

УДК 622.831.3

Моделирование процесса разрушения горных пород по параметру повреждаемости

Приведены результаты численного моделирования процесса разрушения образцов горных пород с использованием теории повреждаемости и сопоставлены с данными лабораторных исследований определения их прочностных характеристик. Обосновано направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: разрушение горных пород, численное моделирование, повреждаемость, фрактальный анализ, предел прочности, лабораторные исследования.

Контактная информация: worldlab.eg@gmail.com

Постановка задачи. Результаты численного моделирования процесса разрушения образцов горных пород [1] позволяют констатировать, что большинство критериев прочности не могут описать закономерности разрушения осадочных пород без введения физически обоснованного дополнительного коэффициента или системы коэффициентов. Из рассмотренных при численном моделировании критериев прочности наиболее близкие значения получены с помощью критерия Парчевского–Шашенко, погрешность которого не превышает 30 % по отношению к значениям, полученным экспериментальным путем [1]. Использование этого критерия при моделировании процесса разрушения осадочных горных пород дает возможность установить только факт разрушения, но не дает представления о закономерностях дезинтеграции породы, формирования и распространения разрушающих трещин и пр. Чтобы получить картину дезинтеграции породы при численном моделировании, необходимо учесть другие факторы, критерии или иной методический подход, которые позволят определить закономерности процесса разрушения.

Аналитические исследования и численное моделирование. Анализ лабораторных исследований и численного моделирования процесса разрушения осадочных горных пород показал [1], что существенную роль при определении закономерностей разрушения породы играют условия закрепления образца. Выделим три основных условия закрепления: первое – нижнее основание полностью закреплено, верхнее имеет возможность двигаться только по вертикали под действием силы; второе – нижнее основание закреплено только от движения по вертикали, верхнее двигается только по вертикали; третье – нижнее основание полностью закреплено, верхнее двигается только по вертикали под действием собственного веса. На рис. 1 представлены результаты числен-



А. И. ВОЛОШИН,
член-корр. НАН Украины
(ИГТМ НАН Украины)



О. В. РЯБЦЕВ,
канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)



Ю. А. МОРОЗОВ,
инж.
(ИГТМ НАН Украины)

ного моделирования для рассмотренных условий закрепления соответственно.

Лабораторные исследования на образцах показали, что реальное нагружение осуществляется по схеме, промежуточной между рассмотренными вариантами. Кроме того, следует принимать во внимание слоистость образца и модель материала как трансверсально изотроп-

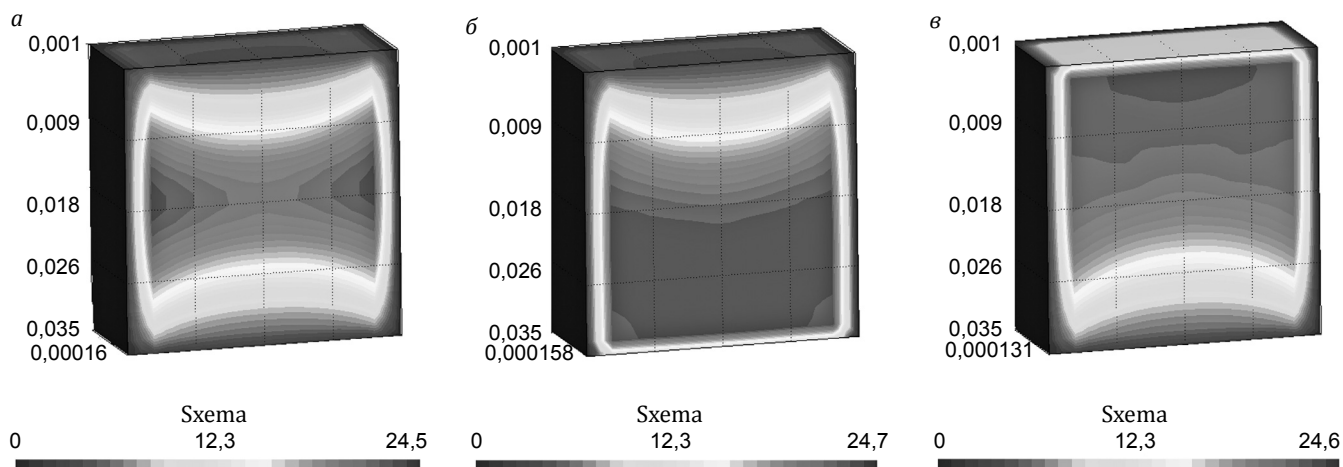


Рис. 1. Результаты численного моделирования процесса разрушения образца осадочной горной породы при разных условиях закрепления: *а* – нижнее основание полностью закреплено, верхнее имеет возможность двигаться только по вертикали под действием силы; *б* – нижнее основание закреплено только от движения по вертикали, верхнее движется только по вертикали; *в* – нижнее основание полностью закреплено, верхнее движется только по вертикали под действием собственного веса.

ного, а не чисто изотропного. В дальнейшем для построения модели трансверсально изотропного материала целесообразно принимать схему закрепления с полностью закрепленным нижним основанием.

Рассмотрим несколько схем нагружения образцов осадочных горных пород, представленных на рис. 2 [2]. Результаты численного моделирования по схемам нагру-

жения, показанным на рис. 2, представлены на рис. 3.

Результаты численного моделирования, представленные на рис. 3, показали явно выраженные эффекты, связанные со слоистостью материала. Следует обратить внимание на то, что переход от модели изотропного материала к трансотропному несколько изменяет характер распределения энергии формоизменения – основной причины деградации материала и в конечном итоге причины разрушения. Совершенно четко можно выделить область, в которой прочностные характеристики материала будут максимально деградировать и нагрузки будут перераспределяться до момента разрушения. Для изотропного и трансотропного тела соответственно эти области показаны на рис. 4.

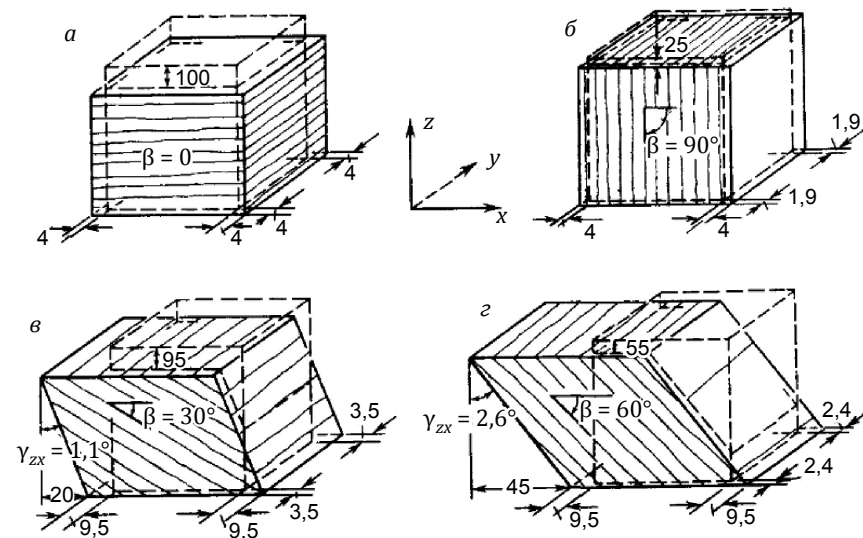


Рис. 2. Схемы нагружения образцов осадочных горных пород [2]: *а* и *б* – слоистость ортогонально и параллельна вектору нагружения; *в* и *г* – слоистость под углом 30° и 60° к верхнему основанию.

Очевидно, что для проведения дальнейших исследований необходимо ввести некий критерий, который бы описывал процесс деградации породы при нагрузке. В качестве такого критерия рассмотрим параметр поврежденности Работнова [3].

Континуальная механика поврежденности исходит из того, что изменение со временем механических свойств материалов феноменологически можно интерпретировать как результат накопления повреждений, различных дефектов, микропор и трещин. Когда повреждения достигают опасного уровня, происходит разрушение. Трещинообразование начинается на самых ранних этапах деформации и связано с ростом имеющихся и возникновением новых суб- и микродефектов. В материале всегда имеется много разных дефектов, которые приводят к высоким местным напряжениям. Уменьшение прочности (свойства тела сопротивляться воздействиям со стороны внешнего окружения) деформируемых твердых тел часто объясняют скрытым разрушением и микродефектной структурой тела. Таким образом, поскольку повреждения тела существенно влияют на характер его разрушения, то несомненно и механика разрушения, и механика поврежденности призваны решить главную прикладную задачу – оценить запас прочности твердого тела.

В основу соотношений, используемых для описания процессов накопления повреждений в рамках предлагаемой модели поврежденного материала, положена предпосылка, что разрушение в точке материала возникает при достижении в ней некоторой энергии WR . Конкретный вид этой энергии определяется механизмом рассматриваемого разрушения и

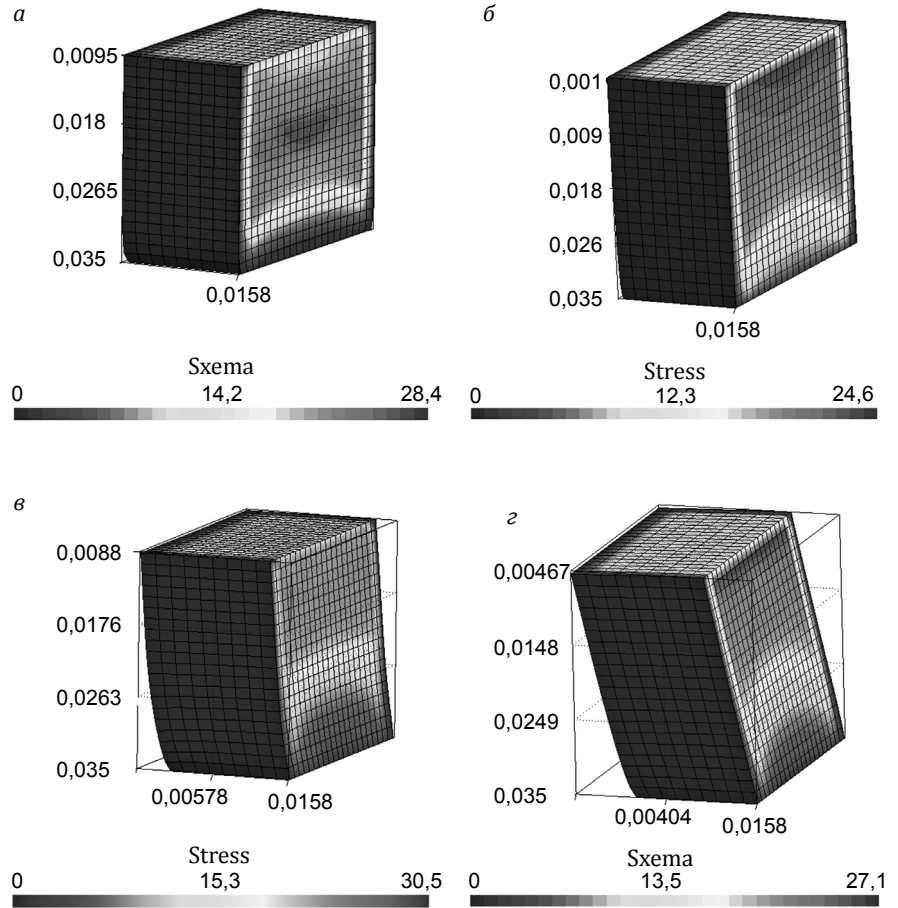


Рис. 3. Результаты численного моделирования нагружения образцов осадочных горных пород в зависимости от направления слоистости: а – слоистость ортогональна вектору нагружения; б – слоистость параллельна вектору нагружения; в – слоистость под углом 30° к верхнему основанию; г – слоистость под углом 60° к верхнему основанию.

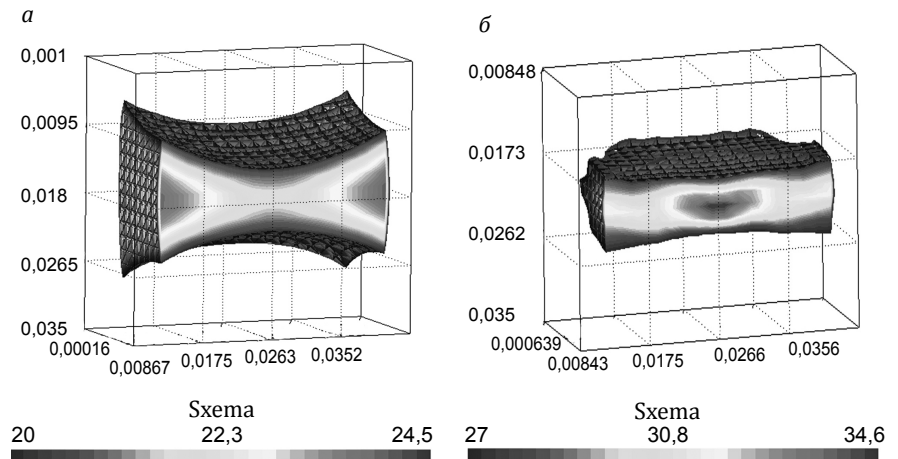


Рис. 4. Численное моделирование областей с максимальной деградацией материала: а – изотропное тело; б – трансотропное тело.

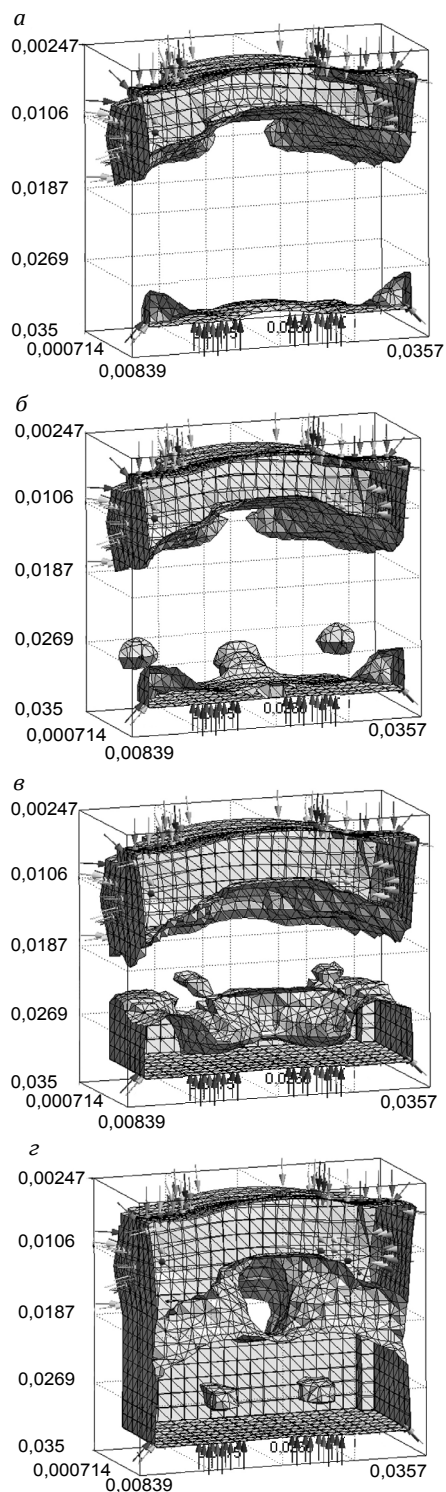


Рис. 5. Распределение повреждаемости на стадиях, предшествующих разрушению: а, б и в – повреждаемость на 65-м, 70-м и 75-м шагах нагружения; з – повреждаемость на 80-м шаге нагружения (момент разрушения).

представляет собой работу некоторой части тензора напряжений на необратимых деформациях. Причем для каждого конкретного материала значение WR , соответствующее выбранному механизму разрушения, зависит от реализуемого вида напряженно-деформированного состояния (НДС) и температуры T . В результате разрушение представляется как процесс, характеризующийся изменением энергии разрушения W от $W = 0$ для неповрежденного материала до $W = WR$ – полного разрушения материала в рассматриваемой точке.

Поскольку значение WR зависит от вида породы, вида НДС и температуры, для описания текущего состояния поврежденности вместо энергии W удобнее использовать функцию поврежденности – нормированный аналог энергии W . Для неповрежденного материала функция поврежденности равна 0, в процессе разрушения ее значение увеличивается до предельного значения, равного 1.

Для численного моделирования дезинтеграции образца осадочной горной породы с использованием параметра поврежденности рассмотрим трансверсально изотропное тело и построим итерационный процесс, аналогичный методу переменных параметров упругости Биргера при решении разрешающих уравнений МКЭ, построенных на базе секущих матриц жесткости материала. В его основе – представление зависимости деформаций от напряжений в форме так называемого обобщенного закона упругости, в котором параметры упругости зависят от напряженного состояния в одной точке и поэтому различны в разных точках тела.

Традиционный критериальный подход феноменологической макроскопической механики разрушения в принципе не способен решать проблему прогноза разрушения, так как основан на макроскопическом масштабе усредненного описания, в то время как все твердые тела и геосреды – многомасштабные системы. Фундаментом эволюционной концепции разрушения являются идеи иерархичности и многомасштабности деформационных процессов – базовые идеи и физической мезомеханики, и нелинейной динамики [4].

Степенные законы распределения – фундаментальное свойство эволюции большинства многомасштабных иерархических нелинейных систем и в случае нагружаемых сред. Полученные численные решения демонстрируют фундаментальное свойство всех эволюционных процессов, а именно наличие двух стадий: квазистационарной стадии сравнительно медленного накопления изменений в нелинейной системе; катастрофического сверхбыстрого этапа эволюции, когда события развиваются в режиме с обострением [4].

Теория поврежденности дает феноменологическое описание эволюции рассеянных дефектов – микротрещин, количество которых в любом элементарном объеме предполагается весьма большим, что позволяет описывать этот процесс с помощью осредненного параметра – поврежденности. Главное преимущество теории поврежденности перед теориями прочности состоит в уче-

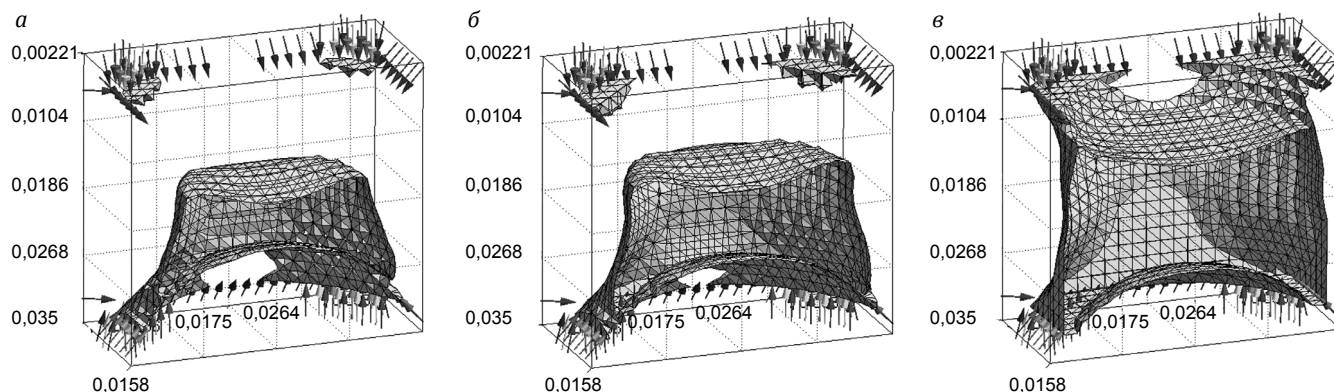


Рис. 6. Распределение повреждаемости на стадиях, предшествующих разрушению: а и б – повреждаемость на 70-м и 75-м шагах нагружения; в – повреждаемость на 80-м шаге нагружения (момент разрушения).

те предыстории нагружения, предшествующей макроскопическому разрушению [5].

При численном моделировании на восходящей ветви кривой деформирования происходит накопление микрповреждений, которые на нисходящей ветви объединяются в магистральные трещины. Нисходящая ветвь может быть построена на супер жестких испытательных машинах. Не имея опытных данных, следует задаться некоторой моделью и ее материальными константами. Существует достаточно много моделей [6]. Наиболее общие и одновременно наиболее гибкие – это энергетические принципы [6].

Упругая часть, накопленная к моменту разрушения, составляет некую долю общей энергии, рассеянной при разрушении, т. е. ее можно оценить. Исходя из этого, а также используя понятие единой кривой и следуя концепции повреждаемости среды, есть возможность уйти от феноменологических теорий прочности, которые в случае геоматериалов работают не самым лучшим образом, кроме того, опытные параметры, необходимые для их полноценной реализации, достаточно сложно получить. Ниже приведены результаты численного моделирования, подтверждающие сделанные выводы.

Численное моделирование выполнялось для породного образца в форме куба с гранью 35 мм. Нагружение осуществля-

лось пошагово (за 50–80 шагов) за счет движения верхней плиты пресса. На рис. 5 изображено распределение повреждаемости на стадиях, непосредственно предшествовавших разрушению, и отчетливо виден пошаговый рост областей высокой повреждаемости, а также показан градиент скалярного поля повреждаемости (направление максимальной скорости возрастания).

Аналогичные процессы происходят и в образцах с закреплением: нижняя грань жестко закреплена, верхняя имеет возможность двигаться только по вертикали. Распределение повреждаемости на стадиях, предшествующих разрушению для этих условий, показано на рис. 6.

На рис. 5 и 6 наблюдается слияние нескольких первоначально непересекающихся областей в один перколяционный кластер. К разрушению породного образца приводит образо-

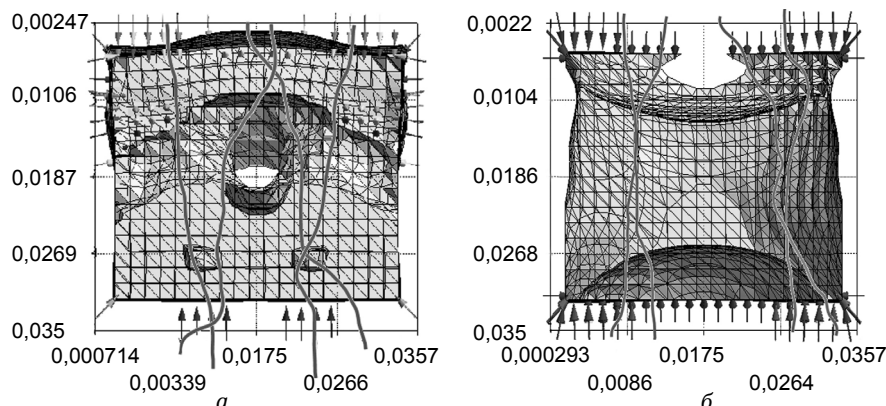


Рис. 7. Образование магистральных трещин в момент разрушения породных образцов: а и б – не жестким и с жестким закреплением нижнего основания образца.

вание магистральных трещин по линиям максимального градиента (кривые на рис. 7), что соответствует перколяционно-кластерной модели накопления повреждений. Результаты моделирования процесса разрушения породных образцов (рис. 7) хорошо коррелируют с соответствующими экспериментальными данными [1].

Выводы. Результаты численного моделирования достаточно хорошо описывают процессы разрушения породных образцов [1] и позволяют сделать заключение, совпадающее с результатами работ отечественных и зарубежных авторов о том, что механизм разрушения геоматериалов имеет перколяционно-фрактальный характер, привлекая методы сплошной среды (не обязательно изотропной), теорию повреждаемости (скалярную или тензорную) и теорию перколяционных кластеров. Поэтому дальнейшие исследования будут сосредоточены на использовании теории повреждаемости и фрактального анализа для решения задач, связанных с установлением закономерностей разрушения осадочных горных пород. Это позволит вывести комплексный геомеханический прогноз напряженно-деформи-

рованного состояния вмещающих пород на качественно новый уровень.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Волошин А. И.* Численное моделирование процесса разрушения горных пород / А. И. Волошин, О. В. Рябцев, Ю. А. Морозов // Уголь Украины. – 2016. – № 8. – С. 39–43.
2. *Витке В.* Механика скальных пород / В. Витке; пер. с нем. – М.: Недра, 1990. – 439 с.
3. *Степанова Л. В.* Описание рассеянного разрушения: параметр поврежденности Ю. Н. Работнова: историческая справка, фундаментальные результаты и современное состояние / Л. В. Степанова, С. А. Игонин // Вестник СамГУ. Сер. естественно-науч. – 2014. – № 3 (114). – С. 97–114.
4. *Макаров П. В.* Самоорганизованная критичность деформационных процессов и перспективы прогноза разрушения / П. В. Макаров // Физическая мезомеханика. – 2010. – № 13. – С. 97–112.
5. *Извеков О. Я.* Реализация энергетической модели континуального разрушения хрупких сред в SIMULIA/ABAQUS 6.9 / О. Я. Извеков, А. А. Селицкий, А. М. Крупник. – Режим доступа: http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_es10_mfti.pdf. – Название с экрана.
6. *Грабовский А. П.* Деформационные модели кинетики повреждаемости конструкционных материалов при упругопластическом деформировании / А. П. Грабовский, А. А. Бондарец // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2013. – № 1. – С. 26–34.

ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

Год 1977

В журнале № 9 в статье Н. А. Богомолова и Е. А. Воловика «Основные требования к новой системе шахтного водоотлива» рассмотрены недостатки существующей системы шахтного водоотлива, а также основные принципы: непрерывность действия, откачка воды вместе со взвесями, работа насосных агрегатов с отрицательной высотой всасывания, прямые схемы водоотлива, на которых базируется новая эффективная система шахтного водоотлива.

Внедрение новой системы позволит в 2,5–3 раза снизить трудоемкость обслуживания, резко увеличит эффективность и надежность системы.

.....

В журнале № 8 в статье Н. С. Полякова «О создании проходческой техники для проведения выработок по крепким породам» приведены основные результаты применения выработок по крепким породам в нашей стране и за рубежом. Поставлены неотложные задачи по созданию проходческой техники для указанной цели.