

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СВОЙСТВАМ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

EVALUATING IMPACT LOAD FOR CEMENT STONE SPECIFICATIONS

**А.В. Самсыкин, А.Ф. Галиев,
Ф.А. Агзамов, М.А. Тихонов,
Ф.У. Еникеев, А.В. Самсыкина**

**ООО «БашНИПИнефть»;
ФГБОУ ВПО Уфимский
государственный нефтяной
технический университет;
ООО НПП «Буринтех»**

**A.V. Samsykin, A.F. Galiev,
F.A. Agzamov, M.A. Tikhonov,
F.U. Enikeev, A.V. Samsykina**

**BashNIPIneft LLC;
FSBEI Ufa state petroleum
technical university
NPP Burintekh LLC**

На основе МКЭ с помощью пакета прикладных программ «ANSYS» проведена оценка воздействия динамических нагрузок, возникающих в результате проведения различных технологических операций в скважине, на крепь скважины. Также показано, что оценка опасности напряжений в крепи скважины, возникающих в результате динамического воздействия, возможна путем построения паспорта прочности цементного камня на основе теории Мора. В качестве возможного решения проблемы сохранения целостности крепи предлагается армирование цементного камня волокнистыми наполнителями согласно принципу композиции.

The paper describes the ANSYS-assisted FEM evaluation of the impact load on well support created during various well interventions. The study also demonstrates that the hazards evaluation of stresses in the well support, which result from dynamic loads, can be carried out with the help of Mohr strength certificate for a cement stone. Cement stone fiber reinforcement accordance with the composition principle is proposed as one of the possible solutions to the problem of well support integrity maintaining.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, напряжение, деформация, цементный камень, паспорт прочности, волокнистые наполнители

Keywords: dynamic load, stress, deformation, cement stone, passport to safety, fibrous fillers

Практика крепления скважин показывает, что цементный камень, обеспечивающий герметичность крепи, является наиболее слабым звеном и может легко разрушаться под воздействием различных нагрузок. В наибольшей степени нарушения целостности крепи проявляются в процессе динамических воздействий.

Анализ факторов показал, что наиболее существенными динамическими нагрузками, приводящими к нарушению крепи, являются нагрузки при кумулятивной перфорации, гидравлическом разрыве пласта (ГРП), опрессовке обсадных колонн и механическом бурении с целью углубления, объединенные в общую группу по признаку кратковременности процесса, а также как источники создания значительных напряжений (до 400 МПа) и деформаций, способствующих разрушению в точке их приложения [1].

Наиболее эффективным современным средством оценки напряжений и деформаций, возникающих в результате воздействия динамических нагрузок на тело, является использование метода конечных элементов (МКЭ) [2,3].

Сущность МКЭ состоит в аппроксимации исследуемого тела некоторой моделью, которая представляет собой совокупность элементов с конечным числом степеней свободы. Эти элементы взаимосвязаны только в узловых точках, куда прикладываются

фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов. Параметры приведенной идеализированной системы определяются исходя из соответствующих вариационных решений [2].

В настоящее время на основе МКЭ существует достаточно много программных продуктов, решающих самые разнообразные задачи, в частности, пакет прикладных программ ANSYS, являющийся наиболее распространенным средством для научных и инженерных расчетов. Особенностью ANSYS является чрезвычайно широкий спектр задач, которые он в состоянии решать, в том числе и задачи по оценке напряжений и деформаций цементного камня, возникающих при воздействии различных динамических нагрузок.

Таблица 1. Параметры для оценки динамических нагрузок

Параметр	Значение
диаметр скважины, м	0,216
диаметр обсадной колонны, м	0,114
толщина цементного кольца, м	0,051
модуль упругости стали, МПа	$2,1 \times 10^5$
коэффициент Пуассона стали	0,25
предел текучести стали, МПа	$1,27 \times 10^3$
модуль упругости цементного камня, МПа	$0,2 \times 10^5$
коэффициент Пуассона цементного камня	0,17
предел прочности цементного камня, МПа	1,4

Для проведения графической интерпретации динамических нагрузок МКЭ выбран пакет прикладных программ ANSYS 5.7 ED. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Расчеты строились по схеме, представленной на рисунке 1.

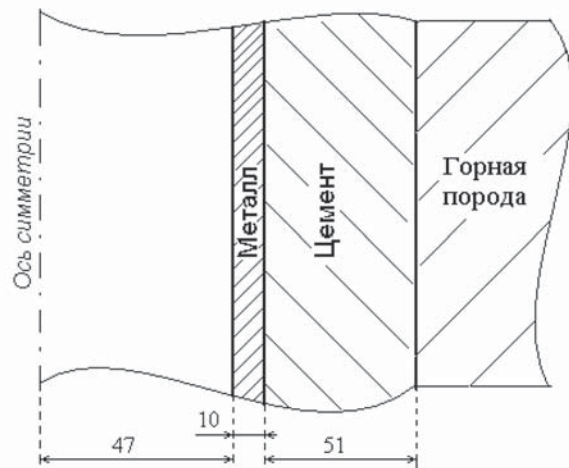


Рисунок 1. Схема оценки влияния динамических нагрузок на крепь скважины

Ниже, в качестве примера, представлена часть полученных результатов оценки влияния динамических воздействий при кумулятивной перфорации и ГРП на обсадную колонну и цементный камень за ней (рисунок 2-3).

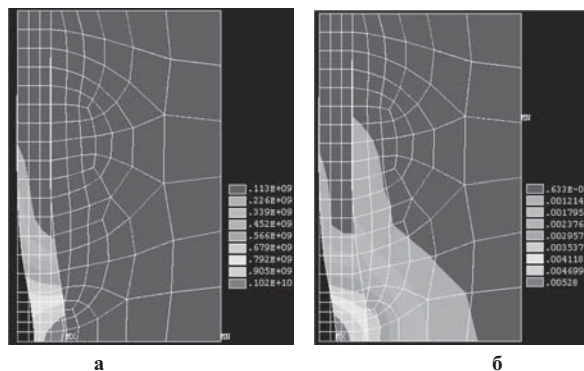


Рисунок 2. Распределение а) напряжений, б) деформации при кумулятивной перфорации

Оценка результатов воздействия нагрузок на крепь скважины от выбранных технологических операций, проведенная МКЭ на основе пакета прикладных программ «ANSYS», убедительно показала, что крепь в зоне приложения динамического воздействия испытывает высокие значения напряжений, существенно превышающие значения предела прочности цементного камня на растяжение, под действием которых происходит образование трещин и нарушение целостности крепи. Как видно из рисунка 2-3, значения возникающих напряжений достаточно высоки, а значения деформации, напротив, невелики. Так, например, в процессе проведения перфорационных работ при создании в

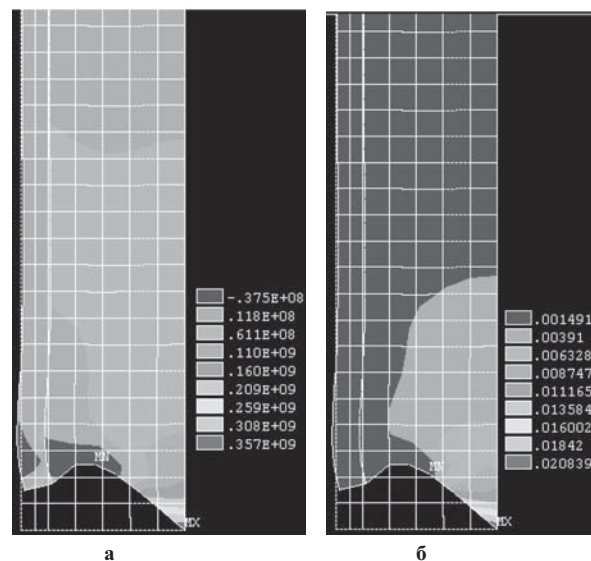


Рисунок 3. Распределение а) напряжений, б) деформации при ГРП

интервале перфорации давления в 300 МПа значения напряжений варьируются в пределах от $0,11 \cdot 10^3$ МПа до $1 \cdot 10^3$ МПа, при значениях деформации от $0,63 \cdot 10^{-3}$ до 0,05. В процессе ГРП значения напряжений изменяются в пределах от $0,38 \cdot 10^2$ МПа до $3,5 \cdot 10^2$ МПа, при изменении значений деформации от $1 \cdot 10^{-3}$ до 0,02. Подобная картина наблюдается и в остальных двух рассматриваемых случаях – высокие значения напряжений при практически нулевой деформации. Также при проведении той или иной технологической операции существенное значение имеет размер зоны воздействия динамической нагрузки. Если размер зоны воздействия сопоставим с толщиной стенки обсадной колонны (10 мм) (случай кумулятивной перфорации), то происходит выпучивание колонны. Если же размер очага деформации существенно превышает толщину стенки (случай опрессовки и роторного бурения), то происходит срез крепи скважины. К сожалению, цементный камень, основой которого является традиционный тампонажный портландцемент, по мере формирования характеризуется одновременно увеличением предела прочности и повышением хрупкости, что в свою очередь снижает его удароустойчивость, а также повышает его предрасположенность к трещинообразованию. Поэтому технологические операции, сопровождающиеся динамическими нагрузками, следует проводить лишь тогда, когда цементный камень наберет достаточную удароустойчивость и эластичность, чтобы противостоять возникновению трещин в крепи скважины.

Одним из возможных способов оценки опасности возникающих при проведении различных технологических операций напряжений является построение паспорта прочности цементного камня на основе теории Мора.

Теория прочности Мора (предельных напряженных состояний) носит довольно общий характер, поскольку она учитывает и переход материала в пластическое состояние, и возможность хрупкого разрушения путем отрыва или скола, а также определяет различие в сопротивлении материала растяжению и сжатию [4].

В теории Мора, экспериментально проверенной Карманом, постулируется, что ответственными за разрушение материала являются касательные напряжения, а само разрушение носит характер сдвига по площадкам, на которых достигается предельное состояние, причем величина предельного касательного напряжения является функцией нормального напряжения, действующего на площадке скольжения.

Графическая интерпретация теории прочности Мора чрезвычайно наглядна и дает возможность оценивать опасность того или иного напряженного состояния простым вписанием предельного круга этого состояния в диаграмму. Если круг исследуемого состояния пересекает огибающую, такая комбинация напряжений вызовет разрушение, если он располагается под огибающей, состояние разрушения еще не достигнуто [4].

Для хрупких материалов, коим является и цемент, предельные напряжения равны пределам прочности, т.е. σ_1 есть предел прочности на растяжение σ_r , а σ_3 – предел прочности на сжатие $\sigma_{сж}$. При этом условие прочности по гипотезе Мора имеет вид

$$\sigma_{экр} = \sigma_1 - m\sigma_3 \leq \sigma_{adm}^p, \quad (1)$$

где $\sigma_{экр}$ — эквивалентное напряжение, т.е. такое напряжение, которое следует создать в растянутом образце, чтобы его состояние было равноопасно с

заданным напряженным состоянием; $m = \frac{\sigma_r}{\sigma_{сж}}$ — отношение предельного напряжения при растяжении к предельному напряжению при сжатии, коэффициент запаса; σ_{adm}^p — допускаемое значение нормального напряжения, принимаемое для одноосного растяжения.

Огибающая к предельным кругам напряжений достаточно полно характеризует прочностные свойства цементного камня. Испытания, с помощью которых устанавливается прочность крепи, называют паспортом прочности.

Для динамических испытаний величины σ_1 и σ_3 определяются как эффективные напряжения в соответствии с принципом Терцаги:

$$\sigma_i^*(t) = \sigma_i(t) - p_n(t), \quad (2)$$

где $p_n(t)$ — поровое давление в процессе импульсного нагружения.

Для построения паспорта прочности различных образцов цементного камня использовался метод

среза со сжатием. Как известно, цементный камень способен испытывать различные виды деформации, связанные с технологическими операциями в скважине. В ряде случаев наиболее опасным типом деформации цементного камня является сдвиг (рисунок 4,а), вызываемый одновременным действием нормальных напряжений в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Из работы [4] известно, что показатели механических свойств цементного камня при сдвиге определяются в процессе испытаний на срез. Из тех же источников установлено, что метод среза со сжатием является наиболее точным методом, определяющим прочностные свойства цементного камня за обсадной колонной в случае сдвига.



Рисунок 4. Механизм возникновения среза в цементном камне: а) общий вид; б) выделенный фрагмент цементного камня; Р — давление, создающее динамическую нагрузку, σ — нормальные напряжения, создающие одновременное растяжение и сжатие по двум взаимно перпендикулярным направлениям, τ — касательные напряжения сдвига, ОА и ОВ — зоны возможного возникновения среза

Экспериментальные данные по срезу [4] показывают, что напряженное состояние образца в момент разрушения известно достаточно точно, а огибающая к предельным кругам проводится с приемлемой погрешностью. Паспорт прочности, построенный по данному методу, близок к истинному. Этим методом и следует пользоваться во всех случаях, когда необходимо получить действительный паспорт прочности какого-либо материала и, в частности, цементного камня.

Возможным решением проблемы сохранения целостности и герметичности крепи скважины является использование в цементном растворе различных наполнителей согласно принципу композиции. Принцип композиции позволяет в результате совместного использования различных (недостающих у каждого компонента) свойств каждой фазы обеспечить высокое сопротивление тела разрушающему воздействию и тем самым существенно повысить качество композита.

При выборе материала наполнителей, используемых для армирования цементного камня, необходимо учитывать, что для достижения максимального упрочняющего эффекта более прочный компонент должен играть роль усиливающей структуры. Для этого необходимо, чтобы упрочняю-

щие элементы имели достаточную длину, чтобы выступать в качестве арматуры. Естественно, что в этом случае наиболее выгодной формой использования армирующей фазы является тонкое волокно, а из общего числа армирующих добавок – волокнистые. В работе [5] показано, что существует определенная критическая длина волокна, ниже которой упрочняющий эффект падает. Эта длина зависит от прочности матрицы и волокна, степени адгезии на поверхности матрицы, и приблизительно в 20 раз больше диаметра волокна.

При армировании материалов волокнами свойства композиции определяются одновременной работой составляющих ее фаз. Работа композита зависит от степени сцепления арматуры и матрицы, что, в основном, и обеспечивает равномерную передачу и распределение прикладываемого усилия по всему объему, и совместную деформацию компонентов как единого целого. Иными словами, от композита требуется, чтобы достаточная механическая прочность сочеталась с деформационной устойчивостью, т.е. с его способностью надежно противостоять возникновению и развитию необратимых деформаций или появлению и росту трещин [6].

Деформационная устойчивость проявляется в затухающем характере деформационных процессов, в релаксационной способности материала, с повышением которой более интенсивно снимаются напряжения, возникающие под влиянием внешних и внутренних факторов. Наиболее деформационно-устойчивыми являются те конгломераты, которые характеризуются высокими значениями упругих и упругоэластических деформаций в области определенного интервала и реального перепада температур, в которых работает материал [6]. Упругоэластические деформации характеризуются показателем эластичности, под которым понимается процентная доля спадающей деформации за определенные периоды времени после разгрузки образца, находящегося под воздействием нагрузки, равной по величине предельному напряжению сдвига или какой-либо силовой нагрузке. Показатель эластичности выражается величиной

$$I_{\tau} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}}, \quad (3)$$

где ε_0 - деформация сдвига, возникшая за время τ_0 под нагрузкой; ε_{τ} - деформация, оставшаяся после упругоэластического восстановления в течение выбранного периода времени τ , когда нагрузка снята.

Повышение прочности композитов при дисперсном армировании обусловлено тем, что волокна, свободно ориентируясь, и при равномерном распределении в матрице могут воспринимать усилия практически любого направления, что препятствует образованию и развитию трещин в композиции. При

этом волокна тормозят движение микродефектов. После образования трещины в матрице волокна более эффективно, чем обычная арматура препятствуют ее развитию и росту благодаря тому, что практически со всех сторон блокируют возникшую трещину. Однако при нагружении композита эффективно работает только около 20% волокон при дисперсном армировании вяжущих [5]. По данным А.И. Боровкова и Б.Е. Победри хаотичное армирование более эффективно, чем направленное, так как позволяет лучше использовать прочность волокон, особенно при воздействии разносторонних переменных нагрузок на композиционный материал [7].

К свойствам волокон, используемых для дисперсного армирования, предъявляется целый ряд требований, обуславливающих высокое качество композиции в целом [7]:

- наличие более высокой прочности и эластичности, чем у матрицы;
- наличие более высокого модуля упругости, чем у матрицы;
- высокая коррозионная и термическая стойкость в различных средах;
- высокая стабильность механических свойств;
- технологичность при изготовлении волокон с оптимальными размерами.

Помимо этого волокнистый наполнитель должен иметь определенное сродство и образовывать с продуктами твердения цементного камня прочные химические связи. Поскольку в составе продуктов твердения портландцемента имеются окислы кремния SiO_2 , алюминия Al_2O_3 и др., то и вводимые добавки должны содержать такие же окислы.

Объектом исследований в качестве армирующих компонентов, соответствующих вышеуказанным условиям, выбраны асбест и стеклянные волокна «стеклонит». Их выбор был обусловлен следующим. Во-первых, их химический состав позволит обеспечить хорошую адгезию матрицы и добавки. Во-вторых, одна из добавок – асбест, имела опыт применения при креплении скважин, другая – стеклонит, не применялась. Исследования позволят провести сравнительную оценку добавок и разработать методическую основу оценки возможности применения добавок других типов.

Основные характеристики асбеста и стеклонита приведены в таблице 2.

В ходе исследований у образцов проверялись следующие свойства и характеристики:

- предел прочности на изгиб;
- эластичность;
- трещиностойкость.

Ниже приведена часть результатов проведенных исследований (рисунки 5-8).

Таблица 2. Основные характеристики асбеста и стеклонита

Характеристика	Стекловолокно	Асбест
основная формула	SiO ₂	3MgO•2SiO ₂ •2H ₂ O
плотность, кг/м ³	2500-2600	3400
предел прочности на растяжение, МПа	3500 – 4600	6000
модуль упругости, ГПа	70 – 85	170
коэффициент Пуассона	0,25	0,18
длина нити, мм	4,5 – 5	3,5 – 4,5
диаметр нити, мкм	6 – 9	1,2 – 1,9

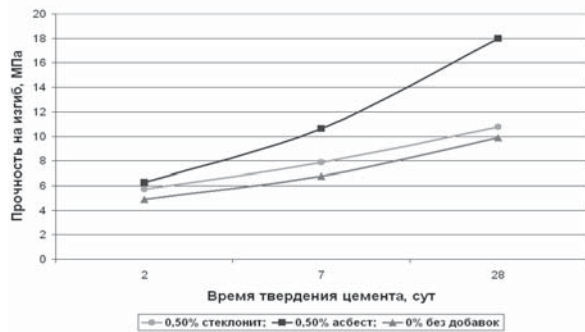


Рисунок 5. Изменение предела прочности на изгиб во времени у образцов цементного камня с одинаковой концентрацией волокнистых наполнителей

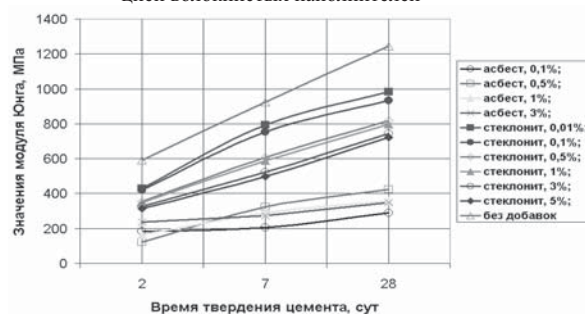


Рисунок 6. Значения модуля Юнга образцов цементного камня во времени в зависимости от концентрации наполнителя

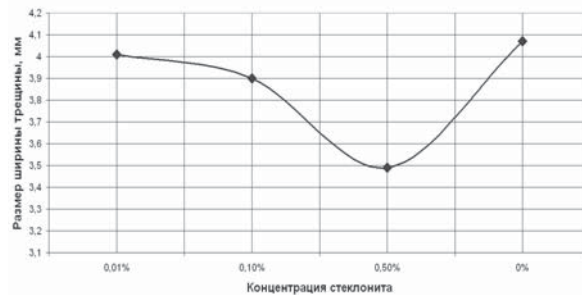


Рисунок 7. Влияние концентрации стеклонита на образование трещин в образцах цементного камня

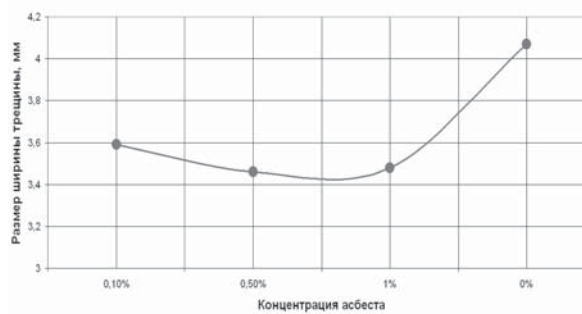


Рисунок 8. Влияние концентрации асбеста на образование трещин в образцах цементного камня

По результатам проведенных испытаний установлено, что для сохранения целостности и повышения удароустойчивости и трещиностойкости крепи скважины рекомендуется применять волокнистые наполнители, в частности, стеклонит в концентрации 0,5% и асбест в концентрации 0,5-1%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Крылов Д.А., Волошко Г.Н. Влияние различных нагрузок в колонне на ее контакт с цементным кольцом. // Нефт. хоз-во. 1991. № 12. С. 8-11.
2. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справочное пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
3. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAL for Windows. М.: ДМК Пресс, 2003. 449 с.
4. Свойства горных пород и методы их определения / Ильницкая Е.И. и др. М.: Недра, 1969. 392 с.
5. Кербер М.Л. Композиционные материалы. // Соросовский образовательный журнал, 1999. № 5. С. 33-41.

6. Рыбьев И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ (искусственные строительные конгломераты). М.: Высш. школа, 1978. 309 с.

7. Буслаев В.Ф. Применение композиционных материалов для крепления и эксплуатации скважин. Ухта: УГТУ, 2005. 136 с.

Самсыкин А.В., канд.техн.наук, ведущий инженер отдела строительства скважин, ООО «БашНИПИнефть»
Samsykin A.V., cand.tech.sci, lead engineer department of construction of wells, BashNIPIneft LLC
Галиев А.Ф., инженер отдела строительства скважин, ООО «БашНИПИнефть»
Galiev A.F., engineer department of construction of wells, BashNIPIneft LLC

Агзамов Ф.А., д.т.н., профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВПО УГНТУ
Agzatov F.A., doct.tech.sci, professor of chair «Drilling oil and gas wells», FSBEI USPTU
Тихонов М.А., аспирант кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВПО УГНТУ
Tikhonov M.A., postgraduate student of chair «Drilling oil and gas wells», FSBEI USPTU
Еникеев Ф.У., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Кибернетика», ФГБОУ ВПО УГНТУ
Enikeev F.U., doct.phys-math.sci, professor of chair «Cybernetics», FSBEI USPTU
Самсыкина А.В., инженер, ООО НПП «Буринтех»
Samsykina A.V., engineer, NPP Burintekh LLC
e-mail: faritag@yandex.ru