

УДК 622.255.5:539.43

Ю. І. ВОЙТЕНКО, д-р техн. наук, головний науковий співробітник (Український державний геологорозвідувальний інститут), voytenkou@gmail.com, ORCID-0000-0003-3077-2207,

О. В. КОВТУН, провідний інженер-геолог (Український державний геологорозвідувальний інститут), kovtun85@ukr.net, ORCID-0000-0003-0475-8778

# ПРО ПЕРЕДВИКИДНИЙ СТАН ПОРІД І МОЖЛИВІ МЕХАНІЗМИ ГІРНИЧИХ УДАРІВ І РАПТОВИХ ВИКИДІВ

## О ПРЕДВЫБРОСОВОМ СОСТОЯНИИ ПОРОД И ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ГОРНЫХ УДАРОВ И ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ

(Матеріал друкується мовою оригіналу)

В статье рассмотрено применение критерия хрупкого разрушения А. С. Баланкина для оценки опасности внезапных выбросов угля и газа в угольных шахтах под действием сжимающей нагрузки. Под действием неравномерного горного давления образуются разномасштабные диссипативные структуры на микро- и мезоуровнях. Образование микродефектов в диссипативных структурах происходит преимущественно на локальных анизотропных включениях. Разрушение (первичный выброс) происходит при выполнении условия хрупкого разрушения, а также при условии такого соотношения “мощность пласта – размер скоплений микро- и макродефектов”, которое обеспечивает минимальную прочность горной породы и хрупкое разрушение. Дальнейшее разрушение происходит по известному сценарию.

**Ключевые слова:** внезапный выброс угля и газа, горный удар, прочность, дисперсия прочности, диссипативная структура, микротрещина, угольный пласт, хрупкое разрушение.

**Yu. I. Voitenko**, Doctor of Technical Sciences, Ukrainian State Geological Research Institute, voytenkou@gmail.com, ORCID-0000-0003-3077-2207  
**A. V. Kovtun**, leading geological engineer, Ukrainian State Geological Research Institute, kovtun85@ukr.net, ORCID-0000-0003-0475-8778

ABOUT THE PRE-OUTBURST STATE OF THE COAL AND SANDSTONE AND THE POSSIBLE MECHANISM OF COAL AND GAS OUTBURST PROCESS

The paper aims to examine the suitability of A. S. Balankin brittle fracture criterion in predicting the of large-scale coal and gas outbursts in underground coal mines under compression load. Formation of dissipative structures as cracks and clusters of local microcracking occurs under the influence of the rock pressure. The formation of microdefects in dissipative structures occurs mainly on local anisotropic inclusions. Mechanism of pre-outburst spalling of gas-saturated coal is analyzed. Destruction (primary outburst) occurs when the brittle fracture conditions are met. And also in the case of such a ratio of “coal seam thickness – the size of micro defects aggregations”, which provides reduction in coal strength to a minimum. Further destruction occurs by known scenario.

**Keywords:** coal and gas outburst, sandstones outburst, strength, strength dispersion, dissipative structure, microcrack, coal seam, brittle fracture.

Проблема внезапных выбросов угля и газа, а также горных ударов является комплексной и весьма сложной, поскольку в основе понимания этих явлений лежат геологические, горнотехнические и геомеханические причины [2, 5, 7, 9, 10]. Следует заметить, что, кроме опасности для персонала и технологического процесса, горные удары и внезапные выбросы угля, пород и газа сопровождаются эмиссией в окружающий массив упругой энергии в виде сейсмических волн значительной интенсивности, которые представляют опасность для наземных и подземных сооружений. Они могут инициировать смещение дневной поверхности и образование мульды проседания.

В последние 10–12 лет развивается научное направление, описывающее физико-механические механизмы метанообразования в угольных пластах [8]. Наличие метана в угле и необычно большое его количество при газодинамических явлениях (ГДЯ) свидетельствует о том, что метан

и его фазовое состояние на момент начала развития и в процессе ГДЯ является одним из существенных влияющих факторов.

Тем не менее, в настоящее время общепринятой является точка зрения, что одной из причин внезапных выбросов является высокий уровень напряжений, действующих в угольном пласте, приводящий к формированию диссипативных структур (ДС) в виде локальных и магистральных трещин и снижению прочности породы.

Согласно работе [10] вероятность выброса увеличивается, если одна из трещин под действием напряжений в зоне опорного давления (за счет разгрузки со стороны забоя) и внутрислоевого давления газа увеличивается до размеров магистральной трещины, соизмеримой с мощностью пласта. Хотя в этой статье и других работах авторов утверждается, что способы, формы и условия реализации этого явления весьма многообразны. Следует заметить, что предельное состояние углепородного массива в зоне опорного давления и в целиках определяется не только количе-

ством и длиной магистральных трещин, но и количеством локальных и техногенных трещин в массиве. Как правило, с увеличением количества локальных мелких трещин прочность твердого деформируемого тела в общем случае уменьшается [12].

В последние 25–30 лет наряду с классической механикой разрушения, связывающей прочность твердого деформируемого тела с трещиной, ее размерами и формой, развивалось направление физики твердого тела, в котором прочность и её дисперсия связаны не только с иерархией ДС, но и с размерами деформируемого тела [1]. В данном случае с мощностью угольного пласта или выбросоопасного песчаника  $L_0$  (рис. 1).

Нельзя не отметить работы, в которых для оценок выбросоопасности и мощности горного удара используется энергетический подход, основанный на оценке энергии объемного деформирования горных пород в зоне предполагаемого горного удара [3, 6]. В работе [6] методами теории упругости с учетом возможной дилатансии горных пород определены энергия изменения объема и энергия изменения формы. Это позволяет оценить потенциальную энергию деформирования и дать количественную оценку энергии возможного горного удара. В работе [3] разработана методика оценки вероятности внезапного выброса или горного удара по отношению к энергии деформирования образца угля (песчаника) и к энергии деформирования соответствующей породы в массиве до разрушения. Определены значения этого отношения, соответствующие малой, средней и большой вероятности возникновения динамического явления.

Цель работы – проанализировать существующие механизмы формирования предвыбросового состояния углепородного массива, сформулировать механизм самоорганизации структуры угля и определить критерии начала разрушения на основе синергетики деформируемого твердого тела.

На рис. 2б–г показаны картины формирования магистральной трещины в углепородном массиве под действием сжимающих напряжений, действующих вдоль будущей магистральной трещины эллипсоидальной формы. Напряжения в зоне опорного давления на рис. 2 не показаны. За основу взяты схемы, предложенные в работе и дополненные нашим пониманием формирования ДС [1].

Области малых размеров в данном случае – скопления локальных трещин различной ориентации, которые в предельном состоянии предразрушения образуют области нарушенного материала или магистральную трещину (рис. 1).

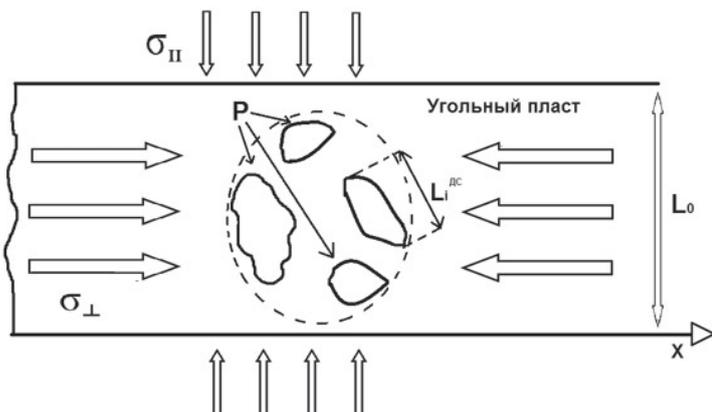


Рис. 1. Схема образования магистральной трещины в угольном пласте из нескольких кластеров микродефектов

Согласно работе [1] твердое деформируемое тело, в том числе и горные породы, склонно к хрупкому разрушению, если выполняется условие

$$R_{кр} = \frac{\sigma_{II}}{\sqrt{2}\tau_{II}} < \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

здесь  $\tau_{II}$  и  $\sigma_{II}$  – сопротивление материала сдвигу и на отрыв. Условие (1), как будет показано ниже, является необходимым, но не достаточным. Условие (1) не противоречит критерию невыбросоопасности, полученному в работе [9]. Согласно публикации [9] заметная вероятность разрушения выбросом достигается для низкой поверхностной энергии (ниже 2 Дж/м<sup>2</sup>) большим (порядка микрона) зиянием трещин и большим газовым давлением (~ 100 атм). Аналогом низкой поверхностной энергии является пропорциональная ей вязкость разрушения на разрыв  $K_{Ic}$ , которая в общем случае является характеристикой прочности твердого деформируемого тела. При таких параметрах прочности и дальнейшем ее снижении в работе [9] рекомендуется учитывать упругую составляющую энергии деформирования пласта.

Согласно работе (1) разрушение будет вязким при  $R_{кр} > 1$  и вязкохрупким при  $R_{кр} > 1/\sqrt{2}$ . В этих случаях деформирование и смещение угля будет происходить по механизму внезапного отжима, как пластического материала [11].

В соответствии со статьей [1] катастрофическое хрупкое разрушение не только угольного пласта, но и других круп-

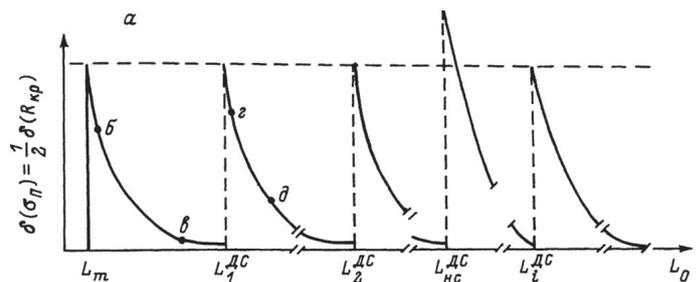


Рис. 2а. Дисперсия прочности угольного пласта в зависимости от соотношения  $L_i^{DC}/L_0$

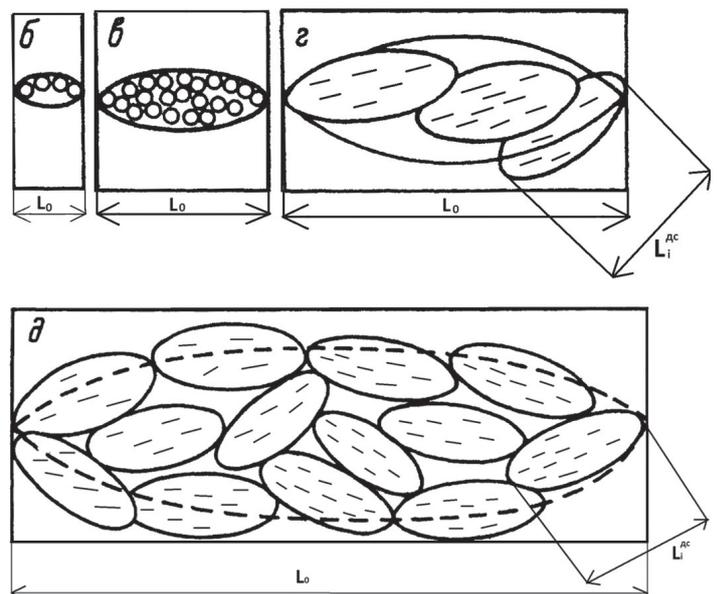


Рис. 2б–д. Схемы образования диссипативных структур в пластах песчаника (б–в) и угля (г–д)

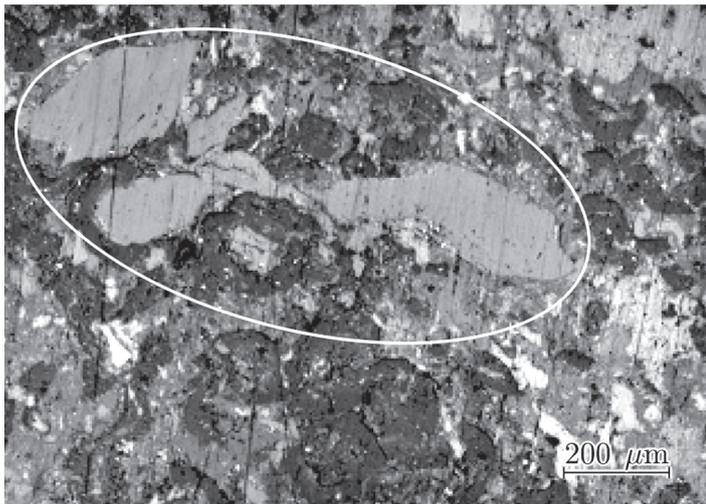


Фото 1. Схема образования ДС в выбросоопасном угле с минеральными включениями (шахта им. Засядько)

ногабаритных, например, металлических и строительных конструкций: трубопроводов, судов, мостов – происходит, во-первых, при выполнении условия (1). Во-вторых, соотношение между размером начального дефекта или группой дефектов, которые объединены в некие кластеры дефектов (рис. 1, 2, фото 1), играющие роль начальных трещин на микро-, мезо- и макроуровнях, и размерами деформированного тела, в нашем случае – песчаника или угольного пласта должно быть таким, чтобы прочность угля или песчаника была минимальной (рис. 2б, в). Поскольку дисперсия прочности в пласте угля или песчаника зависит от соотношения “размер кластеров дефектов”  $L_i^{DC}$  на всех указанных уровнях – “размер (мощность) пласта”  $L_0$ , то есть основание утверждать, что некоторые из таких пластов склонны к катастрофическому разрушению даже при отсутствии сквозных магистральных трещин, а некоторые – не склонны. Подтверждением этому являются микрофотографии, иллюстрирующие микроструктуру выбросоопасного угля (фото 1) (шахта им. Засядька) и невыбросоопасного (рис. 1 в работе [8]). Пунктирную линию, показанную на фото 1, провели авторы данной работы. Она показывает формирование мезокластера микродефектов размером  $\sim 10^{-3}$  м и более в выбросоопасном угле шахты им. Засядько.

Такие дефекты образуются как диссипативные структуры при деформировании угля не только под действием тектонических напряжений, но и под действием техногенных напряжений в зоне опорного давления. Источниками образования и развития мезо- и микродефектов в угле даже при отсутствии развитой трещиноватости являются анизотропные, например, минеральные включения, контакты зерен высокомодульных минералов в песчанике и т. п. (рис. 2, фото 1, 2). В зависимости от соотношения модулей упругости угля и материала минерального включения под действием напряжений трещины образуются либо в материале анизотропного включения, либо в угле. На контактах зерен в песчанике при определенных условиях возникают напряжения, превышающие предел прочности на сжатие. Это приводит к развитию микротрещиноватости в зернах (на рис. 2 она не показана). Естественно, что для начала разрушения, кроме выполнения соотношения (1), необходимо оптимальное соотношение  $L_0 / L_{cr}^{DC}$  (рис. 1, 2, фото 1).

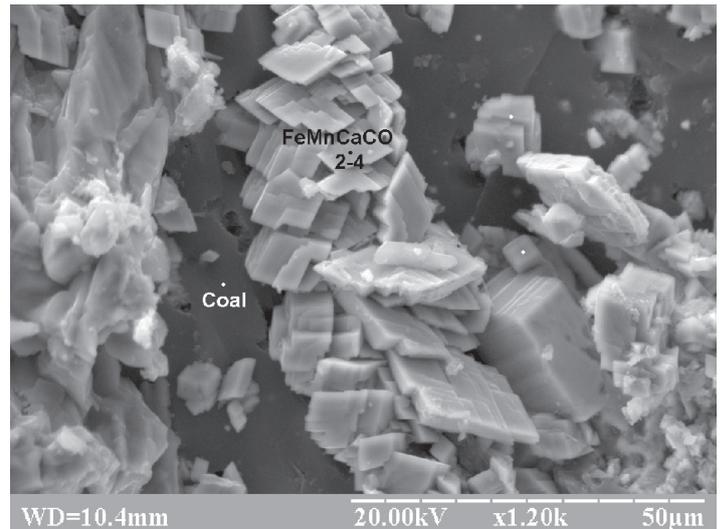


Фото 2. Образец угля с минеральными включениями

Микроструктура других образцов невыбросоопасных углей в работе [8] свидетельствует о малоразмерных порах и включениях с характерным размером  $\sim 1-10$  мкм, которые не способны объединяться в трещиноподобные кластеры. Кроме того, пористые горные породы при сжатии и сдвиге, как правило, ведут себя как пластические среды [11].

Дополнительным фактором, увеличивающим внутреннюю энергию пласта и способствующим увеличению вероятности спонтанного разрушения угля, является внутрипластовое давление метана по аналогии с давлением газа в трубопроводе, а также тепловые следы образующихся трещин и дислокаций. Причем это давление растет по мере деформирования и растрескивания пласта при отсутствии эффективных систем дегазации.

Таким образом, для начала разрушения угля не обязательно наличие сквозных магистральных трещин, как предлагается в работе [10]. Достаточно наличия скоплений мезо- и микродефектов, рассеянных по углю, которые в условиях напряженно-деформированного состояния объединяются в кластеры и образуют диссипативные структуры, способные в случае выполнения условия (1) перерасти в образование нескольких магистральных трещин возле свободной поверхности (очистного забоя). После первичного выброса в дальнейшем выброс под действием волны разгрузки будет происходить по механизму самоподдерживающегося разрушения благодаря потенциальной энергии сжатого угля [6]. При этом, чем глубже залегает пласт угля или песчаника, тем больше величина потенциальной энергии деформирования, тем большая вероятность события, тем чаще оно происходит. Кроме того, на мощность и продолжительность газодинамического явления влияют деформационные свойства породы, поскольку потенциальная энергия определяется площадью под кривыми деформирования –  $\sigma(\epsilon)$  при одномерном сжатии и  $p(\theta)$  при объемном сжатии ( $\sigma, p$  – напряжение и давление;  $\epsilon, \theta$  – одномерная и объемная деформация образца).

Наиболее опасным видом разрушения при этом является хрупкое. Для оценки его вероятности необходимо в перечень горнотехнических параметров, сопровождающих разработку месторождения, включить характеристики прочности, входящие в формулу (1) или другие параметры, позволяющие оценить хрупкость разрушения угля – удельную поверхностную энергию или вязкость разрушения [12]. Кроме того,

весьма полезной является информация о деформационных свойствах угля в условиях неравномерного силового нагружения, от которых зависит мощность возможного выброса.

В заключение отметим, что снизить вероятность ГДЯ можно при снижении внутренней энергии угольного пласта. Пути этого снижения достаточно известны:

- предварительная дегазация;
- управляемое предварительное разрушение и разупрочнение, способствующее повышению эффективности дегазации;
- управление горным давлением с помощью бурения опережающих скважин и увлажнением угля.

### Выводы

1. Механическое действие давления горного массива на уголь или песчаник в зоне повышенных напряжений приводит к образованию разномасштабных диссипативных структур, особенно вблизи свободной поверхности (возле очистного забоя), которые объединяются в скопления дефектов на мезо- и макроуровнях.

2. Разрушение угля или песчаника (первичный выброс) происходит при выполнении условия (1) и при отношении размеров скоплений к мощности пласта  $L_i^{DC}/L_0$  и их количества, которые обеспечивают минимальную прочность породы за счет синергетического эффекта снижения прочности и хрупкого механизма разрушения.

3. Снижение прочности угля в предвыбросовом состоянии происходит путем развития повреждаемости и трещиноватости с выделением метана на анизотропных включениях и локальных неоднородностях на микро-, мезо- и макроуровнях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Баланкин А. С.* Самоорганизация и диссипативные структуры в деформируемом теле//А. С. Баланкин//Письма в ЖТФ. – 1990. – Т. 16. – Вып. 7. – С. 14–20.
2. *Безручко К. А.* Опыт применения метода локального прогноза выбросоопасности песчаников на шахтах Донбасса//К. А. Безручко//Уголь Украины. – 2015. – № 12 (6). – С. 42–44.
3. *Вовк О. А.* Прогнозирование горных ударов на основе энергетического критерия//О. А. Вовк//Уголь Украины. – 2012. – Вып. 3. – С. 25–27.
4. *Войтенко Ю. І.* Про в'язке та крижкє руйнування гірських порід при ударі та вибуху//Ю. І. Войтенко, О. В. Ковтун//Науковий вісник НТУУ КПІ. Сер. гірництво. – 2017. – № 34. – С. 9–17.
5. *Зборщик М. П.* Тектонофизическая природа газодинамических явлений при разработке пологих пластов//М. П. Зборщик, В. И. Пилюгин//Уголь Украины. – 2010. – № 6. – С. 8–11.
6. *Михалюк А. В.* Энергетическая оценка мощности горного удара//Нетрадиционные технологии взрывных работ. Сб. научных трудов. – Киев: Наукова думка, 1993. – С. 134–142.
7. *Николин Б. И.* Внезапные выбросы угля (породы) и газа: теория, опыт, практика//Б. И. Николин, С. В. Подкопаев, О. Г. Худoley//Уголь Украины. – 2011. – № 3. – С. 37–40.
8. *Скипочка С. И.* К вопросу о механизме метанообразования в угольных пластах//С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, Н. А. Куценко//Доповіді НАН України. – 2008. – № 11. – С. 73–79.
9. *Фельдман Э. П.* Физическая кинетика системы угольный пласт – метан: массоперенос, предвыбросные явления//Э. П. Фельдман, Т. А. Василенко, Н. А. Калугина//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 3. – С. 46–65.
10. *Фельдман Э., Калугина Н., Чеснокова О.* Эволюция трещин в краевой части угольного пласта при его стационарной отработке//Mining of Mineral Deposits. – 2017. – № 2. – С. 41–45.
11. *Хатилова Н. С.* Математическая модель и основные закономерности процесса внезапного отжима призабойной зоны разрабатываемого угольного пласта: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Новосибирск: Институт теоретической и прикладной механики СО АН СССР, 1984. – 32 с.

12. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

### REFERENCES

1. *Balankin A. S.* Self-organization and dissipative structures in a deformable body//Pisma v ZhTF. – 1990. – Vol. 16. – Iss. 7. – P. 14–20. (In Russian).
2. *Bezruchko K. A.* Experience of local prognosis method application of sandstones outburst danger in Donbas mines//Ugol Ukrainy. – 2015. – № 12 (6). – P. 42–44. (In Russian).
3. *Vovk O. A.* Forecasting of rock outburst based on the energy criterion//Ugol Ukrainy. – 2012. – Iss. 3. – P. 25–27. (In Russian).
4. *Voitenko Yu. I., Kovtun O. V.* On fracture of brittle and ductile rocks by impact and explosion//Naukovyi visnyk NTUU KPI. Ser. hirnyctvo. – 2017. – № 34. – P. 9–17. (In Ukrainian).
5. *Zborshchik M. P., Pilyugin V. I.* Tectonophysical nature of gas-dynamic phenomena in the coal mine//Ugol Ukrainy. – 2010. – № 6. – P. 8–11. (In Russian).
6. *Mihalyuk A. V.* Energy estimation of the power of a rock outburst//Netradicionnye tehnologii vzryvnyh rabot. Sb. nauchnyh trudov. – Kiev: Naukova dumka, 1993. – P. 134–142. (In Russian).
7. *Nikolin B. I., Podkopaev S. V., Hudoley O. G.* Coal (rock) and gas outburst: theory, experience, practice//Ugol Ukrainy. – 2011. – № 3. – P. 37–40. (In Russian).
8. *Skipochka S. I., Palamarchuk T. A., Kucenko N. A.* On the mechanism of methane formation in coal seams//Dopovidi NAN Ukrainy. – 2008. – № 11. – P. 73–79. (In Russian).
9. *Feldman Je. P., Vasilenko T. A., Kalugina N. A.* Physical kinetics of coal – methane system: mass transfer, pre-outburst events//Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. – 2014. – № 3. – P. 46–65. (In Russian).
10. *Feldman Je., Kalugina N., Chesnokova O.* Evolution of cracks in selvedge of a coal bed during its stationary working//Mining of Mineral Deposits. – 2017. – № 2. – P. 41–45. (In Russian).
11. *Hapilova N. S.* Mathematical model and basic regularities of the process of squeezing the lower zone of the developed coal seam: author's abstract. dis. doctor of phys.-math. sciences. – Novosibirsk: Institut teoreticheskoy i prikladnoy mehaniki SO AN SSSR, 1984. – 32 p. (In Russian).
12. *Cherepanov G. P.* Mechanics of brittle fracture. – Moskva: Nauka, 1974. – 640 p. (In Russian).

Рукопис отримано 3.04.2018.