

При ограниченном пласте значения гидропроводности приобретают на контуре минимальное значение, к которому приближаются её значения по мере увеличения радиуса влияния, т.е. резкого перепада от проницаемого пласта к непроницаемому КВД не действует, и R_k определяется как точка экстремума на кривой $\varepsilon - f(R)$.

Определив R_k до контура питания и значение гидродинамической плотности запасов по описанной методике определим начальные геологические запасы в пластовых условиях по формуле (10):

$$V_0 = \Pi_r \times \pi R_k^2 \quad (10)$$

Пример, показывающий высокую сходимость подсчёта запасов методом падения давления и по гидродинамическим плотностям показан в работе [5].

Таким образом, нами показана теоретическая возможность, подтверждённая практическими примерами, проводить подсчёт запасов по результатам гидродинамических исследований пластов, что позволит сократить количество оценочных скважин и повысить достоверность подсчёта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боярко Г.Ю. Экономика минерального сырья. — Томск, Аудит-Информ, — 2000.
2. Жданов М.А., Лисунов В.Р., Гришин Ф.А.. — Методика и практика подсчёта запасов нефти и газа. — М., Недра, 1967.
3. Чарный И.А. Основы подземной гидродинамики. — М.: Гостоптехиздат. — 1956.
4. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных пластов и скважин, под редакцией Г.А. Зотова и З.С. Алиева, Москва, Недра, 1980.
5. Пешков В.Е. Гидродинамические исследования малодебитных скважин при их пуске в работу при монотонном изменении режима работы. — Мат. Научно-практической конференции. — Тюмень. — 2002.

ВЛИЯНИЕ CO_2 -СОДЕРЖАЩИХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РАСТВОРОВ НА КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ)

Е.А. ПРЕДТЕЧЕНСКАЯ

Экспериментальные работы были поставлены в связи с проблемой поисков улучшенных коллекторов на больших глубинах, а также для проверки гипотезы об агрессивном воздействии перегретых водных растворов, насыщенных углекислым газом, на породы нижних горизонтов осадочного чехла в зонах тектонических нарушений и формировании в связи с этим локальных очагов разуплотнения и улучшения качества коллекторов.

Исследования последних лет показали, что в результате гидротермального воздействия на песчаные породы в тектонически активных зонах возникает вторичная пористость локального распространения, обусловленная растворением карбонатного цемента и гидролизом алюмосиликатов обломочного каркаса, в частности, полевых шпатов и слюд [4, 6]. Масштабы этих процессов в ряде случаев достаточно широки. Так, в Днепровско-Донецкой впадине с зонами вторичного разуплотнения, приуроченными к тектоническим нарушениям, связаны промышленные скопления нефти и газа более чем на 20 площадях [7]. Они сопровождаются геофизическими, геохимическими и др. аномалиями (АВПД, повышенные термоградиенты, минерализация пластовых вод и т.д.). Все необходимые предпосылки для возникновения подобных аномальных зон существуют и на севере Западной Сибири в Уренгойском районе [2, 6].

При выборе условий эксперимента была поставлена задача максимального приближения к условиям и природным процессам щелочного метасоматоза, имеющим место на глубинах свыше 4 км в районе Большого Уренгоя [3], где по литолого-минералогическим показателям установлена зона вторичного разуплотнения, явления аномального окремнения, альбитизации, каолинизации и карбонатизации пород песчаных пластов нижних горизонтов осадочного чехла предположительно в связи с подтоком перегретых водных растворов, обогащенных углекислым газом, по глубинным разломам [4, 6].

Эксперименты проводились на установке для исследования силикатных систем под давлением воды и двуокиси углерода в лаборатории силикатных систем с летучими компонентами ИГиГ СО РАН под руководством Г.Ю. Шведенкова.

В основу прибора положена принципиальная схема установки Х.Дж. Гринвуда. Для ускорения реакций минералообразования одновременно с образцом в реактор помещались дробленые пробы крупностью 0,25–0,1 мм и менее 0,01 мм в золотых ампулах размером 30×5 мм. Затем образцы и, отвечающие им по составу порошки, насыщались раствором заданной минерализации и углекислым газом, после чего подвергались воздействию высоких температур и давлений.

Проведено 2 серии опытов, условия которых выбирались, исходя из реальных физико-химических условий глубоких горизонтов осадочного чехла Уренгойской структурно-фациальной зоны.

Первая серия опытов была поставлена для моделирования физико-химических условий зоны глубинного катагенеза на глубине свыше 5 км. С этой целью для испытаний были выбраны образцы уплотненных крупнозернистых гра-

Таблица 1. Литолого-минералогическая характеристика песчаных пород до олыга

Скважина, №	Образец, №	Интервал отбора керна, м	С	Md	Вещественный состав, %			Состав обломков пород	Цементы, %					Состав глинистых минералов по данным РА
					кварц	полевые шпаты	обломки пород		Cal Dol	хлорит-гипс	кварц	альбит	Fe, эпидот, пирит	
I серия	Уренгойская 414	4888-4902 8,7 нк	1,5	0,57	35,2	16,4	48,4	Кремни, кварциты, глинистые сланцы, пегматиты, кислые эффузивы.	5-7 3-5	—	3-5	1-2	1-2	Г+Г~М+Х+диккинг
	Южно-Часельская 15	3820-3828 2,3 нк	1,4	0,60	39,7	13,0	38,7	Кремни, кварциты, алевролиты, кремнистые сланцы, пегматиты, кислые эффузивы.	10-15	1-2	5-6	2-3	—	Г+Г~М+Х+К
II серия	Доронинская 275	292-298 1,1 нк	1,33	0,63	22	15	62	Кремни, кварциты, глины, кремнистые сланцы, алевролиты, кислые и средние эффузивы.	2-3 3-5	—	2-3	—	1-2 5	Г+В~Х+В+К
	Доронинская 275	328-330,7 1,0 нк	0,57	0,19	20	10	70	Слюдистые, глинистые сланцы, каолинизированные песчаники, аргиллиты, кислые эффузивы.	0 2-3	5-7	1-2	—	1-2 пирит 2-4	Г+В~Х+Х?+К

Условные обозначения: С - максимальный диаметр, Md - средний диаметр обломков; Cal - кальцит, Dol - доломит; РА - рентгеноструктурный анализ; Г - гидрослюда, Г~М - смешанослойный минерал гидрослюда-монтмориллонитового состава. Х - хлорит, К - каолинит, В - вермикулит, В ~ Х - смешанослойный минерал вермикулит - хлоритового состава.

Таблица 2. Соотношение типов межзерновых контактов и коэффициенты катагенеза образцов песчаных пород до и после эксперимента

Серия, этап	Скважина, №	Образец, №	Глубина отбора керна, м	% сорعкнения	Типы и количество межзерновых контактов, %												Коэффициенты катагенеза				Пористость по данным ртутной порометрии, %
					Точечные первичные вторичные	Прямолинейные первичные вторичные	Прямолинейные вторичные	Механич. присоединение		Пластическая деформация				Регенерация кварца	Растворение кварца под давлением	Химическое растворение	Суггено-стигматитовые	Число контактов на 1 зерно А	Интенсивность катагенеза I	Коэффициент уплотнения Ку	
								неполные	полные	слои	глинист. сланцев	кремнист. сланцев	эффузивов								
I серия	Уренгойская 414	21	4888-4902	1	5,0 2,5	10,1 40,5	2,5 2,5	4,4	19,6	—	—	4,4	—	2,5	1,2 1,8	3,1 4,3	0,6	5,1	5,9	3,8	7,5
				2	3,5 2,1	18,7 24,4	3,5 2,8	4,3	12,3	—	0,7	3,5 п.ш.	2,8 0,7	5,7	0,7 3,5	1,4 1,4	4,9	4,6	5,8	1,6	7,9
	Южно-Часельская 15	40	3820-3828	1	9,7 0,7	28,3 17,3	2,9 2,2	6,7	11,9	—	2,2	2,2	0,7	3,7	1,4 2,9	0 4,4	3,7	4,5	5,2	0,8	6,6
				2	10,7 0,82	20,6 8,3	11,5 5,7	6,6	3,3	—	—	6,5 п.ш.	3,3 4,1	5,9	2,5 0,8	1,6 0,8	7,4	4,0	5,5	0,7	7,0
I серия, I этап	Доронинская 275	23	292-298	1	3,7 1,7	6,4 33,5	1,7 2,5	3,1	19,8	—	—	16,1	3,7	1,7	0 0,6	0,6 5,5	1,2	5,4	6,6	4,7	5,3
				2	5,1 0	17,3 29,7	0,7 0,7	2,9	16,6	1,4	8,7	1,4	2,9	1,4 0	0,7 3,8	0,7	5,1	6,0	1,5	10,6	
	Доронинская 275	29	328-330,7	1	12,8 0,6	21,9 31,7	1,2 0	1,2	10,3	0,6	8,5	4,2	1,2 п.ш.	1,8	0 4,2	—	5,3	5,8	1,6	6,5	
				2	4,5 0	17,7 28,3	1,9 0,6	4,6	10,5	2,5	10,5	1,9 п.ш.	5,0	1,9 1,3	0 4,6	0,6	5,1	6,0	2,0	8,7	

% содержания: 1 - до опыта, 2 - после опыта.

увакковых песчаников нижней юры (береговая свита), вскрытых скважинами Уренгойская 414 и Южно-Часельская 15 на глубинах 4481 и 3828 м соответственно (табл. 1). Открытая пористость пород, установленная методами Преображенского и ртутной порометрии до опыта составляла 6,6 и 7,9% соответственно, проницаемость параллельно оси керна – 0,05 10–15 мкм² (табл. 2).

В ходе экспериментов образцы и отвечающие им по составу дробленые пробы и порошки насыщались раствором заданной минерализации и подвергались воздействию температуры 160°C и давлению 1500 атм в присутствии CO₂ в течение 40 дней.

При постановке экспериментов II серии моделирование катагенетических преобразований проводилось в 2 этапа. На I этапе моделировался Р–Т режим зоны среднего катагенеза на глубине 2,5–3,0 км (давление 150 атм, температура 85°C, концентрация CO₂ = 45%) при тех же параметрах раствора, что и в опытах I серии. На 2 этапе воспроизводились термодинамические условия верхней подзоны зоны глубинного катагенеза на глубине 4–5 км (давление 500 атм и температура 135°C). Длительность каждого этапа составляла 10 дней.

Для опытов II серии были выбраны образцы нижнеюрских песчаников – полевошпатово-кварцевых граувакк, вскрытых скважиной Доронинская 275 (Кузбасс) на глубине 292–330 м. В составе цемента (3–5%) были зафиксированы кальцит, кварц, каолинит, гидрогетит, иллит, хлорит и небольшая примесь смешанослойных минералов иллит-монтмориллонитового состава (табл. 1). Открытая пористость песчаников до опыта составляла 5,3–6,5 %, проницаемость – 0,39 10–15 мкм² (табл. 2). Эти образцы и отвечающие им по составу порошки были последовательно испытаны в режиме возрастающих температур и давлений при тех же параметрах раствора и концентрации в нем CO₂.

До и после испытаний было проведено изучение петрографических шлифов (стадиальный, гранулометрический анализы), структуры порового пространства образцов, пропитанных бакелитовой смолой, а также методом ртутной порометрии, коллекторских свойств пород, выполнен рентгеноструктурный анализ (РА) глинистых и карбонатных минералов, а также осадков из растворов, химический силикатный анализ растворов, спектральный приближенно-количественный анализ на 45 элементов. Порометрические исследования проводились на приборе *Micrometrics auto-pore-9200* фирмы *Cultronics* (Франция). Определялись поры диаметром от 3 нм (30 Å) до 300 мкм (3 10⁶ × Å). Минеральная плотность пород определялась на приборе *Autopipnometr* той же фирмы.

Пористость по данным ртутной порометрии определялась по формуле:

$$Kn = [(ρ \cdot v) - 1 + 1] - 1,$$

где $ρ$ – минеральная плотность породы, г/см³; v – общий интрузионный объем породы, см³.

В результате проведенных экспериментов были зафиксированы изменения структуры обломочной части и порового пространства пород, а также их минерального состава.

I серия экспериментов

Образцы, выбранные для опытов I серии, имели близкий вещественный и гранулометрический состав, но отличались количеством и типом цемента (табл. 1). Оба песчаника относились к типу полевошпатово-кварцевых граувакк. Парагенезы аутигенных минералов свидетельствуют о том, что анализируемые породы в естественном залегании находились на стадии глубинного катагенеза. Соотношение межзерновых контактов показывает, что образец № 40, менее уплотнен в связи с консервацией минерального каркаса карбонатным цементом на более ранних стадиях катагенеза. Открытая пористость песчаников, определенная стандартным методом, составила: для образца № 21 – 5,5%, для образца № 40 – 6,6%, проницаемость параллельно оси керна – 0,05·10⁻¹⁵ м² и 0,39·10⁻¹⁵ м² соответственно. Пористость, определенная методом ртутной порометрии, составила: для образца № 21 – 7,9%, для образца № 40 – 6,64% (табл. 2).

Изучение шлифов, прокрашенных цветными смолами показало, что в образце № 21 до опыта преобладали сообщающиеся поры шелевидной и треугольной формы диаметром 0,19–0,24 мм (мах – 1,7 мм). Внутризерновые поры представлены порами, возникшими за счет растворения полевых шпатов, слюд и плагиоклазов в составе эффузивных обломков, а также сформированными в результате доломитизации плагиоклазов. По данным ртутной порометрии максимальный объем сообщающихся пор до опыта приходился на долю пор диаметром 0,021–3,65 мкм, то есть тонких меж- и внутризерновых капилляров. Среди пор малого диаметра преобладали поры размером 0,021–0,003 мкм (рис. 1).

В отличие от образца № 21, в образце № 40, с карбонатным цементом, до опыта преобладали поры округлой и сложной конфигурации. Реже встречались внутризерновые поры по трещинам спайности полевых шпатов. Основной объем сообщающихся пор приходился на поры и каналы диаметром от 3,65 до 0,044 мкм. Среди пор малого диаметра преобладали поры размером 0,021–0,003 мкм (рис. 2). Суммарная поверхность пор и поровых каналов также обусловлена наличием тонких капилляров диаметром 0,02–0,003 мкм (рис. 2).

После испытания образцов 21 и 40 давлением 1500 атм, что, согласно расчетам Ф. Берча (1), соответствует их смещению вниз по разрезу на глубину более 2000 м по сравнению с современными отметками, а также в результате воздействия повышенных температур в течение 40 суток в породах произошли заметные структурные и минеральные преобразования. Прежде всего, это изменения в соотношении обломков каркаса пород, что выразилось в:

- переуплотнении пород с уменьшением среднего диаметра зерен и развитием хрупких и пластических деформаций, в результате чего в образце № 40 возросло содержание крупноалевритовой и снизилось – мелкопесчаной фракции (с 14 до 30 и с 53 до 33% соответственно), а в образце № 21 заметно повысилось содержание мелкопесчаной и уменьшилось количество среднепесчаной фракции;

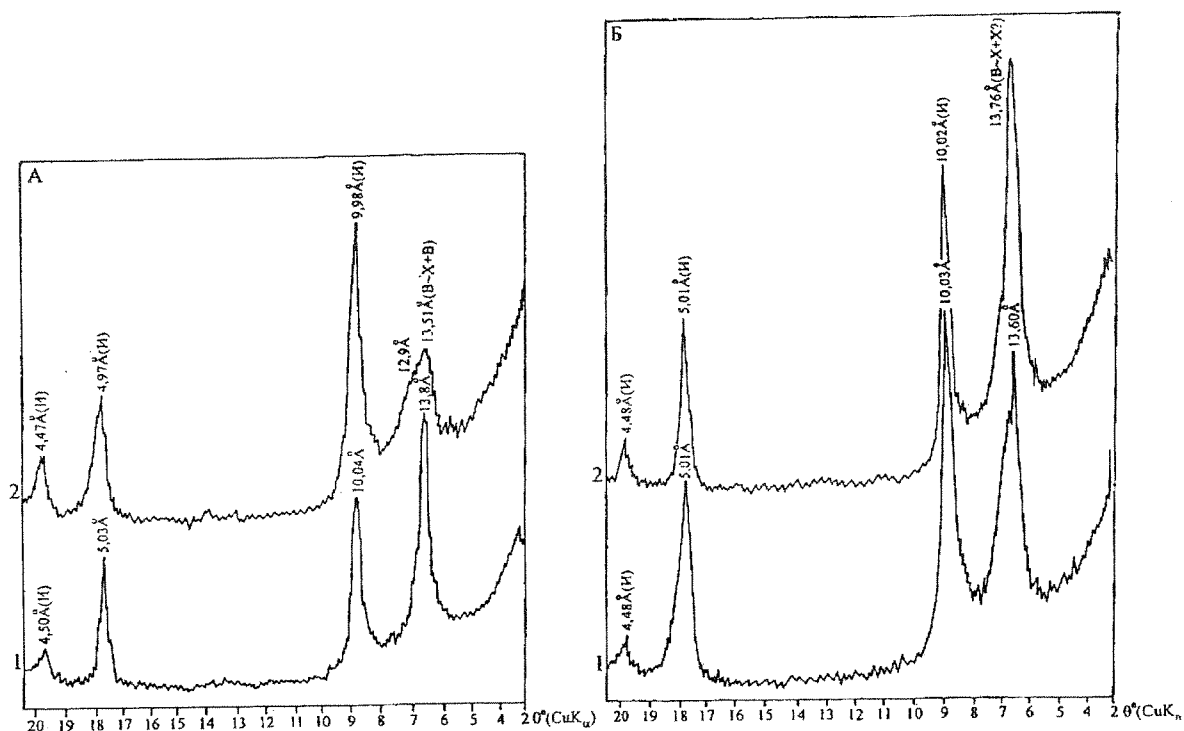


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм тонкой фракции образцов №23 (А) и №29 (Б), скв. Доронинская 275, прокаленной при $T = 550^{\circ}\text{C}$ в течение 2 часов (1 — до опыта, 2 — после опыта, II серия, 2 этап). Условные обозначения: И — иллит, В — вермикулит, Х — хлорит, В-Х — смешанослойный минерал вермикулит-хлорит. Условия записи: ДРОН-3, Cu_α , 40 кв, 40 мА. Анализ выполнен Н.Т. Мандриковой

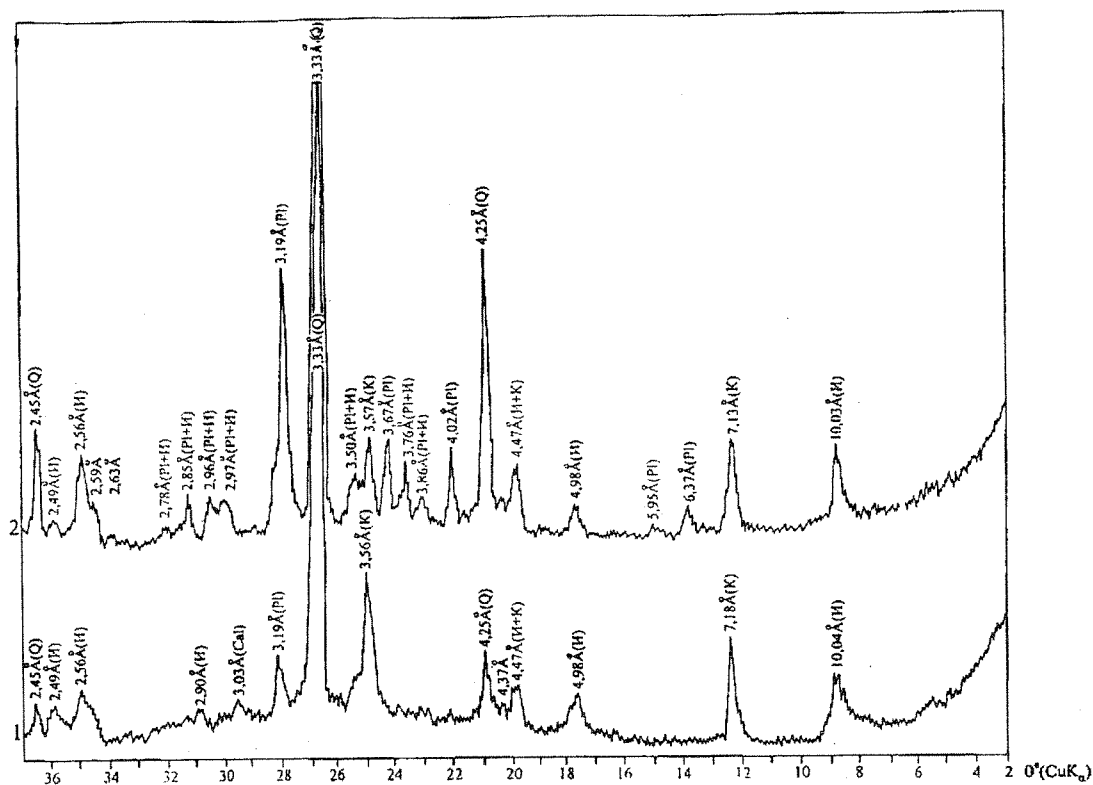


Рис. 2. Фрагменты дифрактограмм тонкой фракции образца №29 (скв. Доронинская 275), обработанной HCl (1 — до опыта, 2 — после опыта, II серия, 2 этап). Условные обозначения: Q — кварц, И — иллит, PI — плагиоклаз, Cal — кальцит, K — каолинит. Условия записи: ДРОН-3, Cu_α , 40 кв, 40 мА. Анализ выполнен Н.Т. Мандриковой

– изменении соотношения межзерновых контактов, особенно полных и неполных прямолинейных. Резко уменьшилось количество прямолинейных первичных полных и возросло – прямолинейных вторичных неполных контактов, возникших вследствие растворения и регенерации кварца и альбита. Возросло количество контактов, сформированных вследствие пластических деформаций полевых шпатов слюд и эффузивов, а также сутурн-стилолитовых контактов (табл. 2). В образце № 21 снизились коэффициенты A и K_u за счет разуплотнения, обусловленного процессами растворения и катаклаза полевых шпатов.

Изменения в структуре порового пространства выразились менее отчетливо. После опыта растворилась часть кальцитового цемента, о чем свидетельствует изучение покрашенных шлифов и данные РА, в результате чего повысилась сообщаемость межзерновых пор. По данным порометрического анализа в образце № 21 величина открытой пористости после опыта почти не изменилась, хотя объем пор диаметром от 300 до 0.01 мкм, значительно уменьшился а поверхность пор малых диаметров – возросла (рис. 1). В образце № 40 объем и суммарная поверхность пор возросли (рис. 2).

Минералогические изменения проявились слабо. В обоих образцах произошла увеличительная перекристаллизация кремней и кварцитов с образованием крупных розеток халцедона. В образце № 40 в составе кальцитового цемента появились мраморизованные участки. Кроме того, усилились процессы новообразования изоморфно-замещенного доломита по полевым шпатам и растворения последних с образованием внутризерновой пористости. По данным РА в обоих образцах произошли изменения в дифракционной картине альбита, которая стала более четкой в области углов $2\theta=27^{\circ}-28^{\circ}$. В образце № 21 заметно усилилась интенсивность альбитового рефлекса с $d=3, 185 \text{ \AA}$ и появился дополнительный пик с $d=3, 239 \text{ \AA}$, что, возможно, связано с образованием дополнительного количества альбита в результате гидролиза силикатов.

II серия экспериментов

Песчаники, вскрытые скважиной Доронинская 275 до опыта различались структурой обломочной части (образец № 23 – крупно-, а № 29 – мелкозернистой структуры) и содержанием цемента (табл. 1).

По данным РА состав тонкой фракции обоих образцов до опыта был близок. В составе этой фракции образца № 23, наряду с иллитом, каолинитом, кварцем и альбитом, присутствовал вермикулит и смешанослойный минерал вермикулит-хлорит. Состав глинистой фракции образца № 29 отличался более высоким содержанием смешанослойных минералов вермикулит-хлоритового состава с преобладанием хлоритовой компоненты (табл. 1).

Степень уплотнения зерен в песчанике № 23 до опыта была выше, чем в образце № 29, за счет обилия в его составе обломков сланцев и эффузивов (табл. 2). В то же время открытая пористость песчаников была практически одинакова и составляла: в образце № 23 – 5.4% по методу Преображенского и 10.6% – по методу ртутной порометрии: в образце № 29 – 6.5 и 8.7 соответственно. Проницаемость обоих песчаников до опыта не превышала $0.01-0.03 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

В шлифах, пропитанных бакелитовой смолой, до опыта зафиксированы: в образце № 23 – межзерновые поры, возникшие вследствие растворения растительных остатков и внутризерновые поры по полевым шпатам, слюдам и слюдисто-глинистым сланцам, в то время как для образца № 29 более характерны единичные межзерновые изолированные или сообщающиеся поры округлой сложной конфигурации, а также микропоры внутри тонкозернистого сидеритового цемента и трещины в обломках сланцев. Основной объем межзернового порового пространства обоих образцов также приходился на поры и каверны малого диаметра (0.003–0.40 мкм, особенно 0.021–0.018 мкм). В это же время средний диаметр пор образца № 29 значительно меньше (0.02 мкм), чем в образце № 23 (0.11 мкм).

После испытания образцов с малых глубин в условиях, имитирующих Р–Т режим начальной зоны глубинного катагенеза (глубина 3 км, давление 150 атм, температура 85°C) в течение 10 суток после 1 этапа испытаний были отмечены изменения в соотношении типов межзерновых контактов (табл. 2). В образце № 23, содержащем небольшое количество карбонатного цемента, после опыта произошло разуплотнение обломочного каркаса, в результате чего значительно снизились коэффициенты A (число контактов на 1 зерно) и K_u (коэффициент уплотнения). Заметно уменьшилось количество полных и возросло число неполных прямолинейных контактов (табл. 2). Тонкозернистый плотный глинистый образец № 29, напротив, еще более уплотнился. В результате заметно возросли коэффициенты катагенеза A и K_u (табл. 2).

Существенного изменения структуры порового пространства после 1-ого этапа испытаний в обоих образцах не произошло. Изучение покрашенных шлифов показало, что как до, так и после опыта в обр. № 23 преобладали сообщающиеся межзерновые поры округлой, треугольной, звездчатой формы, реже – причудливых очертаний. В образце № 29 возрос объем пор малого диаметра в области размеров от 0.89 до 0.003 мкм. Объем более крупных пор возрос незначительно. Суммарная поверхность пор заметно увеличилась в области диаметров 0.010–0.19 мкм. Пористость по данным ртутной порометрии увеличилась на 1.8% и составила 8.7% в образце № 23 и более резко возросла в образце № 29 (с 5.3 до 10.6%, табл. 2).

Поровое пространство образца № 23 после опыта заполнилось жидкими углеводородами, поэтому изучить его структуру не удалось. Общий вес битумоидов, экстрагируемых из этого образца, составил 0.2062 г (0.084% породы).

Минералогические преобразования в образце № 23 после опыта выразились в изменении дифракционной картины глинистых минералов тонкой фракции. Произошло незначительное уширение пика иллитов в области рефлексов 5.0 и 10.0 \AA (табл., рис. 1). В образце № 29 после опыта заметно улучшился рефлекс 3.19 \AA и уменьшился пик 4.02 \AA альбита, что может свидетельствовать об образовании дополнительных количеств этого минерала в ходе эксперимен-

та. Кроме того, улучшились рефлексы 10.03, 2.45 и 2.56 Å у иллита, возможно, вследствие улучшения структуры этого минерала (табл., рис. 2).

На II этапе испытаний образцы и соответствующие им по составу порошки были подвергнуты более высоким нагрузкам (500 ат) в условиях повышенных температур при той же минерализации раствора и концентрации в нем CO_2 .

После 10 – суточного испытания повышенным давлением образец №29 частично разрушился. В препарате, изготовленном из образца №29 после опыта, зарегистрировано более интенсивное замещение полевых шпатов карбонатами и серицитом, биотита – гидрослюда и сидеритом, растворение зерен кварца на контактах с глинистыми и слюдяными обломками, а также образование дополнительных количеств аутигенного альбита.

Минеральные преобразования наиболее отчетливо проявились в составе порошков, особенно в глинистой фракции. Эти изменения имели различный характер в зависимости от исходных состава и структуры пород. Так, в пробе № 29 улучшилась структура иллита и хлорита, в то время как в порошке № 23 дефектность структуры глинистых минералов, в частности, вермикулита, напротив, возросла. Увеличилось количество пакетов вермикулит-хлоритового состава по сравнению с пробами до опыта и после 1-ого этапа испытаний. Возросла разупорядоченность и дефектность в структуре иллита, что выразилось в уширении рефлексов 1.99, 4.97 и 10.0 Å (рис. 1). Вместе с тем, в этом образце и в обр.29 существенно улучшилась дифракционная картина альбита и кварца (рис. 2). О росте относительного количества этих минералов свидетельствуют как результаты изучения петрографических шлифов, так и данные РА (появление линий альбита и кварца на дифрактограммах, которые отсутствовали до опыта (рефлексы 3.67, 4.02 Å, рис. 2).

Заметные изменения структуры и состава глинистых минералов произошли и во фракции 0.25–0.1 мм. Так, в пробе № 23 интенсивность рефлексов хлорита и каолинита после опыта уменьшилась (что обусловлено либо уменьшением количества фазы в пробе, либо ухудшением структуры этих минералов после опыта). После 2 этапа в этой же пробе появилась тенденция к росту беспорядочности в ориентации частиц иллита, в то время как в пробе № 29 ориентация частиц и структура этого минерала улучшились, вследствие чего рефлекс (001)-10 Å стал более симметричным, что обусловлено более однообразным составом межслоевого промежутка.

Рентгеноструктурный анализ осадков из раствора после опыта показал, что в осадке № 23 наряду с хлоритом, присутствуют кварц, каолинит, а также в незначительных количествах – альбит и кальцит. Содержания кварца и альбита в осадке № 29 оказались выше, чем в осадке № 23, что подтверждается результатами изучения шлифов. В этом же осадке обнаружены также каолинит, хлорит и иллит. Эти данные косвенно свидетельствуют о формировании дополнительных количеств аутигенных минералов: кварца, каолинита, хлорита, иллита и альбита в результате эксперимента.

По данным химического силикатного анализа в растворах № 23 и 29 после опытов II серии увеличилось количество ионов *Ca*, *Fe* и *Mn*, и уменьшилось содержание *Na*, *K*, *Mg* и *Si*.

В образце № 29 после 2-го этапа испытаний с помощью ртутной порометрии зарегистрировано более интенсивное увеличение объема пор большого и менее выраженный рост объема пор малого диаметра по сравнению с 1-ым этапом. Максимальный прирост суммарной поверхности пор также пришелся на диапазон размеров 0.04–0.003 мкм. Величина открытой пористости возросла на 2% по сравнению 1-ым этапом и на 3.5% по сравнению с исходным значением этого параметра и составила 10.7%. В обоих образцах увеличилась доля внутризерновых пор, возникших вследствие деградации неустойчивых обломков, особенно полевых шпатов и слюд, а также карбонатизации зерен плагиоклазов в составе эффузивных обломков.

Обсуждение результатов и основные выводы

В результате проведенных экспериментов были зарегистрированы следующие изменения в структуре и составе пород:

- 1 – изменение структуры порового пространства (морфологии, размера, объема пор, коэффициента открытой и эффективной пористости и трещиноватости и суммарной поверхности пор и поровых каналов);
- 2 – изменение минерального состава (появление новых минеральных фаз, дополнительное образование аутигенных минералов, изменение кристаллической структуры минералов);
- 3 – изменение структуры обломочной части (переуплотнение, разуплотнение, катаклаз, растворение под давлением, перекристаллизация, пластические деформации обломочных зерен, изменение в соотношении типов межзерновых контактов и коэффициентов катагенеза).

Структурные преобразования обломочного каркаса и порового пространства более отчетливо проявились в результате 40-дневного испытания образцов пород с больших глубин максимальными нагрузками (1500 атм) при 160°C, т.е. в условиях, характерных для зоны глубинного катагенеза при концентрации CO_2 в растворе 45%. В этом режиме испытаний появления новых минеральных фаз зарегистрировано не было.

В опытах I серии более интенсивные структурные преобразования после гидротермального воздействия были зафиксированы в граувакковом песчанике № 21 из скв. Уренгойской 414 с невысоким содержанием цемента, где вследствие переуплотнения и растворения неустойчивых обломков снизились коэффициенты *A* (число контактов на 1 зерно) и *K_з* (коэффициент уплотнения), а также уменьшился объем пор большого диаметра и несколько возросла суммарная поверхность мелких пор и капилляров, что, очевидно, связано с возникновением внутризерновой микропористости. К изменениям в минеральном составе можно отнести образование дополнительных количеств аутигенного альбита и протоиломита, сформировавшихся по ослабленным зонам внутри зерен полевых шпатов.

В образце № 40 близкого минерального состава с карбонатным цементом структурные преобразования обломочного каркаса проявились менее отчетливо, о чем можно судить по практически не изменившимся после опыта коэффициентам A и K , и идентичным кривым внедрения ртути до и после испытаний давлением. В этом образце при воздействии щелочного раствора, насыщенного углекислым газом, произошло заметное растворение кварца и кремнистых обломков с образованием дополнительных порций аутигенного кварца и халцедона, в связи с чем возросла доля вторичных контактов, возникших путем растворения под давлением и регенерации кварцевых зерен.

Появление новых минеральных фаз в образцах 23 и 29 после опытов II серии было отмечено уже через 10 суток гидротермального воздействия на песчаные породы при температуре 85°C и давлении 150 атм. Как уже упоминалось, различными методами было зарегистрировано формирование дополнительных количеств кварца, альбита, каолинита и хлорита. О возможности синтеза этих минералов из перегретых водных растворов щелочного состава в присутствии CO_2 сообщено рядом исследователей [6, 9 и др.].

Показано, что растворимость полевых шпатов в водных растворах, насыщенных углекислым газом, при $T = 100\text{--}200^\circ\text{C}$ и $P = 42$ атм возрастает с ростом концентрации CO_2 [6]. При этом молярная доля CO_2 составляет более 0.43 м/л, а критическая температура 160°C. В результате деанортитизации основных и средних плагиоклазов и десилификации калиевых шпатов образуются новые порции аутигенных кварца, каолинита, кальцита.

Каолинит и кварц, как продукты гидролиза альбита, были экспериментально получены Г.Ю. Шведенковым и С.В. Шведенковой [9] при $T = 200^\circ\text{C}$ и $P = 136$ атм. Формирование каолинита путем гидратации анортита в углекислой среде зафиксировано Р.П. Рафальским и Н.И. Присягиной при $T = 300^\circ\text{C}$ и молярной доле CO_2 ниже 0.5. Этими авторами показано, что гидролиз протекает с такой скоростью, что уже через 1 час первоначально кислые растворы приобретают нейтральную реакцию.

По экспериментальным данным скорость гидролиза микроклина в перегретых водных растворах в присутствии CO_2 с образованием каолинита и кварца достаточно высока в щелочной и нейтральной средах при $T = 250^\circ\text{C}$. В таких условиях полный гидролиз этого минерала завершается в течение нескольких суток [6].

Как известно, растворение породообразующих силикатов и образование новых минеральных фаз определяется степенью растворимости минералов и быстро возрастают с ростом температур и давлений в условиях больших глубин (7). В ходе экспериментов несмотря на относительно невысокие температуры и небольшую длительность испытаний, скорость минеральных преобразований оказалась достаточно высокой. Это, по нашему мнению, обусловлено большой ролью реакций гидратации, гидролиза и особенно ионного обмена между компонентами пород и гидротермальным раствором и прежде всего присутствием щелочных полевых шпатов, иллитов и смешанослойных фаз. Это косвенно подтверждается данными химического анализа раствора до и после эксперимента.

В экспериментальных работах, посвященных воздействию углекислых растворов на некоторые железо- и алюминий содержащие минералы, показано, что наличие растворенного CO_2 по сравнению с чистой водой усиливает вынос таких катионов, как Fe , Mn , Ca , щелочных земель и почти полностью затормаживает вынос катионов группы алюминия. В раствор переходят, в основном, щелочные, щелочноземельные элементы и кремнезем [9, 10].

В результате опытов при заданных параметрах раствора и концентраций в нем CO_2 в выбранном P – T режиме не было получено значительного количества новых минеральных фаз карбонатного состава за счет растворения карбонатного цемента, поскольку, согласно данным В.Е. Шарпа и Г.С. Кеннеди [12] при $T = 100\text{--}200^\circ\text{C}$ и давлении 1400 атм растворимость кальцита ничтожна и составляет $n \cdot 10^{-1}\%$ и, кроме того, реакция растворения карбонатов интенсивно протекает в кислой среде.

По данным С.Д. Малинина [5] при росте концентраций CO_2 свыше 0.2 валовых процента растворимость кальцита практически равна нулю. Поэтому в результате гидротермального воздействия на песчаники с карбонатным цементом при выбранных условиях эксперимента, растворения последнего в заметных количествах зафиксировано не было. Лишь в результате 20-дневного воздействия на породы во 2-ой серии экспериментов в шлифах наблюдалась слабая доломитизация плагиоклазов обломочного каркаса и полевошпатовых лейст в составе обломков эффузивных пород.

Наиболее ощутимые структурные и минеральные преобразования песчаных пород произошли в результате экспериментов второй серии. Уже после 10 суток гидротермального воздействия под давлением 150 атм при $T = 85^\circ\text{C}$ произошло разуплотнение крупнозернистого песчаника и образование дополнительной емкости в результате выщелачивания полевых шпатов и слюд, возросла дефектность в структуре иллитов и хлоритов, а также были синтезированы новые минеральные фазы – каолинит, кварц и альбит. Более интенсивное образование последних было зафиксировано при $T = 135^\circ\text{C}$ и $P = 500$ атм.

По данным ртутной порометрии открытая пористость песчаников увеличилась на 0,4–1,5% после испытаний I серии и на 2,2–5,3% – после опытов II серии.

В результате опытов открытая пористость граувяковых песчаников, в среднем, возросла на 2,6%, что свидетельствует о возможности улучшения качества коллекторов в тектонически активных зонах при участии щелочных гидротермальных растворов, насыщенных CO_2 . Повышение щелочности пластовых флюидов, в частности, наблюдается в нижних горизонтах осадочного чехла в районе Енисей-Хатангского прогиба (Южно-Носковская площадь, вымский горизонт, глубина 3799 м) и других северных районов Западно-Сибирской плиты, что, очевидно, связано с процессами растворения и дегидратации глинистых минералов и, в том числе смешанослойных образований, в процессе катигенетического уплотнения пород с выделением агрессивных возрожденных вод. Известно, что в Уренгойском районе смешанослойные монтмориллонит-гидрослюдистые минералы сохраняются в разрезе до глубины 4,5–5,0 км. Здесь же

по данным С.Н.Симакова и др. [7] к нижним горизонтам осадочного чехла приурочены щелочные слабо минерализованные гидрокарбонатно-натриевые воды, обогащенные CO_2 , а во вмещающих породах широко развиты процессы вторичного разуплотнения вследствие растворения неустойчивых компонентов обломочного каркаса (6).

После испытания в течение 10 суток давлением 150 атм при $T=85^\circ\text{C}$ в присутствии CO_2 полимиктового песчаника из скважины Доронинская 275, содержащего остаточные битумоиды в связанном виде, последние были переведены в подвижное состояние, в связи с чем все свободное поровое пространство породы оказалось заполненным жидкими УВ. Этот результат имеет важное практическое значение, т.к. в последние годы при разработке нефтяных месторождений все более широкое применение находят методы интенсификации добычи УВ путем закачки в пласт реагентов, насыщенных углекислым газом [8,10,11 и др.]. Эксперименты по исследованию нефтеотдачи продуктивных пластов для извлечения тяжелых нефтей на месторождениях Ритчи, Рейнджли (США), Уилмингтон (Канада) и др. с помощью нагнетания горячего пара с добавками CO_2 и других органических растворителей показали, что под давлением горячего пара с добавками CO_2 выход битумоидов существенно увеличивается по сравнению с их выходом при нагнетании чистого пара. Так, на месторождении Рейнджли (США, штат Колорадо) текущая добыча нефти после закачки в пласт CO_2 возросла на 34,5% по сравнению с периодом заводнения [11].

Проведенные эксперименты позволяют сделать два практически важных вывода.

1. В результате проработки катагенетически преобразованных и уплотненных песчаников с больших глубин горячими щелочными растворами, обогащенными CO_2 , в условиях повышенных температур и давлений, образуется дополнительная емкость в виде внутри- и межзерновых вторичных пор и каналов, что приводит к разуплотнению, увеличению открытой пористости пород и улучшению качества коллекторов.
2. Присутствие CO_2 в растворе стимулирует рост подвижности связанных битумоидов в составе песчано-алевритовых пород на больших глубинах, что имеет важное значение при выборе оптимального режима эксплуатации нефтяных месторождений с трудно извлекаемыми запасами УВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берч Ф. и др. Справочник для геологов по физическим константам. М.: Изд-во иностр. литер., 1949, 302 с.
2. Борукаев Г.Ч. Закономерности нефтегазообразования на больших глубинах Уренгойского мегапрогиба (по материалам Тюменской скважины СГ-6). Автореф.канд.дисс. — Новосибирск, 1996. — 19 с.
3. Ермаков В.И., Скоробогатов В.А. Термоглубинные условия газонефтеносности юрских отложений северных районов Западной Сибири /Геология нефти и газа. — № 11. — М.: Недра, 1988 — С. 17—22.
4. Карнюшина Е.Е., Леоненко Г.Н. Свойства коллекторов Западной Сибири в зоне катагенеза / Вестник МГУ, 1989. — Сер.4, № 5. — С.35—41.
5. Малинин С.Д. Растворимость кальцита в растворах $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ (NaCl) при температурах 100—600° С и давлениях до 1000 кг/см². — В кн.: Эксперимент в минералогии и петрографии. М.: Наука, 1975, С. 121—127.
6. Предтеченская Е.А., Вакуленко Л.В., Злобина О.Н. Катагенез песчаников нижней и средней юры Уренгойского района / Геология и геофизика. — Т.34, № 7. — 1993. — С. 70—80.
7. Прогноз и оценка нефтегазоносности недр на больших глубинах /Под ред. С.Н.Симакова // Тр.ВНИГРИ. — Ленинград: Недра, 1986. — 247 с.
8. Рафальский Р.П., Присягина Н.И., Кондрашин И.Б. Взаимодействие микроклин-пертита с водными растворами при 150° и 250° / Геохимия. — 1990. — № 2. — С. 225—236.
9. Состояние опытных работ по нагнетанию двуокиси углерода на Елабужском месторождении / Р.Р. Ибатуллин и др. //Современные методы увеличения нефтеотдачи пластов. РАН. Науч. сов. по разраб. месторождений нефти и газа. — М.: Наука, 1992. — С. 63—67.
10. Шведенков Г.Ю., Шведенкова С.В. Полевые шпаты под давлением воды и двуокиси углерода. — Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1982. — 148 с.
11. Frank T.H., Burchfield T.E. Research aimed at immiscible CO_2 flooding /Oil and gas Geology, 85, № 17, 1987, P. 76—82.
12. Hervey J.R., Jakovakis A.S. Perforation review of a miscible CO_2 tertiary project: Rangely Weber Sand Unit, Colorado. /SPE Reservoir Fig. 6, №2, 1991, P. 163—168.
13. Sharp W.E., Kennedy G.C. The system $\text{CaO}-\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ in the two-phase region calcite-aqueous solution. — J. Geol., 1965, v. 73, N 2, P. 391—403.