде Comsol Multuphysics было проведено компьютерное моделирование динамического воздействия ударника на стержни. Была построена 3D модель ударника и стержней с закрепленным между ними образцом горной породы. На рис. 1 показаны результаты моделирования в виде форм ударных импульсов при длине ударника 200, 300 и 400 мм. Как видно из графиков, чем больше длина ударника, тем больше длительность импульса и выше амплитуда импульса. Выбор длины ударника аргументировался тем, чтобы длительность импульса была максимально короткой, но при уменьшении длины ударника до 200 мм энергия удара становится довольно низкой, поэтому было принято решение использовать ударник длиной 300 мм.

При данной длине ударника длительность импульса остается достаточно ко-

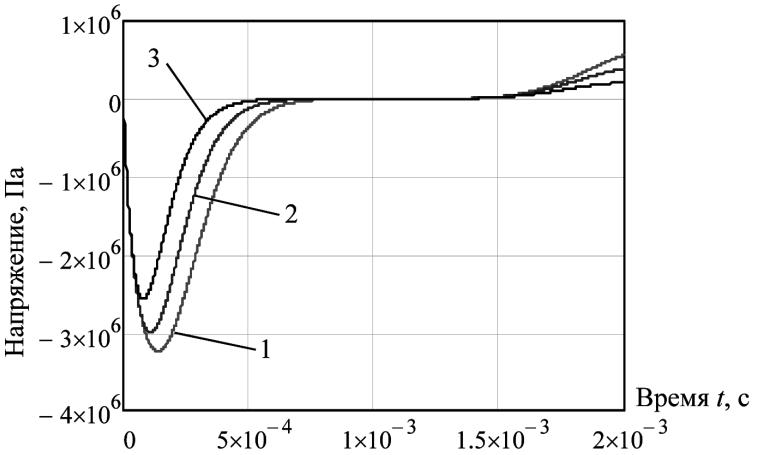

Рис. 1. Формы ударных импульсов при различной длине ударника: 1—400 мм; 2—300 мм; 3—200 мм

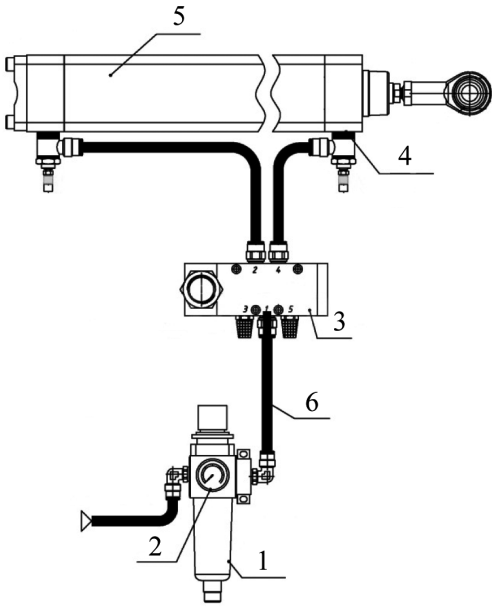

Рис. 2. Пневматическая схема с ручным управлением пневмоклапаном: 1 — фильтр-регулятор MC202-D00; 2 — манометр M043-P12; 3 — распределитель 452C-910; 4 — клапан быстрого выхлопа VSC 544-1/4; 5 — пневмоцилиндр 40M2L050A0210; 6 — полиамидная пневмотрубка RILSAN 12/10

роткой, а амплитуда импульса и энергия удара снижаются незначительно.

В нашем случае стрежни выполнены из магматической горной породы — гранита. Это необходимо для того, чтобы уменьшить потери от отражений на контакте стержня и образца породы, так они будут иметь близкие волновые сопротивления, как это выполнено в работе [16].

Ударник представляет собой гранитный стержень с размерами 50×50×300 мм и массой 2 кг. Его функция состоит в том, чтобы совершать ударные воздействия на стержни. Для того чтобы создать достаточное воздействие, скорость, с которой должен двигаться ударник, должна быть примерно равной 1 м/с и не меняться от эксперимента к эксперименту. Поэтому было принято решение использовать пневматическую схему управления ударником.

На рис. 2 представлена схема управления ударником с ручным пневмоклапаном. Воздух из компрессора поступает в фильтр-регулятор *1*, где происходит его необходимая подготовка и с его помощью регулируется давление в системе. Контроль давления воздуха, поступающего в систему, осуществляется с помощью манометра *2*. Подготовленный воздух из фильтра-регулятора поступает в ручной распределитель *3*. В свою очередь распределитель направляет воздух к клапанам быстрого выхлопа *4*. В зависимости от положения ручки на распределителе система либо выдвигает, либо втягивает шток пневмоцилиндра *5*. Все части пневмосистемы соединены между собой полиамидными пневмотрубками *6*.

Теоретические расчеты показывают, что данная схема позволяет выдвинуть шток пневмоцилиндра с диаметром поршня 50 мм на 210 мм за 0,2—0,25 с при условиях, что используется пневмотрубка внутренним диаметром 10 мм и масса перемещаемого груза должна быть до 20 кг. Принимая во внимание то, что масса ударника намного меньше заявленной и составляет всего 2 кг, можно предположить, что ударник сможет развивать необходимую скорость для совершения удара. Расчет в соответствии с [17] показал, что при данных параметрах энергия удара будет близка к 1 Дж.

Внешний вид установки представлен на рис. 3. В установке, в качестве передающей ударную волну от ударника среды используются два гранитных стержня: нагружной *1* и опорный *2*, размерами 50×50×1500 мм. Между торцами этих стержней закрепляется образец горной породы *3*. Размеры гранитных стержней обусловлены тем, что при прохождении ударной волны через них, фронт этой волны максимально приближался к плоскому.

Стержни и ударник *4* закреплены на двутавре *5* с помощью опор из алюми-

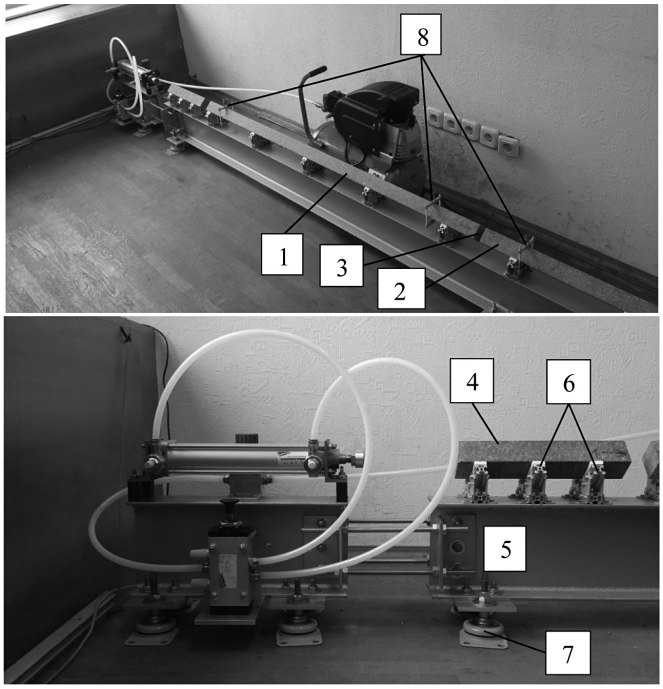

Рис. 3. Внешний вид установки: 1 — нагружной гранитный стержень; 2 — опорный гранитный стержень 3 — образец горной породы; 4 — ударник; 5 — двутавр; 6 — опоры из алюминиевого профиля; 5 — регулируемая виброопора ОВ 70; 8 — тензорезисторы

ниевого профиля с антифрикционными вставками из фторопласта-4 толщиной 8 мм 6, для снижения силы трения между стержнем и опорой. В свою очередь двутавр имеет акустическую развязку со своей опорой полом и выровнен с помощью регулируемых виброопор ОВ-70 7. Данная конструкция позволяет максимально эффективно исключить внешние помехи.

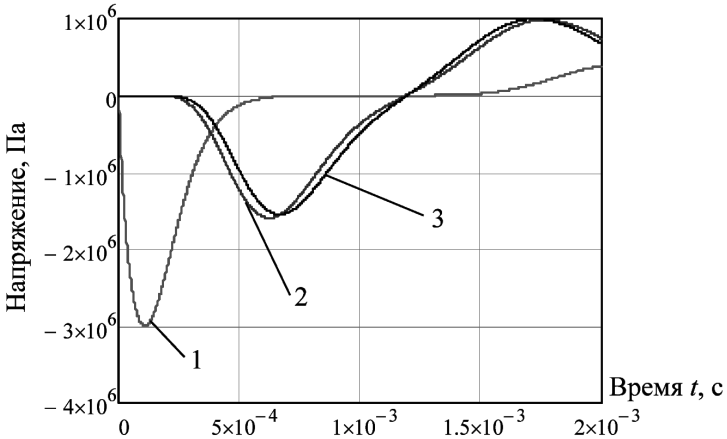

Рис. 4. Прохождение ударного импульса через стержни и образец горной породы: 1 — ударный импульс; 2 — форма импульса напряжения перед образцом горной породы; 3 — форма импульса напряжения после образца горной породы

Регистрация деформаций стержней производится с помощью трех наборов тензорезисторов *8*, собранных в мостовые схемы и приклеенных на стержни таким образом, чтобы регистрировать деформации при прохождении ударной волны. Первый мост тензорезисторов наклеен на расстоянии 25 мм от торца нагружного стержня со стороны ударника, чтобы регистрировать начальную форму ударного импульса. Второй и третий мосты расположены на расстояниях 25 мм от торцов до и после образца горной породы.

Расположение тензорезисторов было обосновано с учетом результатов компьютерного моделирования.

На рис. 4 представлены результаты моделирования прохождения ударного импульса через стрежни и образец горной породы. Из графика видно, что при прохождении ударного импульса через нагружной стержень его амплитуда уменьшается с 3 до 1,5 МПа. Также можно заметить то, что длительность импульса значительно увеличилась с 0,27 до 0,5 мс.

Регистрация данных с тензорезисторов производится с помощью осциллографа, который передает данные на компьютер для последующей обработки.

Выводы

Разработана экспериментальная установка, основанная на базе разрезных стержней Гопкинсона, которая в дальнейших исследованиях будет использована для установления взаимосвязей акустических и механических свойств горных пород при импульсных динамических нагружениях.

Авторский коллектив выражает благодарность В.Б. Иванову за помощь в разработке, конструировании и изготовлении экспериментальной установки, д.т.н., проф. А.С. Вознесенскому и д.т.н., проф. В.Л. Шкуратнику за консультации по рассматриваемому вопросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keshavarz M., *Pellet F. L.*, Loret B. Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C, Pure and Applied Geophysics, 167, 2010, pp. 1511—1523.

2. *Singh T. N.*, *Dubey R. K.* Study of transmission velocity of primary wave (P-wave) in coal measure sandstone // Journal of Scientific & Industrial Research, June 2000, vol. 59, pp. 482—486.

3. *Shkuratnik V. L.*, *Nikolenko P. V.*, *Koshelev A. E.* Stress dependence of elastic P-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // Journal of Mining Science, 2016, 52 (5), pp. 873—877.

4. *Бельтюков Н. Л.*, *Евсеев А. В.* Сопоставление упругих свойств горных пород // Вестник ПГТУ. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. — 2010. — № 5. — С. 82—85.

5. *Бельтюков Н. Л.*, *Паньков И. Л.* Изучение скорости прохождения продольных волн при деформировании сильвинитовых образцов / Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Материалы Региональной научно-практической конференции. Пермь, 19—20 мая, 2009. — Пермь: ПермГУ, 2009. — С. 399—402.

6. *Voznesensky A. S.*, *Kutkin Y. O.*, *Krasilov M. N.* Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone // Journal of Mining Science, 2015, 51 (1), pp. 23—30.

7. *Pellet F. L.*, Fabre G. Damage evaluation with P-wave velocity measurements during uniaxial compression tests on argillaceous rocks, International journal of geomechanics, 2007, vol. 7, 6, pp. 431—436.

8. *Voznesenskii A. S.*, *Kutkin Y. O.*, *Krasilov M. N.*, *Komissarov A. A.* Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor // International Journal of Fatigue, 2015, Vol. 77, Pp. 186—193.

9. *Voznesenskii A. S.*, Kutkin Ya.O., *Krasilov M. N.*, *Komissarov A. A.* The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the re-

sidual strength of gypsum rocks in fatigue tests // International Journal of Fatigue, 2016, Vol. 84, Pp. 53—58.

10. *Voznesenskii A.S.*, *Krasilov M.N.*, Kutkin Ya.O., *Tavostin M.N.*, Osipov Yu.V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings // International Journal of Fatigue, 2017, Vol. 97, Pp. 70—76.

11. *Берон А.И.*, *Ватолин Е.С.*, *Койфман М.И.*, *Мохначев М.П.*, *Чирков С.Е.* Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения / Под ред. А.И. Берона. — М.: Недра, 1984. — 276 с.

12. *Ефимов В.П.* Исследование зависимости трещиностойкости горных пород от скорости нагружения // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2015. — т. 2. — № 3. — С. 74—78.

13. *Ефимов В.П.* Влияние скорости нагружения на трещиностойкость горных пород с позиций кинетической термофлуктуационной концепции разрушения // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 57—63.

14. *Hopkinson B.* A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 213, 437–456. doi: 10.1098/rsta.1914.0010.

15. Kolsky H. An investigation of mechanical properties at very high rates of loading // Proceeding of the Physics Society of London. B62. 1949. P. 676—700.

16. *Zhao J., Wu W., Zhang Q.B., Sun L.* Some recent developments on rock dynamic experiments and modeling // Rock Dynamics and Applications — State of the Art, 2013, Taylor & Francis Group, London, pp. 25—40.

17. *Кочетков П.А.*, *Сафонов А.Л.* Прочность скальных пород в условиях циклического ударного нагружения / Деформируемые среды при импульсных нагрузках: сборник научных трудов. АН Украины. Отделение геодинамики взрыва Института геофизики им. С.И. Субботина. Под ред. И.В. Белинского. — Киев: Наукова думка, 1992. — 136 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Куткин Ярослав Олегович[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: kutnew@mail.ru,
Красилов Максим Николаевич[1] — ассистент, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru,
Насибулин Рамиль Раильевич[1] — студент, e-mail: ram4ik10@mail.ru,
[1] НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 146–152.

UDC 622.831:550.3

Ya.O. Kutkin, M.N. Krasilov, R.R. Nasibullin

DEVELOPMENT OF AN INSTALLATION FOR THE STUDY OF ROCK PROPERTIES UNDER DYNAMIC INFLUENCES

A review was carried out related to the works on characterization of interconnections between the acoustic quality factor and rocks strength at various loading speeds. It was found that such relationship was not sufficiently investigated for the cases of dynamic loadings. An experimental setup was presented based on the Hopkinson slit bars for studying the relationship between acoustic and mechanical properties of rocks under impulse dynamic loads. Computer simulation was carried out and the results are presented for compressive wave propagation through the rods made of rocks. An estimation was made for the increase in the duration of the shock impulse and a decrease in its amplitude when propagating through the loading rod and a sample of the rock.

key words: rocks, strength, acoustical quality factor, loading rate, dynamic influences, experimental setup, Hopkinson slit bars.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-146-152

AUTHORS

Kutkin Ya.O.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: kutnew@mail.ru,
Krasilov M.N.[1], Assistant, e-mail: krasilov.maksim.93@mail.ru,
Nasibullin R.R.[1], Student, e-mail: ram4ik10@mail.ru,
[1] National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Foundation for basic research and the Foundation for support of scientific and project activities of students, postgraduates and young scientists «National intellectual development» in the framework of scientific project No. 17-35-80028 «mol_ev_a».

REFERENCES

1. Keshavarz M., Pellet F. L., Loret B. Damage and Changes in Mechanical Properties of a Gabbro Thermally Loaded up to 1,000 °C. *Pure and Applied Geophysics*, 167, 2010, pp. 1511—1523.

2. Singh T. N., Dubey R. K. Study of transmission velocity of primary wave (P-wave) in coal measure sandstone. *Journal of Scientific & Industrial Research*, June 2000, vol. 59, pp. 482—486.

3. Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Stress dependence of elastic P-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions. *Journal of Mining Science*, 2016, 52 (5), pp. 873—877.

4. Bel'tyukov N. L., Evseev A. V. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geologiya, geoinformatsionnye sistemy, gorno-neftyanoe delo*. 2010, no 5, pp. 82—85.

5. Bel'tyukov N. L., Pan'kov I. L. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala: Materialy Regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Perm', 19—20 maya, 2009 (Geology and mineral resources of the Western Urals: materials of the Regional scientific-practical conference, Perm, May 19—20, 2009), Perm, PermGU, 2009, pp. 399—402.

6. Voznesensky A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N. Interrelation of the acoustic Q-factor and strength in limestone. *Journal of Mining Science*, 2015, 51 (1), pp. 23—30.

7. Pellet F. L., Fabre G. Damage evaluation with P-wave velocity measurements during uniaxial compression tests on argillaceous rocks. *International journal of geomechanics*, 2007, vol. 7, 6, pp. 431—436.

8. Voznesenskii A. S., Kutkin Y. O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. Predicting fatigue strength of rocks by its interrelation with the acoustic quality factor. *International Journal of Fatigue*, 2015, Vol. 77, Pp. 186—193.

9. Voznesenskii A. S., Kutkin Ya.O., Krasilov M. N., Komissarov A. A. The influence of the stress state type and scale factor on the relationship between the acoustic quality factor and the residual strength of gypsum rocks in fatigue tests. *International Journal of Fatigue*, 2016, Vol. 84, Pp. 53—58.

10. Voznesenskii A. S., Krasilov M. N., Kutkin Ya.O., Tavostin M. N., Osipov Yu.V. Features of interrelations between acoustic quality factor and strength of rock salt during fatigue cyclic loadings. *International Journal of Fatigue*, 2017, Vol. 97, Pp. 70—76.

11. Beron A. I., Vatolin E. S., Koyfman M. I., Mokhnachev M. P., Chirkov S. E. *Svoystva gornykh porod pri raznykh vidakh i rezhimakh nagruzheniya*. Pod red. A. I. Berona (Properties of rocks under different types and modes of loading. Beron A. I. (Ed.)), Moscow, Nedra, 1984, 276 p.

12. Efimov V. P. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2015. t. 2, no 3, pp. 74—78.

13. Efimov V. P. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no 2, pp. 57—63.

14. Hopkinson B. *A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 213, 437–456. doi: 10.1098/rsta.1914.0010.

15. Kolsky H. An investigation of mechanical properties at very high rates of loading. *Proceeding of the Physics Society of London*. B62. 1949. P. 676—700.

16. Zhao J., Wu W., Zhang Q. B., Sun L. Some recent developments on rock dynamic experiments and modeling. *Rock Dynamics and Applications State of the Art*, 2013, Taylor & Francis Group, London, pp. 25—40.

17. Kochetkov P. A., Safonov A. L. *Deformiruemye sredy pri impul'snykh nagruzkakh: sbornik nauchnykh trudov*. Pod red. I. V. Belinskogo (A deformable medium under impulse loads: a collection of scientific papers. Belinskiy I. V. (Ed.)), Kiev, Naukova dumka, 1992, 136 p.