

DOI 10.25689/NP.2018.4.225-239

УДК 622.245.422

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕЛЕ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ
ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В СКВАЖИНЕ**

¹Агзамов Ф.А., ²Белусов А.О.

¹ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

²Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмень

**SUBSTANTIATION OF PROCEDURE FOR EVALUATION OF
CRITICAL STRESSES ACTING ON CEMENT SHEATH DURING
WELL INTERVENTIONS**

¹Agzamov F.A., ²Belousov A.O.

¹ Ufa State Petroleum Technical University

²KogalymNIPIneft, Branch of LUKOIL-Engineering Company in Tyumen

E-mail: BelousovAO@tmn.lukoil.com

Аннотация. Для определения показателей, описывающих упруго-деформационные характеристики цементного камня, необходимые для предупреждения нарушения герметичности крепи, вследствие динамических и ударных воздействий, проведены расчетные, экспериментальные и промысловые исследования.

Проведенный расчет прочности цементного камня, необходимой для сопротивления динамическим воздействиям, и экспериментальные исследования показали, что на момент проведения технологических операций крепь должна обеспечить надежную герметичность затрубного пространства. Анализ промысловых материалов показал, что часто после проведения гидроразрыва пластов (ГРП) герметичность цементного кольца нарушается, и в скважине фиксируются перетоки.

При проведении экспериментальных работ подтвердилось влияние термической коррозии на камень из портландцемента, твердевший при температуре близкой к 100 °С. Это проявилось в снижении прочностных характеристик (пределы прочности на сжатие, изгиб, разрыв и удароустойчивость), увеличении хрупкости и тангенциальных напряжений. В целом, происходит снижение способности крепи скважины к сопротивлению динамическим воздействиям.

На основании проведенных исследований предложены показатели, необходимые для оценки упруго-деформационных характеристик цементного камня.

Ключевые слова: Цементный камень, нагрузки на крепь, прочность на изгиб, прочность на сжатие, удароустойчивость.

Abstract. Numerical, experimental and field studies have been conducted to determine parameters describing stress-strain performance of cement sheath required for prevention of cement structural integrity failures due to dynamic and shock loads.

Estimation of cement sheath strength required to resist dynamic loads and experimental study data indicate that adequate annulus integrity should be provided before any well intervention. Analysis of field data has demonstrated that cement bond integrity failures due to hydraulic fracturing treatments are not infrequent, resulting in losses of reservoir fluids through cross-flows along the cement sheath.

Experimental studies confirmed adverse impact of thermal corrosion on Portland cement sheath cured at temperatures of about 100 °C. Particularly, poor strength performance (compression, bending, tensile strength, and shock resistance), increased brittleness and circumferential stresses inside cement are observed. Ultimately, this translates into reduction of oil-well cement sheath resistance to dynamic loads.

On the basis of research findings, parameters required for evaluation of cement sheath stress-strain performance are proposed.

Key words: Cement sheath, support load, bending strength, compression strength, shock resistance.

Вопросы качества цементирования скважин неоднозначны и недостаточно сформулированы, они всегда являлись спором буровиков и промысловиков. Очевидным остается тот факт, что для продолжительной эксплуатации нефтяных и газовых скважин необходимо, чтобы твердеющий в заколонном пространстве цементный камень приобрел после цементирования требуемые физико-механические свойства.

Отсутствие в научно-технической литературе единого мнения касательно упруго-деформационных показателей цементного камня, необходимых для восприятия динамических и ударных воздействий, требует разработки специальной методики оценки опасных напряжений, учитывающей, как переход материала в пластическое состояние, так и его хрупкое разрушение.

Как показывает практика крепления скважин, важность высоких требований только к прочности цементного камня долгое время переоценивалась. Коренной пересмотр требований к прочности цементного камня не означает, что прочность не имеет значения; прочность камня, проявляющая тенденцию к росту, является надежным признаком его стойкости и долговечности.

Ранее нами было показано, что, несмотря на многолетний опыт использования тампонажного раствора на основе портландцемента, до сих пор нет научно обоснованных, подтвержденных промысловыми результатами, требований к технологическим свойствам цементного камня, в частности, к его прочности. В работе представлялась методика, позволяющая произвести расчет необходимой прочности цементного камня для сопротивления динамическим и ударным нагрузкам в частности от опрессовки, углубления, перфорации и гидроразрыва пластов (ГРП) [1].

Для проверки достаточности стандартного комплекса испытаний тампонажных материалов и на основании ранее представленной методики, проведен расчет необходимой прочности цементного камня, обеспечивающей сопротивление динамическим и ударным нагрузкам, для разведочной скважины, построенной на Лас-Еганском месторождении.

При цементировании обсадной колонны применялись серийно выпускаемые тампонажные цементы, соответствующие требованиям ГОСТ 1581-96, ISO 10426-1:2009 и ТУ производителя на соответствующую тампонажную продукцию. Подбор рецептуры тампонажного раствора произведен с учетом индивидуальных геолого-технических условий с использованием стандартного комплекса химических реагентов, традиционного для месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

Фактические данные по времени проведения технологических операций, начиная от момента окончания процесса цементирования, совмещенные с оценкой прочностных характеристик цементного камня,

использованного на этой скважине, а также расчетными требованиями к прочности, представлены на рис. 1.

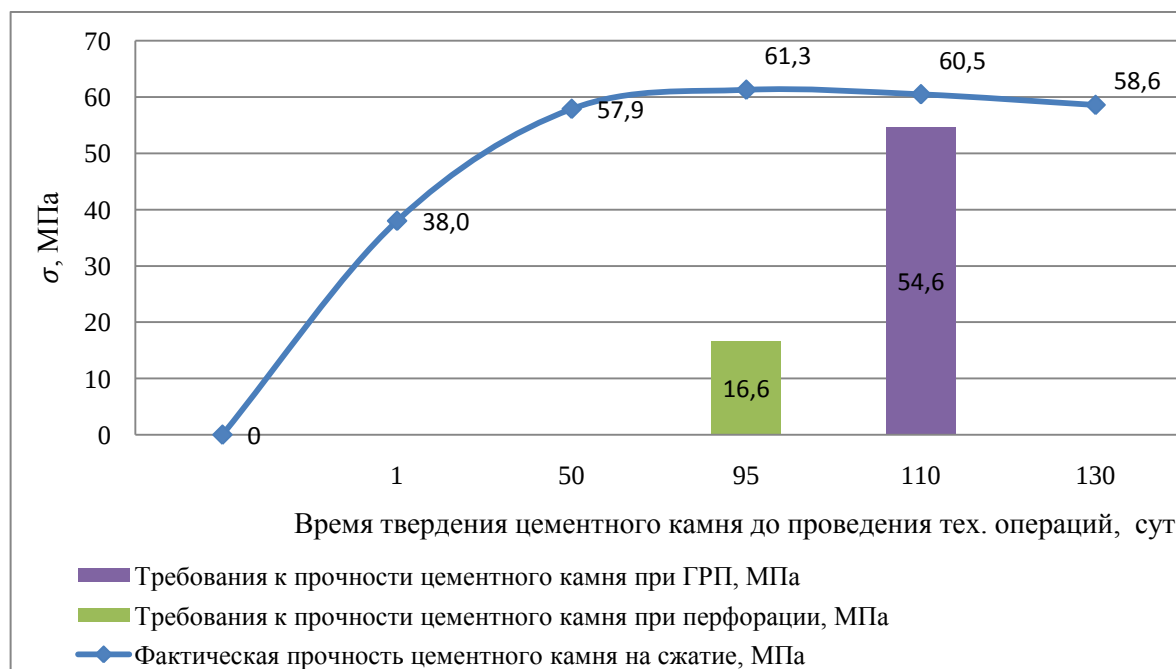


Рис. 1. Сравнение фактической прочности цементного камня с расчетными требованиями при учете реального времени проведения технологических операций на разведочной скважине Лас-Еганского месторождения

Из рис. 1 видно, что фактическая прочность цементного камня на момент проведения перфорации и ГРП, удовлетворяет расчетным требованиям и должна обеспечить герметичность затрубного пространства. Исключение требований к прочности цементного камня при опрессовке обоснованы проведением данной операции сразу после получения «СТОП», при не затвердевшем цементом растворе.

По данным промысловых геофизических исследований (ПГИ), проведенных в промежуток между перфорацией и ГРП, наличие заколонной циркуляции на данной скважине не отмечалось. При повторном проведении ПГИ после ГРП в нижней точке перфорации была отмечена заколонная циркуляция флюидов. Данные геофизических исследований могут свидетельствовать о том, что цементный камень выдержал нагрузки от проведения перфорации, а после проведения ГРП герметичность крепи была нарушена. Следует отметить, что по данным

волнового акустического каротажа в интервале перетока отмечалось наличие сплошного контакта с колонной и породой, герметичность признана удовлетворительной, а характер распределения вещества в затрубном пространстве однородным. Эксцентричность колонны при этом составляла 0,09.

Приведенные промысловые материалы, характерные для многих скважин, показывают, что должны быть введены новые показатели оценки качества цементного камня, поскольку на сегодняшний день требования проектно-сметной документации (ПСД) и регламентирующих документов распространяются только на предел прочности цементного камня при сжатии и изгибе. При этом многие отечественные и зарубежные исследователи отмечают, что требования необходимо предъявлять и к упругим свойствам камня [2, 3]. Другие авторы подчеркивают важность показателей, отражающих хрупкость и деструктивные процессы в цементном камне [4, 5]. Очевидно, должны существовать обобщающие характеристики тампонажного камня, объединяющие в себе требования, как к прочности, так и к упругости цементного камня. Следовательно, еще на этапе разработки ПСД необходимо учитывать достижение цементным камнем требуемых физико-механических характеристик, необходимых для восприятия динамических и ударных нагрузок.

С целью определения показателей, необходимых для обоснования требований к упругим и деформационным характеристикам цементного камня, применявшегося при цементировании описанной выше скважины, были проведены экспериментальные исследования, включающие:

- определение прочностных характеристик, производившееся в соответствии с ГОСТ 26798.1-96;
- определение коэффициента запаса прочности проведенное, на основании полученных прочностных характеристик по формуле 1;

$$\lambda = \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_{сж}} \quad (1)$$

- определение Модуля Юнга, произведено на основании полученных прочностных характеристик по зависимости А.И. Булатова (ВНИИКРнефть) [2], формула 2;

$$E = 1,5\sigma_{изг} \cdot 10^3 \quad (2)$$

- определение удароустойчивости, характеризуемое показателем удельной ударной прочности разрушения, проводившееся с использованием копра, в соответствии с ГОСТ 30353-95.

Удароустойчивость рассчитывалась по формуле 3:

$$A=P \cdot (0,01+0,02+...+H)/V \quad (3)$$

где: P – вес груза, Н;

0,01, 0,02 – высота падения груза, м;

V – объем образца, м³;

H – высота падения груза, при которой появилась первая трещина, м.

- определение показателя прочности при растяжении, проводившееся методом раздавливания цилиндрических образцов равномерно распределенной нагрузкой, прикладываемой к диаметрально противоположным образующим [6, 7, 8]. Расчет прочности камня на растяжение проводился по формулам 4, 5.

$$\sigma_{пр.растяж.} = q \cdot \frac{2 \cdot F_f}{\pi \cdot D \cdot L} \approx q \cdot \frac{0.636 \cdot F_f}{D \cdot L} \quad (4)$$

где: F_f – максимальное значение силы, действующей на образец, Н;

D – диаметр образца, м;

L – длина (толщина) образца, м;

Q – коэффициент, зависящий от статического коэффициента Пуассона.

Коэффициент q определялся по формуле:

$$q = 0,262 \cdot \frac{L}{D} + 1 \quad (5)$$

- определение нормальных и касательных напряжений в цементном камне, проводившееся методом сдвига со сжатием [8, 9] с помощью специального устройства, представленного на рис. 2. При этом расчет напряжений σ и τ в плоскости среза производился по формулам 6, 7.

$$\tau = \frac{F_{cp}}{S} = \frac{P \cdot \sin \alpha}{S} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F_{сж}}{S} = \frac{P \cdot \cos \alpha}{S} \quad (7)$$

где: P – нагрузка;

α – угол наклона пластины;

S – площадь поверхности среза.

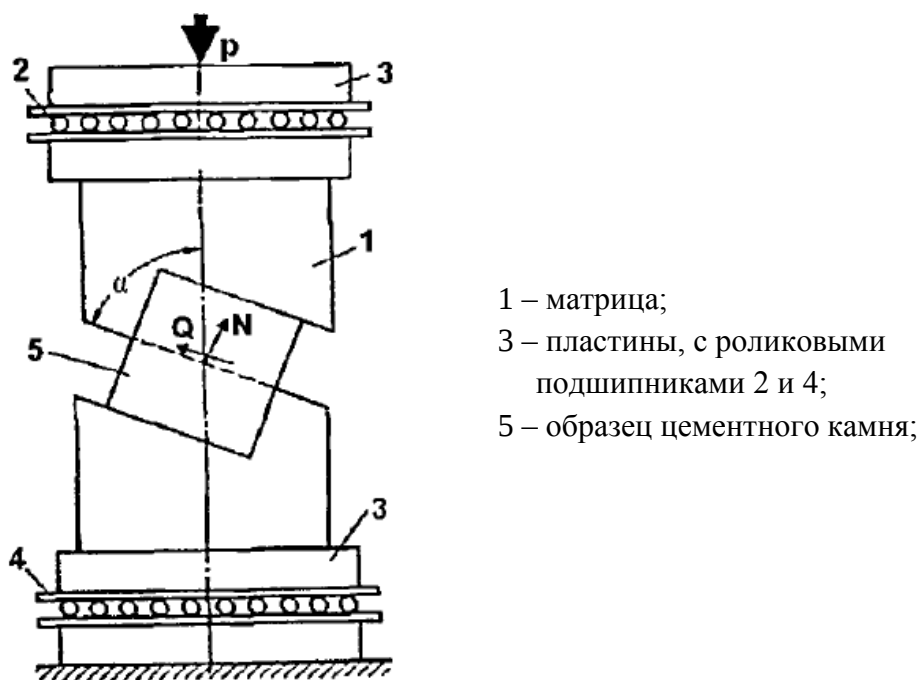


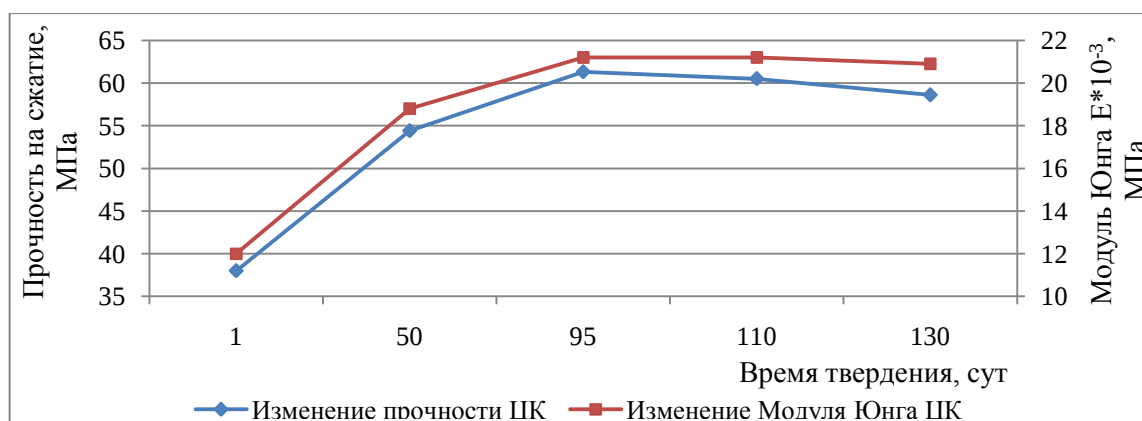
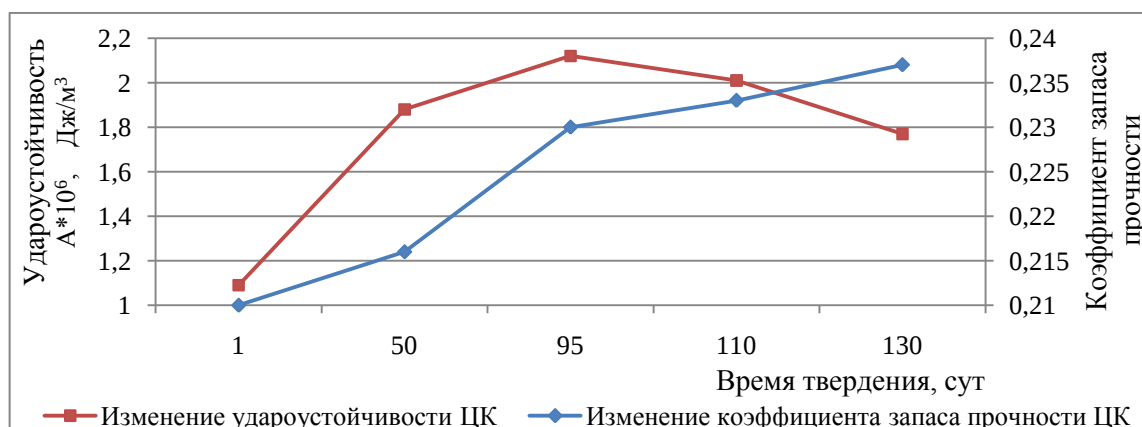
Рис. 2. Схема испытаний образцов цементного камня на сдвиг со сжатием [8]

Экспериментальные исследования цементного камня проводились при температуре выдержки образцов 96°C , в соответствии с результатами геологических исследований для пласта Ю на Лас-Еганском месторождении. Полученные результаты, представлены в табл. 1 и на рис. 3, 4.

Таблица 1

Прочностные и упруго-деформационные характеристики цементного камня

Показатели качества			Температура твердения 96 °С				
			Возраст, сут				
			1	50	95	110	130
Предел прочности, МПа	Изгиб		8	12,5	14,1	14,1	13,9
	Сжатие		38	57,9	61,3	60,5	58,6
	Разрыв		9	11,9	12	11,7	10,4
Модуль Юнга $E \cdot 10^{-3}$, МПа			12,0	18,8	21,1	21,2	20,9
Коэффициент запаса прочности			0,21	0,22	0,232	0,232	0,24
Удароустойчивость $A \cdot 10^6$, Дж/м ³			1,09	1,88	2,12	2,01	1,77
Касательные напряжения τ , МПа	Угол среза, α	30 ⁰	8,1	16,8	23,8	25,7	27,3
		45 ⁰	9,1	18,9	24,9	27,5	29,4
		60 ⁰	9,6	19,9	26	28,9	30,9
Нормальные напряжения σ , МПа		30 ⁰	13,2	24,5	29,9	32,6	35,7
		45 ⁰	9,1	17,9	23,8	27,5	29,4
		60 ⁰	5,5	12,5	13,5	14,2	15,0

**Рис. 3. Изменение прочности на сжатие и Модуля Юнга цементного камня****Рис. 4. Изменения удароустойчивости и коэффициента запаса прочности цементного камня**

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что твердение портландцементного материала за обсадной колонной в условиях высоких температур глубоких скважинах сопровождается снижением прочности. Это связано с термической коррозией, неизбежно сопровождающейся ростом проницаемости цементного камня, и, как следствие, потерей изоляционных свойств. На возможность протекания указанных процессов в продуктах твердения бездобавочного портландцемента, начиная с температуры 75°C , указывал В.С. Данюшевский и др. [4, 5, 10]. При этом отмечалось, что возможны два вида перекристаллизации: внутрифазовая перекристаллизация, сопровождающаяся слиянием и укрупнением мелких кристаллических продуктов твердения; межфазовая перекристаллизация, заключающаяся в растворении термодинамически неустойчивых продуктов твердения и образовании на их основе новых, крупных, более устойчивых соединений. Именно межфазовая перекристаллизация характерна для ПЦТ-I-G при температурах около 100°C , и процессы термической коррозии способны создать в цементном камне напряженное состояние.

Приведенные результаты исследований четко показали и подтвердили выполненные ранее исследования о том, что деструктивные явления, обусловленные термической коррозией, начинают происходить в камне из тампонажного портландцемента ПЦТ-I-G при температуре твердения близкой к 100°C . К сожалению, на практике возможности протекания указанных процессов и их негативным последствиям, не уделяется должного внимания.

В подтверждение гипотезы, о том, что увеличение упруго-деформационных свойств цементного камня за счет понижения его прочностных показателей, можно показать на примере того, что увеличение набора прочности цементного камня практически пропорционально увеличению хрупкости и снижению эластичности.

Для оценки опасности возникающих напряжений в цементном камне на его свойства, необходим критерий предельного механического состояния. В научно-технической литературе существует около 20 гипотез прочности материалов, одни из которых применяются при расчетах, а другие проверяются экспериментально [11].

Следует отметить, что на сегодняшний день не существует универсальной теории прочности для различных материалов. При этом для цементного камня расчет показателей напряженного состояния осложнен тем, что механические свойства, и в частности, соотношения между упругими и пластическими деформациями не являются постоянными, а изменяются в зависимости от давления, температуры, продолжительности нагружения и возраста.

Специалисты по геомеханике считают, что из всех известных гипотез и теорий прочности наиболее достоверно поведение цементного камня описывает теория Мора [12, 13].

Для описания напряженного состояния по теории Мора предлагается строить круговую диаграмму интерпретации результатов экспериментов, суть которой состоит в следующем. Если для нескольких видов напряженного состояния опытным путем определить величины предельных состояний и изобразить их в виде кругов напряжений на совмещенной диаграмме, то все круги будут иметь общую огибающую. Данная обобщенная характеристика материала называется паспортом прочности.

При проведении исследований для получения данных по касательным и нормальным напряжениям применялся метод испытания на срез со сжатием, позволяющий фиксировать плоскость среза и изменять ее положение по отношению к направлению действия внешней силы (угол α), достигая изменение величин нормальных и касательных сил в плоскости среза.

По полученным данным в координатной системе σ, τ строилась зависимость $\tau=f(\sigma)$, являющаяся огибающей к предельным кругам напряжений Мора. Графическое построение паспортов прочности выполнено для $\alpha=30^\circ$ (Рис. 5, 6).

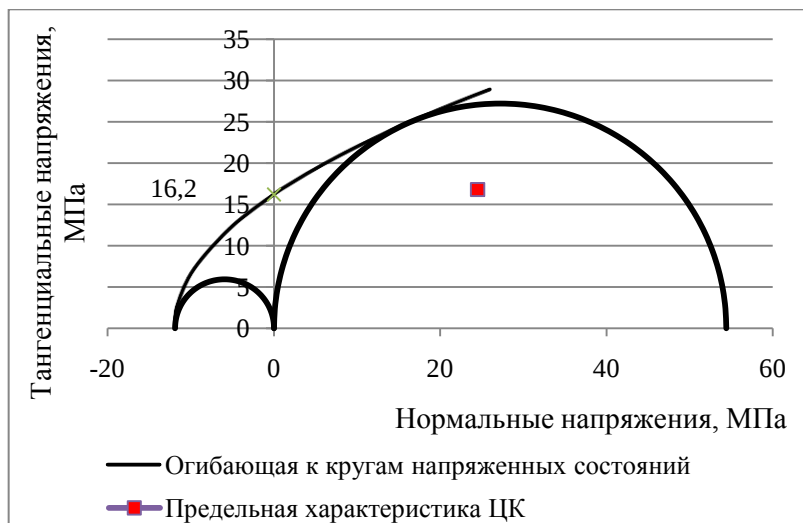


Рис. 5. Паспорт прочности цементного камня в возрасте 50 суток при температуре твердения 96°C .

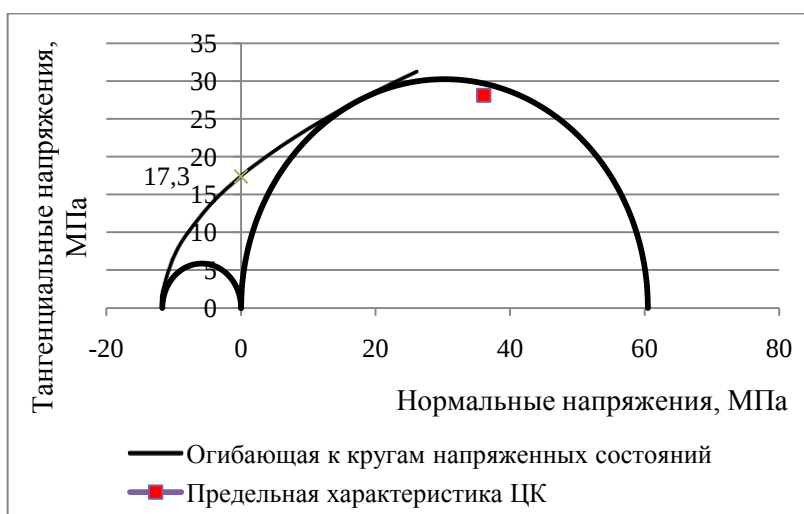


Рис. 6. Паспорт прочности цементного камня в возрасте 110 суток при температуре твердения 96°C .

При построении паспорта прочности цементного камня учитывалось, что предел прочности на растяжение σ_1 при $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ всегда положительный т.е. $\sigma_2 = \sigma_n > 0$, а предел прочности на сжатие σ_3 при $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ всегда отрицательный. $\sigma_2 = \sigma_n < 0$ (σ_n – образец твердого тела находится в предельном состоянии) [12, 13].

Графическая интерпретация условия прочности Мора дает возможность оценивать опасность напряженного состояния. Из рисунка 6 следует, что предельная характеристика цементного камня, находящаяся в непосредственной близости от огибающей, подтверждает возможность разрушения данного материала [12, 13]. Это означает возможность разрушения цементного камня и потерю герметичности крепи при проведении ГРП на данной скважине в указанном возрасте.

Из рис. 5 следует, что проведение ГРП через 50 суток после цементирования кратно снижает вероятность нарушения герметичности крепи. В частности, данные паспорта прочности указывают на способность цементного камня к активному сопротивлению внешним воздействиям в этом возрасте.

На рис. 7 представлены данные по касательным напряжениям τ , ответственным по теории Мора за разрушение образцов цементного камня, в зависимости от возраста. Тангенциальные напряжения с увеличением длительности твердения цементного камня тоже увеличиваются, тем самым демонстрируя снижение способности цементного камня к сопротивлению динамическим воздействиям, что только подтверждает вывод, приведенный нами ранее.

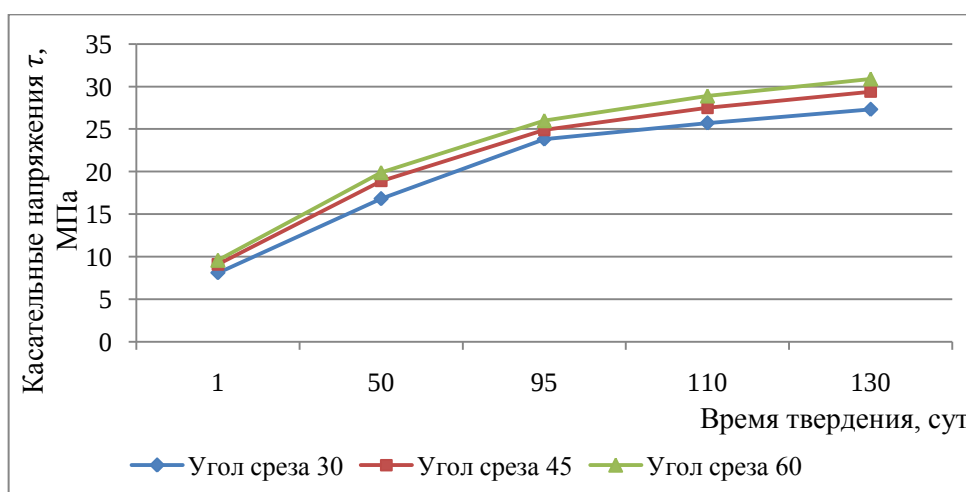


Рис. 7. Изменение касательных напряжений в зависимости от возраста цементного камня

ВЫВОДЫ:

1. Твердение камня из тампонажного портландцемента ПЦТ-I-G при температурах близких к 100⁰С неизбежно приводит к термической коррозии, влекущей за собой снижение упругих и деформационных характеристик.
2. Для предупреждения нарушения герметичности крепи при динамических и ударных воздействиях цементный камень должен быть прочным и упругим на всем сроке эксплуатации скважины.
3. Предложены показатели, необходимые для оценки упруго-деформационных характеристик цементного камня, которые обязательны при проектировании дизайна ГРП.
4. Подтверждена возможность оценки напряжений, возникающих в крепи скважины под воздействием динамических нагрузок путем построения паспорта прочности цементного камня.
5. Полученные результаты позволяют определить наиболее благоприятные сроки проведения технологических операций в скважине [9].

Список литературы

1. Агзамов Ф.А. Результаты расчета нагрузок, возникающих при динамическом и ударном воздействии в обсадной колонне, как обоснование требований к прочности цементного камня / Ф.А. Агзамов, А.О. Белоусов // Нефть. Газ. Новации / №10. 2017. – С. 60-64.
2. Булатов А.И. Формирование и работа цементного камня в скважине. / А.И. Булатов // . – М.: Недра, 1990. -409 с.
3. Толкачев Г. М. Оценка упруго-прочностных свойств цементного камня тампонажного материала, предназначенного для цементирования скважин / Г.М. Толкачев, В. А. Асанов, А. А. Фохт // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 8. – С. 36-40.
4. Данюшевский В.С. Проектирование оптимальных составов тампонажных цементов / В.С. Данюшевский //- М.: Недра, 1978. 293с.
5. Овчинников В.П., Н.А. Аксенова, П.В. Овчинников. Физико-химические процессы твердения, работа в скважине и коррозия цементного камня / В.П. Овчинников,

- Н.А. Аксенова, П.В. Овчинников // Учеб. пособие для ВУЗов. Тюмень: Изд-во «Экспресс», 2008. - 368 с.
6. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. Q.Z. Wang, X. M. Jiaa, S. Q. Kou, Z. X. Zhangb and P.-A. Lindqvistb. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Volume 41, Issue 2, February 2004, Pages 245-253.
 7. Вавилин В.А. Бразильский тест и статический предел прочности / В.А. Вавилин, А.О. Белоусов, Т.Р. Галиев, А.А. Кунакасов, Е.В. Харьков, В.В. Колпаков, Ю.К. Романов, Р.В. Пустошкин // Материалы 5 научно-практической конференции EAGE. Тюмень, 2017.
 8. Определение показателей механических свойств горных пород при простых видах нагружения. Учебно – метод. пособ. Уфа. УГНТУ, 2013. – 17 с.
 9. Самсыкин А.В. Разработка композиционных тампонажных составов повышенной сопротивляемости динамическим воздействиям для сохранения герметичности крепи скважин. / А.В. Самсыкин // Дисс. канд. техн. наук. – Уфа. 2010. – 247 с.
 10. Новохатский Д.Ф. Коррозионная стойкость камня из ШПЦС-120 с добавками КМЦ / Д.Ф. Новохатский, Л.И. Рябова, З.П. Чайко // РНТС. Сер. Бурение. М.: ВНИИОЭНГ, 1976. -Вып. 6. -29 с.
 11. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев // Учеб. для вузов. - 10-е издание, перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. - 592 с.
 12. Ильницкая Е.И., Свойства горных пород и методы их определения. / Е.И. Ильницкая, Р.И.Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш //– М.: Недра, 1969. – 392 с.
 13. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. / А.В. Михалюк // – Киев: Наук.думка, 1980. – 154 с.

Сведения об авторах

Агзамов Фарит Акрамович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация
E-mail: faritag@yandex.ru

Белосов Андрей Олегович, инженер 2 категории, филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени, г. Когалым, Российская Федерация
E-mail: BelousovAO@tmn.lukoil.com

Authors

Agzamov F.A., Dr.Sc, Professor, Oil and Gas Well Drilling Department, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation
E-mail: faritag@yandex.ru

Belousov A.O., KogalymNIPIneft, LUKOIL-Engineering Company in Tyumen, Kogalym, Russian Federation
E-mail: BelousovAO@tmn.lukoil.com

Агзамов Фарит Акрамович
450062, Российская Федерация, Республика Башкортостан
г. Уфа, ул., Космонавтов, 1
Тел.: 8 (347) 242 09 34
E-mail: faritag@yandex.ru