

ПРАВИТЕЛЬСТВО ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ  
ДЕПАРТАМЕНТ ПО НЕФТИ, ГАЗУ И МИНЕРАЛЬНЫМ РЕСУРСАМ ХМАО – ЮГРЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ  
«НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ ИМ. В.И. ШПИЛЬМАНА».

# ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОВОГО И РУДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА – ЮГРЫ

*Десятая  
научно-практическая конференция*

*Том 1*

*Под редакцией*

КАРАСЕВА В.И. – кандидата экономических наук,  
ШПИЛЬМАНА А.В. – кандидата геолого-минералогических наук,  
ВОЛКОВА В.А. – кандидата геолого-минералогических наук

Ханты-Мансийск  
Издательский Дом «ИздатНаукаСервис»  
2007

# **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОБРАЗЦОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ ЭФФЕКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЛАСТОВЫХ УСЛОВИЙ**

М.Ю. Зубков, В.В. Колпаков, Р.В. Коваленко,  
Я.А. Пормейстер (ТФ ООО «КогалымНИПИнефть»)

При определении относительных фазовых проницаемостей (ОФП), остаточной нефтенасыщенности и коэффициентов вытеснения нефти водой (Квыт.), авторы столкнулись с результатами экспериментов, проведенных на одних и тех же образцах (используемых в составных моделях продуктивных пластов) по несколько раз. При этом фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) образцов в одних случаях значительно различаются до и после проведения экспериментов, а в других – наоборот почти не изменились.

В связи с этим возник вопрос о возможности использования образцов керна два раза или более при проведении специальных видов исследований, где предусмотрены их нагружение до пластовых условий с моделированием эффективного давления, а затем разгрузка до атмосферного давления.

## **Результаты исследований**

С целью выявления закономерностей в изменении ФЕС и структуре порового пространства пород-коллекторов в результате их нагружения использовались результаты исследования структуры порового пространства образцов после двух принципиально различных видов экспериментов. Во-первых, после определения коллекторских и электрических свойств в условиях, моделирующих пластовые (обозначим их для краткости **УЭСиКп<sub>пл.</sub>**), и, во-вторых, после проведения экспериментов по определению ОФП и остаточной нефтенасыщенности, с расчетом коэффициента вытеснения (обозначим их для краткости **ОФПиКвыт.**).

Для этого использовались результаты определения структуры порового пространства 90 образцов, подвергшихся нагружению, проницаемость которых изменялась в пределах 1,2–564,0 мД.

Для исключения ошибок в определении структуры порового пространства образцов до и после их нагружения, капиллярные кривые и ФЕС образцов изучались по два раза на каждом образце (до их нагружения и после). Полученные результаты показали высокую степень сходимости, не выходящей за рамки погрешности, предусмотренной соответствующими ГОСТами и СТП [1–4].

Рассмотрим изменения ФЕС и структуры порового пространства первой группы образцов (**УЭСиКп<sub>пл.</sub>**), состоящей из 57 образцов с вариацией абсолютной проницаемости от 1,2 до 261,0 мД, отобранных из пластов БС<sub>11</sub>, БС<sub>12</sub>, БС<sub>16–22</sub>, ЮС<sub>1</sub> и ЮС<sub>2</sub> Тевлинско-Русскинского месторождения.

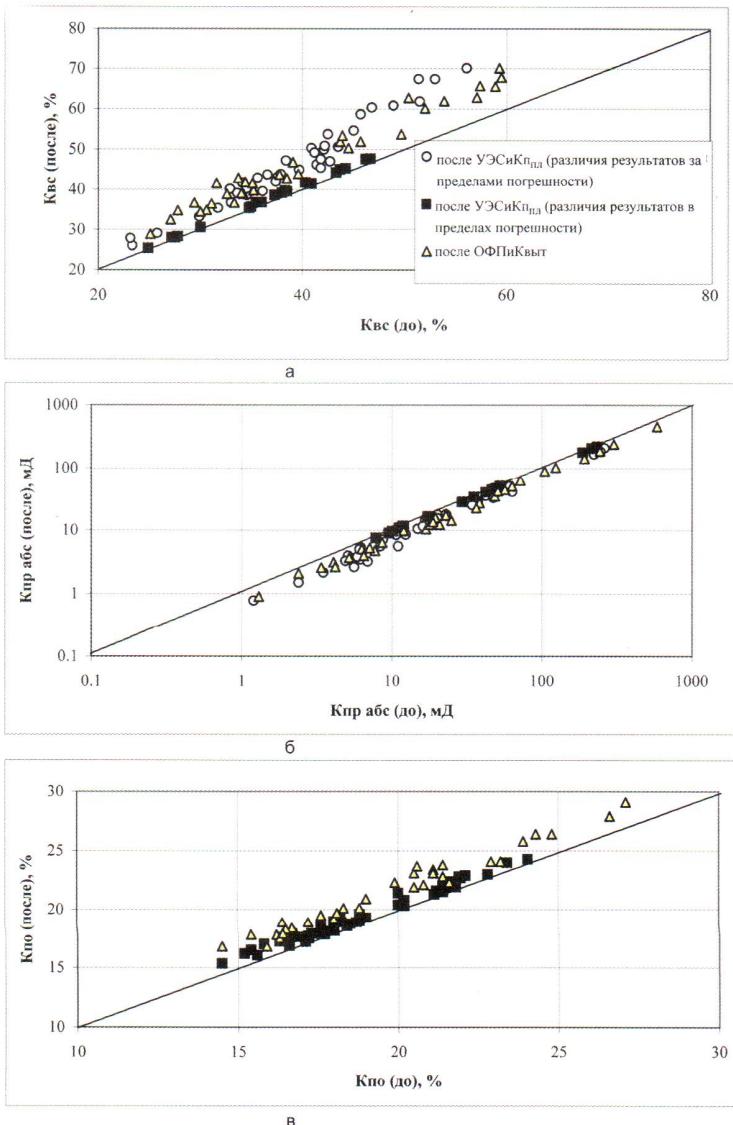


Рис. 1. Сопоставление водоудерживающей способности (а), абсолютной проницаемости (б) и открытой пористости (в) до и после определения УЭС и Кп в пластовых условиях (УЭСиКппл), а также ОФП и Квыт (ОФПиКвыт)

вающей способности ( $K_{вс}$ ) и, напротив, снижения абсолютной проницаемости ( $K_{пр}$ ) и, **во-вторых**, явно превышающих утвержденные в руководящих документах пределы погрешности измерения (см. рис. 1). Причем величина отмеченных различий в  $K_{вс}$  и  $K_{пр}$  увеличивается по мере ухудшения ФЕС образцов (см. рис. 1а, б).

Полученные результаты можно объяснить, рассмотрев закономерности изменения распределения пор по размерам в образцах до и после их нагружения по данным капиллярометрических исследований (рис. 2–5). На приведенных рисунках видно, что независимо от ФЕС образцов отмечается закономерное уменьшение радиусов пор и соединяющих их каналов после проведения экспериментов по сравнению с таковыми в тех же образцах до их проведения, поэтому отмечается рост содержания в них  $K_{вс}$  после экспериментов с моделированием эффективного давления.

Исследования, проведенные спустя 6 месяцев после определения УЭСиКппл, показали, что почти полностью восстановили исходную структуру порового пространства всего около 30% от общего числа образцов, а в остальных она так и осталась «уплотненной» и практически не изменилась после снятия нагрузки.

После проведения исследований, связанных с нагружением образцов, были повторно выполнены определения ФЕС и получены капиллярные характеристики через следующие интервалы времени: 1 неделя, 1 месяц, 6 месяцев.

В целом сопоставление ФЕС и структуры порового пространства образцов до определения УЭСиКппл, и, например, через 1 месяц после их нагружения, показало увеличение их водоудерживающей способности и пористости (рис. 1а, в) и уменьшение их проницаемости (рис. 1б).

Результаты измерения ФЕС образцов, выполненные до и после их нагружения (вследствие проведения опытов по определению УЭСиКппл), можно разделить на две группы. **Во-первых**, входящие в пределы допустимой погрешности измерений, регламентированной ГОСТами и СТП [1–3], но с тенденцией увеличения после экспериментов их пористости ( $K_{по}$ ) и водоудержи-

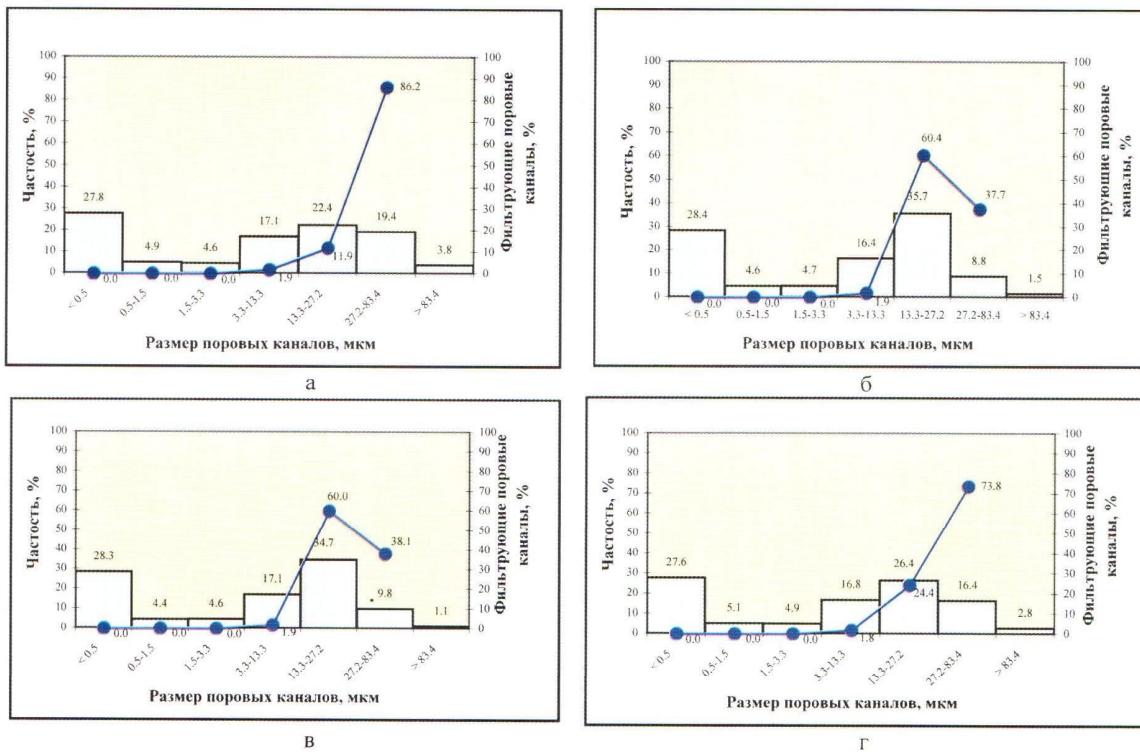


Рис. 2. Сопоставление структуры порового пространства и вкладов различных по размерам пор в фильтрацию в образце 4542 до проведения исследований по определению УЭСиКппл (а) и после, спустя:

- б** – 1 неделю;
- в** – 1 месяц;
- г** – 6 месяцев

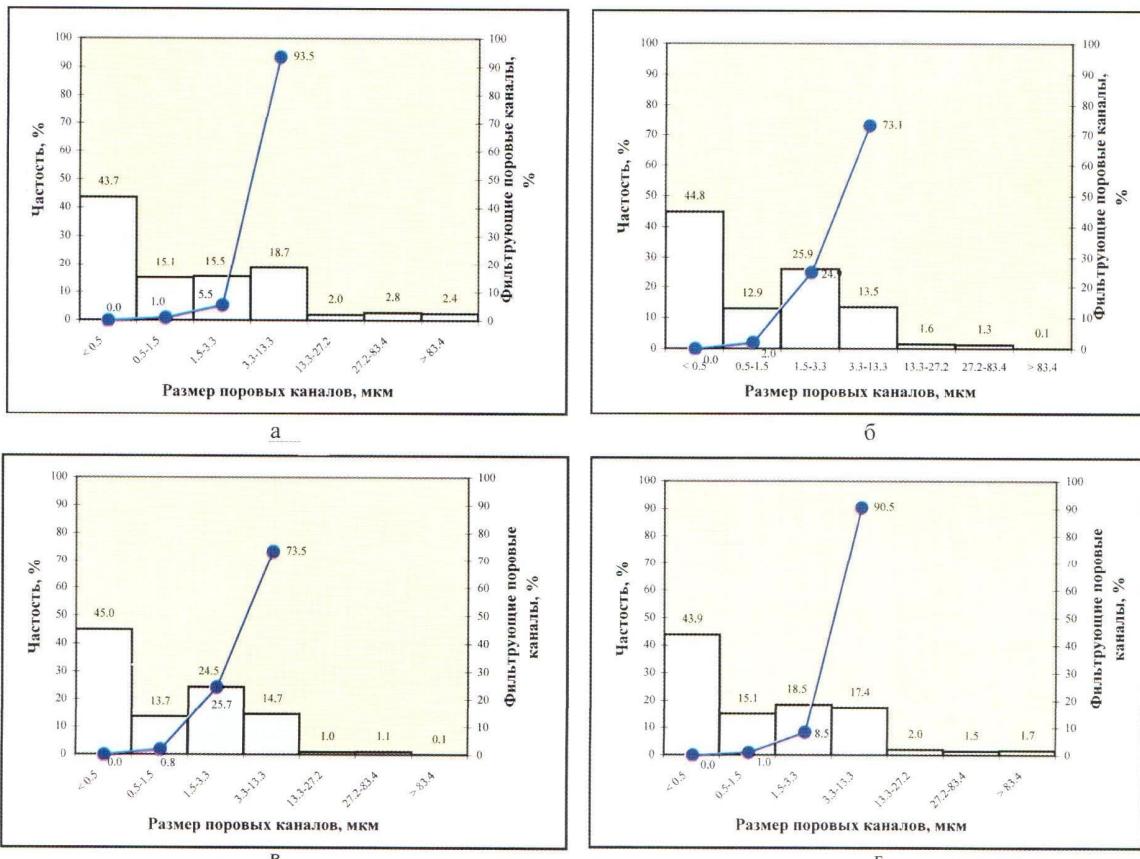
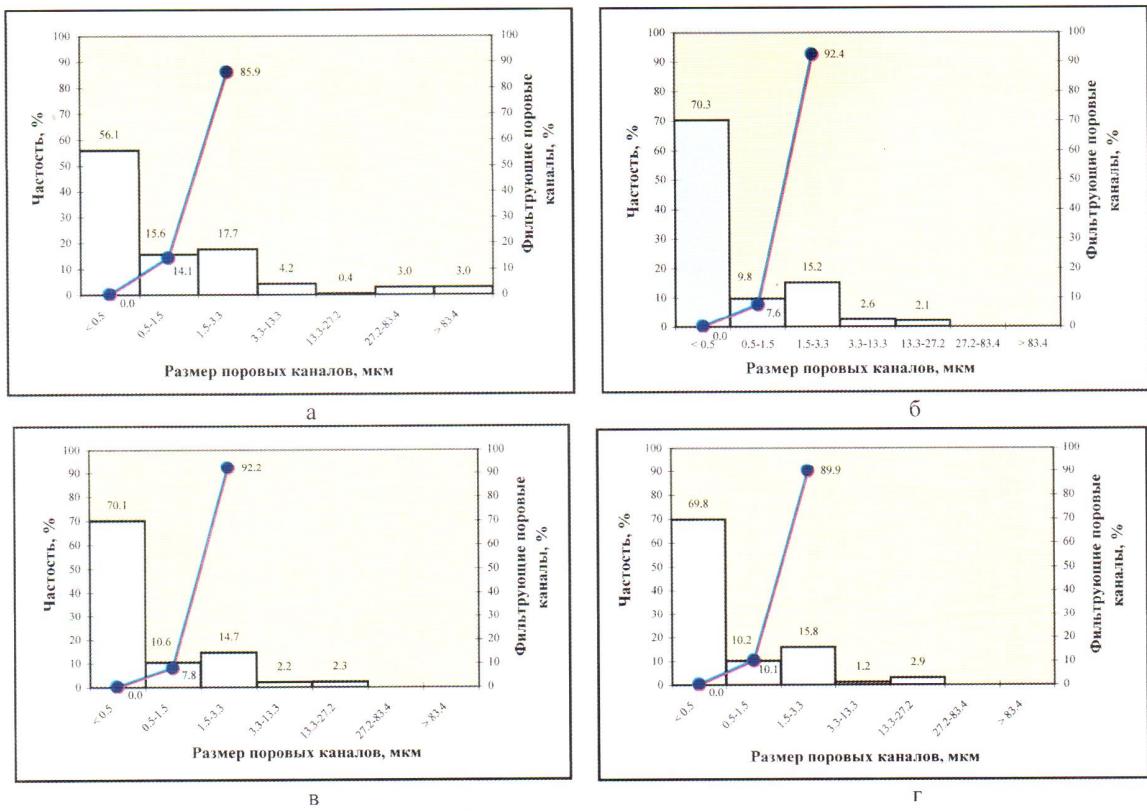


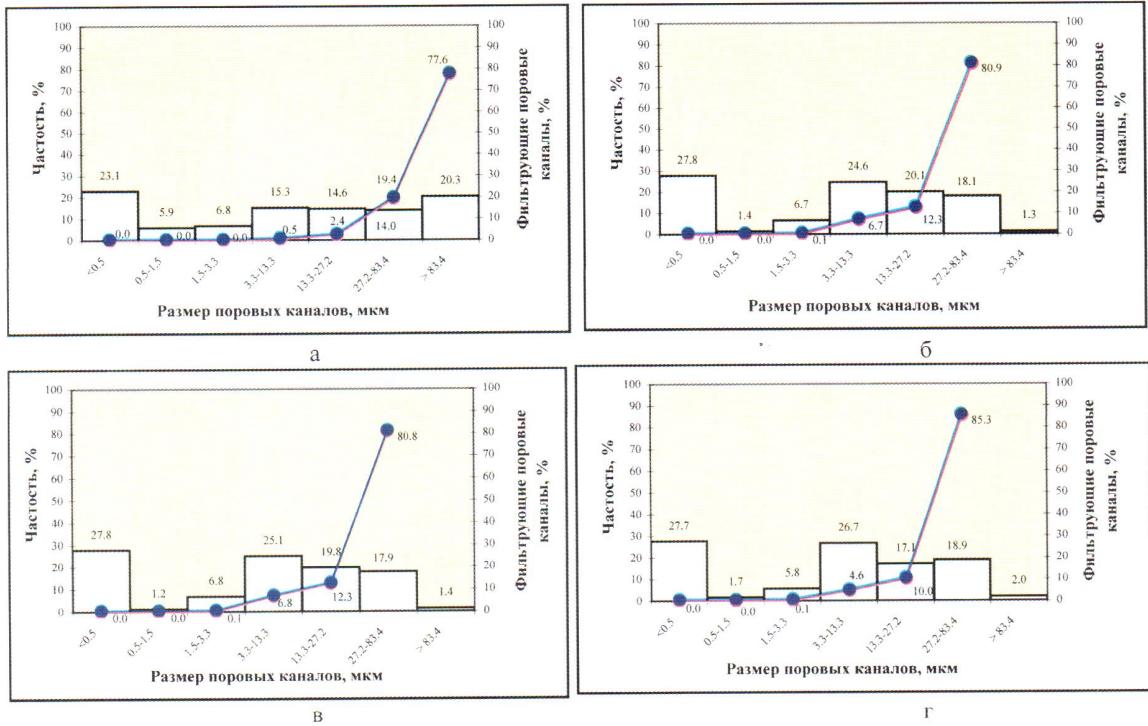
Рис. 3. Сопоставление структуры порового пространства и вкладов различных по размерам пор в фильтрацию в образце 3714 до проведения исследований по определению УЭСиКппл (а) и после, спустя:

- б** – 1 неделю;
- в** – 1 месяц;
- г** – 6 месяцев



**Рис. 4.** Сопоставление структуры порового пространства и вкладов различных по размерам пор в фильтрацию в образце 1629 до проведения исследований по определению УЭСиКппл (а) и после, спустя:

- б** – 1 неделю; **в** – 1 месяц; **г** – 6 месяцев



**Рис. 5.** Сопоставление структуры порового пространства и вкладов различных по размерам пор в фильтрацию в образце 188 до проведения исследований по определению УЭСиКппл (а) и после, спустя:

- б** – 1 неделю; **в** – 1 месяц; **г** – 6 месяцев

Почти полностью восстановили исходную структуру порового пространства образцы, которые изначально испытали незначительные изменения, попадающие в границы погрешностей, принятых в ГОСТах и СТП [1–3].

На приведенных рисунках демонстрируются различные варианты изменения структуры порового пространства образцов со временем. На рис. 2 и 3 представлены результаты изучения структуры порового пространства образцов, которые после сня-

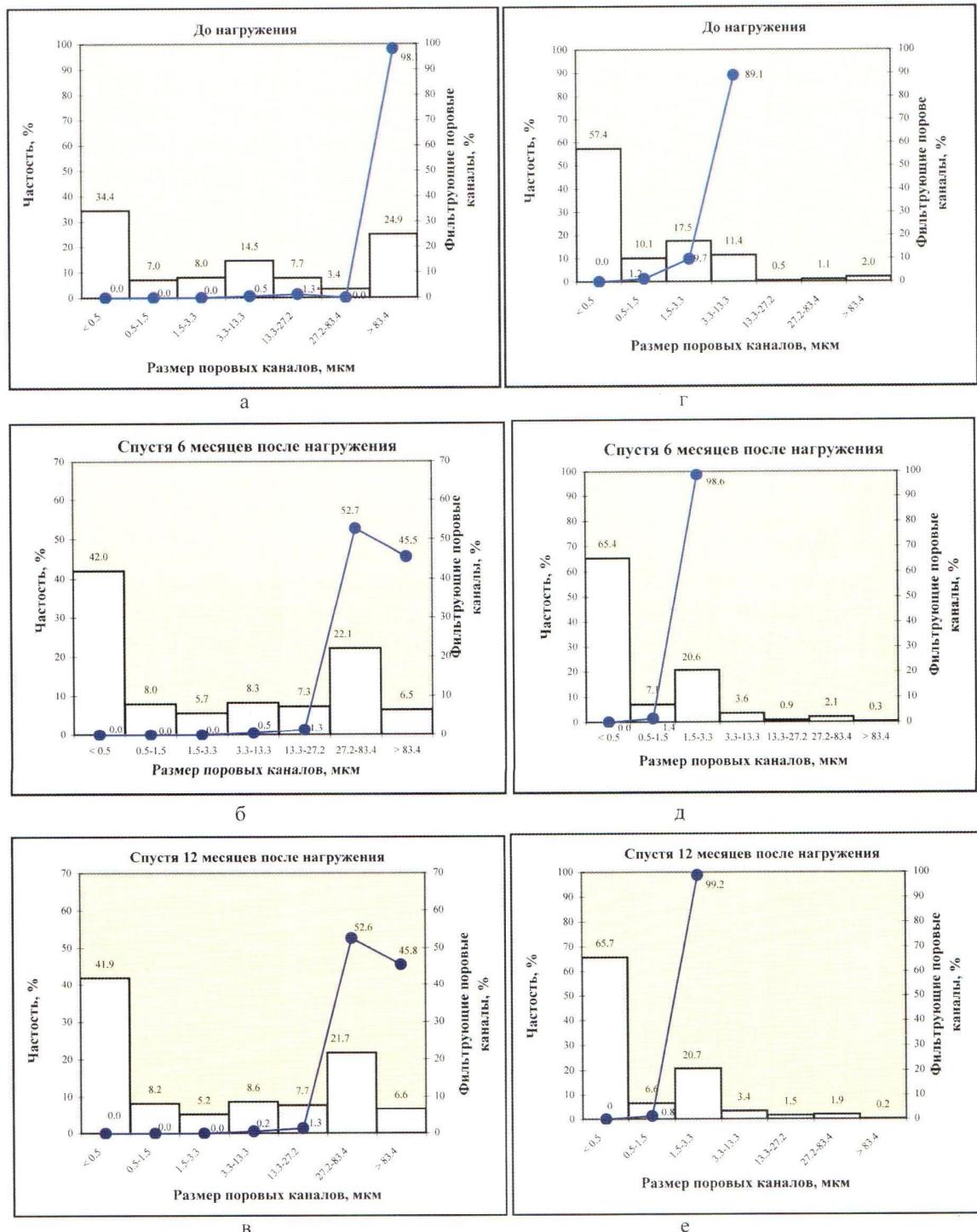


Рис. 6. Сопоставление структуры порового пространства и вкладов различных по размерам пор в фильтрацию образцов, до и после проведения исследований по определению ОФП и Квтм: (а–в) – обр. 157; (г–е) – обр. 65а

тия нагрузки в значительной степени постепенно восстановили исходную структуру порового пространства.

На рис. 4 и 5 приведены примеры обработки капиллярных кривых образцов, у которых произошло практически необратимое изменение структуры порового пространства вследствие их нагружения, причем необратимые изменения наблюдаются как в сравнительно высокопроницаемом образце, так и образце с низкими ФЕС.

Анализ сопоставления данных до и после определения **УЭСиКп<sub>пл</sub>** показал необходимость контроля структуры порового пространства образцов после проведения исследований, поскольку не всегда они восстанавливают прежние свойства после их нагружения.

Вторая группа (после определения **ОФПиКвыт.**) представлена 33 образцами, абсолютная проницаемость которых варьирует от 1,3 до 584,0 мД. Эти образцы были отобраны из пластов АВ<sub>1</sub><sup>3</sup>, БВ<sub>8</sub>, ЮВ<sub>1</sub>, ЮК<sub>2-4</sub> Лас-Еганского, Повховского и Ловинского месторождений.

Определения ФЕС и капиллярных характеристик образцов после **ОФПиКвыт.**, выполненные через 6 и 12 месяцев после их нагружения, показали почти полную их идентичность (рис. 6). То есть, восстановления структуры их порового пространства после проведения экспериментов не наблюдается даже в течение года.

Сравнивая ФЕС образцов после **ОФПиКвыт.**, полученные до и после экспериментов, можно отметить значительное увеличение их пористости и величины вододерживающей способности (см. рис. 1 а, в) и снижение проницаемости (см. рис. 1б). Изменение ФЕС образцов после проведения **ОФПиКвыт.**, как и в случае с первой группой образцов (после определения **УЭСиКп<sub>пл</sub>**), обусловлено уменьшением радиусов пор и соединяющих их поровых каналов (см. рис. 6).

Проведенные исследования позволили сделать вывод о полной непригодности повторного использования коллекции образцов керна после экспериментов по определению **ОФПиКвыт.** из-за значительного и необратимого изменения первоначальной структуры порового пространства горной породы и выборочном повторном применении образцов после исследований **УЭСиКп<sub>пл</sub>** в условиях, моделирующих пластовые.

### Обсуждение полученных результатов

Сравнивая условия проведения экспериментов по определению **УЭСиКп<sub>пл</sub>** и **ОФПиКвыт.**, следует отметить, что основные различия в их методиках связаны с тем, что первые проводятся без фильтрации жидкости через их поровое пространство, а вторые – с фильтрацией, и продолжительность вторых опытов во много раз длительнее, чем первых. Действительно, если эксперименты по определению **УЭСиКп<sub>пл</sub>** делятся в среднем 4–6 часов, то опыты, связанные с изучением **ОФПиКвыт.**, продолжаются в течение 5–10 суток в зависимости от проницаемости модели пласта.

Если предположить, что фильтрация флюида через поровое пространство образцов, входящих в составную модель пластов, приводит к вымыванию глинистого или иного цемента, находящегося в их поровом пространстве, то должно наблюдаться увеличение их пористости и уменьшение величины Квс с соответствующим ростом доли пор и каналов большего размера. Однако в действительности рост емкостного пространства образцов после экспериментов происходит за счет увеличения доли именно самых мелких пор и уменьшения (иногда довольно резкого) вклада самых крупных пор и соединяющих их каналов (см. рис. 2–6). Следовательно, процесс фильтрации флюидов вряд ли является причиной роста пористости образцов, сопровождаемой уменьшением размеров самих пор и соединяющих их каналов.

Разная длительность рассматриваемых групп экспериментов нам представляется более важной. Чтобы разобраться в существе рассматриваемой причины, напомним некоторые общие сведения из теории прочности горных пород [4].

При **макроскопическом** рассмотрении деформаций различают два их основных вида – обратимые (упругие) и остаточные (пластические).

В составе обратимой деформации можно выделить две ее составляющие, во-первых, деформацию, пропадающую условно-мгновенно (обозначаемую как  $\gamma_1$ ), и деформацию, исчезающую на протяжении некоторого времени (упругое последействие, обозначаемое как  $\gamma_{II}$ ).

При разгрузке образцов, спустя различное время после начала действия напряжений, можно наблюдать, как изменяются во времени величины  $\gamma_1$ ,  $\gamma_{II}$  (упругая деформация) и пластической деформации (обозначенной как  $\gamma_{III}$ ).

В любой момент времени действия напряжений общая деформация образца (обозначаемая как  $\gamma_i$ ) равна сумме перечисленных выше трех составляющих:

$$\gamma_i = \gamma_1 + \gamma_{II} + \gamma_{III}.$$

Величины  $\gamma_1$ ,  $\gamma_{II}$  и  $\gamma_{III}$  для любого момента времени непосредственно определяются по схеме кинетики деформации (называемой также кривой деформации горных пород), в которой обобщена серия кривых, отличающихся одна от другой лишь временем разгрузки образца (рис. 7). Отметим, что по мере увеличения продолжительности эксперимента, связанного с нагружением образца, доля пластической деформации постепенно увеличивается, и через некоторое время она становится главной составляющей в величине относительной деформации образца.

Исходя из этих данных, можно заключить, что эксперименты по определению **УЭСиКп<sub>III</sub>**, скорее всего, находятся в самом начале кривой деформации рассматриваемых образцов, поэтому они или почти полностью, или в значительной степени восстанавливают первоначальную структуру порового пространства после снятия всесторонней эффективной нагрузки. То есть, доля пластической деформации в величине общей деформации невелика из-за небольшой длительности этих опытов (см. рис. 7).

Напротив, эксперименты по определению **ОФПиКв<sub>III</sub>** делятся в среднем в 30–60 раз дольше, чем исследования **УЭСиКп<sub>III</sub>**, поэтому в величине их общей деформации доля пластической составляющей гораздо больше, и по этой причине они значительно хуже восстанавливают первоначальную структуру порового пространства из-за необратимых ее изменений.

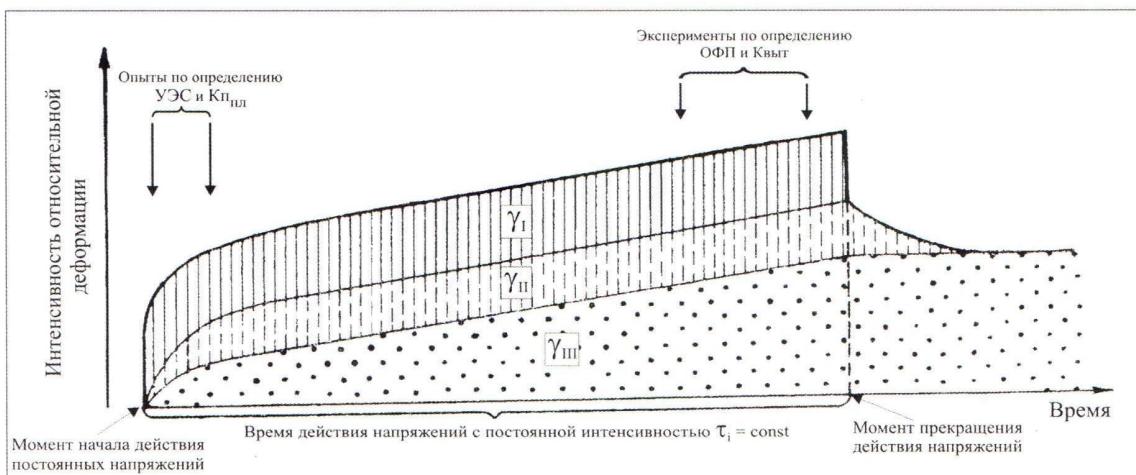


Рис. 7. Схема кинетики деформации горной породы по [4] с изменениями

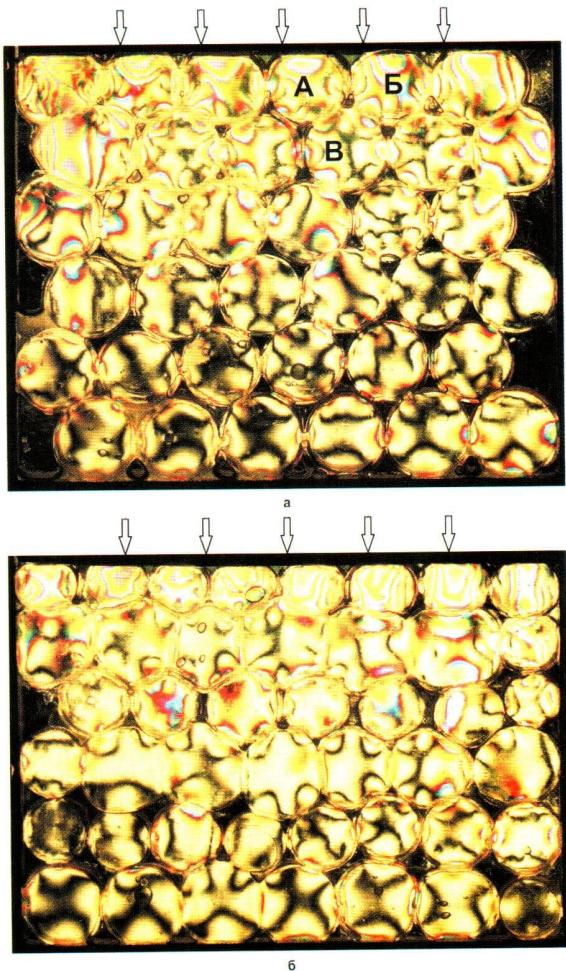


Рис. 8. Оптико-поляризационная модель нагружения образца, состоящего из крупных зерен желатина одного диаметра (а) и разного диаметра и твердости (б), соотношение размеров больших и малых зерен – 1,4:1 (стрелками показано направление нагрузки)

оптико-поляризационного моделирования напряжений в образцах, имитирующих однородные песчаники, сложенные зернами одного размера и твердости, и гетерогенные песчаники, состоящие из зерен различного размера и твердости, расположенных послойно (рис. 8а, б).

Поскольку методы оптико-поляризационного моделирования подробно описаны в известных публикациях [4–6], то мы не приводим подробной характеристики этого метода.

Анализ полученных результатов моделирования показал, что напряжения в моделях песчаника распределяются неравномерно как по ее высоте, так и в пределах отдельных зерен. Напомним, что в рассматриваемых моделях величина касательных напряжений пропорциональна порядку изохром, присутствующих в желатиновых зернах, которые по аналогии с понятиями, принятыми в петрографии, можно назвать уровнями интерференционной окраски. Чем выше уровень интерференционной окраски или порядок изохром в зерне или той или иной его части, тем больше величина касательных напряжений в этом месте.

Наиболее четко наблюдается закономерное ослабление величины напряжений (порядка изохром или уровня интерференционной окраски) в желатиновых зернах от

Понять механизм увеличения КП вследствие приложения к образцам эффективного давления нам поможет эксперимент, выполненный еще средневековыми учеными. Он заключается в том, что стеклянный шар, помещенный в плотно облегающую его металлическую оболочку, подвергался многократным сильным ударам по этой оболочке, в результате чего стеклянный шар постепенно дробился на обломки. В какой-то момент времени из-за превышения объема стеклянных осколков (вместе с образовавшимися трещинами) исходного объема монолитного стеклянного шара они разрывали металлическую оболочку. Этот эксперимент наглядно доказывает, что разрушающийся материал всегда имеет больший удельный объем, чем исходный монолитный из-за возникновения в нем дополнительной емкости, обусловленной появлением дислокаций и трещин различного размера и протяженности.

Рассмотрев возможные причины изменения структуры порового пространства образцов вследствие воздействия на них эффективного пластового давления на макроскопическом уровне с применением понятий кинетики деформаций горных пород, попробуем разобраться с ними и на микроскопическом уровне.

Для этого воспользуемся методом

внешней границы оптической модели песчаника, на которую приложена нагрузка, к ее нижней, наиболее удаленной от поверхности образца (см. рис. 8). Нижнюю часть рассматриваемых моделей можно условно принять за центральную часть цилиндрического образца, подвергаемого снаружи сжатию, которая наиболее удалена от его поверхности. Уменьшение величины напряжения по направлению от поверхности образца к его нижней части обусловлено существованием внутреннего трения или трения между слагающими его частицами, препятствующего распространению напряжения от поверхности образца к его центру (см. рис. 8).

В отличие от ньютоновской жидкости, в которой прилагаемое к ней напряжение практически мгновенно распространяется на весь ее объем (гидростатическое давление), в твердом теле (в нашем случае песчанике) для распространения напряжения на весь объем образца необходимо определенное время. Причем в зависимости от величины внутреннего трения оно может оказаться весьма значительным.

Таким образом, внешняя часть образца, подвергнутого сжатию, оказывается «переуплотненной», по сравнению с его центральной частью. Следовательно, наблюдаемые изменения структуры порового пространства образца после его испытаний в условиях, моделирующих пластовые, в первую очередь обусловлены изменениями, произошедшими с его приповерхностной частью. Этот вывод очень важен при интерпретации самых коротких по продолжительности опытов.

Отметим также, что участки или, вернее, зерна, в которых отмечаются повышенные уровни касательных (а значит и нормальных) напряжений наиболее (при прочих равных условиях) подвержены механическому разрушению.

Следующая особенность распределения напряжений в объеме желатиновой модели песчаника заключается в том, что напряжения передаются неравномерно от зерна к зерну, что ведет к возникновению «разуплотненных» или недонагруженных участков в объеме образца. Эти участки проявляются пониженными по сравнению с окружающими зернами уровнями касательных напряжений в желатиновых зернах (соответствующими пониженным интерференционным окраскам этих зерен). Такие участки выделяются в правой части рис. 8а (во втором, третьем и четвертом слоях, считая от низа модели). На рис. 8б они расположены более локально (в пределах отдельных зерен), например, первый (от низа) слой, крайнее правое зерно; во втором (от низа) слое 1, 2 и 4 зерна слева и так далее.

Формирование недоуплотненных зон в объеме модели песчаника объясняется двумя основными причинами. Во-первых, наличием в нем внутреннего трения на контактах различных по составу и свойствам зерен. Между одними зернами оно ниже, и напряжение быстрее передается от зерна к зерну, между другими оно выше, и здесь напряжения накапливаются. Во-вторых, плохой сортировкой песчаников. Более крупные зерна (представляющие собой своеобразный каркас) воспринимают основную нагрузку, а расположенные между ними (в крупных порах) более мелкие зерна, включая глинистые мельчайшие частицы, подвергаются сжатию гораздо меньше (см. рис. 8б). Эпигенетические глинистые частицы, образовавшиеся на поверхности обломочных зерен, вовсе не подвержены действию эффективного давления. На них действует лишь гидростатическое давление.

Более твердые зерна, которые в рассматриваемой модели песчаника представлены небольшими по размерам желатиновыми зернами, способны воспринимать гораздо большую по величине нагрузку, чем менее твердые. Это проявляется в более высокой интерференционной окраске этих зерен по сравнению с последними (см. рис. 8б). Полученные данные подтверждают тривиальный факт, что более твердые зерна, воспринимая внешнюю нагрузку, способны сначала деформировать, а затем и разрушать менее прочные обломочные зерна.

Действительно, мелкие твердые зерна желатина сохраняют свою первоначальную (круглую) форму, вдавливаясь и интенсивно деформируя более крупные мягкие зерна, имеющие более низкие величины касательных напряжений. При этом первоначальная межзерновая пористость, существовавшая между крупными зернами, почти полностью исчезла, а между мелкими (более твердыми) сохранилась гораздо лучше (см. рис. 8б).

Анализируя характер распределения касательных напряжений в отдельных зернах желатина в рассматриваемых оптико-поляризационных моделях, следует отметить, что максимальные значения касательных напряжений (судя по уровням изохроматических полос) фиксируются на контактах соприкасающихся между собой зерен. В участках, прилегающих к порам и по направлению к центральной части зерен, величина напряжения быстро уменьшается. При этом по ориентировке изоклинов можно восстановить направления нормальных, а на основе полученных данных и ориентировку максимальных касательных напряжений в объеме каждого желатинового зерна (см. рис. 8).

Чтобы детально изучить механизм образования дислокаций и микротрещин в отдельных зернах, входящих в состав песчаника, на основе его желатиновой модели, рассмотрим увеличенный фрагмент правой верхней части модели (зерна А, Б, В) (рис. 8а). Поскольку рассматриваемые зерна имеют одинаковую твердость, то распределения интерференционных окрасок и направлений изоклинов (черные полосы в желатиновых зернах) объясняются лишь закономерностями распределения и уровнями напряжений, возникших в них под действием приложенной нагрузки (рис. 8а).

Максимальные уровни касательных напряжений (достигающие 2 и 3 порядков) отмечаются в самых верхних зернах А и Б, к которым непосредственно приложена нагрузка (рис. 9). Напряжения на контактах с соседними зернами, расположенными рядом с ними в том же ряду, гораздо ниже и в лучшем случае достигают лишь 1 порядка. На контактах зерен А и Б с зерном из подстилающего слоя (зерно В) уровни касательных напряжений выше, чем в соседних с ними зернах, и почти достигают 2 порядка.

Чем выше уровень напряжений, тем большая вероятность разрушения зерен в этом месте (при прочих равных условиях). Поэтому, используя полученные на модели уровни касательных напряжений, формирующиеся в желатиновых зернах под действием нагрузки, легко спрогнозировать наиболее вероятные участки возникновения дислокаций и микротрещин в зернах (см. рис. 9). Используя данные об ориентировке нормальных напряжений (полученных на основе изучения расположения изоклинов), несложно показать и направление прогнозируемых дислокаций и микротрещин отрыва. Из полученных результатов обработки модели можно заключить, что трещины отрыва имеют субвертикальную ориентировку к плоскости контакта соприкасающихся зерен. В пространстве между контактами зерен трещины отрыва в теле зерен наклоняются в сторону соседних с ними зерен, а в пространстве между ними приобретают

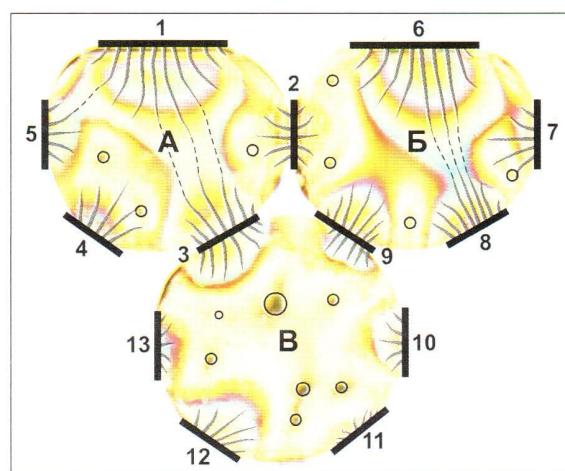


Рис. 9. Увеличенный фрагмент верхней правой части рисунка 8а, на котором намечены наиболее вероятные траектории распространения трещин отрыва под действием приложенных напряжений (кружки разного диаметра – изотропные точки, черные отрезки с цифрами – места контактов с соседними зернами и их номер)

субвертикальную ориентировку к плоскости контакта соприкасающихся зерен. В пространстве между контактами зерен трещины отрыва в теле зерен наклоняются в сторону соседних с ними зерен, а в пространстве между ними приобретают

субгоризонтальную ориентировку. Здесь, однако, следует сделать замечание о том, что в теле зерен, расположенных между контактами с другими зернами, уровни касательных напряжений очень низкие, поэтому вероятность образования трещин отрыва субгоризонтальной ориентировки очень мала, хотя и не равна нулю. Наиболее вероятно формирование субгоризонтальных трещин отрыва в минеральных зернах, обладающих спайностью и отдельностью в определенных направлениях, при совпадении с которыми даже небольшие по величине напряжения могут привести к разрушению обломочных зерен по плоскостям спайности и отдельности.

Обратим внимание на особые точки в теле зерен, получивших название изотропных [4–6]. Эти точки находятся в тех местах зерен, где касательные напряжения равны нулю, а нормальные равны во всех направлениях. Иными словами, эти точки расположены в местах равностороннего сжатия зерен, поэтому в этих участках зерен образование дислокаций и микротрещин невозможно (см. рис. 9). Обычно эти точки расположены в теле зерен между контактами с соседними зернами, на некотором удалении от этих контактов. Поскольку их должно быть по одной между контактами зерен, то по числу контактирующих зерен их обычно должно быть пять или шесть в каждом из зерен. Однако, на самом деле, их может быть как больше, так и меньше пяти или шести. Например, в зерне А надежно установлены лишь три такие точки, между 2 и 3 и 4, а также 4 и 5 контактами (см. рис. 9). Между 1 и 2, а также 1 и 5 контактами такие точки не установлены. Можно допустить, что они оказались на самом краю зерна между этими контактами.

В зерне Б отчетливо выделяется четыре изотропные точки, а пятая, вероятно, находится на самом краю зерна между 6 и 7 контактами. Напротив, в зерне В выделяется по крайней мере семь изотропных точек, причем «лишняя» седьмая точка расположена на почти непосредственно над 11 контактом, нарушая отмеченную выше закономерность. На самом деле, седьмая изотропная точка является результатом взаимодействия более напряженных, чем 11 контакт, 10 и 12 контактов, возмущения от которых достигли и уравняли друг друга в седьмой («лишней») точке, расположенной над и между обычными изотропными точками, сформировавшимися между 10 и 11, а также между

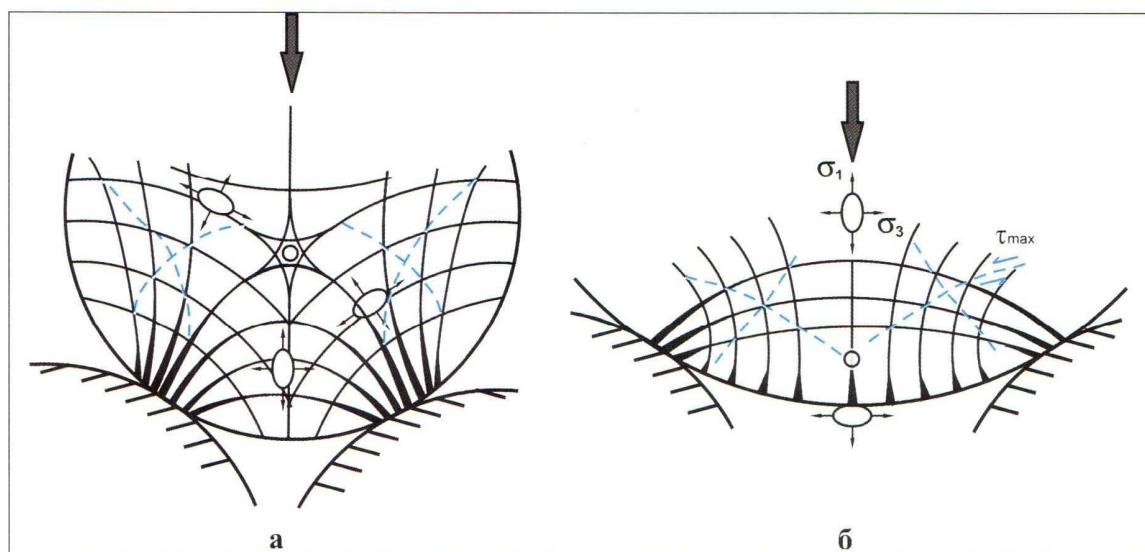


Рис. 10. Траектории нормальных ( $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , обозначенных сплошными линиями) и касательных ( $\tau_{max}$ , обозначенных пунктирными линиями) напряжений, а также места расположения и направления трещин отрыва (утолщения на траекториях нормальных напряжений): а – изотропная точка расположена на некотором удалении от kontaktов зерен; б – изотропная точка приближена к краю верхнего зерна и расположена между kontaktами зерен (стрелками указаны направления прилагаемой нагрузки)

11 и 12 контактами. Появление большого количества изотропных точек в теле зерна сопровождается понижением концентрации напряжений в нем и, соответственно, вероятность его разрушения уменьшается. Образование дислокаций и микротрешин в таких зернах (как зерно В) возможно лишь в небольшой по объему зоне, прилегающей к приконтактной части с другими окружающими его зернами (см. рис. 9).

Рассмотрим подробно приконтактную часть одного из зерен с соседними двумя для двух рассмотренных выше вариантов, а именно, когда изотропная точка расположена в теле зерна между контактами с двумя соседними зернами на некотором удалении от них и на краю зерна (рис. 10 а, б).

В **первом** из предложенных вариантов изотропная точка расположена в теле зерна на некотором удалении от его контактов с соседними зернами. Характерно, что при переходе через изотропную точку эллипсоид деформаций поворачивается на  $90^\circ$  и, соответственно, ориентировка прогнозируемых трещин отрыва также поворачивается на  $90^\circ$ . На рис. 10а хорошо видно, что, как и отмечалось выше, в зоне непосредственно контакта трещины отрыва ориентированы перпендикулярно к плоскости контакта, а между контактами зерен (над порой) они имеют субгоризонтальную ориентировку, соединяя между собой границы контактов зерен.

Во **втором** варианте, когда изотропная точка оказывается на самом краю зерна между его контактами с соседними зернами, под ней возможно формирование трещин отрыва, ориентированных перпендикулярно к поверхности этого зерна, а над изотропной точкой они приобретают «нормальную» субгоризонтальную ориентировку (см. рис. 10 б). При переходе через изотропную точку эллипсоид деформации, как и положено, поворачивается на  $90^\circ$ . В рассматриваемом случае вполне возможно отделение отковавшихся микробломков от зерна по взаимно перпендикулярной системе микротрешин в зонах максимальных напряжений, приуроченных к их приконтактным частям.

Если рассматриваемые зерна обладают пластичностью (глинистые обломки, аргиллизиты, обломки слюд и хлоритов и т. п.) или характеризуются наличием в них спайности или отдельности (слюды, хлориты, полевые шпаты, карбонаты, обломки пород, состоящие из различных минералов и т. п.), то наряду с трещинами отрыва в них могут развиваться и сколово-сдвиговые дислокации (рис. 10).

Необходимо обратить внимание на существенные отличия трещин отрыва и сколово-сдвиговых дислокаций. Эти отличия заключаются в том, что трещины отрыва, если они не вышли за пределы зерна (то есть не привели к его разрушению), способны после снятия нагрузки частично или почти полностью «схлопываться» за счет диффузационного заращивания. Сколово-сдвиговые дислокации, напротив, практически необратимы, так как вдоль возникшей дислокации произошло перемещение атомов, и они обрели «других» соседей. Кроме того, вдоль поверхности смещения образуется большое количество дислокаций, препятствующих смыканию противоположных сторон трещины.

Разрушение любых зерен независимо от их состава происходит с образования в них трещин отрыва, поскольку породы характеризуются минимальной прочностью на отрыв. Для образования сколово-сдвиговой дислокации необходима большая по величине нагрузка. Поэтому первоначально происходит формирование трещин отрыва, которые по прошествии некоторого времени могут перейти в сколово-сдвиговую дислокацию, если разрушаемые минеральные зерна обладают достаточной пластичностью (обломки глинистых минералов и/или аргиллизированные обломки) или траектории сколово-сдвиговых дислокаций оказались близки по ориентировке к направлениям спайности или отдельности в обломочных зернах тех или иных минералов.

Необходимо также обратить внимание на свойства флюида, заполняющего поры между обломочными зернами. Если поровый флюид смачивает поверхность зерен, то они разрушаются гораздо легче под действием напряжений (эффект Ребиндера), чем при его отсутствии (при прочих равных условиях). Так как терригенные обломки, слагающие продуктивные отложения западносибирских месторождений, представлены почти исключительно силикатами и алюмосиликатами, хорошо смачиваемыми водой, то их разрушение под действием напряжений в ее присутствии значительно ускоряется и облегчается. Проверить этот тезис легко с помощью простейшего опыта, который заключается в сравнении процесса разрезания стекла (например, оконного) ножницами в воздухе и погрузив его на небольшую глубину в воду. Если в первом случае разрезать его вряд ли удастся, то во втором – оно будет сравнительно легко резаться самыми обычными ножницами.

Поэтому после определения пористости в условиях, моделирующих пластовые, с использованием газа или керосина в качестве флюидов, заполняющих поры, образцы окажутся менее подверженными разрушению (пластической деформации), чем при использовании воды, а потому легче (быстрее) и в большей степени восстановят исходную структуру порового пространства.

Таким образом, при сжатии песчаника под действием внешней нагрузки зерна сближаются в местах контактов, что приводит к уменьшению радиусов соединяющих их каналов. В местах соприкосновения зерен друг с другом возникают напряжения, под действием которых в зернах в этих участках создаются условия, необходимые для формирования сначала дислокаций, а затем и микротрещин отрыва. Чем продолжительнее эксперимент, тем на большее расстояние от места контакта зерен успевают «вырасти» трещины. При определенных условиях трещины, имеющие взаимно перпендикулярную ориентировку, могут соединяться друг с другом, что может вызвать дробление зерен в этих участках на микроскопические блоки.

Появление в обломочных зернах дислокаций и микротрещин ведет к увеличению общей пористости песчаника и уменьшению объемной плотности этих зерен, а значит к некоторому увеличению объема песчаника после снятия нагрузки. Действительно, радиус зерен за счет появления в них (главным образом на их периферии в местах соприкосновения с соседними зернами) дислокаций и микротрещин, как это ни парадоксально, должен увеличиться. Поскольку дислокации и трещинки, возникающие под действием нагрузки на контактах зерен, имеют микроскопические размеры, то по данным капиллярометрии они попадают в класс пор, имеющих самый маленький диаметр, в которых содержится связанная или остаточная вода. Поэтому после экспериментов с моделированием условий, близких к пластовым, содержание связанной воды и общая пористость образцов увеличиваются.

Если в местах контактов зерен происходит их частичное разрушение, приводящее к уменьшению радиусов каналов, связывающих поры, то после снятия нагрузки они уже не восстанавливают свои первоначальные размеры по прошествии сколь угодно большого времени (этот феномен воспринимается как пластическая деформация пород).

В тех случаях, когда после снятия нагрузки, под действием межатомных сил и процессов диффузии атомов, образовавшиеся в зернах дислокации и микротрещины залечиваются, происходит частичное или почти полное восстановление структуры их порового пространства (этот феномен воспринимается как упругая деформация, включая упругое последействие).

Следует обратить внимание на то, что в наших экспериментах наблюдалось снижение величины напряжений по направлению от поверхности образца к его центральной части вследствие внутреннего трения, препятствующего быстрому выравниванию

уровней напряжений по всему его объему. По этой причине при моделировании пластовых условий наибольшему «перенапряжению» и, соответственно, разрушению подвергаются зерна, слагающие приповерхностную его часть. В природе литостатическое и эффективное давления росли постепенно на протяжении десятков миллионов лет, поэтому такого резкого градиента в распределении напряжений по длине образца, мысленно «вырезанного» в теле осадочной толщи, конечно не наблюдается. В природных условиях в осадках на одной и той же глубине уровень напряжений одинаков, если, конечно, в рассматриваемом участке не происходили новейшие тектонические движения, которые, безусловно, нарушили существовавшее до этого равновесное распределение напряжений.

Обратим внимание еще раз на тот факт, что в природных обломках, входящих в состав песчаников, всегда имеются дефекты в виде дислокаций, микротрещин и т. п., которые при нагрузке начинают увеличиваться в размерах («разрастаться»). Поэтому, при прочих равных условиях, чем более дефектны обломочные зерна, входящие в состав песчаников, тем большие необратимые изменения произойдут со структурой их порового пространства приложении к ним эффективного давления и с тем меньшей вероятностью они смогут восстановить исходную структуру своего порового пространства.

Глинистые минералы, присутствующие в песчаниках в форме цемента, а не в виде обломков (то есть имеющие эпигенетическое происхождение), будут подвергаться действию эффективного давления лишь вокруг контактов обломочных зерен. Поскольку отдельные их кристаллы слабо связаны друг с другом, а, кроме того, для них характерна спайность вдоль базальных плоскостей, то они легко деформируются, отслаиваются друг от друга, вследствие чего возникает дополнительная микроскопическая пористость. Но в отличие от вторичной пористости, возникающей за счет образования дислокаций и микротрещин под действием нагрузки, в собственно обломочных зернах, вторичная пористость в глинах (из приконтактной области) формируется за счет «уменьшения» объема самих пор, так как деформируемые и частично разрушающие глинистые агрегаты «выдавливаются» из приконтактной части в глубину пор. Поэтому дополнительного увеличения пористости образцов в этом случае не происходит.

Отмеченная выше (при анализе результатов исследований образцов после снятия с них напряжений) закономерность, заключающаяся в том, что, чем хуже ФЕС образцов, тем в большей степени уменьшается их Кпр и, напротив, увеличивается Кво, находит вполне логичное объяснение в свете полученных на основе оптико-поларизационного моделирования данных. Поскольку плохие коллекторы с низкими ФЕС – это тонкозернистые (сильно алевритистые), глинистые мелкозернистые песчаники и алевролиты, то в таких породах в том же объеме, что и в более крупнозернистых песчаниках, содержится больше обломочных зерен, а следовательно, и количество контактов между зернами гораздо больше. Поэтому на контактах мелких зерен (при прочих равных условиях) в фиксированном объеме породы возникнет больше дислокаций и микротрещин, чем на контактах более крупных зерен в таком же по величине объеме породы. То есть, удельная микротрещиноватость в тонкозернистых породах на контактах обломочных зерен будет заметно выше, чем в более грубозернистых. Кроме того, в одинаковых условиях и в одинаковых по составу зернах, но имеющих разный размер, дислокации и микротрешины за одно и то же время быстрее достигнут противоположного края мелкого зерна, чем крупного, вследствие чего произойдет его необратимое разрушение. Поэтому при одинаковом времени нахождения мелкозернистых и крупнозернистых песчаников под нагрузкой в первых больше разовьются необратимые (пластические) деформации, чем в последних.

## **Выводы**

1. После использования образцов песчаников в экспериментах с моделированием пластовых условий структура их порового пространства изменяется, причем часть из них после экспериментов в большей или меньшей степени восстанавливает первоначальную структуру порового пространства, а другая – претерпевает необратимые изменения.

2. После сравнительно кратковременных экспериментов (определение **УЭСиК<sub>пл.</sub>**) образцы в основном восстанавливают свою первоначальную структуру порового пространства, чем после длительных (определение **ОФПиК<sub>выт.</sub>**), после которых происходит необратимое изменение структуры их порового пространства.

3. Для повторного использования в опытах с моделированием пластовых условий можно брать образцы лишь после сравнительно кратковременных экспериментов по определению **УЭСиК<sub>пл.</sub>**, причем предварительно необходимо убедиться, что структура их порового пространства после проведения первого эксперимента восстановилась.

4. Уменьшение проницаемости образцов и наоборот увеличение их пористости и остаточной водонасыщенности после проведения экспериментов с моделированием пластовых условий объясняется уменьшением размеров поровых каналов, соединяющих поры между собой, а также образованием в обломочных зернах в местах их контактов под действием приложенной нагрузки дислокаций и микротрешин.

5. Если образовавшиеся под действием нагрузки на контактах зерен дислокации и микротресцины вызывают частичное разрушение зерен в этих участках, то после снятия нагрузки восстановления исходной структуры их порового пространства не происходит.

6. Наличие в поровом пространстве смачивающего флюида (например, поровой воды) должно значительно ускорять процессы необратимого изменения структуры порового пространства песчаника под действием нагрузки за счет облегчения развития в них микротрешин и дислокаций в местах контактов зерен (эффект Ребиндера).

7. Напротив, если поровое пространство песчаника заполнено несмачивающей жидкостью или газом, то после проведения экспериментов в условиях, моделирующих пластовые, вероятность сохранения и восстановления исходной структуры порового пространства значительно выше.

8. Из-за наличия внутреннего трения (между обломочными зернами) в песчанике при приложении к его поверхности нагрузки напряжение распределяется в нем неравномерно: максимальная ее величина наблюдается в приповерхностной его части, поэтому можно ожидать, что наиболее значительные (в том числе и необратимые) изменения структуры его порового пространства происходят именно в этой его части.

9. При прочих равных условиях (включая идентичность минерального состава обломочных зерен) мелкозернистые песчаники (и тем более алевролиты) вследствие приложения одинаковых по времени и величине нагрузок будут претерпевать более интенсивные (в том числе необратимые) изменения структуры порового пространства, чем крупнозернистые.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением.
2. ГОСТ 26450.2-85 Породы горные. Метод определения коллекторских свойств.
3. СТП 50-32-02 Породы горные. Метод определения водоудерживающей способности. – НПЦ «Тюменьгеофизика». – Тюмень. – 2002.
4. Белоусов В.В., Гзовский М.В. Экспериментальная тектоника.– М.: Недра.– 1964.– 120 с.
5. Фрохт М. Фотоупругость. I и II. ОГИЗ.– 1948–1950.
6. Хаимова-Малькова Р.И. Методика исследований напряжений поляризационно-оптическим методом.– М.: Наука.– 1970.– 150 с.