

УДК 622.271.1:622.342.1

Мельник Татьяна Николаевна

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ГУ «Донецкий физико-математический
институт им. А.А. Галкина»,
ДНР, 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72
e-mail: tatmeln18@gmail.com

Нескреба Денис Анатольевич

младший научный сотрудник,
ГУ «Институт физики горных процессов»,
ДНР, 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72
e-mail: perviy.den@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СПОСОБОМ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ УГЛЯ И ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация:

Представлены результаты экспериментов по одноосному сжатию порошков, полученных при разрушении объемных образцов горной породы (глинистого сланца) и каменного угля. Выполнен анализ процессов, происходящих при одноосном сжатии фракций диспергированных материалов, характеризующихся разным размером частиц. Результаты предложены в качестве обоснования экспериментального метода определения прочностных характеристик диспергированных материалов, в частности, горных пород и ископаемого угля.

При выполнении эксперимента из диспергированной породы, образовавшейся после разрушения образца, отбираются фракции разных размеров. Фракции поочередно засыпаются в контейнер высокого давления, который устанавливается на пресс с регистрирующей аппаратурой.

Результаты измерений дают возможность построить графики «нагрузка – относительная деформация» для каждой из фракций. Показано, что разность деформации порошков с гранулами разного размера имеет более выраженную зависимость от нагрузки. При дифференцировании данных кривых для угля оказывается, что их угол наклона существенно изменяется при давлении, соответствующем пределу прочности. Для более прочного природного материала, глинистого сланца, для выделения данной точки использовались касательные или линейные аппроксимации экспериментальных кривых разности деформации, проведенные на заключительных отрезках. На основании обработки данных зависимостей и делаются выводы о прочности изучаемого материала.

Описываемый в статье метод предлагается для измерения прочности хрупких природных материалов, для которых изготовление образца для испытания на одноосное сжатие связано с существенными трудностями. В результате предоставляется возможность значительно сократить длительность подготовительного этапа измерений и избежать искажений их результатов вследствие локальных отклонений в структурном и химическом составе исследуемого материала – горной породы или ископаемого угля.

Ключевые слова: прочность, деформация, хрупкость, одноосное сжатие, уголь, естественные горные породы, разрушение.

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.055

Melnik Tatyana N.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Researcher,
SU «Donetsk Institute for Physics and Engineering
named after A.A. Galkin»,
DPR, 83114 Donetsk, 72 R. Luxemburg Str.
e-mail: tatmeln18@gmail.com

Neskreba Denis A.,

Junior Researcher,
SU «Institute for Physics of Mining Processes»,
DPR, 83114 Donetsk, 72 R. Luxemburg Str.
e-mail: perviy.den@mail.ru

SPECIFIC FEATURES OF EVALUATION OF STRENGTH BY UNIAXIAL COMPRESSION OF GRANULATED COAL AND NATURAL ROCKS

Abstract:

The paper reports the results of the experiments on uniaxial compressing of powders produced by the fracture of bulk samples of rock materials (clay argillite) and fossil coal. The analysis of the processes that occur in the course of uniaxial compression of fractions of dispersed materials of different particle size is presented. The results are interpreted as a substantiation of an experimental method of estimation of strength characteristics of dispersed materials, in particular, natural rocks and fossil coal.

In the course of the experiment, fractions of different size are separated from the dispersed rock left after the fracture of a sample. The fractions are one-by-one placed into a high-pressure chamber mounted on the press equipped by measuring devices.

The results of the measurements provide the stress-strain graphs for every fraction. We demonstrate that the difference in deformation of the powders with the granules of different size is of more explicit dependence on loading. After differentiation of the curves for fossil coal, we found that the inclination angle substantially changes at the pressure associated with the strength limit. More strong natural material like clay argillite is characterized by tangential or linear approximations of the experimental curves of the deformation differences that are applied to the final intervals. The processing of the experimental curves forms the basis for the conclusions about the strength of the tested material.

The described method is supposed to be useful for the measurement of the strength of brittle natural materials that do not allow preparation of a sample for the tests by uniaxial compression. As a result, there appears an opportunity to reduce the duration of the preparatory stage of the experiment and to avoid the distortions of the results determined by local deviations of the structure and the chemical composition of the tested material like a rock or fossil coal.

Key words: strength, strain, brittleness, uniaxial compression, coal, natural rocks, fracture.

Введение

Разрушающие методы являются наиболее точными способами измерения прочности материалов, и результаты, полученные в процессе их применения, максимально приближены к реальным физическим характеристикам. Однако все данные методы основаны на исследовании свойств макроскопического сплошного объекта. В то же время диспергированные материалы (к примеру, порошковые) также могут стать источником информации о прочности.

При определении прочности горных пород наиболее доступными и производительными методами являются испытания на одноосное сжатие или растяжение при различных конфигурациях измерительных установок. Согласно действующим ГОСТам [1], для лабораторных исследований необходима тщательная обработка и подготовка серии идентичных образцов, что может быть в некоторых случаях затруднительным ввиду сложности выполнения регламентированных требований к их размерам и форме из-за хрупкости исследуемой породы.

Заслуживает внимания и тот факт, что горные породы по своей сути являются существенно неоднородными объектами как по своей структуре, так и по химическому составу, причем размер неоднородностей вполне может быть сравним с размером исследуемых образцов [2]. Таким образом, образцы, изготовленные из материала, взятого на некотором ограниченном участке породного пласта, могут не отражать целостную картину распределения механических характеристик по его толщине или протяженности.

Кроме того, изготовление образцов предписанной формы, с надлежащим образом обработанной поверхностью, для хрупких материалов с развитой поровой или трещиноватой структурой (каковыми является большое число естественных горных пород) может быть весьма трудоемким процессом, требующим значительного времени на выполнение подготовительных действий.

Поэтому представляется целесообразной разработка метода определения прочности образцов диспергированных горных пород, т.е. анализ прочности измельченных образцов, разделенных на фракции с различающимися размерами частиц. В данном случае имеется возможность значительно сократить длительность подготовительного этапа измерений и избежать искажений их результатов вследствие локальных отклонений в структурном и химическом составе породы.

Экспериментальные исследования

Суть экспериментов, положенных в основу экспресс-метода определения прочности, состоит в следующем. Вначале проводится отбор образцов, изготавливается кубический образец размером 55x55 мм. В данной работе отбирались образцы песчано-глинистого сланца (нарушенной породы) и каменного угля, взятые на шахте им. А.А. Скочинского (ДНР).

Подготовленный образец устанавливается на пресс с регистрирующей аппаратурой, и нагрузка увеличивается вплоть до полного разрушения образца. Из диспергированной породы, образовавшейся после разрушения образца, отбираются фракции разных размеров. В данной работе были отобраны три фракции с диаметром гранул 0,4 - 0,5, 2 - 2,5 и 5 мм, навеской по 35 г. Фракции поочередно засыпаются в контейнер высокого давления, который устанавливается на тот же пресс с регистрирующей аппаратурой.

Результаты измерений дают возможность построить графики «нагрузка – относительная деформация» для каждой из фракций. На основании обработки данных зависимостей и делаются выводы о прочности изучаемого материала.

Анализ экспериментальных результатов

Выводы о взаимосвязи прочностных характеристик исследуемого материала и результатов его прессования в измельченном виде были результатами активной работы по теоретическому анализу проблемы сжатия диспергированных материалов, прово-

дившейся с 60-х годов 20 века в связи с развитием и широким применением методов порошковой металлургии. Именно в это время были созданы основы дискретно-контактной теории прессования порошков [3, 4]. Суть дискретно-контактных представлений о прессовании порошков состоит в анализе условий контактного взаимодействия и деформаций отдельных частиц. О поведении прессуемой навески как единого объекта судят на основании гипотезы об идентичности условий деформирования отдельной частицы и брикета в целом [5 – 8].

Определение прочности материала по результатам эксперимента по одноосному сжатию гранул данного материала, характеризующихся различным размером, требует несколько иного подхода к анализу результатов эксперимента, чем в опытах по одноосному сжатию монолитных образцов. Различие состоит в том, что момент разрушения гранулированного материала не выражен столь явно, как в случае монолитного образца. Поэтому имеет смысл считать, что нагружение становится равным пределу прочности в тот момент, когда завершается разрушение всех гранул в навеске и дальнейшей деформации подвергается уже плотно сжатый, практически монолитный образец.

Поскольку описываемый метод предлагается для измерения прочности хрупких природных материалов, для которых изготовление образца для испытания на одноосное сжатие согласно ГОСТ связано с существенными трудностями, его применение удобно проиллюстрировать на результатах одноосного сжатия порошков угля марки Ж (шахта им. А.А. Скочинского).

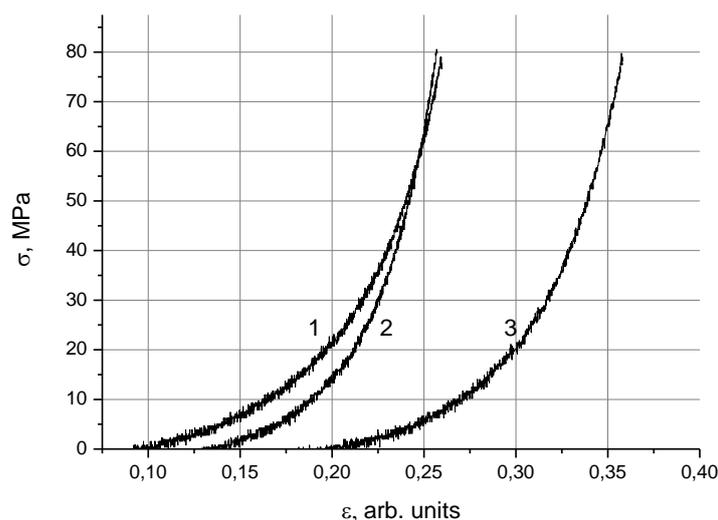


Рис.1. Экспериментальные кривые «нагрузка–относительная деформация» для ненарушенного угля марки Ж, шахта им. А.А. Скочинского, фракцией, mm: 1 – 0,4; 2 – 2,5; 3 – 5

На кривой «напряжение – деформация» отсутствует какая-либо явная особенность (рис. 1). Экспериментальные кривые с высокой точностью описываются аппроксимирующими экспоненциальными зависимостями.

Однако начиная с некоторого уровня нагружения, на данном графике это $\sigma \sim 10$ МПа, кривые нагружения можно практически совместить параллельным переносом по оси деформации. Данный факт можно интерпретировать следующим образом.

Свободный объем, содержащийся в навесках гранул разного размера, также различается. При сжатии вначале происходит упаковка гранул, а уже потом их разрушение. Поэтому различие в степени деформации порошков с гранулами разного размера при одном и том же нагружении может быть связано с первоначальным вытеснением свободного объема навески.

Начиная с некоторой величины нагружения, разность деформаций фракций угля с частицами разного размера при одном и том же нагружении (рис. 2 а) становится

практически постоянной. Интенсивное разрушение частиц здесь уже завершилось (предел прочности достигнут), и влияние их размера на деформационные кривые мало. Далее материал деформируется уже в виде компакта во всех случаях. Однако на начальной стадии нагружения, до 10 МПа, разность деформации порошков с гранулами разного размера имеет более выраженную зависимость от нагрузки. При дифференцировании данных кривых оказывается, что их угол наклона существенно изменяется при давлении порядка 3 МПа. На кривой 2, соответствующей наибольшей разнице в размерах гранул, 0,5 и 5 мм, в данной точке даже наблюдается максимум.

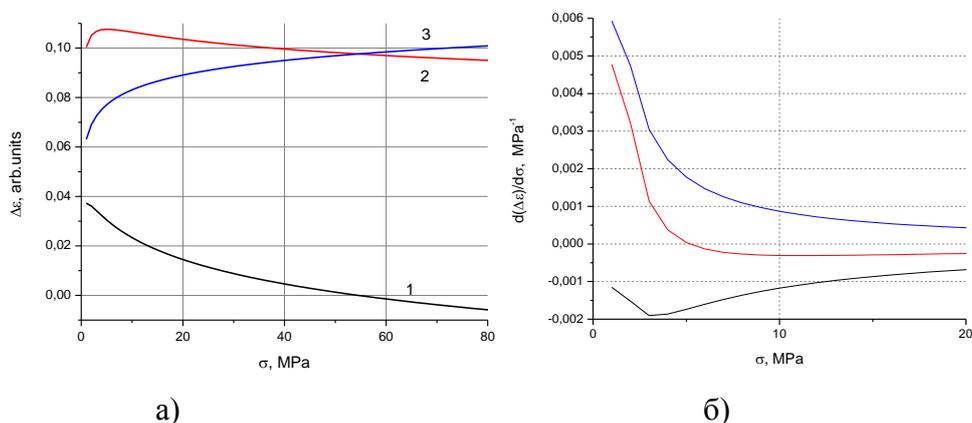


Рис. 2. Разность деформаций а) и ее производная б) при одной и той же нагрузке на уголь с фракциями разного размера:
1 – 2,5 и 0,4 – 0,5 мм; 2 – 5 и 0,4 – 0,5 мм; 3 – 5 и 2,5 мм

Численное дифференцирование представляется наиболее точным способом определения точки, где характер кривой изменяется (рис. 2, б).

Соответственно, можно считать, что здесь меняется характер происходящих процессов, и данную точку можно считать пределом прочности материала гранул, где происходит массовое их разрушение [9].

При анализе подобных кривых для более прочного природного материала, глинистого сланца, для выделения данной точки использовались касательные или линейные аппроксимации экспериментальных кривых разности деформации, проведенные на заключительных отрезках (рис. 3). Это изменение связано с тем, что явно видимые особые точки на экспериментальных зависимостях в более прочных материалах отсутствуют.

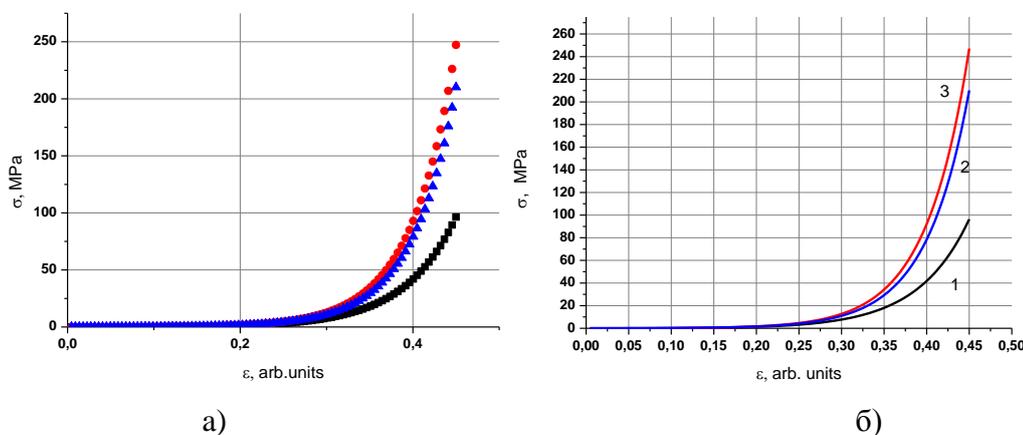


Рис. 3. Соотношение усилия нагрузки и относительной деформации для фракций разного размера (образцы песчано-глинистого сланца, взятые на шахте им. А.А. Скочинского):
а) – экспериментальные данные для фракций размером 0,4 – 0,5 мм (■), 2 – 2,5 мм (▲), 5 мм (●);
б) – экспоненциальная аппроксимация

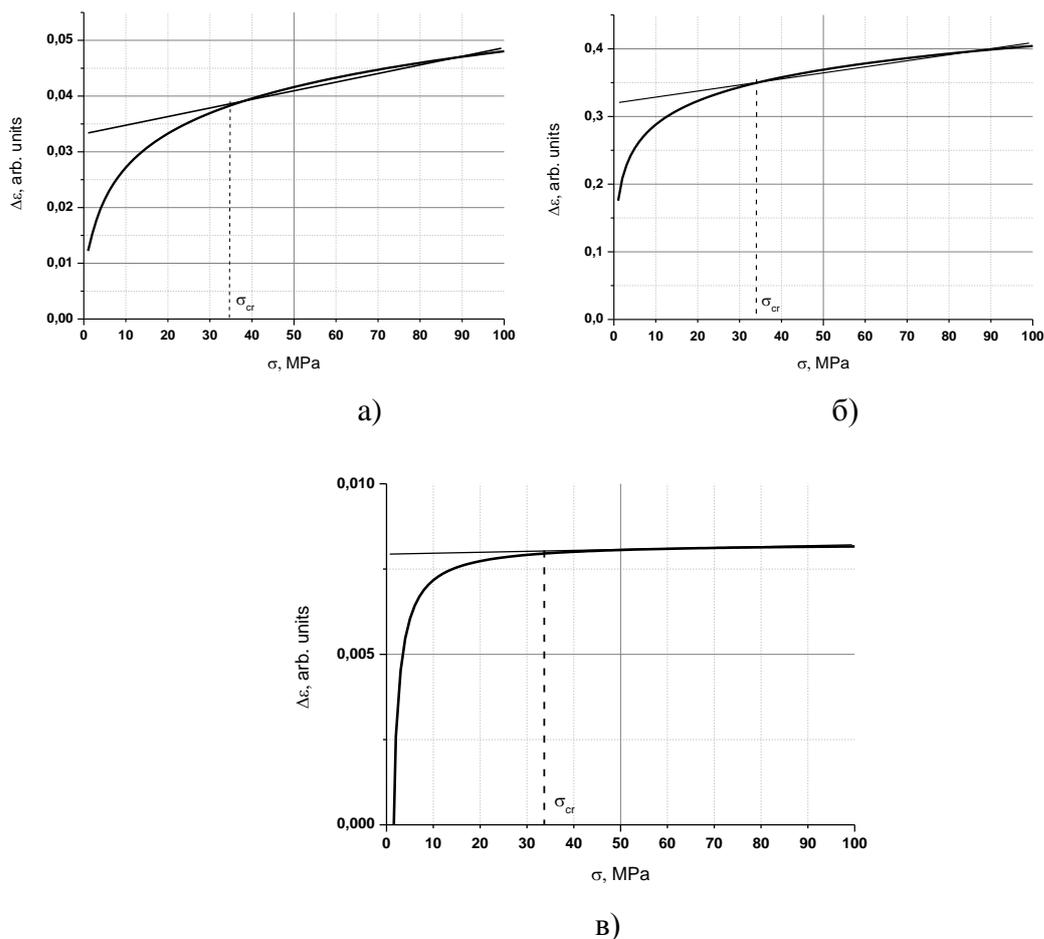


Рис. 4. Разность деформации навесок гранул разных размеров при одной и той же нагрузке:
а) – 2,5 и 0,5 мм; б) – 5 и 0,5 мм; в) – 2,5 и 5 мм

В этом случае предел прочности (34 МПа) определялся по точке отклонения разности деформации от линейной зависимости на заключительном этапе сжатия [10].

На графиках рис. 4 а, б видно, что на заключительном этапе нагружения разность деформации может быть аппроксимирована линейной зависимостью даже в случае, когда разница в размерах гранул велика (различие на порядок), и кривые нагружения не параллельны, как в случае малой разницы в размерах (рис. 4 в).

Наиболее удобным методом аппроксимации является метод наименьших квадратов, который не игнорирует наличие ошибок в значениях аппроксимирующей функции, а усредняет их влияние на результат аппроксимации. Решением являются параметры аппроксимирующей прямой на заключительном этапе сжатия. Соответственно, предел прочности фиксируется как точка выхода графика разности деформации гранул на линейный участок. С математической точки зрения, в данной точке отклонение экспериментального графика от линейной зависимости станет меньше среднеквадратичного отклонения от линейной аппроксимации на заключительной стадии деформации.

Выводы

Вышеизложенную методику можно суммировать следующим образом. Выполняется одноосное сжатие навесок гранулированного материала с гранулами разного размера. Строятся графики разности деформации при разных размерах гранул. Дифференцированием графиков выделяются особые точки, соответствующие пределу прочности материала. Для прочных материалов, в случае отсутствия явных особых точек, выполняется линейная аппроксимация разности деформации на заключительной стадии

сжатия, и предел прочности определяется как момент выхода графика разности деформации на линейную зависимость.

Представленный в работе анализ измерений прочности измельченных образцов, разделенных на фракции с различающимися размерами частиц, составляет основу метода определения прочности диспергированных горных пород. В данном случае имеется возможность значительно сократить длительность подготовительного этапа измерений и избежать искажений их результатов вследствие локальных отклонений в структурном и химическом составе породы.

Список литературы

1. *Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.* ГОСТ 21153.2-84. Введ. 1986-07-01. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001.
2. Алексеев А.Д., 2010. *Физика угля и горных процессов.* Киев: Наукова думка, 424 с.
3. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др., 1982. *Феноменологические теории прессования порошков.* Киев: Наукова думка, 140 с.
4. Бальшин М.Ю., 1972. *Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна.* Москва: Металлургия, 336 с.
5. Самодурова М.Н., Барков Л.А., Иванов В.А., Яров Б.А., 2013. *Основные уравнения континуальной теории порошков с особыми свойствами.* Вестник ЮрГУ, серия «Металлургия», Т.13, № 2, С. 65 - 68.
6. Норель Б.К., Петров Ю.В., Селютина Н.С., 2019. *Энергетические и временные характеристики предельного состояния горных пород, 2-е изд.* Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 132 с.
7. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В., 2016. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 1. Порошковое тело. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*, Т. 2 (243), С.124 - 133.
8. Кочетков А.В., Леонтьев Н.В., Модин И.А., Турыгина И.А., Чекмарев Д.Т., 2018. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя при сжатии. *Проблемы прочности и пластичности*, Т. 80, № 3, С. 359 - 367.
9. Стариков Г.П., Мельник Т.Н., Нескреба Д.А., 2020. Определение прочности диспергированных горных пород. *ФТВД*, Т. 30., № 4, С. 83 – 92.
10. Стариков Г.П., Мельник Т.Н., Нескреба Д.А., 2021. Методические основы определения прочности угля способом одноосного сжатия гранулированных образцов. *Физика и техника высоких давлений*, Т. 31, № 2, С. 79 - 90.

References

1. *Porody gornye. Metody opredeleniia predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [Mountain rocks. Methods for determining the ultimate strength in uniaxial compression]. GOST 21153.2-84. Vved. 1986-07-01. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2001.
2. Alekseev A.D., 2010. *Fizika uglia i gornykh protsessov* [Physics of coal and mining processes]. Kiev: Naukova dumka, 424 p.
3. Shtern M.B., Serdyuk G.G., Maksimenko L.A. i dr., 1982. *Fenomenologicheskie teorii pressovaniya poroshkov* [Phenomenological theories of powder pressing]. Kiev: Naukova dumka, 140 p.
4. Bal'shin M.Yu., 1972. *Nauchnye osnovy poroshkovoi metallurgii i metallurgii volokna* [Scientific foundations of powder metallurgy and fiber metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 336 p.

5. Samodurova M.N., Barkov L.A., Ivanov V.A., Yarov B.A., 2013. Osnovnye uravneniya kontinual'noi teorii poroshkov s osobymi svoistvami [Basic equations of the continuum theory of powders with special properties]. Vestnik YurGU, seriya "Metallurgiya", Vol.13, № 2, P. 65 - 68.

6. Norel' B.K., Petrov Yu.V., Selyutina N.S., 2019. Energeticheskie i vremennye kharakteristiki predel'nogo sostoyaniya gornyx porod , 2 izd [Energy and time characteristics of the limit state of rocks, 2nd ed.]. Sankt-Peterburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 132 p.

7. Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V., 2016. Opredelenie reologicheskikh kharakteristik i modelirovanie protsessa ekstruzii poroshkovykh i poristykh materialov. Chast' 1. Poroshkovoe telo [Determination of the rheological characteristics and modeling of the extrusion process of powder and porous materials. Part 1. Powder body]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta, Vol. 2 (243), P.124 - 133.

8. Kochetkov A.V., Leont'ev N.V., Modin I.A., Turygina I.A., Chekmarev D.T., 2018. Chislennoe modelirovanie deformirovaniya granulirovanogo sloya pri szhatii [Numerical simulation of the deformation of a granular layer under compression]. Problemy prochnosti i plastichnosti, Vol. 80, № 3, P. 359 - 367.

9. Starikov G.P., Mel'nik T.N., Neskrebba D.A., 2020. Opredelenie prochnosti dispergirrovannykh gornyx porod [Determination of the strength of dispersed rocks]. FTVD, Vol. 30., № 4, P. 83 – 92.

10. Starikov G.P., Mel'nik T.N., Neskrebba D.A., 2021. Metodicheskie osnovy opredeleniya prochnosti uglya sposobom odnoosnogo szhatiya granulirovannykh obraztsov [Methodological foundations for determining the strength of coal by uniaxial compression of granular samples]. Fizika i tekhnika vysokikh davlenii, Vol. 31, № 2, P. 79 - 90.