

УДК 539.42

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫВАЛОВ НА СТЕНКАХ СКВАЖИН

© 2022 г. Ю. Ф. Коваленко<sup>а,\*</sup>, К. Б. Устинов<sup>а</sup>, В. И. Карев<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

\*e-mail: perfolinkgeo@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.06.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 22.06.2022 г.

Проведено физическое моделирование образования вывалов в скважину на образцах горных пород с отверстиями, просверленными перпендикулярно плоскости залегания. Моделирование продемонстрировало появление ярко выраженных ориентированных вывалов при равномерных боковых напряжениях. Для объяснения наблюдаемых явлений предлагаются некоторые гипотезы. Согласно первой гипотезе, предполагается, что причина кроется в комбинированном влиянии анизотропии прочности и анизотропии упругости определенного типа, определяемой параметром, отличным от отношения модулей упругости вдоль и по нормали к слоистости. Согласно второй гипотезе, причиной может быть подавление роста вторичных вывалов после инициации первичного вывала. Согласно третьей гипотезе, причина может быть связана исключительно с анизотропией прочности определенного типа. Результаты представляются полезными при проектировании и разработке углеводородных месторождений и подземных хранилищ газа и при интерпретировании данных скважинных исследований для определения напряженного состояния в Земной коре.

*Ключевые слова:* измерения напряжений в массиве пород, вывалы в скважинах, интерпретация данных исследования скважин, анизотропия прочности, упругая анизотропия

DOI: 10.31857/S0572329922060125

**1. Введение.** Оценка состояния призабойной зоны пласта при эксплуатации месторождений углеводородов и, особенно, подземных хранилищ газа (ПХГ) и выявление причин выноса песка в скважину (пескопроявления) при дренировании слабоустойчивых пород является важнейшей задачей научных и практических исследований, направленных на создание новых технологий.

Несмотря на многолетний опыт эксплуатации пескопроявляющих скважин до настоящего времени отсутствует достаточно обоснованная модель разрушения коллектора и математическое описание процессов, протекающих в системе пласт–скважина [1–5].

В литературе за основную причину интенсивного выноса песка в скважину принимают разрушение призабойной зоны пласта, связанного с возникновением напряжений в породе, превышающих ее предел прочности. В результате происходит нарушение целостности горных пород в призабойной части пласта, приводящее к образованию вывалов пород на стенках скважин и кавернообразованию. Именно с образованием вывалов породы на стенках скважин, пробуренных в слабосцементированных песчаниках, связан интенсивный вынос песка в скважину. Поэтому, чтобы минимизировать

риск пескопроявлений и их интенсивность, необходимо разобраться в механизме появления вывалов в скважинах и понять, какие условия залегания и деформационно-прочностные свойства горных пород оказывают основное влияние на их возникновение.

Измерения вывалов скважин считаются надежным инструментом для определения начальных напряжений в пласте на глубине (в частности, комбинаций величин главных напряжений в плоскости, перпендикулярной оси скважины, и их азимутов), например, [6–8], (и цитируемой там литературы). Это явно подразумевает, что неравномерность напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной оси скважины, является основным и практически чуть ли не единственным источником вывалов, наблюдаемых в скважинах. В монографии М. Зобак [6] рассмотрел влияние на инициирование вывалов других факторов, таких как анизотропия прочности и структура, рассмотрел несколько случаев из практики и подчеркнул, что анизотропия прочности горных пород (в основном вызванная наличием слоистой структуры) часто затрудняет интерпретацию измерений восстановления деформаций. Однако чаще всего такие факторы, в лучшем случае, только упоминаются. В то же время объяснение наблюдаемых вывалов в скважинах исключительно неравномерностью напряжений в настоящее время стало основной парадигмой для интерпретации геофизического исследования скважин.

При отсутствии анизотропии действующих напряжений ожидается, что из-за изотропии прочностных и упругих свойств вывалы будут происходить по контуру скважины по окружности вследствие осевой симметрии; предполагается, что такая картина возникает в вертикальных скважинах, пробуренных в массивах с горизонтальным напластованием, находящихся под действием равных горизонтальных напряжений [6, 7]. Обычно речь идет о вертикальности скважины и равенстве горизонтальных напряжений, хотя более точной формулировкой является перпендикулярность скважины к напластованию и равенство напряжений в плоскости напластования, хотя это всего лишь вопрос ригоризма.

Нарушение равенства горизонтальных напряжений приводит к возникновению вывалов в точках на контуре скважины и дальнейшему их распространению вдоль ее диаметра по направлению минимального горизонтального напряжения (перпендикулярно максимальному напряжению) вследствие концентрации сжимающих напряжений в этих точках [9]. Обычно различают три характерные формы вывалов по контурам вертикальных скважин [7]:

- чешуйчатые отслоения, проявляющиеся в виде систем криволинейных трещин, распространяющихся приблизительно параллельно контуру скважины в зонах, прилегающих к стволу скважины в направлении минимального напряжения; наблюдаются в низкопористых твердых породах, таких как базальт или гранит;
- в песчаниках наблюдаются вывалы в виде “собачьих ушей”, то есть вывалы в виде широких зон;
- “червоточины”, то есть вывалы в виде узких разрезов; наблюдаются в высокопористых породах.

Во всех трех вышеперечисленных случаях вывалы могут быть отнесены к однолопастным, в отличие от двухлопастных вывалов [6], характерных для скважин, ориентированных параллельно напластованию в слоистых породах. Двухлопастные вывалы образуются из-за анизотропии прочности, вызванной ослаблением вдоль плоскостей напластования [6, 10, 11]. Термины одно- и двухлопастные вывалы были введены, по видимому, Зобаком [6], при этом количество “лопастей”-вывалов относится к половине контура скважины.

Среди исследований, в которых рассматривалось влияние структуры и анизотропии на формы вывалов, следует отметить работу Кайзера и др. [12]. Работа посвящена исследованию разрушения вблизи круглого отверстия в угле. В образце с отверстием

вдоль слоистости, нагружаемом почти равными напряжениями (разница напряжений была в пределах 8%), прикладываемыми в плоскости, перпендикулярной оси отверстия, и в условиях плоской деформации сохраняемых вдоль оси отверстия, авторы наблюдали вывалы в направлениях, перпендикулярных слоистости. Отметим, что уголь обладает четко выраженной слоистой структурой с системой трещин, параллельной слоистости, и, как следствие, выраженной упругой и прочностной анизотропией. В [13] Бэбкок предложил интерпретировать данные исследования скважин, рассматривая естественные трещины как источник вывалов, но позже эти идеи были подвергнуты критике, и в качестве объяснения было выдвинуто влияние разницы напряжений [14].

Настоящее исследование посвящено прямому физическому моделированию вывалов скважин для пород-коллекторов (песчаники и известняки) из четырех нефтяных и газоконденсатных месторождений. Моделирование проводилось на образцах с отверстиями, выполненными как перпендикулярно, так и параллельно плоскости залегания (один образец). Слоистая структура всех изученных пород была слабо выражена, а упругая анизотропия (как статическая, так и измеренная с помощью акустических волн) по общепринятому параметру (отношение модулей Юнга вдоль и по нормали к плоскости залегания) либо отсутствовала, либо была слабо выраженной. Однако все рассматриваемые породы проявляли анизотропию прочности. В нескольких опытах при равнокомпонентном боковом нагружении наблюдались ярко выраженные ориентированные вывалы однолопастной формы, обычно приписываемые неравнокомпонентному нагружению, а не двухлопастной формы, характерной для пород, обладающих анизотропией прочности [6]. Такое поведение представляется достаточно удивительным, хотя для его объяснения можно выдвинуть несколько гипотез. Наблюдаемые формы вывалов могут быть вызваны: комбинированным влиянием прочности и упругой анизотропии горных пород (i); подавлением образования всех четырех зон за счет снижения концентрации напряжений в потенциально опасных точках после появления первых двух зон (ii); анизотропией прочности определенного типа (iii).

Цель статьи – привлечь внимание исследователей и инженеров к тому факту, что анизотропия напряжений не обязательно является основной или единственной причиной наблюдаемых вывалов в скважинах, особенно в не слишком прочных породах, таких как песчаники, часто образующих коллектора месторождений углеводородов.

**2. Эксперименты: приборы, материалы, измерения.** Эксперименты проводились на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН), созданной в Институте проблем механики Российской академии наук и предназначенной для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород [15, 16] в условиях истинно трехосного нагружения. Образцы представляли собой кубики с ребром 40 мм. Конструкция узла нагружения, благодаря примененной кинематике с перекрывающимися нажимными плитами, установленными на прецизионных роликовых подшипниках, позволяет прикладывать напряжения по всей поверхности граней образцов. Для уменьшения трения между гранями образца и нагружающими нажимными плитами вставлялись тонкие фторопластовые прокладки. В прокладках, закрывающих грани с отверстиями, были вырезаны центральные отверстия диаметром 10 мм.

Для моделирования вывалов использовалась модифицированная схема “полого цилиндра”. С этой целью для испытаний были специально изготовлены наконечники противоположных нажимных плит с центральными каналами для входа и выхода воздуха (рис. 1).

Испытания проводились на кубических образцах  $40 \times 40 \times 40$  мм с центральными отверстиями диаметром 10 мм. Во время экспериментов поток воздуха с избыточным давлением 0.01–0.02 МПа подавался в отверстие в образце через коаксиальный канал диаметром 9 мм в нагружающей плите и выводился через аналогичный канал в проти-

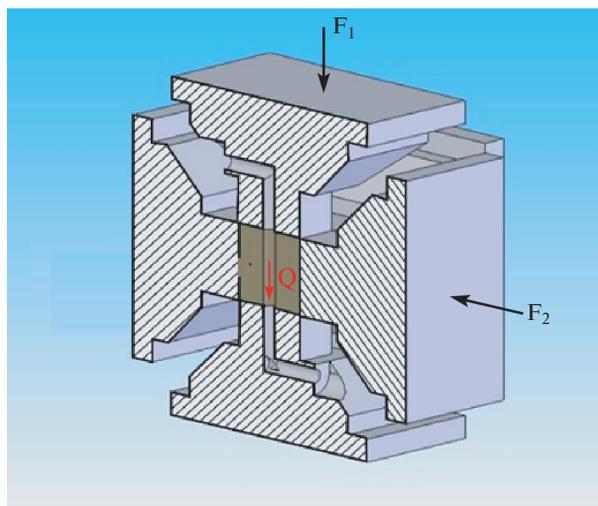


Рис. 1. Схема нагружающего узла для испытаний по схеме “полый цилиндр”.

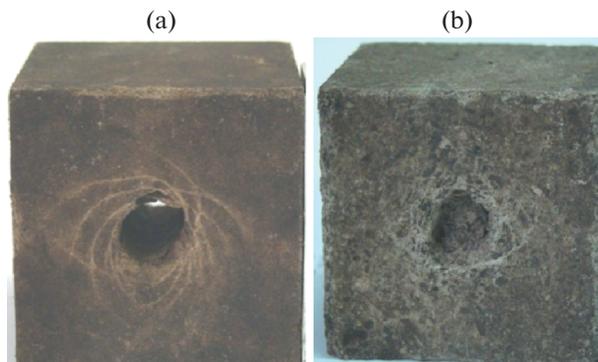
воположной нагружающей плите на электронные весы для взвешивания вынесенного песка.

Образцы были изготовлены из кернового материала, извлеченного из коллекторов четырех нефтегазовых и газоконденсатных месторождений шельфов Арктики, Каспийского моря и Сахалина. Образцы были вырезаны параллельно оси керна с использованием камнерезных и шлифовальных станков с высокой точностью, непараллельность граней составляла не более 20 мкм. Образцы помечались так, чтобы ось 1 совпала с осью керна, оси 2 и 3 были выбраны произвольно.

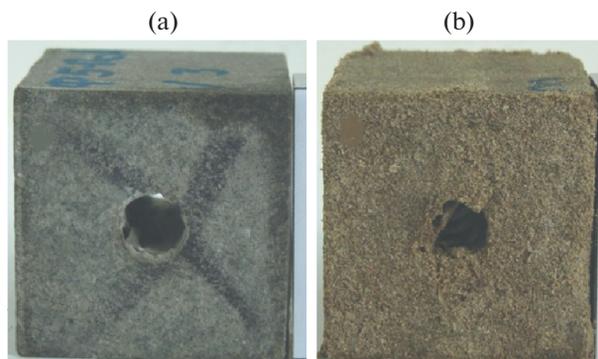
Образцы нагружались равными напряжениями, приложенными по каждой из осей, в режиме управления по нагрузке с постоянной скоростью 31.25 КПа/с. Разгрузка всех образцов осуществлялась равномерно по всем осям (во избежание возникновения касательных напряжений, способных изменить конфигурацию вывалов). Перед испытанием в каждом образце были измерены скорости продольных упругих волн в трех направлениях. В общей сложности было испытано 30 образцов.

**3. Экспериментальные результаты.** Серия опытов была проведена на 9 образцах кернового материала (известняка из нижнепермских отложений) из коллектора нефтяного месторождения Приразломное, расположенного на арктическом шельфе [17]. Все образцы были вырезаны соосно оси керна, с отверстиями также соосными оси керна. Материал вел себя как изотропный, видимых трещин не наблюдалось. На рис. 2 представлены фотографии двух типичных образцов с отверстиями и вывалами. Во всех случаях трещины вокруг отверстий формировались практически осесимметрично.

Серия испытаний из 3 образцов была проведена на образцах породы из коллектора нефтегазоконденсатного месторождения им. В. Филановского, расположенного на шельфе Каспийского моря. Образцы были вырезаны соосно оси керна, отверстие также было соосно оси керна. Образцы (песчаники неокамского подъяруса) не проявляли упругой анизотропии, хотя продемонстрировали меньшую прочность на сжатие перпендикулярно оси керна по сравнению с прочностью на сжатие при нагружении вдоль оси керна. В плоскости, перпендикулярной оси керна, образцы не проявляли анизотропии прочности [16]; ни слоистой структуры, ни начальной трещиноватости не наблюдалось. Фотографии двух образцов с отверстиями и вывалами представлены на рис. 3,а,в. Появление выраженных трещин наблюдалось в образцах на рис. 3,б, в то



**Рис. 2.** Отверстия с вывалами после испытания образцов из коллектора Приразломного нефтяного месторождения.



**Рис. 3.** Отверстия с вывалами после испытания образцов из нефтегазоконденсатного месторождения им. В. Филановского.

время как в образце, представленном на рис. 3,а, наблюдалось появление очень небольшого количества трещин вдоль окружности.

Серия испытаний была проведена на образцах из коллектора Штокмановского газоконденсатного месторождения, расположенного на шельфе Арктики [18] (13 образцов из юрско-меловых отложений были вырезаны соосно оси керна, отверстия также были соосны оси керна). Различие скоростей продольных акустических волн в перпендикулярных направлениях не превышало 8% для всех образцов. Видимой слоистой структуры не наблюдалось (рис. 4). Фотографии трех образцов с отверстиями и типичными картинками вывалов представлены на рис. 4,а–с.

В большинстве опытов (кроме двух из тринадцати, в которых вывалы были небольшими и имели форму, близкую к осесимметричной) вывалы имели выраженную удлиненную форму. Типы вывалов (чешуйчатое отслоение, “собачье ухо” или “червоточина” [7]) не всегда четко различались, за исключением случаев, подобных (с), имеющих вид гипертрофированных “червоточин”. В последнем случае наблюдаемая форма, возможно, вызвана некоей вторичной причиной, например, “вымыванием” частиц потоком воздуха. Необходимо подчеркнуть, что во всей серии экспериментов отверстия были сделаны вдоль оси керна, перпендикулярно плоскости залегания, т.е. пер-

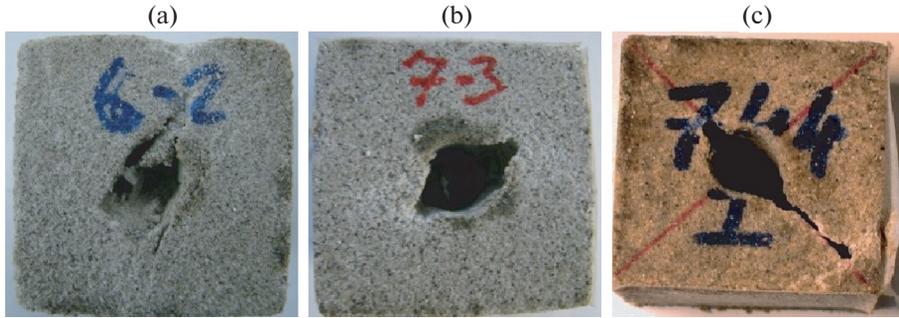


Рис. 4. Отверстия с вывалами после испытания образцов из Штокмановского месторождения.

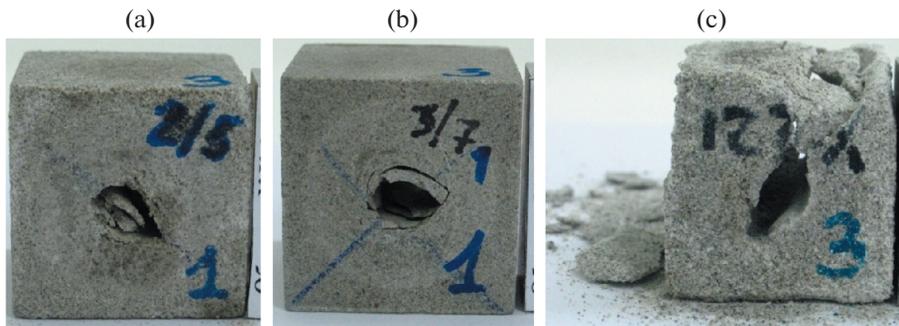


Рис. 5. Отверстия с вывалами после испытания образцов из Киринского месторождения; отверстие соосно оси керна, а), б); отверстие перпендикулярно оси керна (здесь вертикальной), с).

пендикулярно плоскостям, в которых не ожидалось проявления ни упругой, ни прочностной анизотропии.

Серия опытов (4 образца из песчаника неогеновых отложений) была проведена на образцах из коллектора Киринского газоконденсатного месторождения, расположенного на шельфе Сахалина. Все образцы были вырезаны соосно оси керна, в трех образцах отверстия были просверлены соосно оси керна, а в одном – перпендикулярно ему. Различие продольных акустических скоростей в перпендикулярных направлениях не превышало 1% для первых двух образцов и 6% для последних двух образцов. Видимой слоистой структуры не наблюдалось (рис. 5,а–д). Фотографии двух образцов с отверстиями вдоль оси керна и одного образца с отверстием перпендикулярно оси керна представлены на рис. 5,а–с.

Из фотографий видно, что во всех случаях вывалы имели вытянутую форму, особенно выраженную в образце (с) с отверстием, просверленным перпендикулярно оси керна.

**4. Обсуждение.** Согласно общепринятым представлениям [6], в условиях гидростатического сжатия осесимметричные вывалы формируются вокруг скважин в изотропных породах и вокруг скважин, пробуренных нормально к напластованию в трансверсально-изотропных породах, в то время как на контурах скважин, пробуренных в плоскости напластования в трансверсально-изотропных породах, следует ожидать формирование двухлопастных вывалов. Подобные двухлопастные вывалы были не только предсказаны теоретически [10, 11], но и наблюдались экспериментально [6] (и

цитируемая там литература). Напротив, однолопастные вывалы традиционно объясняются анизотропией действующих напряжений [7, 6]. Однако в проведенных экспериментах однолопастные вывалы наблюдались для двух из четырех испытанных пород в гидростатически нагруженных образцах с отверстиями, нормальными к плоскости залегания: во всех 4 случаях для Киринского месторождения (включая случай, когда отверстие располагалось в плоскости залегания, где ожидалась двухлопастная форма) и, по крайней мере, в 10 из 13 образцов для Штокмановского месторождения.

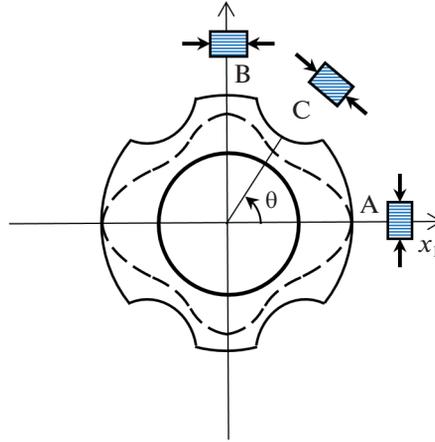
Далее приведен анализ возможных факторов, которые могли привести к появлению однолопастных вывалов вокруг отверстий, где ожидалось осесимметричные или двухлопастные вывалы.

*4.1. Анизотропия прочности.* В качестве основной причины отклонения форм вывалов от окружных в условиях гидростатического нагружения полагают анизотропию прочности, обусловленную наличием ослабленных плоскостей, совпадающих с плоскостями напластования в горных породах [6, 10, 11]. Согласно данной модели [19–21], разрушение может происходить либо из-за скольжения по плоскостям напластования, либо при достижении критических условий в плоскостях, где действуют напряжения, комбинация которых превышает предел прочности среды в целом. По этой причине испытания образцов с ориентацией сжимающего напряжения под разными углами к плоскостям ослабления показывают либо примерно постоянную прочность (для образцов с напряжениями, приложенными в направлениях, близких к направлению напластования или перпендикулярных к нему), либо пониженную прочность при разрушении, вызванном скольжением вдоль слоев (для образцов с плоскостями напластования, наклоненными к направлению нагрузки). Данную картину можно также представить как набор виртуальных образцов, расположенных по контуру отверстия, вырезанного в трансверсально-изотропной породе вдоль плоскости напластования, с постоянными окружными сжимающими напряжениями, действующими вдоль данного контура, рис. 6 (сплошная линия). На рис.6 для каждого угла расстояние от центра до точек соответствующей кривой пропорционально напряжению разрушения.

Однако данная модель не учитывает особенность, наблюдаемую в опытах на осадочных породах – меньшую прочность в случае нагрузки, приложенной параллельно напластованию, по сравнению с прочностью при приложении нагрузки по нормали к напластованию [22–24, 16]. Кроме того, в упомянутых экспериментах зависимость прочности от угла не имели резких точек перехода, соответствующих переключению между механизмами разрушения. Для учета этих особенностей можно использовать эмпирические зависимости, описывающие изменение прочности в зависимости от угла наклона к напластованию [22], или полуэмпирические критерии, основанные на модифицированной модели Хилла [25], [26, 27, 23, 16]. Тем не менее, учет всех вышеупомянутых факторов, связанных с анизотропией прочности, предполагает разрушение в точках С, приводящее к двухлопастным вывалам.

*4.2. Упругая анизотропия.* Закон Гука для трансверсальной анизотропии, характерной для большинства осадочных пород, имеет вид [28]

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{11} &= s_{11}\sigma_{11} + s_{12}\sigma_{22} + s_{13}\sigma_{33} \\
 \varepsilon_{22} &= s_{12}\sigma_{11} + s_{11}\sigma_{22} + s_{13}\sigma_{33} \\
 \varepsilon_{33} &= s_{13}\sigma_{11} + s_{13}\sigma_{22} + s_{33}\sigma_{33} \\
 2\varepsilon_{12} &= s_{66}\sigma_{12} \\
 2\varepsilon_{13} &= s_{44}\sigma_{13} \\
 2\varepsilon_{23} &= s_{44}\sigma_{23}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$



**Рис. 6.** Изменение прочности трансверсально-изотропной породы в окрестности отверстия, ориентированного вдоль плоскости изотропии. Сплошная линия – согласно критерию разрушения, учитывающему ослабление вдоль напластования; пунктирная линия – согласно эмпирическому критерию. Точки А, В и С соответствуют сжимающим напряжениям, приложенным перпендикулярно, параллельно и под углом к напластованию, соответственно.

Здесь  $\varepsilon_{ij}, \sigma_{ij}$  – компоненты тензоров деформаций и напряжений в системе координат с осью  $x_3$ , направленной перпендикулярно плоскости изотропии;  $s_{ij}$  – компоненты матрицы податливости, и  $s_{66} = s_{11} + s_{22} - 2s_{12}$ . Общепринятыми безразмерными параметрами, характеризующими анизотропию [29], являются

$$\lambda = s_{11}/s_{33}; \quad \rho = \frac{s_{44} + 2s_{13}}{2\sqrt{s_{11}s_{33}}} \quad (4.2)$$

На практике именно первый параметр используется для характеристики степени анизотропии. Хотя обычно считается, что упругая анизотропия не оказывает значительного влияния на состояние вокруг скважины [6], согласно решению [28] напряженное состояние вблизи круглого отверстия в трансверсально анизотропном теле отличается от напряженного состояния, соответствующего изотропному случаю. На основе этого решения было показано [30] (также см. [16]), что отклонение концентрации напряжений в окрестности отверстия, лежащего в плоскости изотропии, в теле, подверженном гидростатическому сжатию, от концентраций напряжений по контуру отверстия в изотропном теле определяется следующим параметром

$$k_A = \frac{\beta_{11} + \beta_{33} - 2\beta_{13}}{\beta_{44}} \quad (4.3)$$

и очень незначительно зависит от обычного параметра  $\lambda$ . Здесь коэффициенты  $\beta_{ij}$  представляют собой коэффициенты податливости, модифицированные для плоской деформации

$$\beta_{11} = s_{11} - \frac{s_{12}^2}{s_{11}}, \quad \beta_{33} = s_{33} - \frac{s_{13}^2}{s_{11}}, \quad \beta_{13} = s_{13} - \frac{s_{13}s_{12}}{s_{11}}, \quad \beta_{44} = s_{44} \quad (4.4)$$

и для большинства материалов не сильно отличаются от коэффициентов  $s_{ij}$ . Для  $k_A = 1$  концентрация напряжений равна 2 по всему контуру, как в случае изотропии;  $k_A < 1$  и

$k_A > 1$  соответствуют концентрациям напряжений вдоль контура в форме закругленной четырехконечной звезды, с лучами, вытянутыми вдоль главных осей упругой симметрии или наклоненных к ним, соответственно (рис. 7). Важность параметра  $k_A$  подчеркивалась в работах [32, 33]. Отметим, что комбинация упругих констант, удовлетворяющих условиям  $k_A = 1$  или  $\rho = 1$ , соответствует двум из трех частных случаев, рассмотренных де Сен-Венаном [34], для которых тип зависимости упругих констант от ориентации в пространстве имеет наиболее простую форму. Случай неравенства всех трех главных значений напряжений и произвольного наклона их направления к оси скважины был рассмотрен в [35].

На практике определение упругих параметров, входящих в (4.3), может быть затруднено, особенно величины податливости сдвига, которая является обратной по отношению к модулю сдвига. Однако, используя стандартные формулы для компонент напряжений в повернутой системе координат [28], формула (4.3) может быть переписана в терминах модулей Юнга вдоль нормали и в направлении  $45^\circ$  к слоистости,  $E_1 = \beta_{11}^{-1}, E_3 = \beta_{33}^{-1}, E_{(45)} = \beta_{(45)}^{-1}E$ :

$$4E_{(45)}^{-1} = \beta_{11} + \beta_{33} + 2\beta_{13} - \beta_{44} \quad (4.5)$$

Подставляя (4.5) в (4.3), получаем

$$k_A - 1 = 2 \frac{\beta_{11} + \beta_{33} - 2\beta_{(45)}}{\beta_{44}} \quad (4.6)$$

Отсюда видно, что, поскольку  $\beta_{44} > 0$ , условие  $k_A < 1$  (т.е. условие концентраций напряжений в точках А, В) соответствует условию

$$\beta_{11} + \beta_{33} < 2\beta_{(45)}, \quad \text{или} \quad 2E_{(45)}^{-1} > E_{11}^{-1} + E_{33}^{-1} \quad (4.7)$$

Использование условия (4.6) или качественного условия (4.7) на практике может быть проще, чем использование условия (4.3).

На рис. 7 показана концентрация напряжений по контуру круглого отверстия в трансверсально-изотропном теле в условиях гидростатического сжатия для разных значений параметра  $k_A$ . Ось отверстия лежит в плоскости изотропии. Система координат соответствует главной оси изотропии;  $\lambda = 1, \beta_{13}/\beta_{11} = -0.2$ ; сплошные, пунктирные и штрих-пунктирные линии отвечают  $k_A = 1, 0.75, 1.5$  соответственно. Точки А соответствуют направлению напряжений, перпендикулярных слою; точка В соответствует направлению напряжений, параллельных слою; точка С' соответствует направлению минимального (для  $k_A < 1$ ) или максимального (для  $k_A > 1$ ) окружного напряжения.

Согласно [31], для большинства осадочных пород отклонение параметра  $k_A$  от единицы невелико. Между тем, анализ данных [31] показывает, что  $k_A < 1$  для 59% исследованных пород, а среднее значение  $k_A$  также меньше единицы, а именно равно 0.97. Хотя термодинамических ограничений на данный параметр не существует (за исключением того, что он должен быть положительным), однако из рассмотрения различных моделей гетерогенных материалов следует, что этот параметр для неоднородных материалов имеет тенденцию быть меньше единицы. Ниже, в разделе 5, рассматриваются три такие модели, а именно: тело, состоящее из изотропных слоев, тело с ориентированной системой трещин и тело с ориентированной системой сдвиговых трещин. Согласно полученным результатам, основанных на моделях [36, 37], параметр  $k_A$  имеет тенденцию быть меньше единицы для гетерогенных анизотропных сред, описываемых всеми тремя моделями.

4.3. *Комбинированное влияние прочностной и упругой анизотропии.* Разрушение на контуре отверстия должно начинаться в точках, где действующее напряжение превосходит локальную прочность. Обычно наименьшая прочность соответствует точкам С, прочность увеличивается с увеличением угла к точкам В и А, причем прочность в точке А обычно выше, чем в точке В [22–24, 16] (рис. 6). При рассмотрении напряженного состояния (рис. 7), можно также выделить три критические точки: А, В и точку С' (близкую к точке С и предполагаемую совпадающей с точкой С в последующем качественном анализе), где напряжения могут быть максимальными или минимальными. Следовательно, в зависимости от сочетания прочности и концентрации напряжений в точках А, В, С, все они могут быть потенциально опасными в качестве точек начала разрушения. Следует выделить три случая:

1. При наличии выраженной анизотропии прочности и отсутствии упругой анизотропии (или упругой анизотропии с  $k_A \geq 1$  или немного меньше 1) не наблюдается существенной концентрации напряжений (или наблюдается вблизи точек С), и начало разрушения определяется меньшей прочностью в точках С. В этом случае ожидаются двухлопастные вывалы, как описано в [6] и цитируемой там литературе.

2. Однако, если упругая анизотропия заметно выражена и  $k_A < 1$ , влияние концентрации напряжений в точках А, В может превышать влияние снижения прочности в точке С. Так, для  $k_A = 0.5$  отношение напряжений в точке А к минимальным напряжениям в точке, близкой к С, составляет около 1.5, что может быть достаточным для подавления разрушения в точках С и инициирования его в точках В (при условии, что существует анизотропия прочности и прочность при сжатии в направлении, нормальном к слоистости, в точке А, превышает прочность при сжатии в направлении, параллельном слоистости, в точке В). Если это так, то можно ожидать формирование однолопастных вывалов, подобных наблюдавшимся в некоторых из описанных выше экспериментов.

3. Гипотетически, если прочностная анизотропия незначительна, а упругая анизотропия ярко выражена ( $k_A < 1$ ), инициирование разрушения может начаться в точках В и А, в этом случае мы наблюдали бы двухлопастные крестообразные вывалы. Однако, насколько нам известно, подобного вида разрушения не наблюдалось.

Таким образом, комбинированное влияние прочностной и упругой анизотропии (для параметра  $k_A < 1$ ) может быть возможной причиной наблюдавшихся однолопастных вывалов, образывавшихся на контурах отверстий в трансверсально-изотропных породах с отверстиями в плоскости залегания, а не двухлопастных вывалов, предсказываемых теорией [6]. Подобные вывалы могут образовываться также в отверстиях, перпендикулярных напластованию, если анизотропия упругости и прочности в этой плоскости образована ориентированной трещиноватостью или наличием плоскостей ослабления, не совпадающих с напластованием.

4.4. *Подавление инициирования дополнительных вывалов при появлении первичных вывалов в некоторых точках контура отверстия.* Другой возможный механизм может заключаться в следующем. Прочность горных пород имеет естественный разброс даже внутри образца. Следовательно, при нагружении изотропного образца, содержащего отверстие, гидростатическими напряжениями таким образом, чтобы окружные напряжения были постоянными по всему контуру, разрушение начинается в точках контура отверстия с минимальной прочностью. Если это начальное разрушение разовьется достаточно, чтобы сформировать вывал, образованный вывал будет служить концентратором напряжений, и распределение напряжений по контуру отверстия изменится: напряжение увеличится в вершине вывала и упадет на контуре вблизи него.

Действительно, рассмотрим цилиндрическое отверстие в теле, подвергнутом гидростатическому сжатию. До образования вывала концентрация окружного напряжения составляла 2 по всему контуру. После формирования первичного вывала (точка

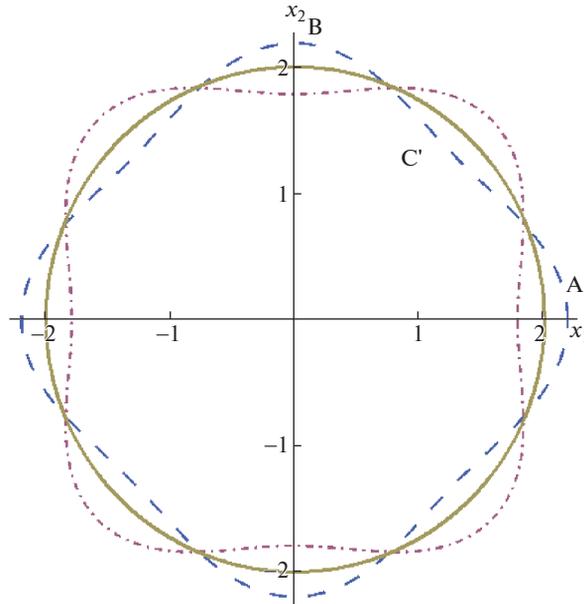
D, рис. 8), концентрация окружных напряжений вдоль контура изменяется: она падает до нуля в точке E (на самом деле это происходит в идеальном случае, изображенном на рисунке, в действительности из-за оставшихся в отверстии обломков горных пород она падает до некоторой небольшой, но конечной величины) и постепенно увеличивается вдоль контура, достигая максимума в точке, противоположной D, т.е. точке D', так что абсолютные значения напряжений вдоль контура подчиняются следующему неравенству  $|\sigma_E| < |\sigma_F| < |\sigma_G| < |\sigma_{D'}|$ . Следовательно, наиболее вероятная точка для появления второго вывала является точкой, противоположной D, т.е. точка D' (показана пунктирной линией на рис. 8). После формирования второго вывала концентрацию напряжений вокруг контура можно оценить из решения для круглого отверстия с двумя трещинами, исходящими из его противоположных сторон. В [38, 39] было показано, что с увеличением длины трещин распределение напряжений по контуру отверстия быстро стремится к распределению напряжений для случая равномерно сжатой полуплоскости с полукруглой выемкой [40, 41] для одноосного нагружения вдоль линии трещины (с максимумом порядка 1.5), и к нулю [39] для равнокомпонентного нагружения. Аналогичные результаты уменьшения напряжений были получены в [16] при моделировании напряженного состояния вокруг скважин с перфорационными щелями. Поэтому, появление двух хорошо развитых вывалов на противоположных сторонах контура должно подавлять развитие разрушения в других точках контура. Таким образом, мы можем говорить о нестабильности круглой формы вывалов даже в изотропных породах.

Описанный сценарий, в принципе, может быть причиной наблюдаемых вытянутых в одном направлении вывалов в гидростатически сжатых образцах, как изотропных, так и обладающих трансверсальной изотропией прочности. В первом случае направление вывала может быть произвольным. В последнем случае точка D на рис. 8 может соответствовать точке C на рис. 6, и направление вывала может быть не перпендикулярно слоистости, что может объяснить наблюдаемые отклонения направления вывалов от нормали к слоистости. Такой механизм может иметь место, если изменение свойств достаточно велико, чтобы сформировать первичный вывал, достаточно большой и способный подавить инициирование других вывалов. Реализация этого механизма, а именно подавление двух из четырех потенциальных вывалов, может также объяснить появление двух вывалов, развивающихся по контуру отверстия не в строго противоположных направлениях, рис. 8,b, а также небольшую асимметрию разрушения вокруг отверстий даже в карбонатных породах (месторождение Приразломное, рис. 2).

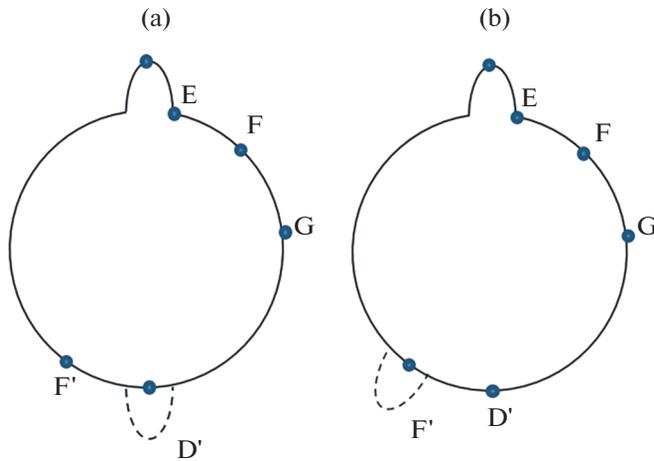
*4.5. Анизотропия прочности определенного типа.* Наблюдаемые вывалы однолопастной формы также могут образовываться из-за анизотропии прочности определенного типа. Если это так, то прочность на сжатие должна описываться овалообразными кривыми без минимума в точке C (рис. 6). Другими словами, прочность на сжатие должна монотонно изменяться с изменением угла между направлением сжатия и плоскостью залегания с максимумом, соответствующим сжатию, нормальному к плоскости залегания, и минимумом, соответствующим сжатию, параллельному плоскости залегания.

Предложенные механизмы возникновения наблюдаемых однолопастных вывалов при равномерной гидростатической нагрузке рассматриваются нами только как гипотезы. Также могут быть рассмотрены другие механизмы, например, такие, как разрушение или деформация отдельных слоев в точках наблюдаемых вывалов (для вывалов, распространяющихся нормально к напластованию). Наблюдаемое поведение также может быть обусловлено сочетанием факторов, упомянутых выше.

Для проверки предложенных гипотез необходимо провести дополнительные испытания, а именно определить полный набор упругих констант, особенно параметр  $s_{44}$  (для определения параметра упругой анизотропии  $k_A$  (4.3)), и определить зависимость прочности на сжатие от угла между приложенным сжатием и плоскостью залегания.



**Рис. 7.** Концентрация напряжений по контуру круглого отверстия в трансверсально-изотропном теле в условиях гидростатического сжатия.



**Рис. 8.** Качественная модель первичного вывала (точка D), подавляющего развитие вторичных вывалов: симметрично, в точках F, F', a); несимметрично, в точках F, D', b).

Все предложенные опыты должны проводиться вместе с испытаниями на образцах с отверстиями, изготовленными из одних и тех же кусков керна горных пород.

Понимание механизмов образования вывалов различных форм будет способствовать лучшей интерпретации данных исследования скважин, в частности, для определения напряжений, действующих в массиве.

**5. Приложение. Многослойная среда.** Для среды, состоящей из двух типов упругих трансверсально-изотропных слоев с упругими податливостями  $\beta_{ij}^{(k)}$ , где индекс  $k = 1, 2$  относится к двум типам слоев, эффективные упругие податливости  $\beta_{ij}^{\text{eff}}$  с использованием общих формул [36] могут быть записаны в используемой нотации следующим образом

$$\begin{aligned}\beta_{44}^{\text{eff}} &= (1 - \Omega)\beta_{44}^{(1)} + \Omega\beta_{44}^{(2)} \\ \beta_{11}^{\text{eff}} &= [(1 - \Omega)\beta_{11}^{(1)-1} + \Omega\beta_{11}^{(2)-1}]^{-1} \\ \beta_{13}^{\text{eff}} &= \frac{(1 - \Omega)\beta_{11}^{(2)}\beta_{13}^{(1)} + \Omega\beta_{11}^{(1)}\beta_{13}^{(2)}}{(1 - \Omega)\beta_{11}^{(2)} + \Omega\beta_{11}^{(1)}} \\ \beta_{33}^{\text{eff}} &= (1 - \Omega)\beta_{33}^{(1)} + \Omega\beta_{33}^{(2)} - \frac{(\beta_{13}^{(1)} - \beta_{13}^{(2)})^2}{\beta_{11}^{(1)}/(1 - \Omega) + \beta_{11}^{(2)}/\Omega}\end{aligned}\quad (5.1)$$

Здесь  $(1 - \Omega)$  и  $\Omega$  относительные концентрации материалов первого и второго типа. Для изотропных слоев с модулями Юнга  $E^{(1)}, E^{(2)} = E^{(1)}/a$  и коэффициентами Пуассона  $\nu^{(1)}, \nu^{(2)}$

$$\begin{aligned}s_{11}^{(1)} = s_{33}^{(1)} &= 1/E^{(1)}, & s_{11}^{(2)} = s_{33}^{(2)} &= a/E^{(1)} \\ s_{13}^{(1)} &= -\nu^{(1)}/E^{(1)}, & s_{13}^{(2)} &= -\nu^{(2)}a/E^{(1)} \\ s_{44}^{(1)} &= 2(1 + \nu^{(1)})/E^{(1)}, & s_{44}^{(2)} &= 2a(1 + \nu^{(2)})/E^{(1)}\end{aligned}\quad (5.2)$$

Подстановка (5.1) и (5.2) в (4.3) с учетом (4.4) дает довольно громоздкое алгебраическое выражение для зависимости  $k_A$  от  $\Omega, a, \nu^{(1)}, \nu^{(2)}$ , элементарный анализ которого показывает, что  $k_A(\Omega, a, \nu^{(1)}, \nu^{(2)}) \leq 1$  для любых значений аргументов.

*Среда с ориентированной системой трещин.* Из результатов [37] следует, что небольшое количество (на единицу объема)  $d\Omega$  круговых трещин, ориентированных параллельно плоскости  $x_1x_2$  в трансверсально-изотропном теле, влияет только на два коэффициента податливости  $s_{33}$  и  $s_{44} = s_{55}$ , а остальные коэффициенты не “чувствуют” наличие трещин. Для первоначально изотропного тела результаты [37] могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}s_{44}^{\text{eff}} &= s_{44} + \frac{2(1 - \nu^2)16}{E(2 - \nu)3}d\Omega, & s_{33}^{\text{eff}} &= s_{33} + \frac{(1 - \nu^2)16}{E}d\Omega \\ s_{11}^{\text{eff}} &= s_{11}, & s_{12}^{\text{eff}} &= s_{12}, & s_{13}^{\text{eff}} &= s_{13}\end{aligned}\quad (5.3)$$

Подставляя (5.3) в (4.3) и раскладывая в ряд по  $d\Omega$  и оставляя только главный член, имеем

$$k_A = 1 - \frac{(1 - \nu)\nu}{(2 - \nu)3}d\Omega \quad (5.4)$$

который меньше единицы для положительных концентраций и коэффициентов Пуассона.

*Среда с ориентированной системой сдвиговых трещин.* Также рассмотрим случай сдвиговых трещин, то есть трещин, раскрытию которых препятствуют достаточно высокие сжимающие напряжения, но которые способны приводить к относительным

смещениям их поверхностей при сдвиге. По сравнению с предыдущим случаем, здесь компонента  $s_{33}^{\text{eff}} = s_{33}$  также остается постоянной, и вместо (5.3) имеем

$$s_{44}^{\text{eff}} = s_{44} + \frac{2(1-\nu^2)}{E(2-\nu)} \frac{16}{3} d\Omega, \quad s_{33}^{\text{eff}} = s_{33}, \quad s_{11}^{\text{eff}} = s_{11}, \quad s_{12}^{\text{eff}} = s_{12}, \quad s_{13}^{\text{eff}} = s_{13} \quad (5.5)$$

Подставляя (5.5) в (4.3) и раскладывая в ряд и сохраняя только главный член, имеем

$$k_A = 1 - \frac{(1-\nu)}{(2-\nu)} \frac{16}{3} d\Omega \quad (5.6)$$

Следовательно, согласно всем трем рассмотренным моделям, параметр, характеризующий степень анизотропии, меньше единицы.

**6. Заключение.** Прямое моделирование продемонстрировало, что однолопастные вывалы на контурах скважин могут образовываться в условиях гидростатического сжатия, для которого, согласно общепринятому мнению, ожидаются либо кольцевые, либо двухлопастные вывалы (для изотропных и трансверсально-изотропных пород соответственно).

Наблюдаемая возможность возникновения однолопастных вывалов на контурах скважин в условиях гидростатического сжатия может привести к неправильной интерпретации результатов исследований скважин в соответствии с существующими методами.

Для объяснения наблюдаемого явления было предложено несколько гипотез: комбинированное влияние прочности и упругой анизотропии, подавление инициирования дополнительных вывалов после образования первичных вывалов, влияние анизотропии прочности определенного типа, проявляющееся в виде монотонного изменения прочности при сжатии с максимумом, соответствующим сжатию, нормальному к плоскости залегания, и минимуму, соответствующему сжатию, параллельному плоскости залегания.

Была подчеркнута важность таких факторов, как анизотропия прочности и естественный разброс прочностных свойств, а также роль специфического параметра, характеризующего упругую анизотропию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект № 22-11-00273.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каримов М.Ф. Эксплуатация подземных хранилищ газа. М.: Недра, 1981. 248 с.
2. Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.С. Основы технологии добычи газа. М.: Недра, 2003. 880 с.
3. Башкатов А.Д. Предупреждение пескования скважин. М.: Недра, 1981. 176 с.
4. Врачев В.В., Шафаренко В.П., Шустров В.П. Пескопроявление при эксплуатации ПХГ // Газовая промышленность. 1999. № 11. С. 62.
5. Басниев К.С., Будзуляк Б.В., Зиновьев В.В. Повышение надежности и безопасности эксплуатации подземных хранилищ газа. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр". 2005. 391 с.
6. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. California: Cambridge University Press, 2007. 443 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>
7. Zang A., Stephansson O. Stress Field of the Earth's Crust. Dordrecht: Springer, 2010. 322 p.
8. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. An overview of rock stress measurement methods // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2003. № 40. P. 975–989.
9. Timoshenko S.P., Goodier J.N. Theory of Elasticity. N. Y.: McGraw-Hill Book Company Inc., 1953. 471 p.
10. Vernik L., Zoback M.D. Strength anisotropy of crystalline rock: Implications for assessment of in situ stresses from wellbore breakouts / Rock Mechanics Contributions and Challenges: Proc. of the 31st US Symposium. Ed. by W.A. Hustrulid, G.A. Johnson. London: CRC Press, 1990. P. ARMA-

- 90-0841.  
<https://doi.org/10.1201/9781003078944>
11. *Germanovich L.N., Galybin A.N., Dyskin A.V., Mokhel A.N., Dunayevsky V.* Borehole stability in laminated rock / Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering. Ed. by G. Barla. Rotterdam and Brookfield: CRC Press/Balkema, 1996. V. 2. P. 767–776.
  12. *Kaiser P.K., Guenot A., Morgenstern N.R.* Deformation of small tunnels. IV. Behaviour during failure // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 1985. V. 22. P. 141–152.
  13. *Babcock E.A.* Measurement of subsurface fractures from dipmeter logs // AAPG Bull. 1978. V. 62 № 7. P. 1111–1126.  
<https://doi.org/10.1306/C1EA4FBD-16C9-11D7-8645000102C1865D>
  14. *Bell J.S., Gough D.I.* Northeast-southwest compressive stress in Alberta: evidence from oil wells // Earth Planet Sci Lett. 1979. V. 45. P. 475–482.  
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(79\)90146-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(79)90146-8)
  15. *Karev V.I., Kovalenko Y.F.* Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production / True Triaxial Testing of Rocks. Leiden: CRC Press/Balkema, 2013. P. 301–310.
  16. *Karev V.I., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B.* Geomechanics of Oil and Gas Wells. Advances in Oil and Gas Exploration and Production. Cham: Springer International Publishing, 2020. 166 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-26608-0>
  17. *Рыжов А.Е., Виценовский М.Ю., Сауткин Р.С.* Оценка коллекторских свойств карбонатных пород Приразломного нефтяного месторождения // Геология нефти и газа. 2012. № 4. С. 39–53.
  18. *Климов Д.М., Тер-Саркисов Р.М., Чугай С.Е., Коваленко Ю.Ф., Рыжов А.Е.* Определение прочностных характеристик пород Штокмановского ГКМ и оценка рисков выноса песка при его разработке // Газовая промышленность. 2010. № 11. С. 57–60.
  19. *Donath F.A.* Experimental study of shear failure in anisotropic rock // Bull. Geol. Soc. America. 1966. V. 72. P. 985–990.
  20. *Jaeger J.C., Cook N.G.W.* Fundamentals of Rock Mechanics. 2nd ed. N. Y.: Chapman and Hall, 1979. 260 p.
  21. *Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Y.F., Ustinov K.B.* Fracture of sedimentary rocks under a complex triaxial stress state // Mech. Solids. 2016. V. 51. P. 522–526.  
<https://doi.org/10.3103/S0025654416050022>
  22. *Singh M., Samadhiya N.K., Kumar A., Kumar V., Singh B.* A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks // Rock Mech. and Rock Eng. 2015. V. 48 (4). P. 1387–1405.
  23. *Karev V.I., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B.* Modeling deformation and failure of anisotropic rocks nearby a horizontal well // J. Min. Sci. 2017. V. 53. № 3. P. 425–433.  
<https://doi.org/10.1134/S1062739117032319>
  24. *Karev V.I., Klimov D.M., Kovalenko Yu.F., Ustinov K.B.* Fracture model of anisotropic rocks under complex loading // Phys. Mesomech. 2016. V. 19. № 6. P. 34–40. doi.org/  
<https://doi.org/10.1134/S1029959918030050>
  25. *Hill R.* A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals // Proc. Roy. Soc. London A. 1948. V. 193. P. 281–297
  26. *Caddell R.M., Raghava E.S., Atkins A.G.* A yield criterion for anisotropic and pressure dependent solids such as oriented polymers // J. Mater. Sci. 1973. V. 8. P. 1641–1646.
  27. *Lui C., Huang Y., Stout M.G.* On the asymmetric yield surface of plastically orthotropic materials: a phenomenological study // Acta Mater. 1997. V. 45. № 6. P. 2397–2406
  28. *Lekhnitskii S.G.* Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body. San Francisco: Holden-Day, 1963. 404 p.
  29. *Suo Z.* Singularities, interfaces and cracks in dissimilar anisotropic media // Proc. R. Soc. Lond. A, Math. Phys. Sci. 1990. V. 427 (1873). P. 331–358.
  30. *Zhuravlev A.B., Ustinov K.B.* On values characterizing the degree of elastic anisotropy of transversely isotropic rocks. Role of shear modulus // Mech. Solids. 2019. V. 54. № 6. P. 958–967.  
<https://doi.org/10.3103/S0025654419060104>
  31. *Batugin S.A., Nirenburg R.K.* Approximate relation between the elastic constants of anisotropic rocks and the anisotropy parameters // J. Mining Sci. 1972. V. 8 (1). P. 5–9.

32. *Gassmann F.* Introduction to seismic travel time methods in anisotropic media // Pure Appl. Geoph. 1964. V. 58. P. 63–112.  
<https://doi.org/10.1007/BF00879140>
33. *Annin B.D.* Transverse-Isotropic Elastic Model of Geomaterials // Sib. Zh. Industr. Mat. 2009. № 12 (3). P. 5–14.
34. *De Saint-Venant.* Mémoire sur la distribution des élasticités autour de chaque point d'un solide ou d'un milieu de contexture quelconque, particulièrement lorsqu'il est amorphe sans être isotrope (Deuxième article) // J. Math. Pures Appl. 2e Sér. 1863. V. 8. P. 257–430.
35. *Mimouna A., Prioul R.* Closed-form approximations to borehole stresses for weak transverse isotropic elastic media // Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 2017. № 98. P. 203–216.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2017.06.002>
36. *Christensen R.M.* Mechanics of composite materials. N. Y.: Wiley-Interscience, 1979. 348 p.
37. *Vavakin A.S., Salganik R.L.* Effective elastic characteristics of bodies with isolated cracks, cavities, and rigid non-homogeneities // Mech. Solids. 1978. V. 13. № 2. P. 87–97.
38. *Dyskin A.V., Germanovich L.N., Ustinov K.B.* Asymptotic solution for long cracks emanated from a pore in compression // Int. J. Fract. 1993. V. 62. P. 307–324.  
<https://doi.org/10.1007/BF00017238>
39. *Ustinov K.B.* Asymptotic solution for long cracks emanated from a hole in bi-axial loading // Int. J. Fract. 1994. V. 68. P. 73–77.  
<https://doi.org/10.1007/BF00013075>
40. *Jeffery G.B.* Plane stress and plane strain in bipolar coordinates // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A. 1921. V. 221. P. 265–293.
41. *Chin-Bing Ling.* On the stresses in a plate containing two circular holes // J. Appl. Phys. 1948. V. 19. № 1. P. 77–82.