

**ПРОЧНОСТЬ ОБСАДНЫХ КОЛОНН ПОИСКОВЫХ СКВАЖИН  
В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ КАВЕРН**

**Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев, С. Н. Горонович**  
(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

*Ключевые слова: поисковая скважина, обсадная труба, каверна, напряженно-деформированное состояние*  
*Key word: exploratory well, casing pipe, cavity, intense-deformed condition*

Нефтяная промышленность – одна из важнейших отраслей нашей страны. В топливно-энергетическом балансе Российской Федерации роль нефти и газа чрезвычайно высока и длительное время будет оставаться определяющим фактором в базовой экономике страны. Возрастающая потребность в увеличении количества добываемой нефти и газа и их разведанных запасов вынуждают бурить скважины на различные глубины.

В статье рассмотрены вопросы обеспечения устойчивости стенок ствола скважины в процессе строительства, предлагается метод расчета.

Строительство сверхглубоких скважин сопровождается рядом осложнений, обусловленных взаимодействием буровых растворов на водной основе с породами (размыв ствола, набухание пород, выщелачивание). В результате чего образуются каверны в стволе скважины в зонах пластического течения солей, что ведет к изменению нагрузок на обсадную колонну и в дальнейшем, зачастую, к смятию обсадных труб. Проблема смятия обсадных колонн является сложной инженерной, актуальной задачей [1].

Процессы осложнения определяются физико-химическими свойствами пород, гидромеханическими параметрами в стволе скважины и природой среды используемых буровых растворов. При этом одни виды осложнений проявляются в процессе бурения, а другие могут проявить себя в течение нескольких месяцев или даже лет после завершения строительства скважины [1].

Наиболее тяжелые осложнения связаны с проявлением горного давления в интервалах пластического течения солей, которые приводят к нарушению целостности обсадных колонн и ликвидации скважин [1]. По данным зарубежных исследований установлено, что около 90% всех известных повреждений колонны вызвано проявлением горного давления соленосных пород, при котором нагрузки на обсадные трубы бывают настолько большими, что даже толстостенные и прочные трубы не могут их выдержать. Четыре из пяти возможных нарушений обсадных колонн в соленосных отложениях связаны с наличием каверн в скважине и некачественным цементированием.

При строительстве сверхглубоких скважин на площадях Прикаспийской синеклизы пробурены скважины с нормированием плотности бурового раствора, которая предполагает обеспечение устойчивости только галогенных пород (галит, сильвин, сильвинит). Это основные минералы хемогенных толщ с ионной связью и кулоновскими силами взаимодействия между ионами, склонных к течению [2].

Устойчивость солей, представленных кисталлогидратами (бишофит, карналлит) с более слабыми силами связи между ионами Ван-дер-Ваальса, не обеспечивается плотностью бурового раствора, так как они представлены в разрезе небольшими толщинами и обладают высокой растворимостью при использовании буровых растворов на водной основе.

Необходимо снизить плотности буровых растворов с обеспечением устойчивости галогенных пород при развитии двух встречных процессов в пластах, представленных кисталлогидратами – растворения и течения. Тогда развитие каверн в этих породах на стадии бурения не несет непосредственной угрозы аварий.

В местах больших каверн, как правило, происходит изгиб и слом колонны вследствие одностороннего действия горного давления. Под действием горного давления на обсадную колонну при пластическом течении пород и одностороннем размещении цементного камня за колонной в местах каверн и желобообразований происходит смятие колонны [3]. Выход из строя даже одной трубы в обсадной колонне в большинстве случаев приводит к ликвидации скважины при их бурении и эксплуатации [1].

При рассмотрении физики процесса смятия обсадных труб основополагающим является пластовое и гидростатическое давление. До начала разработки залежи пластовое давление в большинстве случаев приблизительно равно гидростатическому. Пластовое давление в начале разработки залежи обычно пропорционально глубине её залегания и увеличивается примерно на 0,098 МПа через каждые 10 м глубины. В соответствии с работой [2] при глубине скважины 5800 м горное давление составляет более 140 МПа.

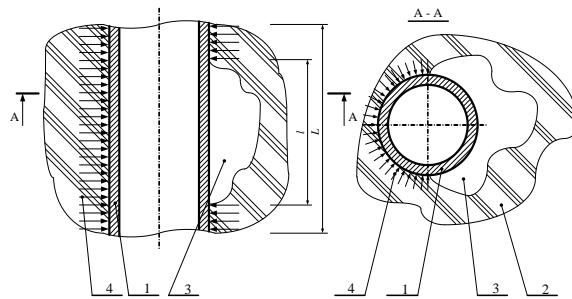
Условия возникновения односторонней модели нагружения на обсадные трубы определяется неполным замещением бурового раствора цементным раствором в процессе тампонажа обсадной колонны в кавернозном интервале ствола скважины, а также наличием гидравлического канала связи заземленного бурового раствора в каверне и проницаемого пласта. При этом происходит выдавливание среды заземленного бурового раствора в каверне в проницаемый пласт и нарушение гидростатической модели нагружения на обсадную трубу. Это приводит к возникновению вектора преобладающей нагрузки со стороны массива соли, определяемого условием (пренебрегая потерями напора при течении среды бурового раствора на участке «каверна – принимающий пласт»):

$$\Delta P_{из} = P_z - P_{пл}, \text{ МПа,}$$

где  $P_z$  – горное давление в интервале каверны, МПа;  $P_{пл}$  – пластовое давление принимающего среду бурового раствора коллектора.

При вскрытии хемогенных отложений большой толщины, достигающих в геологических разрезах осложненных соляно-купольной тектоникой более 5000 м размах градиентов пластовых (поровых) давлений в северной части Прикаспийской синеклизы может составлять 0,0105 – 0,0149 МПа/м при градиентах горного давления 0,0215 – 0,0230 МПа/м. Действие неравномерной нагрузки зачастую ведет к смятию обсадных труб.

Представлен объект расчета (рис.1). Это участок обсадной колонны в поисковых скважинах при образовании каверн. При действии давления горной породы в трубе возникают продольные и окружные напряжения.



**Рис. 1.**  
**Участок обсадной трубы**  
**в случае образования**  
**в скважине каверны:**  
1 – обсадная колонна;  
2 – горная порода;  
3 – каверна;  
4 – давление горной породы

Так как длина рассматриваемого участка намного превышает размеры поперечного сечения, то напряжения в продольном направлении определяем по теории изгиба балок. Участок обсадной трубы рассмотрен как упругий стержень конечной длины, лежащий на упругом основании. При этом общая расчетная длина участка обсадной трубы принята равной трем длинам каверны  $L=3l$ . Это позволило, впоследствии, уйти от влияния краевого эффекта на краю расчетной длины участка обсадной колонны.

Для решения данной задачи использовано уравнение продольно-поперечного изгиба балки. На данный момент отсутствует точное решение дифференциального уравнения продольно-поперечного изгиба балки на упругом основании переменной жесткости. Поэтому решали данную задачу с помощью одного из приближенных методов – это метод конечных разностей.

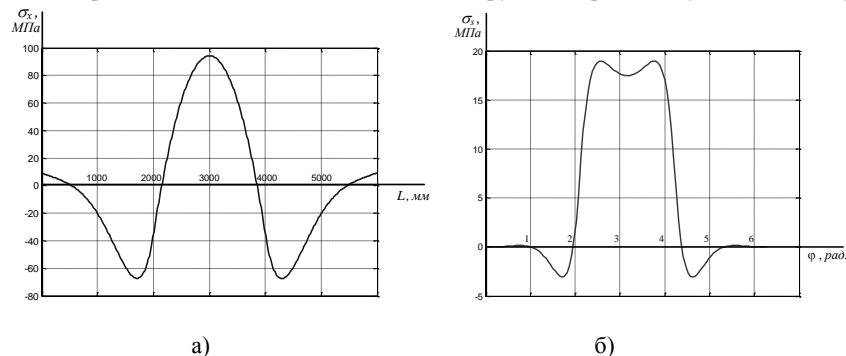
Окружные напряжения из теории изгиба балок нельзя вычислить. Поэтому напряжения в окружном направлении определяем из рассмотрения локального напряженно-деформированного состояния с позиции тонкостенных цилиндрических оболочек по полубезмоментной теории В.З. Власова [4]. Использована система дифференциальных уравнений, записанная при постоянной жесткости интегральных характеристик [5]. Здесь расчет локального напряженно-деформированного состояния производим методом конечных разностей.

Более подробное описание методики определения продольных и окружных напряжений представлены в работах [5, 6]. По определению напряженного состояния обсадных труб создали программы в среде “Matlab”, с помощью которых получили графики распределения напряжений (рис. 2) в продольном и окружном направлениях. Основными зонами при исследовании прочности обсадных колонн с образованием в скважине каверн являются срединная часть каверны и околоопорная (начало и конец образовавшейся каверны) (см. рис.1).

Графики получены при следующих параметрах: диаметр обсадной трубы  $D=250,8$  мм; толщина стенки трубы  $h=15,88$  мм; длина каверны  $l$  3000 мм; коэффициент постели  $c=1000$  Н/мм<sup>3</sup>. Величина нагрузки от горной породы взята  $q=1$  МПа.

Оценка напряженно-деформированного состояния обсадных труб осуществлялась, разделяя действия ряда нагрузок. Это были продольные усилия  $N(x)$  (растяжение от собственного веса) и поперечные – от давления пород. Зная величины напряжений, возникающих в результате действия нагрузок, выделены основные параметры, определяющие смятие обсадных труб.

Из анализа результатов расчета на устойчивость с позиции теории цилиндрических оболочек выяснено, что потеря устойчивости обсадной трубы при данном виде нагружения происходит за пределом текучести металла. Это означает, что смятие трубы происходит при уровне результирующих напряжений, равных пределу текучести металла. Поэтому в качестве расчетного напряжения для определения момента смятия обсадных труб взят предел текучести используемого металла.



**Рис. 2. Распределение величины напряжений:**  
а) продольные напряжения по всей длине конструкции;  
б) окружные напряжения в средней части каверны

Для получения результирующих напряжений и сравнения их с пределом текучести использована четвертая теория прочности (энергетическая теория):

$$\sigma_{\text{рез}}^{IV} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_s + \sigma_s^2} \leq \sigma_T, \quad (3)$$

где  $\sigma_x$  – напряжения в продольном направлении;  $\sigma_s$  – напряжения в окружном направлении.

Для оценки результирующих напряжений, в состав которых входят продольные и окружные (3), по полученной методике расчета составлена (табл.1). Исследования напряженно-деформированного состояния обсадной колонны проводились при следующих параметрах: диаметр обсадной трубы  $D=250,8$  мм; толщина стенки трубы  $h=15,88$  мм; длина каверны  $l$  варьировалась от 1000 мм до 4000 мм; коэффициент постели  $c=1000$  Н/мм<sup>3</sup>. Величина нагрузки от горной породы рассмотрена  $q=1$  МПа, что является удобным при решении обратной задачи определения напряжений смятия обсадной колонны.

Расчет общего напряженно-деформированного состояния участка обсадной колонны методом конечных разностей и расчеты локального напряженно-деформированного состояния по полубезмоментной теории В. З. Власова показали, что

при длине каверны  $l=1$  м вторые составляют 30,4% от первых, то есть необходимо учитывать напряжения при изгибе в продольном направлении и напряжения в окружном направлении. При увеличении растягивающей продольной силы на 200 т величина продольных напряжений при данных параметрах обсадной трубы изменится на 23% (см. табл. 1).

**Таблица 1**

**Величина напряжений для обсадной трубы (сталь N-80, предел текучести 760 МПа) при различных длинах каверны**

Зона исследования	В средней части каверны				В околоопорной части			
Длина каверны, мм	1000	2000	3000	4000	1000	2000	3000	4000
$\sigma_x$ , МПа	-38,1	-94,3	-170,9	-268,6	-18,6	-67,4	-156,3	-286,8
$\sigma_s$ , МПа	11,4	11,4	11,4	11,4	-7,7	-7,7	-7,7	-7,7
$\sigma_{экв}^{IV}$ , МПа	44,9	100,4	176,9	274,5	16,2	63,8	152,6	283,1
$\sigma_x$ (при N=200 т), МПа	-29,34	-72,57	-131,6	-206,8	-14,31	-51,86	-120,4	-220,9

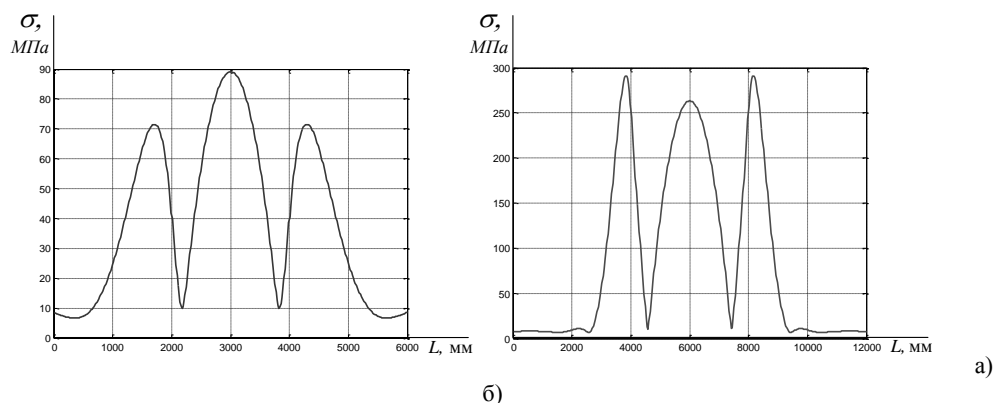
В соответствии с приведенными расчетами для оценки сминающей нагрузки от горной породы для обсадных труб, в поисковых скважинах с различными длинами каверн, проведен перерасчет, результаты которого приведены в (табл. 2).

**Таблица 2**

**Сминающая нагрузка от горной породы для обсадной трубы (сталь N-80, предел текучести 760 МПа) при различных длинах каверны**

Зона исследования	В средней части каверны				В околоопорной части			
Длина каверны, мм	1000	2000	3000	4000	1000	2000	3000	4000
Предельная нагрузка от горной породы (в соответствии с четвертой теорией прочности), МПа								
N=0 т	16,93	7,57	4,29	2,77	47,01	11,9	4,98	2,69
N=200 т	20,89	9,64	5,52	3,57	61,28	15,68	6,51	3,50

Исследование напряженно-деформированного состояния участка обсадной колонны проводилось при различных значениях растягивающего продольного усилия (N). Расчеты показали, что предельная нагрузка от горной породы, когда происходит смятие колонны, может быть значительно увеличена при создании растягивающих продольных усилий в обсадной колонне (при N=200 т предельная нагрузка увеличится до 19%). Изменение длины каверны от 1000 мм до 2000 мм приведет к уменьшению предельной величины нагрузки на 54% (см. табл. 1, 2). При длине каверны до трех метров смятие обсадной трубы происходит в средней части каверны, а при большей длине каверны в околоопорной части каверны (см. рис. 2).



**Рис. 2. Распределение напряжений по длине конструкции при разной длине каверны:**  
а) при длине каверны, равной 2000 мм; б) при длине каверны, равной 4000 мм

Сравнивая обсадные трубы из сталей 09Г2С с пределом текучести 320 МПа и N-80 с пределом текучести 760 МПа, получено, что предельная нагрузка от горной породы на эти конструкции будут различаться в пределах 58%.

Разработанный метод расчета позволил оценить напряженно-деформированное состояние участка обсадной колонны при появлении в скважине каверн, показавший, что при расчетах обсадных колонн надо более полно рассматривать параметры влияющие на процесс смятия. Так же при расчете необходимо учитывать, как напряжения, в продольном направлении (полученных из теории изгиба балок) так и в окружном (полученных из рассмотрения полубезмоментной теории оболочек), потому как вторые составляют 30% от первых. Величину предельной нагрузки от давления горной породы можно увеличить за счет увеличения продольного растягивающего усилия. Приложив растягивающее продольное усилие 200 т., предельная нагрузка от горной породы увеличится на 19%. Используя расчетную методику, варьируя параметрами исследуемой конструкции решается задача обеспечения прочности обсадных труб в поисковых скважинах.

#### **Список литературы**

1. Горонович С. Н., Степанов В. Н., Ефимов А. В. и др. Технологические аспекты строительства сверхглубоких скважин в условиях хемогенных отложений. // Нефтяное хозяйство. 2006. № 4. - М.: Нефтяное хозяйство. - С. 102-104.

2. Горонович С. Н. Устойчивость ствола скважины при бурении галогенных пород./ Нефтяное хозяйство. 2008. № 2. - М.: Нефтяное хозяйство. - С. 106-108.
3. Горонович С. Н., Цыцымушкин П. Ф., Мязин О. Г. и др. Крепление скважин в условиях хемогенных отложений. 2006, № 4, - М.: Нефтяное хозяйство, - С. 103-105.
4. Боярышников С. В. Основы строительной механики машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
5. Якубовский Ю. Е., Пономарева Т. М., Дорофеев Е. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния однопролетного перехода нефтегазопровода по полубезмоментной теории// Изв. вузов. Нефть и газ. – 2006. - №5. – С. 44-49.
6. Якубовский Ю. Е., Малюшин Н. А., Якубовская С. В., Платонов А. Н. Проблемы прочности трубопроводного транспорта. - Спб.: Недра, 2003. -201с.

**Сведения об авторах**

**Якубовский Ю.Е.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, тел.: (3452) 201041

**Дорофеев Е.В.**, ассистент кафедры «Теоретическая и прикладная механика», Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел.: (3452) 201041

**Горонович С.Н.**, к.т.н, зам. директора по науке, ООО «ВолгоУралНИПИгаз», г. Оренбург, тел.: (3532) 770993.

**Jakubovskij J.E.**, Dr.Sci.Tech., the professor managing chair «Theoretical and applied mechanics», the Tyumen state oil and gas university, Tyumen, phone: (3452) 201041

**Dorofeev E.V.**, the assistant to chair «Theoretical and applied mechanics», the Tyumen state oil and gas university, Tyumen, phone: (3452) 201041

**Goronovich S.N.**, Cand.Tech.Sci., the deputy director on a science, «VolgoUralNIPIGaz, Ltd», Orenburg, phone: (3532) 770993