

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2020.1.83-96>

УДК 622.245; 519.6

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В УСЛОВИЯХ БЛИЗКИХ К ВСЕСТОРОННЕМУ СЖАТИЮ

<sup>1</sup>Агзамов Ф.А., <sup>2</sup>Белоусов А.О., <sup>1</sup>Комлев Я.К.

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет

<sup>2</sup>Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмень

## DETERMINATION OF THE CEMENT STONE DYNAMIC STRENGTH UNDER CLOSE TO AN ALL-AROUND COMPRESSION CONDITIONS

<sup>1</sup>F.A. Agzamov, <sup>2</sup>A.O. Belousov, <sup>1</sup>Ya.K. Komlev

<sup>1</sup>Ufa State Petroleum Technological University

<sup>2</sup>KogalymNIPIneft, Branch of LUKOIL-Engineering Company in Tyumen

**E-mail: faritag@yandex.ru**

**Аннотация.** В настоящее время определение прочностных свойств цементного камня производится в соответствии с методикой, установленной ГОСТ 26798.1-96, предусматривающей испытание образцов правильной прямоугольной формы, где основной характеристикой, определяющей прочность материала, являются нормальные напряжения. Этот показатель не может полностью характеризовать сопротивляемость цементного кольца разрушению в скважинных условиях. Представленная в стандарте методика не учитывает тангенциальные (окружные, радиальные) напряжения, возникающие в крепи при проведении технологических операций. Данные обстоятельства требуют разработки специальных методик исследований, а также вспомогательного оборудования, позволяющего адекватно оценить способность цементного кольца сопротивляться возникающим напряжениям в условиях всестороннего сжатия.

**Ключевые слова:** Прочность, цементный камень, напряжения, всестороннее сжатие, деформация.

**Abstract.** Currently, the determination of the strength properties of the cement stone is carried out in accordance with the methodology established by GOST 26798.1-96, which provides for testing samples of regular rectangular shape, where normal stresses are the main characteristic that determines the strength of the material. This indicator cannot fully

characterize the resistance of the cement stone to be fractured in the downhole conditions. The technique presented in the standard does not take into account the tangential (circumferential, radial) stresses that occur in the annulus during technological operations. These circumstances require the development of the special research methods, as well as auxiliary equipment, which makes it possible to adequately assess the ability of a cement stone to resist emerging stresses under conditions of all-around compression.

**Key words:** *Strength, cement stone, stresses, all-around compression, deformation.*

Несмотря на многолетний опыт применения при креплении скважин тампонажных растворов на основе портландцемента, не до конца сформулированы научно обоснованные, подтвержденные промысловыми результатами, требования к его технологическим свойствам, и в первую очередь к прочности формирующегося цементного камня.

По данным научно-технической литературы на крепь скважины действуют нагрузки способные как нарушить герметичность контакта цементного камня с колонной и породой, так и разрушить цементное кольцо [1, 2], в т.ч.:

- динамические и ударные нагрузки при проведении перфорации, работе бурильной колонны при разбуривании моста (стакана), оснастки низа обсадной колонны в процессе углубления или нормализации забоя скважины;
- избыточные внутренние давления, возникающие при опрессовке обсадной колонны на герметичность, а также при проведении гидроразрыва пласта (ГРП).

Проведенный анализ качества цементирования обсадных колонн на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ - Западная Сибирь», показал, что доля сплошного контакта цементного камня с колонной снижается более чем в два раза с 63,1% до 31,7% после разбуривания башмака обсадной колонной и последующего углубления скважины, или нормализации забоя [3].

Для оценки степени негативного воздействия операций по вторичному вскрытию и ГРП на герметичность крепи были

проанализированы результаты определения заколонной циркуляции жидкости, перетоков (ЗКЦ) по материалам промысловых геофизических исследований (ПГИ) (Табл. 1).

Таблица 1

*Причины заколонной циркуляции по месторождениям Западной Сибири*

Год	Кол-во исследованных скважин	Кол-во случаев ЗКЦ	Причина	
			Отсутствие литологической перемычки в пласте, шт., (%)	Перфорация, ГРП шт., (%)
2014	199	65	13 (20%)	50 (77 %)
2015	274	84	22 (26%)	60 (71 %)
2016	265	59	10 (17%)	49 (83 %)
2017	127	26	4 (15%)	22 (85 %)
2018	120	21	8 (38%)	13 (62 %)

Из таблицы видно, что основной причиной отмечаемых случаев ЗКЦ является проведение перфорации и ГРП, в среднем более 75 %. Менее значимой причиной (23 %) отмечаемых случаев ЗКЦ, приходится на геологические причины; оставшаяся часть (2 %), связывается с браками при цементировании.

На основании представленных промысловых данных, с большой степенью достоверности можно утверждать, что прочность цементного камня, применяемого для изоляции продуктивных интервалов, и литологических перемычек в интервале развития трещины ГРП не всегда достаточна для сопротивления действующим нагрузкам. В связи с этим, актуален вопрос адресного подбора тампонажных материалов под ожидаемые условия нагружения крепи скважины.

Ранее нами был представлен расчет нагрузок, действующих на цементное кольцо и определены требования к прочности на сжатие цементного камня, располагаемого в нижнем (продуктивном интервале) затрубного пространства скважин для месторождений Западной Сибири, представленные в табл. 2 [3].

Таблица 2

**Требования к прочности на сжатие цементного камня**

Проведение ГРП	Время проведения опрессовки обсадной колонны	Глубина скважины по вертикали, м				
		1800 - 2050	2050 - 2300	2300 - 2550	2550 - 2800	2800 - 3050
Прочность на сжатие, МПа						
Обсадные колонны диаметром 102 мм - 127 мм						
Нет	после ОЗЦ*	23,8	28,8	33,8	36,2	38,2
Да	**	33,2	40,2	47,2	51,3	55,6
Обсадные колонны диаметром 127 мм - 146 мм						
Нет	после ОЗЦ*	34,1	41,1	48,2	51,5	54,5
Да	**	41,6	50,5	59,2	63,4	66,8
Обсадные колонны диаметром 146 мм - 178 мм						
Нет	после ОЗЦ*	37,1	44,9	52,7	57,3	61,6
Да	**	47,5	57,6	67,6	73,5	78,9

Примечания к таблице 2: \* - ОЗЦ – ожидание затвердевания цемента;

\*\* - время между окончанием цементирования и проведением ГРП (в среднем составляет от 70 до 110 сут);

В настоящее время при испытании тампонажных материалов для крепления скважин руководствуются стандартом ГОСТ 26798.1-96, устанавливающим оценку прочности цементного камня по испытанию образцов балок на изгиб и сжатие в условиях одноосного воздействия [4].

В тоже время, известно, что на цементное кольцо в скважине работает в условиях всестороннего сжатия, и на него в значительной степени действуют динамические нагрузки [5]:

$$\sigma_{\text{дин}} = \frac{H}{E} \sigma_{\text{ст}} \quad , \quad (1)$$

где: H – модуль мгновенных деформаций;

E – модуль длительных деформаций;

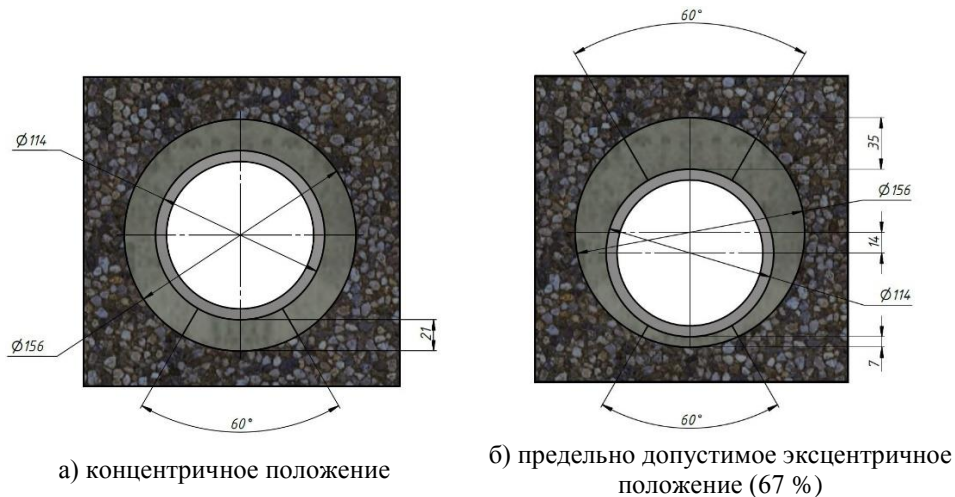
$\sigma_{\text{ст}}$  – статическая прочность, МПа.

Следовательно, прочность цементного камня, определенная при статическом приложении нагрузки, не может полностью характеризовать сопротивляемость цементного кольца разрушению в условиях

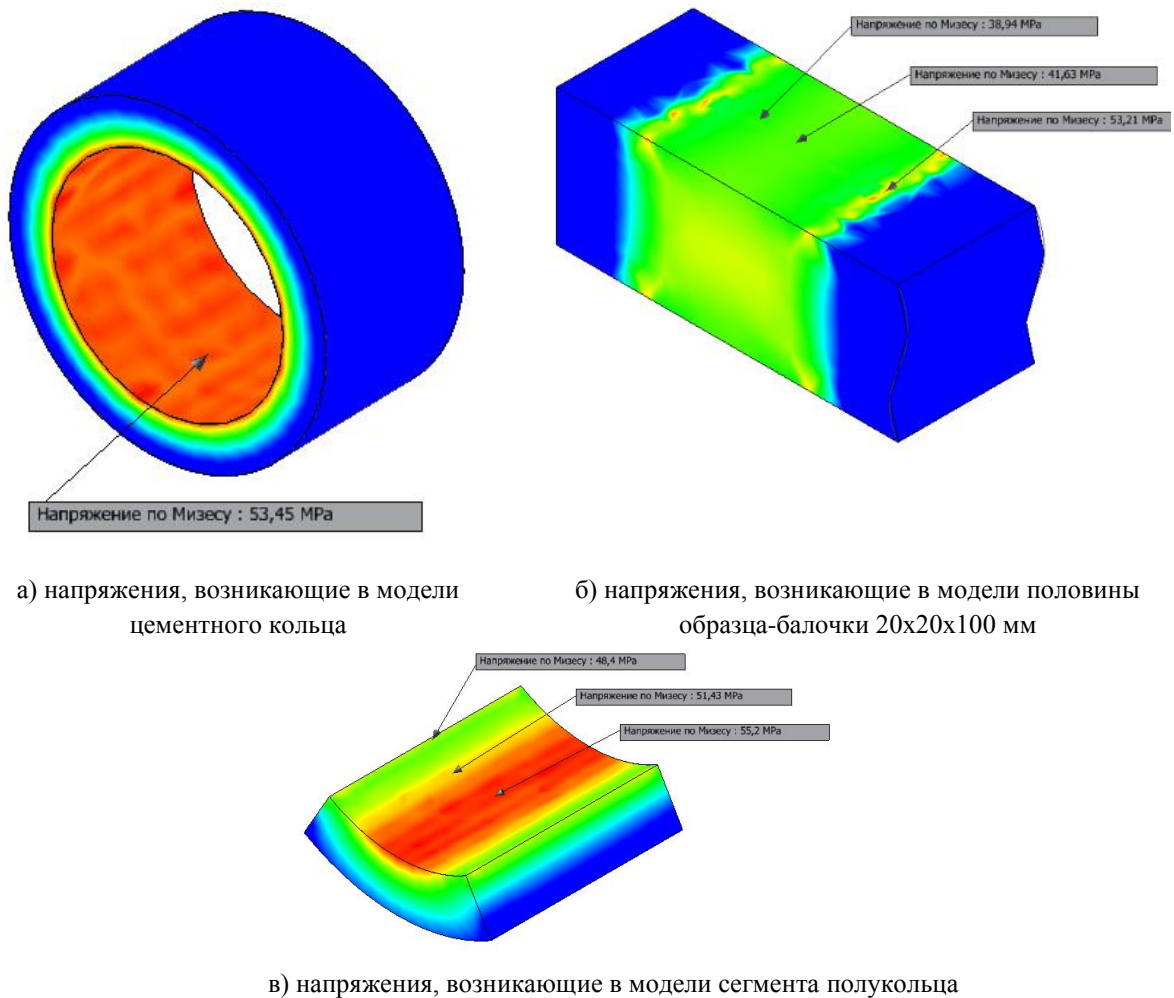
всестороннего сжатия. Данные обстоятельства требуют разработки специальных методик исследований и вспомогательного оборудования, позволяющего адекватно оценить способность цементного кольца противостоять возникающим напряжениям.

Моделирование напряжений, возникающие при различных динамических воздействиях и положениях цементного кольца за обсадной колонной, с использованием цифрового двойника крепи скважины, позволило определить пути оценки динамической прочности цементного камня. Наиболее эффективным инструментом оценки напряжений в теле цементного камня и возникающих деформаций в системе «обсадная колонна – цементный камень», является использование алгоритмов основанных на методе конечных элементов (МКЭ) [6]. В частности, нами был использован пакет прикладных программ Inventor Professional, который способен производить оценку напряжений и деформаций цементного камня, возникающих при динамических нагрузках по Мизесу [7].

Для оценки нагружения цементного камня в условиях, идентичных реальным, перспективным является проведение испытаний на сопротивляемость на цементном камне (кольце) с реальными габаритами (Рис. 1). Расчет был выполнен для модели с наружным диаметром хвостовика 114 мм; толщиной труб 7,4 мм и наружным диаметром цементного кольца, соответствующим номинальному диаметру долота – 156 мм (как один из перспективных методов заканчивания ГС под гидравлический разрыв пласта (ГРП)) [7, 8]. Полученные значения возникающих в теле цементного кольца напряжений сопоставлены с напряжениями возникающих при сжатии балок 20x20x100 мм [4], а также на модели сегмента кольца (прототипа испытательного стенда) (Рис. 2).



**Рис. 1. Геометрические размеры испытываемых сегментов цементных колец в зависимости от положения обсадной колонны в стволе скважины**



**Рис. 2. Моделирование нагружения с использованием МКЭ**

Результаты проведенного моделирования показали, что центральная часть сегмента кольца имеет более равномерное нагружение, и более точно

описывает реальные воздействия на цементный камень за обсадной колонной при перфорации, ГРП. Характер распределения напряжений по телу камня в такой модели сходен с их распределением в образце кольцевой формы. Согласно полученным результатам, напряжения, возникающие в центральной части такой модели (секторе кольца  $60^\circ$ ), отличаются от напряжений в скважинных условиях не более 5 %, тогда как отклонение полученные по испытаниям на формах  $20 \times 20 \times 100$  мм может достигать 30 % (Рис. 2). С учетом приемлемой погрешности ( $< 5$  %) габариты модели были ограничены сектором  $60^\circ$  [9]. Необходимо при этом отметить, что величина погрешности эффекта всестороннего сжатия будет изменяться прямо пропорционально изменению сектора, либо поперечных размеров образцов.

Полученные результаты показали перспективность проведения испытаний на полукольце цементного камня, имеющего реальные габариты, для оценки нагружения цементного камня в реальных скважинных условиях. Для этих целей была разработана специальная методика проведения испытаний на сжатие образцов камня в форме кольцевых сегментов.

Для примера на рис. 3 представлен комплект форм для изготовления сегментов цементных полуколец различной толщины. Верхний прижим имитирует корпус обсадной колонны, нижний прижим имитирует горную породу [9].

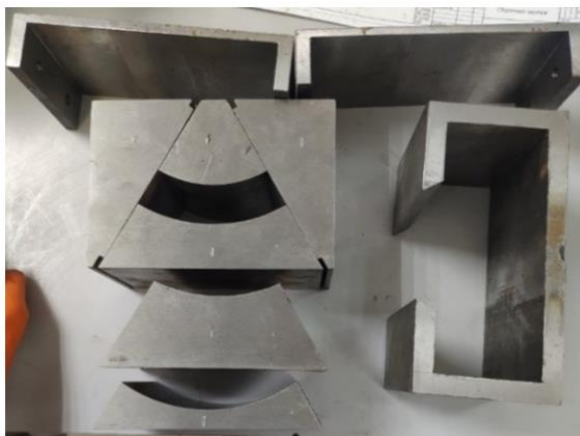
Прочность на сжатие сегментов цементных полуколец  $R_{сж}$  (МПа) определяется по формуле:

$$R_{сж} = \frac{F}{S} = 0,21 * F * 10^{-3} \quad (2)$$

где  $F$  – разрушающая нагрузка, Н;

$S$  – площадь поверхности верхнего прижима,  $\text{мм}^2$ .

Пример испытания на сжатие сегмента цементного полукольца толщиной 35 мм представлен на рис. 4.



*Рис. 3. Формы для изготовления сегментов цементных полуколец*



*Рис. 4. Испытание сегмента цементного полукольца на сжатие*

Методика также учитывает и тот факт, что при выполнении ряда технологических операций (разбуривание цементного стакана, проведение перфорации и т.п.) сдвигающее усилие может прикладываться к определенному сегменту цементного кольца, тогда как в других направлениях цементный камень может испытывать противоположные по вектору действия нагрузки. В таких случаях отдельные участки цементного кольца будут работать на изгиб (Рис. 5), для моделирования такого воздействия на полученных сегментах цементного кольца можно выполнить соответствующие испытания (расчетная схема представлена на рис. 6).

Прочность на изгиб сегмента цементного полукольца  $R_{\text{изг}}$  (МПа) определяется по формуле:



$$R_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{max}}}{W} = \frac{F \times L}{4 \times W} \quad (3)$$

где  $M_{\text{max}}$  – максимальный момент в сечении, Н × м;

$F$  – разрушающая нагрузка, Н;

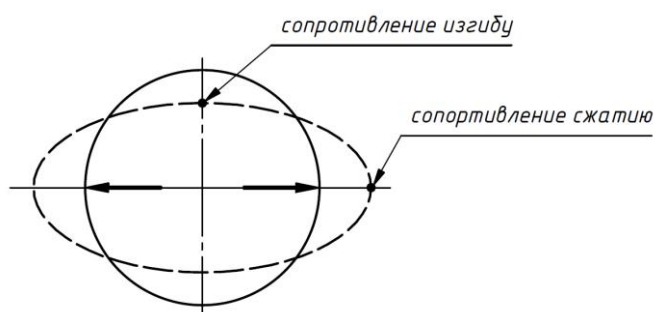
$L$  – расстояние между опорами, мм;

$W$  – момент сопротивления сечения, мм<sup>3</sup>:

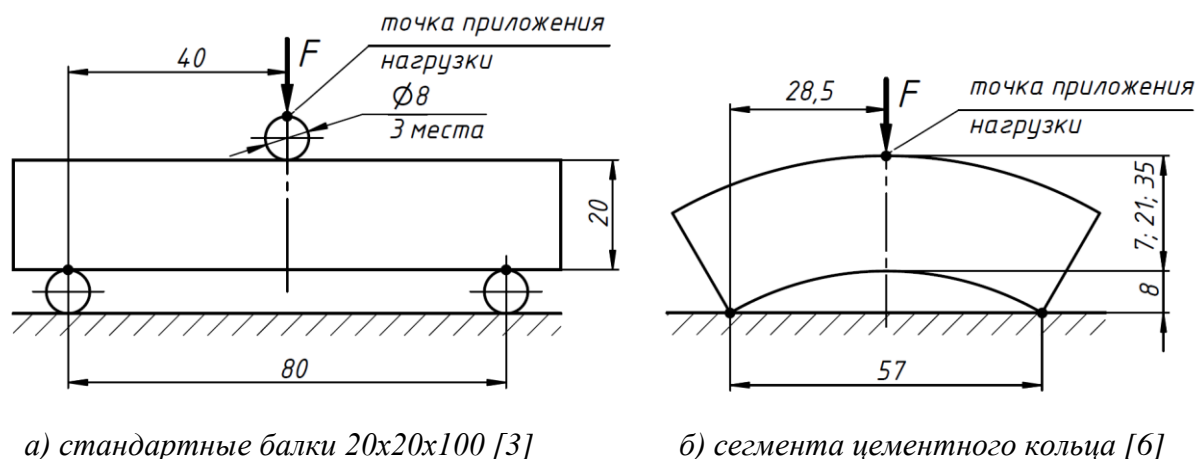
$$W = \frac{b \times h^2}{6} \quad (4)$$

где  $b$  – длина сечения (сегмента), мм;

$h$  – высота сечения (толщина сегмента), мм.



**Рис. 5. Схема работы кольца цементного камня на изгиб**



**Рис. 6. Схема расчета образцов цементного камня на изгиб**

Следовательно, прочность на изгиб для фрагментов изготовленных цементных полуколец определяется по формулам:

- для сегмента толщиной 7 мм  $R_{\text{изг}} = \frac{3 \times F \times L}{2 \times b \times h^2} = 0,0218 \times F$  (5)

- для сегмента толщиной 21 мм  $R_{\text{изг}} = 0,0024 \times F$  (6)

- для сегмента толщиной 35 мм  $R_{\text{изг}} = 0,0009 \times F$  (7)

Для оценки портландцементного камня соответствии предъявляемым требованиям к прочности, проведены исследования применяющихся рецептур тампонажных смесей по разработанной и действующей методике, представленные в табл. 3. Визуальное разрушение образцов сегментов полуколец цементного камня представлено на рис. 7.

Таблица 3

**Результаты испытаний цементного камня по различным методикам**

Методика оценки	Форма для испытания	Время твердения, сут				
		1	7	28	60	90
		Прочность на изгиб/сжатие, МПа				
Разработанная	Образец 35 мм	8,9/38,9	12,1/50,4	14,8/97,3	16,2/106,3	16,9/110
	Образец 21 мм	6,1/54,5	7,6/73,4	9,8/109,6	10,6/118,9	11,5/124,3
	Образец 7 мм	4,3/50,4	5,6/180,6	6,4/ более 218,4*	6,6/более 218,4*	6,8/ более 218,4*
Стандартная [4]	20x20x100 мм	5,7/26,5	8,2/35,9	10,2/46,5	10,4/48,8	10,5/49,0

Примечания к табл. 3:\* - предельная паспортная характеристика испытательного пресса



а) образец толщиной 21 мм



б) образец толщиной 7 мм

**Рис. 7. Образцы сегментов полуколец после испытаний**

Стендовые исследования (Рис. 7) показали, что кроме деформации на местах контакта с колонной и породой в цементном камне также формируются, единичные или по всему камню, крупные радиальные трещины.

Поскольку методикой не предусмотрено наличие сжимающих усилий на боковые поверхности образцов (границы) в процессе нагружения сегментов полуколец, сегменты с большей толщиной стенок разрушаются

в условиях, близких к одноосному сжатию. Образцы, в которых ширина и длина полуколец существенно выше ее толщины (тонких полукольцах с толщиной стенки цементного камня 7 мм), площадь боковых граней кратно меньше, вследствие чего условия нагружения центральной части таких образцов максимально приближены к условиям всестороннего сжатия – на этих сегментах получено максимальное сопротивление сжатию. Следует отметить, что период определения предела прочности для секторов данного размера был ограничен одним месяцем из-за возможностей испытательного пресса.

### **Выводы**

1. Подтверждена рабочая гипотеза, что цементный камень, находясь в условиях всестороннего сжатия при динамическом воздействии (перфорации, ГРП и т.п.), в скважинных условиях имеет более высокие характеристики сопротивления, чем в условиях одноосного сжатия. При моделировании процессов нагружения крепи скважины с использованием цифровых двойников цементного кольца, необходимо учитывать значения сопротивляемости, полученные на тонких полукольцах по предложенной в работе методике испытаний;
2. При выполнении экспериментальных исследований полуколец цементного камня были получены новые сведения по механизму и характеру разрушения. После достижения максимального предела прочности обычный портландцементный камень растрескивается практически повсеместно (хрупко), при этом трещины имеют радиальное расположение;
3. С использованием предложенной методики напряжения в сжимаемом цементном камне получаются больше, чем при использовании стандартных методик одноосного сжатия, что подтверждает ранее полученные с использованием МКЭ результаты моделирования и

объясняется сопротивлением цемента разрушению в условиях, приближенных к всестороннему сжатию;

4. Предложенный метод определения прочности на сжатие цементного камня более точно воспроизводит скважинные условия нагружения крепи, позволяет оценить не только величину динамической прочности, но и характер разрушения (хрупкости) цементного кольца;
5. Установлено, что прочность цементного камня в условиях всестороннего сжатия удовлетворяет расчетным требованиям и имеет большой коэффициент запаса до нарушения целостности. В связи с этим, для предупреждения разрушения цементного камня за обсадной колонной при проведении технологических операций теряется целесообразность создания высокопрочных тампонажных составов.

#### Список литературы

1. Самсыкин А.В. Разработка композиционных тампонажных составов повышенной сопротивляемости динамическим воздействиям для сохранения герметичности крепи скважин. Дисс. канд. техн. наук. – Уфа. 2010. – 247 с.
2. Тихонов, М.А. Совершенствование фиброармированных тампонажных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.15 / Тихонов Михаил Алексеевич. – Уфа: УГНТУ, 2013.- 24 с.
3. 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.
4. ГОСТ 26798.1-96. Цементы тампонажные. Методы испытаний. –Москва:1998. – 22 с.
5. Булатов А.И. Формирование и работа цементного камня в скважине. / А.И. Булатов // – М.: Недра, 1990. - 409 с.
6. Моделирование динамических воздействий на крепь скважины с применением метода конечных элементов. Агзамов Ф.А., Самсыкин А.В., Губайдуллин И.М., Тихонов М.А. и др. Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9. № 4. С. 18-24
7. Агзамов Ф.А. Обоснование методики оценки опасных напряжений в теле цементного камня при проведении технологических операций в скважине / Ф.А. Агзамов, А.О. Белоусов: Нефтяная провинция № 4 (16) 2018. – С. 225-239.
8. Агзамов Ф.А. Комплексный подход к предупреждению нарушения герметичности затрубного пространства скважин при вторичном вскрытии и ГРП / Ф.А. Агзамов, А.О. Белоусов: Нефтяная провинция № 1(17) 2019. – С. 197-214.
9. Бакиров Д.Л. Методика определения хрупкости цементного камня в кольцевом

- пространстве скважин // Д.Л. Бакиров, В.А. Бурдыга, М.М. Фаттахов, Г.Н. Грицай, А.О. Белоусов, В.В. Антонов, И.В. Семакина: Нефтепромысловое дело № 2. 2020.
10. Хациди А.К. Об обосновании новой методики оценки качества цементирования нефтяных и газовых скважин // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2019. - № 4. – С.31-33
  11. Николаев Н.И., Усманов Р.А., Табатабаи Моради С.Ш., и др. Разработка составов и исследование свойств тампонажных смесей для повышения качества вторичного вскрытия продуктивных пластов. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое дело. – 2017. Т.16, №4. – С.321-330

### References

1. Samsykin A.V. Development of composite tampon compositions of increased resistance to dynamic impacts to preserve the tightness of well screws. Dics. It's not a Tech. Sciences. Ufa. 2010. - 247 p.
2. Tikhonov, M.A. Improving fibroarmed tampon materials: autoref. Dis. ... It's not a Tech. Sciences: 25.00.15 / Tikhonov Mikhail Alekseevich. - Ufa: UGNTU, 2013.-24 p.
3. Agzamov F.A. Results of calculating the loads arising from dynamic and shock impact in a casing column as a justification for the requirements for the strength of cement stone / F.A. Agzamov, A.O. Belousov: Oil. Gas. Innovation No 10. 2017. - P. 60-64.
4. GOST 26798.1-96. Cements are tampon-important. Testing methods. Moscow: 1998. 22 p.
5. Bulatov A.I. Formation and work of cement stone in the well. / A.I. Bulatov //. - M.: Nedra, 1990. - 409 p.
6. Simulation of dynamic impacts on well strongest using the end elements method. Agzamov F.A., Samsykin A.V., Gubaidullin I.M., Tikhonov M.A., etc. Oil and gas. 2011. T. 9. No 4. P. 18-24.
7. Agzamov F.A. Justification of the method of assessing dangerous stresses in the body of cement stone during technological operations in the well / F.A. Agzamov, A.O. Belousov: Oil Province No. 4 (16) 2018. P. 225-239. DOI 10.25689/NP.2018.4.225-239
8. Agzamov F.A. Integrated approach to prevention of behind-the-casing leaks during and completion and hydraulic fracturing operations / F.A. Agzamov, A.O. Belousov: Oil Province No. 1 (17) 2019. P. 197-214. DOI 10.25689/NP.2019.1.197-214
9. Bakirov D.L. Techniques for determining the fragility of cement stone in the ring space of wells / D.L. Bakirov, V.A. Burdyga, M.M. Fattakhov, G.N. Gritsai, A.O. Belousov, V.V. Antonov, I.V. Semakina: Oil field no. 2 2020.
10. Hacidi A.K. On the basis of the new methodology for assessing the quality of cementing oil and gas wells / Construction of oil and gas wells on land and at sea. – 2019. - No 4. - P. 31-33
11. Nikolaev N.I., Usmanov R.A., Tabatabai Moradi S.S., et al. Development of compositions and study of the properties of tampon mixtures to improve the quality of secondary opening of productive layers. Herald of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas. – 2017. T.16, No.4. - P.321-330

**Сведения об авторах**

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

*Белусов Андрей Олегович*, инженер 1 категории, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени, Российская Федерация  
E-mail: BelousovAO@tmn.lukoil.com

*Комлев Ян Константинович*, студент, кафедра «Бурение нефтяных и газовых скважин», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Республика Башкортостан, Российская Федерация  
E-mail: faritag@yandex.ru

**Authors**

*F.A. Agzamon*, DSc (Engineering), Professor, Department of Oil and Gas Wells Drilling, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation  
E-mail: faritag@yandex.ru

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

*Ya.K. Komlev*, Student, Department of Oil and Gas Wells Drilling, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation  
E-mail: faritag@yandex.ru

**Агзамов Фарит Акрамович**  
**450062, Российская Федерация, Республика Башкортостан**  
**г.Уфа, ул. Космонавтов, 1**  
**Тел. +7-917-343-1810**  
**E-mail: faritag@yandex.ru**