

УДК 551.14:553.21

Баранов В.А., д-р геол. наук, ст. нучн. сотр.,
Орлова Т.В., аспирант
(ИГТМ НАН Украины),
Кириченко В.А., магистр
(ИППЭ НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕСЧАНИКОВ НА ГАЗОНОСНОСТЬ И ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ

Баранов В.А., д-р геол. наук, ст. наук. співр.,
Орлова Т.В., аспірант
(ІГТМ НАН України),
Кириченко В.А., магістр
(ІППЕ НАН України)

ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІСКОВИКІВ НА ГАЗОНОСНІСТЬ І ГАЗОПРОНИКНІСТЬ

Baranov V.A., D.Sc. (Geology), Senior Researcher,
Orlova T.V., Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine),
Kirichenko V.A. M.Sc.
(INME NAS of Ukraine)

INFLUENCE OF SANDSTONE STRUCTURAL PARAMETERS ON GAS CONTENT AND GAS PERMEABILITY

Аннотация. Предметом исследований являются карбоновые песчаники Донецкого угольного бассейна. Цель работы – изучение и анализ влияния структурных параметров песчаников – главных коллекторов углеводородов, на их газоносность и газопроницаемость. Анализ выполнялся для разных условий образования и преобразования песчаников, вмещающих угли разных стадий углефикации. Исследования проводились на стандартных шлифах с использованием оптической микроскопии. Шлифы изготавливались из проб песчаников отобранных в забоях угольных шахт или из керна разведочных скважин. В результате исследований установлено, что кальцитовый цемент, при прочих равных условиях, является наиболее неблагоприятным фактором, влияющим на пористость и фильтрационные свойства. При прогнозе газоносности пород необходимо учитывать содержание именно вторичных, перекристаллизованных форм карбонатов, поскольку данный процесс сопровождается существенным ухудшением фильтрационных свойств песчаников. Наиболее благоприятными, в отношении коллекторских свойств, будут породы с глинистым цементом. Незначительная примесь первичного карбоната (в пределах 5-6 %) не может существенно влиять на рассматриваемые свойства пород. Крупнозернистые породы будут обладать благоприятными коллекторскими свойствами в верхних частях стратиграфических горизонтов, находящихся на этапе раннего катагенеза и, частично, среднего. Песчаники с более высокой степенью сортировки и окатанности, в которых преобладают мелко- и среднезернистые фракции обломочных зерен, характеризуются более высокой емкостью коллекторов и большей продуктивностью. Значения коэффициента микронарушенности увеличиваются в сторону увеличения

© В.А. Баранов, Т.В. Орлова, В.А. Кириченко, 2017

размеров зерен, ухудшения сортировки, увеличения палеоглубины и тектонических напряжений, в сторону уменьшения цемента, поэтому, данный показатель, косвенно отражает их коллекторские свойства. Наиболее продуктивными в отношении коллекторских свойств, будут интервалы припочвенной части слоя пород, находящихся на стадии раннего и среднего катагенеза. Для большей части пород Донбасса характерны катагенетические процессы преобразования минералов и цемента песчаников в условиях закрытой системы. Именно это стало основной причиной формирования такой низкой газопроницаемости пород Донбасса.

Ключевые слова: трансформация структуры, песчаники, катагенез, газоносность.

Последние годы для многих стран, не имеющих достаточный запас энергоресурсов, связаны с нарастанием энергетического кризиса. Причиной этого во многом является отработка значительного объема запасов в Мире и существенное снижение геолого-поисковых и разведочных работ на нефть и газ. В результате все больший интерес вызывает использование угольного газа - метана, выпускаемого в атмосферу дегазационными и вентиляционными установками. В 1996 г. в Донбассе было использовано около 5 % шахтного метана в шахтных котельных. Таким образом, проблема утилизации шахтного газа на угольных месторождениях является актуальной, но решение ее зависит от ряда важных факторов. Ниже будут представлены некоторые результаты исследования влияния структурных параметров углевмещающих песчаников на газоносность и газопроницаемость на примере отложений Донбасса. Исследования проведены в соответствии с принятыми понятиями, терминологией и условиями трансформации осадочных пород, изложенными в Справочнике по литологии (1983).

В работе Забигаило В.Е., Широков А.З. (1972) приведено, что газ в терригенных отложениях Донбасса находится, в основном, в угольных пластах и песчаных слоях с благоприятными коллекторскими свойствами. В углях содержится большое количество пор сорбционного объема, их емкость по отношению к сорбирующимся газам значительно выше, чем у пород. Тем не менее, принимая во внимание соотношение объемов пород и углей в угленосной толще, следует считать, что основная масса газов, при сравнимых величинах влажности пород и углей в сходных термодинамических условиях, находится не в угольных пластах, а в породах. Там же приводятся данные, согласно которым значения коэффициента газопроницаемости песчаников среднего карбона в юго-западной части Донбасса редко превышают 500 мД. Это данные для газопроницаемости, определяемой параллельно напластованию, значения коэффициентов газопроницаемости, определяемые нормально напластованию, не выходят за пределы 100 мД. На фильтрационные свойства пород значительное влияние оказывают их структурно-минералогические параметры.

По данным [1], в пределах Донбасса геологоразведочные работы позволили открыть несколько десятков промышленных скоплений нефти и газа. Однако о широком освоении Донбасса как газоносной провинции говорить рано. Одна из главных проблем заключается в предельно низких фильтрационных свойствах пород, сформировавшихся под действием как литостатических, так и тектонических воздействий на отложения рассматриваемого региона.

К указанным параметрам относится количество и состав цементирующего вещества, размеры породообразующих обломков, степень их окатанности и сортировки, степень эпигенетических преобразований, количество микродеформаций и их форма.

По данным Никитина А.А. (1984), окварцевание в песчаниках с базальным кальцитовым цементом отличается от окварцевания, наблюдающегося в кварцевых песчаниках с некарбонатным цементом. Согласно этим данным, растворимость кальцита под давлением превышает таковую кварца в 2,0 - 2,5 раза. Растворяясь раньше кварца, кальцитовый цемент корродирует кварцевые зерна. Высвободившийся при этом кремнезем идет на формирование регенерационных каемок с правильной кристаллографической огранкой у зерен кварца. На рис. 1 приведены структурные формы кварца с правильной огранкой и переход первичного бесструктурного карбоната во вторичный кальцит, полученные нами для условий карбоновых песчаников Донбасса.

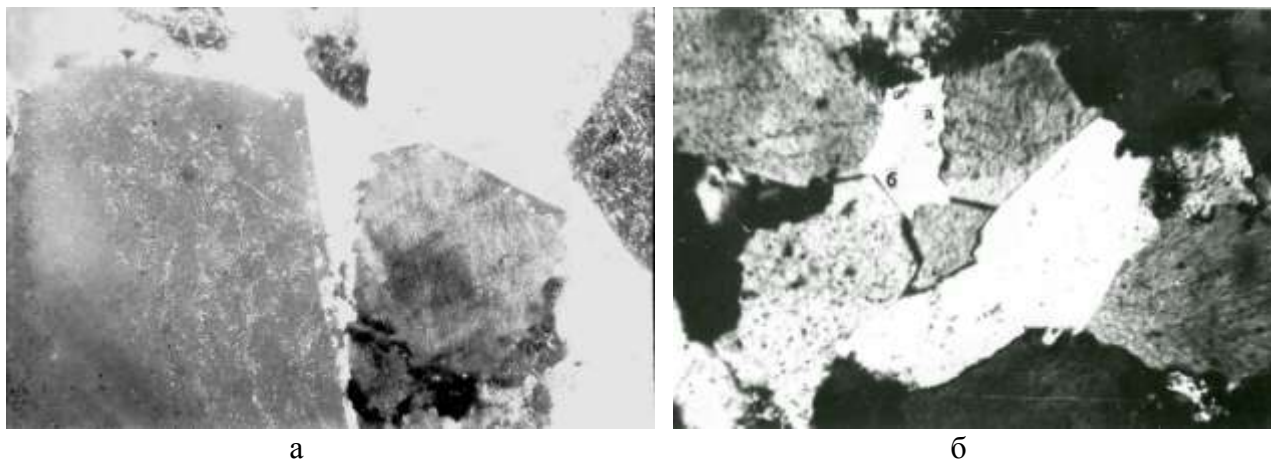


Рисунок 1 - Кварцевые зерна с правильной кристаллографической огранкой у зерен кварца (а) и трансформация карбонатов в кристаллическую форму (б), ув. 100^х

В песчаниках с некарбонатным цементом окварцевание выражается в образовании вокруг обломочных зерен кварца регенерационных кайм без правильной кристаллографической огранки последних и возникновении вторичного кварцевого цемента порового типа. Тип цемента существенно влияет на фильтрационные свойства породы. В результате выполненных экспериментальных исследований установлено что, кальцитовый цемент, при прочих равных условиях, является наиболее неблагоприятным фактором, влияющим на пористость и фильтрационные свойства.

По нашим данным [2], полученным в результате петрографических исследований, карбонат в породах Донбасса установлен в виде двух форм: первично-осадочной и перекристаллизованной или вторичной. Первая форма представлена чаще механической смесью глинистых и карбонатных образований в различных пропорциях. Эта форма первичных карбонатов развита в породах раннего и, частично, среднего катагенеза (ориентировочно до стадии развития углей марок "Ж", "К"). Смесью глинисто-карбонатных минералов представлена в

средне- и крупнозернистом карбонатном песчанике на рис. 2.

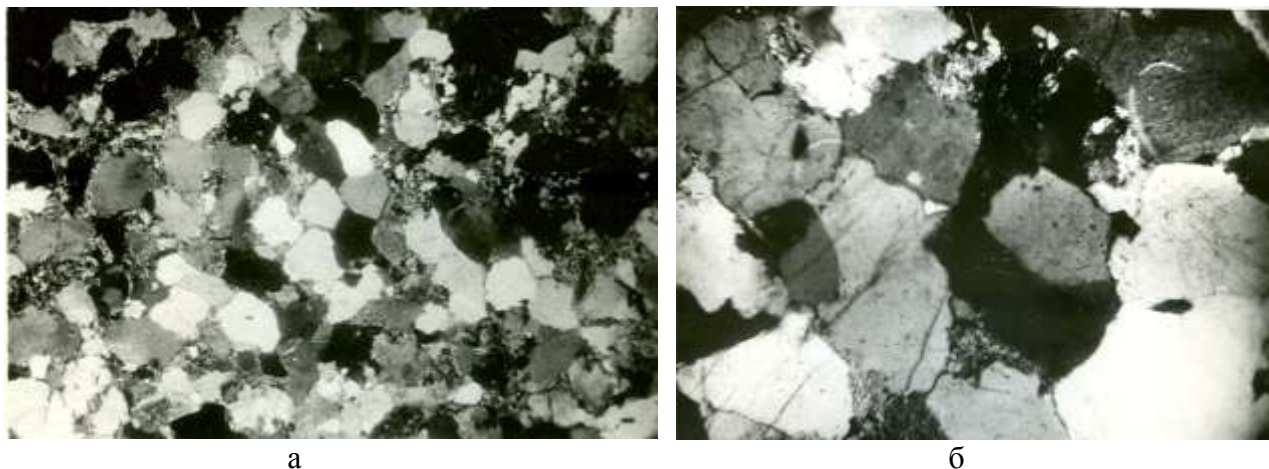


Рисунок 2 - Механическая смесь глинисто-карбонатных минералов цемента в мелкозернистых (а) и среднезернистых (б) песчаниках карбонатных отложений Донбасса; на рис. 2б хорошо видны микротрещины в кварце; шлиф, ув.100^х

В среднем катагенезе, под действием более жестких термобарических условий, первичная форма соединений карбонатов перекристаллизовывается, образуя вторичный карбонат. Данный процесс сопровождается существенным ухудшением фильтрационных свойств песчаников. По этой причине, при прогнозе газоносности пород необходимо учитывать содержание именно вторичных, перекристаллизованных форм карбонатов, поскольку минералогические преобразования влияют на микропористость и проницаемость, существенно снижая последнюю.

Зарубежные исследователи в разных странах [3-6], также широко используют в своих исследованиях трансформацию карбонатов на разных стратиграфических уровнях. В их работах приводятся данные о растворении карбонатом не только кварца, но и полевых шпатов, обломков пород, а преобразования карбонатов используются как индикатор степени преобразований исследуемых отложений на разных стадиях и подстадиях литогенеза.

Исходя из приведенных материалов, наиболее благоприятными, в отношении коллекторских свойств, будут породы с глинистым цементом. Незначительная примесь первичного карбоната (менее 5 %) не может существенно влиять на рассматриваемые свойства пород.

Структурные параметры пород характеризуются размером породообразующих обломков, степенью их окатанности и сортировки. Для терригенных пород безусловным фактом является более значительная пористость в крупнозернистых песчаниках и гравелитах. Тем не менее, необходимо учитывать, что именно эта категория пород подвержена максимальным вторичным преобразованиям, поскольку является наименее устойчива к внешним напряжениям – литостатическому и тектоническому напряжениям, меняющимся в процессе трансформации земной коры.

По данным Л.Б. Рухина (1969), уже под давлением 530 атм. (53 МПа) боль-

шая часть крупных песчаных зерен становится трещиноватыми. Интенсивность дробления песчаных зерен снижается по мере уменьшения их размера. Это явление хорошо согласуется со стремлением данной структуры к оптимальной и наиболее устойчивой при этих условиях по законам термодинамики. Таким образом, крупнозернистые породы будут обладать благоприятными коллекторскими свойствами в верхних частях стратиграфических горизонтов, находящихся на этапе раннего катагенеза и, частично, среднего. Для отложений Донбасса, это породы вмещающие, ориентировочно, угли марок Б, Д, Г. Общеизвестно несоответствие степени углефикации углей и степени катагенеза пород, поэтому приводимые сравнения необходимо рассматривать как ориентировочные.

Согласно В.В. Плошко и др. (1984), разнозернистые песчаники образуют коллекторы с низкой эффективной емкостью. Песчаники с более высокой степенью сортировки и окатанности, в которых преобладают мелко- и среднезернистые фракции обломочных зерен, характеризуются более высокой емкостью коллекторов и большей продуктивностью.

Следующий параметр - степень микронарушенности обломочных зерен песчаников, является характерным для пород Донбасса. Литостатические и тектонические нагрузки привели к значительному уплотнению пород Донбасса. Большое содержание кварца в песчаниках Донбасса (до 60-70 %) при небольшом объеме цемента (в среднем 20-30 %), привело к достаточно быстрому уплотнению пород. Дальнейшую нагрузку воспринимали кварцевые зерна, являющие собой каркас или скелет песчаников. В результате, в обломочных зернах более крупнозернистых пород появилось значительное количество пластических микродеформаций, которые можно рассматривать не только как индикатор напряженно-деформированного состояния, но и как показатель структурно-минералогических изменений (а.с. СССР №1463936, №1752982). Значения коэффициента микронарушенности увеличиваются в сторону увеличения размеров зерен, ухудшения сортировки, увеличения палеоглубины и тектонических напряжений, в сторону уменьшения цемента при прочих равных условиях. Таким образом, данный показатель, характеризующий литолого-фациальные условия осадкообразования и преобразования пород, косвенно отражает их коллекторские свойства.

Следующим структурным параметром является степень распределения размеров обломочных зерен в толще песчаника. Согласно выполненным нами исследованиям установлена качественная закономерность увеличения диаметра породообразующих зерен в сторону почвы песчаного слоя для пород раннего и среднего катагенеза. Для пород позднего катагенеза (ориентировочно вмещающих угли марок ОС - А) идет процесс выравнивания структурного параметра за счет дробления более крупных зерен. Следовательно, наиболее продуктивными в отношении коллекторских свойств, будут интервалы припочвенной части слоя пород, находящихся на стадии раннего и среднего катагенеза.

Рассмотрим минералогические критерии, наиболее существенно влияющие на коллекторские свойства. Для условий Донбасса процессы растворения, кор-

розии, переотложения вещества, регенерации и т.д., широко развитые в других бассейнах являются второстепенными. Данный результат явился следствием раннего (вероятно диагенетического) уплотнения пород. Отсутствие возможности свободного водообмена, особенно в центральных и примыкающих к ним районах, послужило главной причиной слабого развития вышеуказанных процессов. Сравнительно более полно процессы коррозии, регенерации, растворения и переотложения вещества реализовались в прибортовых районах и в зоне сочленения пород Донбасса с ДДВ. Здесь по результатам наших исследований количество регенерационного кварца достигает 5 – 6 %, тогда как в центральных частях бассейна его обычно меньше. Поэтому для большей части пород Донбасса характерны вторичные (катагенетические) процессы преобразования минералов и, в частности, цемента песчаников в условиях закрытой системы. Именно указанные процессы стали в ряду основных причин формирования такой низкой (до 0,00n) газопроницаемости пород Донбасса, особенно в его центральных, тектонически наиболее дислоцированных районах.

Выводы. Локальный прогноз газоносности и газопроницаемости пород Донбасса необходимо осуществлять с учетом структурно-минералогических параметров. К структурным параметрам, характеризующим прогнозную продуктивность пластов относятся: размер породообразующих зерен; степень окатанности зерен и степень отсортированности; степень микронарушенности породообразующих зерен. Слои, сложенные крупнозернистыми фракциями, более продуктивны на этапах раннего и части среднего катагенеза. Разнозернистые песчаники образуют, в основном, коллекторы с низкой эффективной емкостью. Слои с более высокой степенью сортировки (одна либо две хорошо выделяемые мелко- и среднезернистые фракции) и окатанности, характеризуются более высокой емкостью коллекторов и большей продуктивностью. Припочвенные интервалы слоев пород, находящихся на стадии раннего и среднего катагенеза, характеризуются более благоприятными коллекторскими параметрами.

К минералогическим критериям, характеризующим коллекторские свойства в условиях Донбасса, следует относить наличие первично-осадочных и вторичных (перекристаллизованных) карбонатов. При этом количество карбонатов и, в первую очередь вторичных, является одним из основных негативных факторов, влияющих на газопроницаемость пород для условий среднего катагенеза.

Процессы коррозии, регенерации, выщелачивания и т.д., в условиях Донбасса играют подчиненную роль при формировании коллекторов в связи с отсутствием эффективного водообмена. Максимально указанные процессы реализовались в прибортовых районах и в зоне сочленения Донбасса с отложениями ДДВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурич, А.Т. О газонефтеносности угленосных бассейнов (на примере Донбасса) / А.Т. Мурич // Ресурсы нетрадиц. газ. сырья и пробл. его освоения. – Л. – ВНИГРИ, 1990. – С. 93-97.
2. Баранов, В.А. Структурные преобразования песчаников Донбасса и прогноз их выбросоопасности: автореф. дис.... д-ра геол. наук: 04.00.16 / Баранов В.А. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000.– 36 с.

3. Hays, P.D. Oxygen isotopes in meteoric calcite cements as indicators of continental paleoclimate / P.D. Hays, E.L. Grossman // *Geology*, 1991. - V. 19. - P. 441-444.
4. Kim, J.C. Depositional and compositional controls on sandstone diagenesis, the Tetori Group (Middle Jurassic-Early Cretaceous), central Japan / J.C. Kim, Y.I. Lee, K.I. Hisada // *Sedimentary Geology*, 2007. - V. 195. - P. 183-202
5. Lundegard, P.D. Sandstone Porosity Loss – A "Big Picture" View of The Importance of Compaction / P.D. Lundegard // *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992. - V. 62. - P. 250- 260.
6. Moore, C.H. Carbonate Reservoirs Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework / C.H. Moore // *Developments in Sedimentology* 55, 2001: Amsterdam, Elsevier Science B.V., p. 245-287.

REFERENCES

1. Murich, A.T. (1990), "On the gas-oil-gas content of coal-bearing basins (on the example of Donbas)", *Resursy netraditsionnogo gazovogo syrya i problem ego osvoeniya*, VNIGRI, Leningrad, p. 93-97.
2. Baranov, V.A. (2000), "Structural changes sandstones of Donbas and the forecast of their outburst", Abstract of D.Sc. dissertation, Geology of solid fuels, National Mining Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Hays, P.D., and Grossman, E.L. (1991), "Oxygen isotopes in meteoric calcite cements as indicators of continental paleoclimate", *Geology*, v. 19, p. 441-444.
4. Kim, J.C., Lee, Y.I., and Hisada, K.I. (2007), "Depositional and compositional controls on sandstone diagenesis, the Tetori Group (Middle Jurassic-Early Cretaceous), central Japan", *Sedimentary Geology*, v. 195, p. 183-202.
5. Lundegard, P.D. (1992), "Sandstone Porosity Loss - A "Big Picture" View of The Importance of Compaction", *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 62, p. 250- 260.
6. Moore, C.H. (2001), "Carbonate Reservoirs Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework", *Developments in Sedimentology 55: Amsterdam, Elsevier Science B.V.*, p. 245-287.

Об авторах

Баранов Владимир Андреевич, доктор геологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией исследования структурных преобразований горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, baranov-va@rambler.ru.

Орлова Татьяна Викторовна, аспирант лаборатории исследования структурных преобразований горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, tatyana.orlova.02@gmail.com.

Кириченко Виктория Анатольевна, главный геолог отдела антропогенных изменений геологической среды, Институт проблем природопользования и экологии Национальной академии наук Украины (ИППЭ НАН Украины), Днепр, Украина, kirichenkov11@gmail.com

About the authors

Baranov Vladimir Andreevich, Doctor of Geology (D.Sc.), Senior Researcher, Head of Laboratory, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, baranov-va@rambler.ru.

Orlova Tatyana Viktorovna, Doctoral Student, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, tatyana.orlova.02@gmail.com.

Kirichenko Victoria Anatolyevna, Chief Geologist, Department of Anthropogenic Changes in the Geological Environment, Institute of Nature Management and Ecology of National Academy of Sciences of Ukraine (INME NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, kirichenkov11@gmail.com

Анотація. Предметом досліджень є карбонатні пісковики Донецького вугільного басейну. Мета роботи - вивчення та аналіз впливу структурних параметрів пісковиків - головних колекторів вуглеводнів, на їх газоносність і газопроникність. Аналіз виконувався для різних умов утворення і перетворення пісковиків, що вміщують вугілля різних стадій вуглефікації. Дослідження проводились на стандартних шліфах з використанням оптичної мікроскопії. Шліфи виготовлялися з проб пісковиків відібраних в забоях вугільних шахт або з керна роз-

відувальних свердловин. В результаті досліджень встановлено, що кальцитовий цемент, при інших рівних умовах, є найбільш несприятливим фактором, що впливає на пористість і фільтраційні властивості. При прогнозі газоносності порід необхідно враховувати вміст саме вторинних, перекристалізованої форм карбонатів, оскільки даний процес супроводжується істотним погіршенням фільтраційних властивостей пісковиків. Найбільш сприятливими, по відношенню до колекторських властивостей, будуть породи з глинистим цементом. Незначна домішка первинного карбонату (в межах 5-6 %) не може істотно впливати на розглянуті властивості порід. Грубозернистим породам будуть притаманні сприятливі колекторські властивості в верхніх частинах стратиграфічних горизонтів, які перебувають на етапі раннього катагенезу і, частково, середнього. Пісковики з більш високим ступенем сортування і окатаності, в яких переважають дрібно- і середньозернисті фракції уламкових зерен, характеризуються більш високою ємністю колекторів і більшою продуктивністю. Значення коефіцієнта мікронарушеності збільшуються в бік збільшення розмірів зерен, погіршення сортування, збільшення палеоглибини і тектонічних напруг, в сторону зменшення цементу, тому, даний показник, побічно відображає їх колекторські властивості. Найбільш продуктивними щодо колекторських властивостей, будуть інтервали пригрунтової частини шару порід, що знаходяться на стадії раннього і середнього катагенезу. Для більшої частини порід Донбасу характерні катагенетичні процеси перетворення мінералів і цементу пісковиків в умовах закритої системи. Саме це стало основною причиною формування такої низької газопроникності порід Донбасу.

Ключові слова: трансформація структури, пісковики, катагенез, газоносність.

Annotation. Subject of research is carbonaceous sandstones of the Donetsk coal basin. Objective of the work is to study and analyze influence of structural parameters of sandstones - main hydrocarbon reservoirs - on their gas content and gas permeability. The analysis was carried out for different conditions of formation and transformation of sandstones containing coals of different stages of coalification. The studies were carried out on standard sections with using optical microscopy. The grits were made of sandstone samples taken from the faces of coal mines or of the core taken from exploratory wells. As a result of the research, it was established that calcite cement, with other equal conditions, is the most unfavorable factor affecting porosity and filtration properties. While forecasting gas content in the rocks, it is necessary to take into account content of precisely secondary, recrystallized forms of carbonates, since this process is accompanied by a significant deterioration of the sandstone filtration characteristics. The most favorable, in terms of reservoir properties, will be rocks with clay cement. A minor admixture of primary carbonate (within 5-6%) insignificantly affect the properties of the rocks under consideration. Coarse-grained rocks will have favorable reservoir properties in the upper parts of the stratigraphic horizons located at the stage of early and, partially, middle katagenesis. Sandstones with a higher degree of sorting and rounding, in which fine- and medium-grained fractions of clastic grains predominate, are characterized by higher reservoir capacity and greater productivity. Values of the microreflection coefficient increase with increase of grain size, deterioration of sorting, increase in the paleo depth and tectonic stresses and reduction of cement; therefore, this index indirectly reflects reservoir properties of the sandstone. The most productive, in terms of reservoir properties, are intervals of the subsoil part of the rock layer, which are at the stage of early and medium katagenesis. For most of the Donbass rocks, the katagenesis processes of mineral and sandstone cement transformation are characteristic for the closed system. This was the main reason for formation of such low gas permeability of the Donbass rocks.

Keywords: structure transformation, sandstones, katagenesis, gas content.

Статья поступила в редакцию 11.11.2017

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.