

А. Б. Ступин, д-р техн. наук профессор<sup>1</sup>, М. В. Бескровная, канд. техн. наук<sup>2</sup>,  
В. В. Юрченко<sup>1</sup>, М. Кобченко<sup>2</sup>

1 – Донецкий национальный университет, г. Донецк;

2 – университет г. Осло, Норвегия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОД, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ СЕКВЕСТРАЦИИ CO<sub>2</sub>, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ НА СИНХРОТРОНЕ

*Исследованы результаты опытов по определению пористости образцов песчаников, способных секвестрировать CO<sub>2</sub>, которые были взяты из скважин, пробуренных в пределах Беляевского купола вблизи с. Беляевка Первомайского района Харьковской области. Используя программное обеспечение Avizo Fire, было исследовано 4 образца при двукратном и десятикратном увеличении. Полученные значения пористости, около 3 %, позволяют сделать вывод о перспективности использования осадочных пород Донбасса для длительного хранения CO<sub>2</sub>.  
**Ключевые слова:** осадочные породы Донбасса, геологическое хранение CO<sub>2</sub>, пористость горных пород*

### *Состояние вопроса*

Преимуществом использования метанообильных пластов для секвестрации углекислого газа является то, что риск утечек газа чрезвычайно мал. Удержание и герметизация метана в сланцевых пластах были эффективны в течение миллионов лет. Важное преимущество такой секвестрации углекислого газа (CO<sub>2</sub>), по крайней мере, вдвое больше, чем метана. Кроме того, адсорбция CO<sub>2</sub> породой увеличивает эффективность вытеснения метана [1].

Известна также и схема нагнетания углекислого газа [1], которая состоит из улавливания газовых потоков при выделении CO<sub>2</sub> во время тех или иных производственных операций, сжатия газа высоким давлением, его передвижения к месту инъекции по трубам и, наконец, закачки через скважины в пласт. Углекислый газ двигается через пласт по его природным трещинам (кливажной системе) и отсюда распространяется к микропорам, где находится адсорбированный метан.

Для решения проблемы секвестрации CO<sub>2</sub> необходимо определить: во-первых, насколько эффективен природный резервуар, т. е. какова его способность накапливать и удерживать углекислый газ, и, во-вторых, можно ли создать модель, которая позволит определить емкость этого резервуара.

Подобно [1], допускаем, что сланец также как и уголь отличается от большинства других резервуаров структурой пор, проницаемостью, другими геологическими характеристиками, механизмами хранения и транспортировки через него жидкостей и газа. Это делает математическое описание и аналитическую интерпретацию газовых потоков в угольных пластах относительно сложными проблемами. С целью их решения выполняются многочисленные измерения особенностей пород, анализы продуктивности скважин и в целом резервуара, разработано компьютерное моделирование потока жидкости в угольных пластах, основанное на имеющихся моделях традиционных нефтяных и газовых месторождений с использованием, например, подхода, по которому состояние неподвижной нефти условно представляет массу угля, а объем газа, адсорбируемый его поверхностью, рассчитывается как отношение раствора газ-нефть в традиционной модели.

Закачивание  $\text{CO}_2$  в геологические формации насчитывает более чем тридцатилетний опыт работ по повышению нефте- и газоотдачи пластов. Кроме этого, в последнее время в различных странах проводятся многочисленные исследования по геологическому хранению  $\text{CO}_2$ . В качестве долгосрочных хранилищ  $\text{CO}_2$  рассматривают главным образом поровые или трещиноватые осадочные породы (коллекторы), ограниченные от окружающей горной среды и земной поверхности слабопроницаемыми или практически непроницаемыми породами (флюидоупорами или покрывками). Следует отметить, что природные хранилища газов (в том числе и горючих) естественного генезиса являются надежными на протяжении сотен тысяч и миллионов лет, утечки газов из них пренебрежимо малы.

Выделяются три основных типа формаций, в которых возможно геологическое хранение  $\text{CO}_2$ : истощенные или находящиеся на стадии истощения нефтегазоносные бассейны (oil and gas reservoirs), глубоко залегающие соленосные формации (saline formations) и не имеющие промышленного значения угольные пласты (unmineable coal seams). Среди других возможных вариантов геологических формаций также рассматриваются базальты (basalt formations) и горючие сланцы (organic rich shales), однако их потенциал еще пока недостаточно изучен.

Успешность геологического метода хранения  $\text{CO}_2$  подтверждается результатами экспериментов, проводимых в разное время компаниями MRCSP, MGSC, SECARB, SWP, WESTCARB, Big Sky, PCOR (USA), а также в рамках проектов Weyburn, Fenn Big Valley (Канада), Sleipner (Норвегия), Yubari (Япония), Qinshui Basin (Китай) и др. [2–4].

На территории Украины расположены крупные нефтегазоносные провинции с большим объемом продуктивных горизонтов. Один из самых крупных нефтегазоносных районов – Днепроовско-Донецкий бассейн расположен в границах двух больших структур: Днепроовско-Донецкой впадины (ДДВ) и Донецкого каменноугольного бассейна (Донбасса). Газоносность Днепроовско-Донецкого бассейна тесно связана с терригенными осадочными породами среднего-верхнего карбона и нижней перми. Метановая газоносность Донбасса также связана с угленосной толщей карбона.

Результаты предыдущих геологоразведочных работ показали, что в геологических условиях Донбасса наиболее перспективными районами в отношении газоносности являются участки с сохранными гидрохимическими отложениями нижнепермского периода [5]. Важная роль гидрохимических отложений заключается в их хороших изоляционных свойствах.

Таким образом, лучшими фильтрационно-емкостными параметрами среди палеозойских пород Донбасса обладают песчаники [6].

### ***Цель исследования***

Целью работы является рассмотрение первостепенной задачи, которую необходимо решить для количественной оценки возможностей геологического хранения  $\text{CO}_2$  в Донбассе, что в свою очередь позволит оценить не только потенциал  $\text{CO}_2$ -емкости Донецкого бассейна, а и возможности выхода метана в процессах начавшегося промышленного освоения газовых ресурсов Донбасса и Харьковской области. Основным параметром такой задачи является значение пористости горных пород, определению которой для образцов взятых из скважин, пробуренных в пределах Беляевского купола вблизи с. Беляевка Первомайского района Харьковской области, посвящена эта работа.

### ***Изложение основного материала исследования***

Классический метод моделирования природно-трещиноватого резервуара основывается на концепции, по которой форма и объем резервуара представляется ячеистой сеткой, отражающей пористость и проницаемость сланца. Разветвленная трещиноватая система от-

ражается другим комплектом ячеек. Эти две системы ячеистой сетки связаны специальными математическими средствами в одно физическое пространство.

Существуют установленные стандарты для оценки нетрадиционных резервуаров метана, таких как угольные пласты, а также исходных данных, необходимых для этой оценки. Они включают содержание газа, его сорбционную способность, проницаемость угля, давление резервуара, его геометрию и химические характеристики угля. Эмпирические данные собираются из кернов, полученных при бурении скважин, и образцов горных пород с калибровкой, выполненной инструментами спектроскопии и литоплотностного каротажа.

Разработаны имитационные программы, включающие модули, специфически предусматривающие оценку резервуаров угольного метана. Объемы угля рассчитываются на основе данных о мощности пластов и ареала их простираия, затем программа оценивает геологические запасы газа экстраполяцией данных каротажа и кернов. Из-за сильно варьирующихся условий угольных пластов трудно достичь большой точности расчетов прогнозируемых запасов газа.

При необходимом наборе статистических данных программы, позволяющие моделировать добычу газа способом искусственной нейронной сети, могут генерировать потенциал производительности резервуара и рекомендовать оптимальный режим дренажа [2–6].

Авторами статьи были исследованы газоемкостные параметры (пористость) образцов песчаника (таблица 1), которые были взяты из скважин, пробуренных в пределах Беляевского купола вблизи с. Беляевка Первомайского района Харьковской области.

В связи с отсутствием возможности специального взятия образцов из потенциальных участков, пригодных для хранения CO<sub>2</sub>, были использованы образцы, которые ранее брались для других целей из осадочных отложений Донбасса, но имеющие близкое местонахождение к потенциальным участкам хранения CO<sub>2</sub> и относящиеся к соответствующим горизонтам. Поэтому для исследований пористости были использованы нижеприведенные параметры образцов песчаника (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры образцов песчаника для определения пористости

Номер образца	1	2	3	4
Номер скважины	8	5	31	10
Глубина скважины, м	210	323	349	343

Для исследований были выбраны образцы пород в форме цилиндров высотой 20 мм и диаметром 8 мм. Предварительные оценки пористости были получены методом рентгеновской компьютерной томографии. Эти исследования проводились в Европейском центре синхротронного излучения, г. Гренобль (Франция). Затем полученные данные обрабатывались в Avizo Fire.

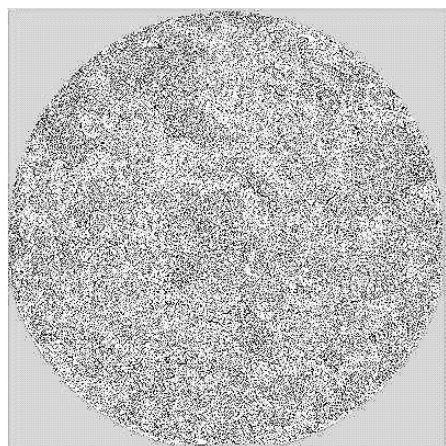
Используя программное обеспечение Avizo Fire, было исследовано 4 образца при двукратном и десятикратном увеличении. Для вычисления объема пористости необходимо выполнить следующие действия: убрать «шум»; удалить матричный материал (породу), оставляя только поры; выполнить трехмерное восстановление пор и подсчет объема пор.

Для устранения «шума» необходимо отфильтровать изображение (рисунок 1). В данной программе существуют различные варианты фильтров. В нашем случае выбор осуществлялся между двумя фильтрами: Edge-preserving и Median.

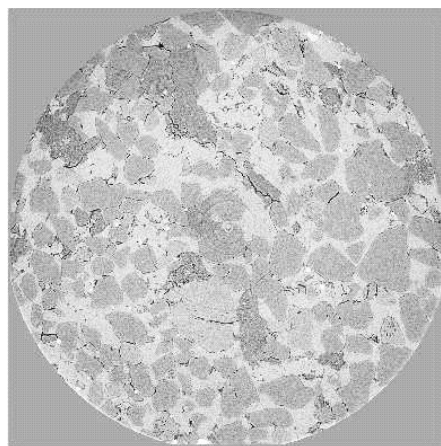
На первый взгляд может показаться, что данные, обработанные фильтром Edge-preserving – более сглаженные, однако, при ближайшем рассмотрении, видно, что границы пор размыты (что приводит к потере некоторых данных), а также появляются дополнительные вкрапления. Поэтому предпочтение было отдано фильтру Median. На рисунке 1 представлены для сравнения исходные данные (а) и отфильтрованные с помощью фильтра Median (б).

Далее необходимо удалить матричный материал (породу), оставляя только поры. Для этого используется функция Thresholding (пороговая классификация). На рисунке 2 показаны поры, выделенные из общего массива для образцов 1 и 2, соответственно (при десятикратном увеличении).

С помощью функции I\_analyze производятся расчеты количества и объема пор. После чего в объемном изображении мы можем видеть прорисовку всех пор, где каждым отдельным цветом (оттенком серого) показаны цельные поры – кластеры взаимосвязанных пор, в которых может храниться CO<sub>2</sub> в сверхкритическом состоянии (рисунок 3).

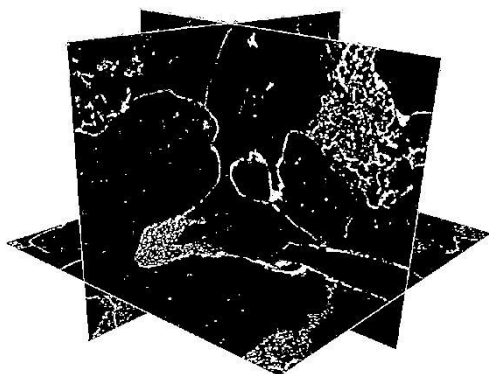


а) оригинальные данные

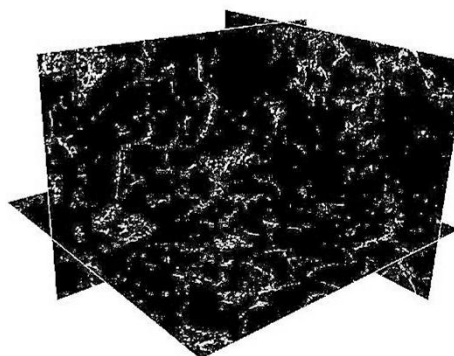


б) данные, обработанные фильтром Median

Рисунок 1 – Пример фильтрации данных

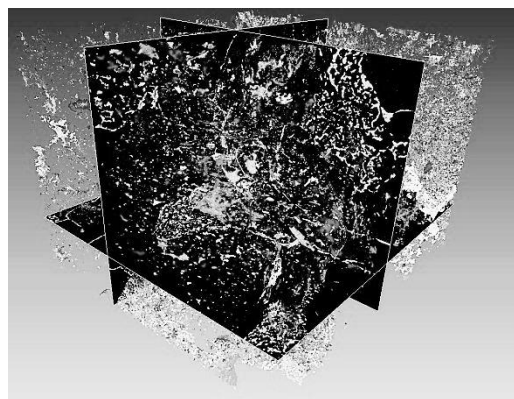


а) образец 1

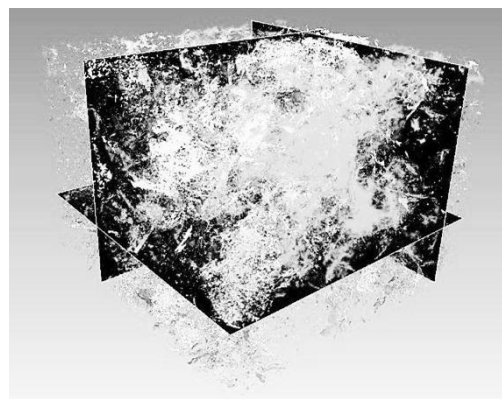


б) образец 2

Рисунок 2 – Результат использования функции Thresholding



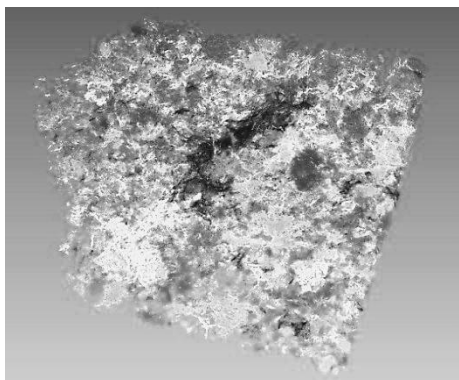
а) образец 1



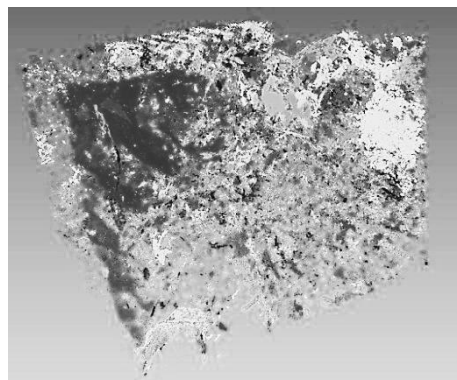
б) образец 2

Рисунок 3 – Результаты объемного восстановления пор

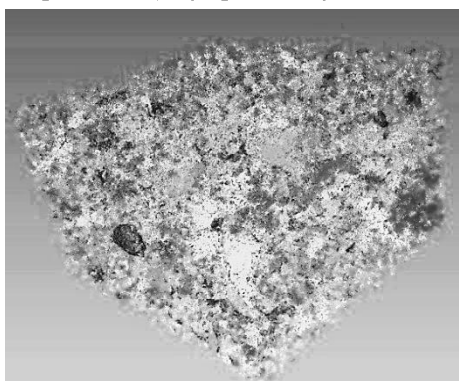
На рисунке 4 представлены результаты объемного восстановления пор для 4 образцов при различных увеличениях.



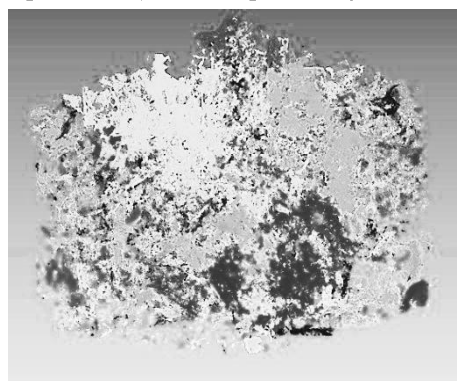
а) образец 1 (двукратное увеличение)



б) образец 1 (десятикратное увеличение)



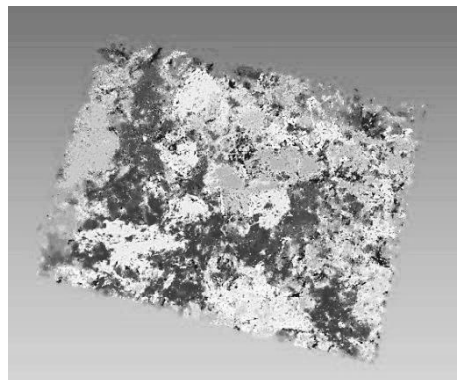
в) образец 2 (двукратное увеличение)



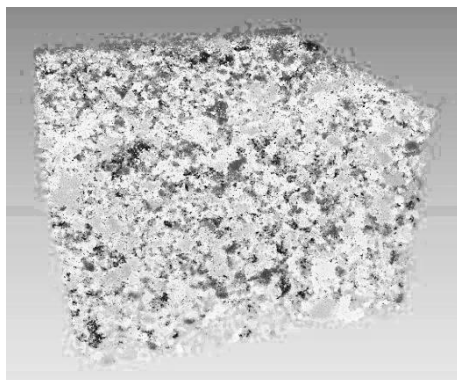
г) образец 2 (десятикратное увеличение)



д) образец 3 (двукратное увеличение)



ж) образец 4 (десятикратное увеличение)



е) образец 4 (двукратное увеличение)

Рисунок 4 – Результаты объемного восстановления пор

Суммируя объемы всех пор и учитывая значение объема образца, можно определить относительный объем пор (таблица 2), то есть пористость.

Таблица 2 – Статистика определения пористости

Номер образца	Увеличение	Минимальный объем пор	Максимальный объем пор	Среднее значение	Медианное значение	Среднеквадратичное отклонение	Относительный объем пор
1	2	2,18861E-17	4,59834E-11	1,42973E-15	8,75446E-17	8,46907E-14	0,01381
1	10	1,75089E-19	7,13294E-12	1,06747E-16	2,10106E-18	2,32723E-14	0,03206
2	2	2,18861E-17	1,50799E-11	1,62297E-15	1,53203E-16	4,24641E-14	0,01389
2	10	1,75089E-19	9,21765E-13	6,33780E-17	5,42775E-18	3,04981E-15	0,02661
3	10	1,75616E-19	2,28021E-12	7,96444E-17	2,10739E-18	7,75357E-15	0,02503
4	2	2,18861E-17	1,00121E-11	3,68775E-16	4,37721E-17	1,38530E-14	0,01350
4	10	1,75089E-19	2,10844E-12	4,05574E-17	5,25266E-19	5,11583E-15	0,01751

### Выводы

Полученные значения пористости образцов, взятых из скважин, пробуренных в пределах Беляевского купола вблизи с. Беляевка Первомайского района Харьковской области (около 3%) и обработанные с использованием программного обеспечения Avizo Fire при двукратном и десятикратном увеличении, позволяют сделать вывод о перспективности использования осадочных отложений Донбасса для секвестрации, а также долговременного хранения CO<sub>2</sub>. При хранении углекислого газа в подземных горизонтах возможно использование отработанных нефтегазоносных коллекторов.

### Список литературы

1. Кауфман Л. Л. Добыча угольного газа (обзор зарубежного опыта): монография / Л. Л. Кауфман, Н. И. Кулдыркаев, В. А. Лысиков; под общ. ред. Л. Л. Кауфмана. – Донецк: Донбасс, 2011. – 363 с.  
Kaufman L. L. Dobyucha ugolnogo gaza (obzor zarubezhnogo opyta): monografiya (Coal gas recovery (a review of foreign experince): monograph) / L. L. Kaufman, N. I. Kuldyrkayev, V. A. Lysikov; pod obshch. red. L. L. Kaufmana. – Donetsk: Donbass, 2011. – 363 s.
2. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [B. Metz, O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 442 pp.
3. Carbon sequestration atlas of the United States and Canada / National Energy Technology Laboratory. – U. S.: Department of Energy. Office of Fossil Energy, 2007.
4. William D. Gunter CO<sub>2</sub> Storage and Enhanced Methane Production / William D. Gunter, Mathew J. Mavor, John R. Robinson / Field Testing at Fenn-Big Valley, Alberta, Canada. – Access mode: <http://uregina.ca>.
5. Баранов В. А. Влияние структуры на пористость песчаников Донбасса / В. А. Баранов // Геотехническая механика. – 2010. – № 88. – С. 70–76.  
Baranov V. A. Vliyanie struktury na poristost peschanikov Donbassa (The effect of the structure on porosity of sandstones of Donbass) / V. A. Baranov // Geotekhnicheskaya mekhanika. – 2010. – № 88. – S. 70–76
6. Бескровная М. В. Перспективы улавливания и геологического хранения CO<sub>2</sub> в Донбассе / М. В. Бескровная, В. В. Осетров, Н. С. Шестакин // Збірка доповідей національного екологічного форуму «Екологія промислового регіону». – Донецьк: ДП «Донецький екологічний інститут», 2012. – Т. 1. – С. 105–106.  
Beskrovnaya M. V. Perspektivy ulavlivaniya i geologicheskogo khraneniya CO<sub>2</sub> v Donbasse (The prospects of CO<sub>2</sub> recovery and geological gas storing in Donbass) / M. V. Beskrovnaya, V. V. Osetrov, N. S. Shestavin // Zbirka dopovidei natsionalnogo ekologichnogo forumu “Ekologiya promysloвого regionu”. – Donetsk: DP “Donetskyi ekologichnyi instytut”, 2012. – S. 105–106.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. П. Висоцький, АДІ ДонНТУ.

Стаття надійшла до редакції 24.12.12

*О. Б. Ступін<sup>1</sup>, М. В. Безкровна<sup>1</sup>, В. В. Юрченко<sup>1</sup>, М. Кобченко<sup>2</sup>*  
*1 – Донецький національний університет, м. Донецьк*  
*2 – Університет г.Осло, Норвегія*

**Дослідження геологічних порід, перспективних для секвестрації CO<sub>2</sub>, з використанням даних рентгенівської томографії на синхротроні**

Досліджено результати експериментів із визначення пористості зразків пісковиків, що здатні секвеструвати CO<sub>2</sub>, які були взяті зі свердловин, що були пробурені в межах Біляївського куполу поблизу с. Біляївка Первомайського району Харківської області. Використовуючи програмне забезпечення Avizo Fire, було досліджено 4 зразки при двократному й десятикратному збільшенні. Отримані значення пористості наближені до 3 %, що дозволяє зробити висновок про перспективність використання осадових порід Донбасу для довготривалого зберігання CO<sub>2</sub>.

ОСАЛОВІ ПОРОДИ ДОНБАСУ, ГЕОЛОГІЧНЕ ЗБЕРІГАННЯ CO<sub>2</sub>, ПОРИСТІСТЬ ГІРНИХ ПОРІД

*A. B. Stupin<sup>1</sup>, M. V. Beskrovnaya<sup>1</sup>, V. V. Yurchenko<sup>1</sup>, M. Kobchenko<sup>2</sup>*  
*1 – Donetsk National University, Donetsk*  
*2 – University of Oslo, Norway*

**Pay Geological Rocks Research for CO<sub>2</sub> Sequestration with the Use of Data of X-Ray Tomography on Synchrotron**

The analysis of geological structure features of Donetsk coal basin in terms of its possibilities for CO<sub>2</sub> storage has been made. The selection and search of geological structures of horizons served as a long-term CO<sub>2</sub> storage in oil and gas-bearing basins are based on the previous search and geological exploration work results. Sandstones are clarified to have better reservoir properties among the Paleozoic rocks of Donbass. Sandstones reservoir characteristics in relation to carbon dioxide are observed to have been still remained unstudied. There is a need to carry out a battery of experimental studies to evaluate CO<sub>2</sub> capacity potential of Donbass sandstones.

The experimental results on sandstones samples porosity which can sequester CO<sub>2</sub> taken from boreholes within Belyaevskiy dome near Belyaevka village of Pervomayskiy District, Kharkov Region, are examined. Using Avizo Fire software 4 samples with two- and tenfold increase have been analyzed. The obtained porosity values are close to 3 % which allows to conclude that the use of Donbass sedimentary rocks is prospective for long-term CO<sub>2</sub> storage.

SEDIMENTARY ROCKS OF DONBASS, CO<sub>2</sub> GEOLOGIC REPOSITORY, ROCKS POROSITY