

Канд. техн. наук С.Ю. Макеев,
науч. сотр. В.Я. Осенний,
канд. техн. наук Р.А. Дякун
(ИГТМ НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ НА ПРОЦЕССЫ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Наведені результати експериментальних досліджень щодо навантаження зразків гірничих порід різного ступеню газонасиченості. Встановлено, що границя міцності на одновісне стиснення дегазованих зразків алевроліта кубічної форми в середньому у 1,3 рази більше, ніж у газонасичених, а питома енергія, яка передана дегазованими зразками перед їх руйнуванням, у 1,5 рази перевищує енергію зразків, насичених газом.

THE INFLUENCE OF SATURATION GAS ON THE PROCESSES OF CRACKS FORMATION AND DESTRUCTION OF ROCKS

Results of experimental researches are brought on the loading of rock samples with different degree of saturation gas. It is set that tensile strength on the monaxonic compression of gas-free rock samples of cube form siltstone on the average there is more in 1,3 time, than at saturated by gas, and the specific energy transmitted to gas-free rock samples before their destruction, in 1,5 time exceeds energy of the rock samples saturated by gas.

Строение углепородного массива, особенно его пористость и дефектность, имеют большое влияние на формирование его напряженно-деформированного состояния, газодинамические свойства и выбороопасность при ведении горных работ. Присутствие в поровом пространстве газообразной составляющей в значительной мере влияет на физико-механические свойства породы. Дефекты сплошности способствуют росту напряжений на контуре простирания трещины и пор. В результате деформаций происходит изменение структуры, порового пространства и механических свойств горных пород [1-2].

Учитывая, что в природных условиях в угольных пластах и вмещающих породах всегда содержится газ, то роль газодинамического фактора является неотъемлемой составляющей в формировании и развитии напряженно-деформированного состояния горного массива. Имеющееся в поровом пространстве горной породы газообразное вещество изменяет ее свойства. Если же при прочих равных условиях газ находится в порах под давлением, то в этом случае несущая способность горной породы еще более снижается из-за растягивающего действия газонаполненного порового пространства. А если газ является еще и химически активным, т.е. может вступать в химические реакции с материалом горной породы, то он может очень сильно изменить механические характеристики породы. При этом химическая активность может, как упрочнять, так и ослаблять горную породу.

Вмещающие породы выбороопасных пластов угля имеют существенное влияние на характер проявления горного давления, а именно вывалы в призабойной части забоя, отжимы угля, внезапные выбросы угля и газа, поэтому по-

лучение и учет данных о физико-механических свойствах при допредельном и запредельном нагружении газонасыщенных образцов горных пород, вмещающих отработываемые угольные пласты, является важной и актуальной научно-практической задачей.

Исследование влияния газонасыщенности на прочностные свойства горных пород проводились многими учеными в основном для различных видов угля, песчаника, мрамора. Эксперименты заключались в искусственном газонасыщении образцов, после чего их подвергали различным видам нагружения на специальных прессах в лабораторных условиях [3-6].

Практически во всех работах исследователи приходили к сходным выводам, что поровое давление, создаваемое инертным газом, оказывает чисто механическое действие на скелет породы, которому противодействует внешнее давление, алгебраически суммируемое с поровым. В результате происходит изменение параметра, характеризующего вид напряженного состояния. Наличие газа в образце при сжатии увеличивают жесткость системы пресс-образец. По размеру площадки текучести и характеру участка диаграммы ниспадающей ветви можно судить об изменениях, произошедших при газонасыщении, и о склонности материала к разрушению. Газонасыщенные угли разрушаются очень интенсивно и в значительных объемах, с образованием мелких фрагментов, разрушение же неgasонасыщенных образцов происходит при разделении их на крупные фракции.

В реальных условиях высокого газонасыщения горные породы кровли и почвы ведут себя при отработке угольных пластов по-разному. Поэтому, с целью понимания и изучения механизма смещения пород в выработки в сложных горно-геологических условиях, а, следовательно, для совершенствования технологий проведения и крепления выработок в лабораторных условиях были поставлены эксперименты по насыщению инертным газом образцов вмещающих горных пород.

В связи со сложностью нагнетания газа в такие породы, как аргиллиты и алевролиты (песчаники более пористые), исследования на них затруднены и проводилось их немного. С целью насыщения таких пород флюидами в ИГТМ НАН Украины была разработана и изготовлена специальная вакуумная камера (рис. 1).

Способ насыщения пород под вакуумом состоял в следующем: в вакуум-эксикатор помещались образцы и выдерживались в течение 6-14 часов при разряжении 0,1 мм рт. ст. На дно эксикатора, не снимая вакуума, через специальное отверстие с помощью вентиля через шланг подавался флюид из специальной закрытой емкости и образец выдерживался в вакууме в течение определенного времени. Образцы взвешивались до вакуумирования и после подачи флюида. Затем образцы устанавливались в стенд-камеру (рис. 2) и выдерживались при давлении инертного газа 8-10 МПа.



Рис. 1 – Камера для вакуумирования и последующего насыщения флюидом горных пород

После этого стенд-камера устанавливалась на пресс и производилось нагружение по заданной программе. Таким образом, на прессе исследовались деформация и разрушение образцов, насыщенных флюидом, и результаты сравнивались с данными, полученными для ненасыщенных образцов тех же проб. При проведении исследований использовались также результаты акустических измерений скорости прохождения импульсов через образцы различных горных пород и [7].



Рис. 2 – Стенд-камера для нагружения газо-водонасыщенных образцов под прессом

Из различных участков шахт Центрального Донбасса, ПО «Укрзападуголь» и ПО «Павлоградуголь» с привязкой к месту проведения выработок отбирались пробы горных пород и изготавливались образцы в виде кубиков, грани которых были ориентированны перпендикулярно, параллельно или под определенным углом к слоистости. Образцы изготавливались с помощью дисковых (алмазных) пил. Грани обрабатывались на шлифовальных станках порошкообразными абразивами.

Основным требованием к изготавливаемым образцам были параллельность их сторон, отклонения в линейных размерах образцов допускались не более 1%. Правильность формы и размера образцов проверялись стальным угольником и штангенциркулем. При обработке образцов особое внимание уделялось тща-

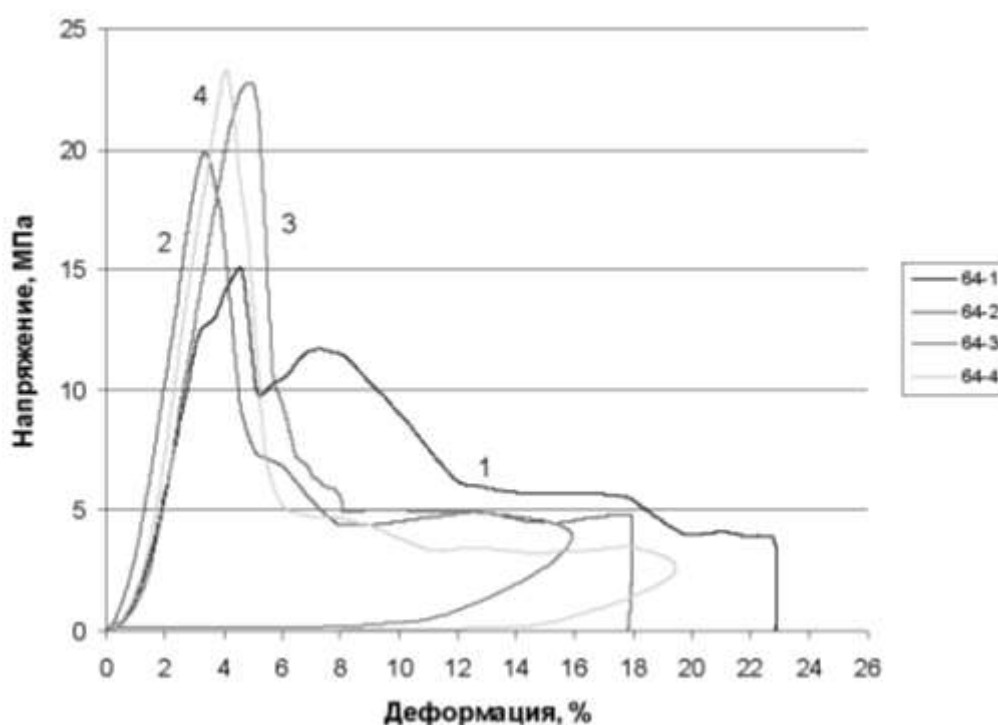
тельности шлифовки и доводки рабочих поверхностей, непосредственно принимающих на себя нагрузку пресса. Эти поверхности после обработки доводились на плоском стекле с применением мелких шлифовальных порошков. Доведенные рабочие поверхности образцов отмечались карандашом особым знаком. Блоки для испытаний выбирались по возможности без трещин.

В качестве примера приведем испытания образцов алевролита шахты «Павлоградская», пробы № 64, отобранной из непосредственной кровли 4/6 СШ ПК 28. Физико-механические свойства образцов данной пробы приведены в табл. 1. Удельная энергия, приведенная в таблице, показывает значение затраченной энергии при нагружении, отнесенная к объему образца, при которой образец начинает разрушаться.

Таблица 1 – Физико-механические свойства образцов алевролита

Параметры	Номер образца			
	64-1	64-2	64-3	64-4
Модуль упругости, МПа	565,6	778,8	714,3	808,3
Нагрузка, кН	25,74	31,62	39,41	38,33
Деформация, мм	1,869	1,407	1,891	1,539
Затраченная энергия, Дж	24,05	22,24	37,26	29,50
Объем образца, см ³	69,573	64,962	70,311	66,069
Удельная энергия, Дж/см ³	0,345	0,342	0,530	0,446

Типичные диаграммы напряжение-деформация, полученные при испытаниях на одноосное сжатие образцов пробы 64 представлены на рис. 3.



1, 2 – диаграммы для образцов, насыщенных азотом

3, 4 – диаграммы для образцов материнской породы без насыщения

Рис. 3 – Данные испытаний на одноосное сжатие образцов алевролита из непосредственной кровли угольного пласта С₄ шахты «Павлоградская»

Неупругое поведение алевролита в условиях одноосного сжатия проявляется во всем многообразии: от хрупкого или псевдохрупкого разрушения, до прерывистого скольжения, псевдопластичного и пластичного течения. Различие в характере поведения образцов 64-1 и 64-2 обусловлено изменением структуры внутри образца 64-1. Для понимания причин, формирующих тот или иной тип неупругого поведения алевролитов при одноосном сжатии, необходимо знание о взаимосвязи внутренних процессов и полных кривых напряжение-деформация.

Несущие способности и деформации образцов алевролита, регистрируемые при их испытании, – важные параметры. Тем не менее, это лишь внешние проявления внутренних процессов, происходящих в горной породе при ее нагружении и деформировании. Несовпадение нагрузочной и разгрузочной характеристик алевролита приводит к появлению гистерезисной петли и определяет необратимые затраты энергии на деформирование.

Для понимания механизма разрушения газонасыщенных пород необходимо иметь информацию о процессах трещинообразования внутри образца и оценить происходящие изменения.

Рассматривая диаграммы 1 и 2 на рис. 3, видим, что наиболее явно выражена более быстрая мобилизация у второго образца, чем у первого в начальном этапе нагружения. Относительно ненасыщенных газом образцов (диаграммы 3 и 4), можно сказать, что деформация у них больше в самом начальном состоянии. Это говорит о том, что в процессе расширения пор в накопленном повреждении газ выходит и проявляет разгрузочное действие. То есть, прочность у образцов, насыщенных газом снизилась в 1,2 раза, а энергоемкость разрушения – в 1,4 раза, а именно на энергоемкость разрушения газ влияет в 1,16 раза больше, чем на предел прочности.

Таким образом, предел прочности на одноосное сжатие дегазированных образцов алевролита кубической формы в среднем в 1,3 раза больше, чем у газонасыщенных, а удельная энергия, сообщенная дегазированным образцами перед их разрушением, в 1,5 раза превышает энергию образцов, насыщенных газом.

При рассмотрении образцов 64-1 и 64-2 видно, что они оба имеют практически одинаковую прочность, но разница, видимо, в пористости. Характерной особенностью деформирования образца алевролита с высокой пористостью явилось заметное накопление остаточных деформаций образца 64-1, чем и объясняется отклонение деформирования от линейной зависимости и наличие разницы между модулями упругости насыщенных и ненасыщенных образцов, вычисленными по ветвям нагружения и разгрузки. Из сказанного следует, что для более эффективного разрушения газонасыщенной породы, например, рабочим органом комбайна, важно достичь предела прочности, а энергия дополнительного разрушения реализуется за счет наличия газа.

Типичная динамика роста трещин в образце алевролита при его нагружении представлена на рис. 4.

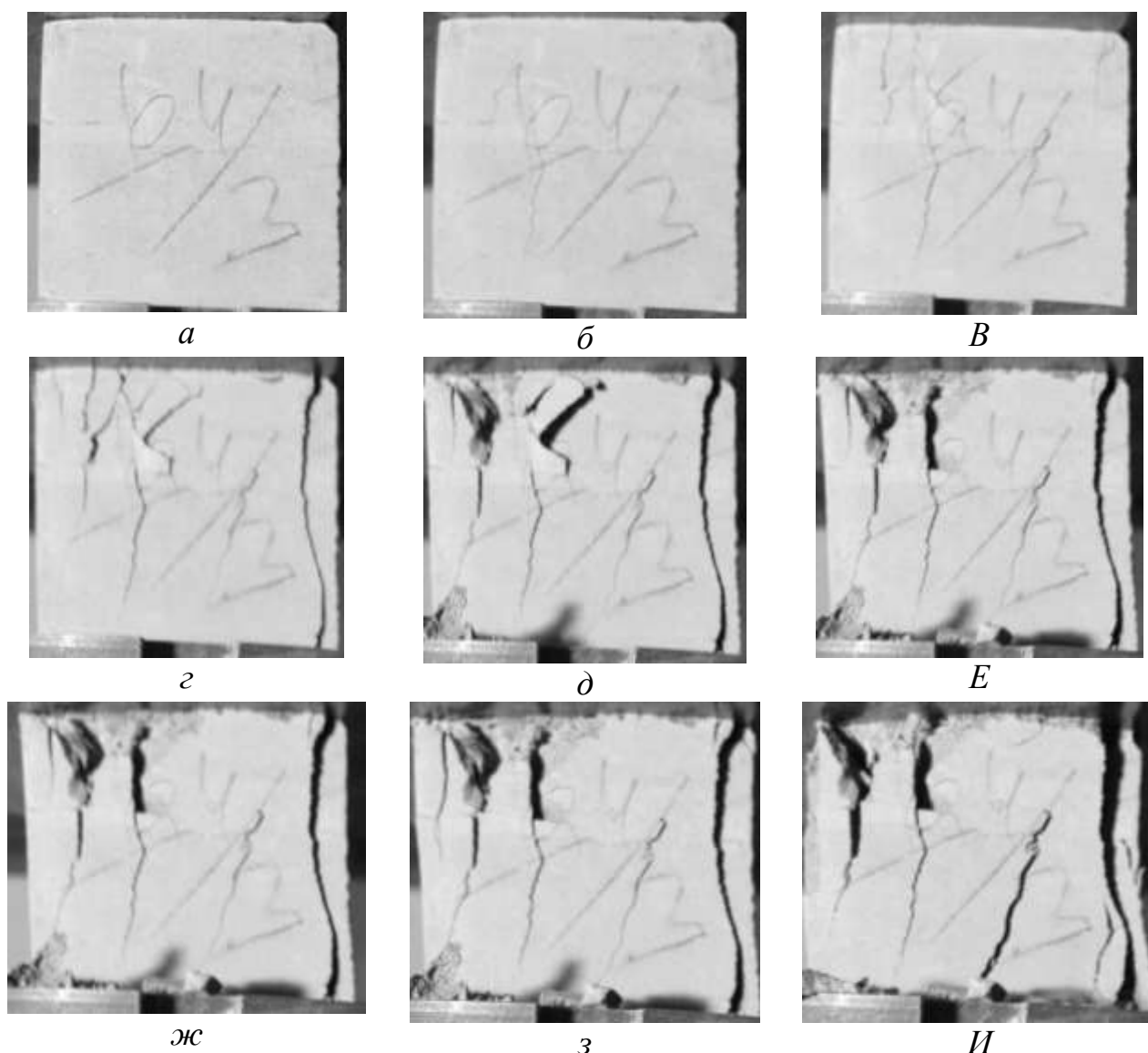
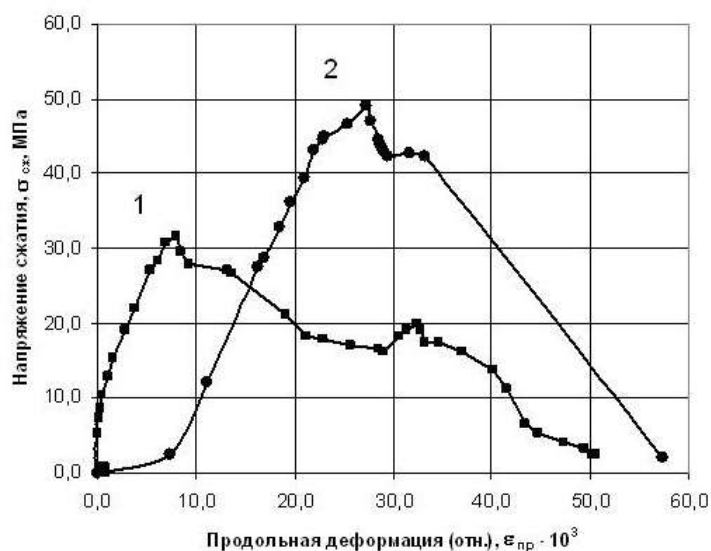


Рис. 4 – Типичная динамика роста трещин в образце алевролита при его одноосном сжатии

Анализируя характер роста трещиноватости на рис. 4, можно сказать следующее. По мере роста нагрузки первая вертикальная трещина появляется в левой части образца (рис. 4-б), затем развивается такая же трещина в его правой части (рис. 4-в). Несколько позже наблюдается соединение правой трещиной верхнего и нижнего оснований и развитие сети веерных трещин в левом верхнем углу (рис. 4-г), которые приводят к отколу отдельных фрагментов вблизи левого угла верхней грани и развитию двух вертикальных параллельных трещин (рис. 4-д). Левая из них замыкается на нижнем левом углу образца, вызывая откол его угловой части. На рис. 4 (е-з) в верхней плоскости образца происходит постепенное измельчение кромки, а все трещины увеличиваются в размерах. В середине образца, начиная с рис. 4-в, постепенно развивается под углом в 30^0 к основанию внутренняя трещина, которая раскрывается на нижнем основании (рис. 4-и). Характер развития трещин показывает классический пример разрушения образца при одноосном сжатии для данного типа пород.

Следует отметить, что образование магистральных трещин в образцах (см. рис. 4 (г-и)) приводит к перераспределению нагрузки внутри них и, как следствие, напряженного состояния, а именно в большинстве случаев в образце за короткий промежуток времени проходит волна разгрузки, степень и интенсивность которой частично определяется по запредельному характеру деформирования.

Аналогичные исследования проведены с кернами алевролита, отобранными керноотборником в 26 восточном конвейерном штреке в потолочине угольного пласта m_3 в условиях шахты «Трудовская» ГП «Донецкуголь». Типичные результаты одноосного нагружения газонасыщенных образцов и материнской породы приведены на рис. 5.



1 – диаграмма для образца, насыщенного азотом

2 – диаграмма для образца материнской породы без насыщения

Рис. 5 – Данные испытаний на одноосное сжатие образцов алевролита из непосредственной кровли угольного пласта m_3 шахты «Трудовская»

Анализ рис. 3 и 5 позволил установить следующее. Для одного и того же типа горных пород (алевролит), отобранных в различных регионах, горно-геологических и горнотехнических условиях наблюдается однотипный характер деформируемости и разрушаемости насыщенных и ненасыщенных газом образцов. Он заключается в том, что насыщение газовым флюидом приводит к уменьшению предельных напряжений и относительных деформаций, при которых наступает переход в область запредельного разрушения. Эта закономерность не зависит от геометрии образца (эксперименты проведены для кубической и цилиндрической формы).

Выводы:

Образование магистральных трещин в образцах (см. рис.4 (г-и)) приводит к перераспределению нагрузки внутри них и, как следствие, напряженного состояния, а именно в большинстве случаев в образце за короткий промежуток времени проходит волна разгрузки, степень и интенсивность которой частично

определяется по предельному характеру деформирования. Возможность развития такого механизма событий подтверждается в работах [8, 9], когда образование заколов во вмещающих породах может формировать в предельно-напряженном угольном пласте динамические волны разгрузки с инициированием динамического разрушения угля до уровня тонкодисперсных фракций.

Для более эффективного разрушения газонасыщенной породы, например, рабочим органом комбайна, важно достичь предела прочности, а энергия дополнительного разрушения реализуется за счет наличия газа.

Для управления состоянием непосредственной и основной кровли одними из важных технологических показателей являются учет в расчетах по принятию решений управления горным давлением предела прочности и удельной энергии, при которых происходит развитие предельного деформирования разной степени газонасыщенности вмещающих пород и, соответственно, подбора схем и степени их дегазации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов – К. Наукова думка, 1989. – 192 с.
2. Кириллов А.К. Исследование процесса уплотнения ископаемых углей при деформировании образцов в камере высокого давления / А.К. Кириллов, В.В. Слюсарев // Физика и техника высоких давлений. – Донецк, 2006. – Том.16, №3. – С. 137-143.
3. Эттингер И. Л. Газоёмкость ископаемых углей / И. Л. Эттингер. – М., Недра, 1966. – 224 с.
4. Механика и физика динамических явлений в шахтах / А.Н. Зорин, В.Г. Колесников, К.К. Софийский [и др.]. – К. Наукова думка, 1979. – 168 с.
5. Ставрогин А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271с.
6. Малышев Ю.Н. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни. – М.: Издательство Академии горных наук, 2000. – 519с.
7. Влияние физико-механических свойств песчаника, алевролита, аргиллита на характер их разрушения / С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний, А.С. Баскевич, Г.А. Рыжов // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: Науково-виробничий збірник / Кременчуцький Державний політехнічний ун-т ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2010. – № 2/2010(6). – С. 21-27.
8. Моделирование динамического разрушения предельно напряженного угля по радиально-послойному механизму вблизи тектонического нарушения / Р.А. Дякун, К.К. Подоляк, И.Л. Дякун, В.Н. Светличный // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: матер. XXII Международ. науч. школы (17-23 сент. 2012). – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2012. - С. 120-124.
9. Дякун Р.А. О параметрах физического моделирования динамического разрушения предельно напряженного угля по радиально-послойному механизму вблизи тектонического нарушения / Р.А. Дякун // Форум гірників - 2012: матеріали міжнародної конференції (03-06 жовт. 2012). – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012. – С. 125-128.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПАЛЕОДЕГАЗАЦИИ НЕОГЕНА И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

Склад флюїдів з Гераклітів принципово не відрізняється від складу газів із сучасних зон струминного виділення в Чорному морі, що є підтвердженням їх генетичного споріднення. Дані аналізів вказують на різкі коливання змістів і непостійний склад газових флюїдів палеодегазації в неогені. Наявність газів вуглеводнів та слідів нафти в Гераклітах, тектонічна будова регіону дозволяють зробити висновок про високі перспективи знаходження родовищ нафти і газу в Південно-Західному Криму.

THE RESULTS OF STUDYING PALEO DEGASSING OF NEOGENE AND OIL AND GAS POTENTIAL THE SOUTH-WESTERN CRIMEA

The composition of fluids from Heraclitus has no fundamental differences from the gas composition from the modern jet ejections zones in the Black Sea, which is a confirmation of their genetic relatedness. Data of analysis show sharp fluctuations of the contents and unstable structure of gas fluids paleo degassing of Neogene. The presence of hydrocarbon gases and traces of oil in Heraclitus, the tectonic structure of the region allow to conclude high prospects of finding oil and gas in the South-West Crimea.

В научной литературе появлялось значительное количество новых данных о процессах углеводородной глубинной дегазации Земли, которые ставят под сомнение биогенный генезис образования нефти и газа [3, 10, 15, 26, 2]. Абиогенная природа образования углеводородов требует иных подходов к поисковым работам и признакам нефтегазоносности, а также переоценки геологических перспектив, ранее изученных регионов [17, 27]. Новыми главными критериями наличия нефти и газа являются процессы углеводородной дегазации недр, тектоническое строение и геодинамическая активность разломной тектоники региона [3, 27].

Важнейшим следствием поступления углеводородных флюидов является подпитка существующих и образование новых месторождений нефти и газа, что сопровождается выделением энергии, изменением геологических свойств горных пород и вспышками жизнедеятельности морских организмов в местах их выхода на границе литосферы, гидросферы и атмосферы (пузырьковая деятельность). В наше время наиболее изучены процессы холодной дегазации в грязевых вулканах суши, на дне океанов, морей и озера Байкал [4, 5, 7, 13, 14, 22, 23]. Обычно в водной среде рядом с выходами холодных флюидов находятся «оазисы жизни», «аутигенные» карбонатные образования и залежи газогидратов [5, 7, 14, 23]. Современные «аутигенные» карбонатные образования из разных частей гидросферы различаются по внешнему виду, минералогическому составу, по геохимии, содержанию изотопов углерода и кислорода, что связано с различными физико-географическими условиями их образования и газовым составом флюидов дегазации [22, 29]. Общим в их генезисе являются наличие дегазации флюидов, содержащих метан, на границе литосферы и гидросферы и бактериальных матов с сообществом метанотрофных архей. Можно наблюдать следующие связи между дегазацией, образованием карбонатов и наличием жизни. Большая часть участков струйного выделения газов характе-