

**ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПО КРЕПИ СКВАЖИН
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДАВЛЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

**Д. С. Герасимов¹, В. П. Овчинников¹, В. Г. Кузнецов¹,
П. В. Овчинников², И. И. Клещенко¹, В. М. Спасибов¹**

¹ Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», г. Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрен спектр вопросов освоения месторождений, приводятся краткая характеристика их геологического строения, сведения о свойствах продуктивных горных пород (пластов). Значительное внимание уделено техническим средствам и технологиям сооружения скважин эксплуатационного и геолого-разведочного направления. Затронуты вопросы разработки месторождений, аспекты безопасности и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: горные породы; сооружение скважин; сложные геолого-технологические условия

STUDY OF STRESSES ON THE CREPE OF WELLS UNDER ROCKS PRESSURE

**D. S. Gerasimov¹, V. P. Ovchinnikov¹, V. G. Kuznetsov¹, P. V. Ovchinnikov²,
I. I. Kleshchenko¹, V. M. Spasibov¹**

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² LLC «LUKOIL-Engineering», Moscow, Russia

Abstract. The article considers the spectrum of issues of development of deposits. We give a brief description of the structure: their geological structure, information about the properties of productive rocks (reservoirs). Considerable attention is paid to the technical means and technologies for the construction of wells in the operational and geological exploration area. The article touches upon the issues of field development, aspects of safety and environment.

Key words: rocks; well construction; complex geological and technological conditions

Значительное число месторождений нефти и газа Прикамья, Западной и Восточной Сибири характеризуются присутствием многолетнемерзлых горных пород, которые распространяются от Кольского полуострова далее до Урала, совпадая с широтой полярного круга, затем их граница отклоняется к югу, доходя до широтного участка реки Оби, пересекает реку Енисей и уходит за пределы России. Большая часть криолитозоны, площадью порядка 9 млн км², находится к востоку от Уральских гор, южная граница доходит до широты 58–59⁰. Первые поисковые скважины в районе распространения мерзлых горных пород были пробурены

в 30-е гг. прошлого столетия, в Западно-Сибирской низменности — с 1952 года. Их результатом явилось открытие уникальных крупных газовых и газоконденсатных месторождений, таких как Медвежье, Уренгойское, Ямбургское, Харасавэйское, Бованенковское и многие другие. Открыты месторождения и в Восточной Сибири [1].

Наличие в геологическом разрезе этих месторождений многолетнемерзлых горных пород обуславливает возникновение специфических осложнений, результатом чего является нарушение сплошности обсадных колонн, их смятие. Объяснению механизма разрушения посвящены работы А. В. Марамзина, Г. С. Грязнова, И. В. Белова, Р. И. Медведского, В. Г. Кузнецова, М. А. Гудмана, В. П. Овчинникова, Р. Е. Смита и др. Наиболее полно причина смятия обсадных колонн в интервалах криолитозоны описана в работах [1–3]. Причиной этого вида отложений, по мнению авторов этих работ, является образование при профилактических остановках в заколонном и межколонном пространстве замкнутой водонасыщенной (глинистого, тампонажного и др. видов на водной основе технологических растворов) композиции. Переход водной фазы в льдообразное состояние генерирует возникновение кристаллического давления, превышающего механическую прочность элементов крепи скважины — обсадной колонны, цементного камня. С результатами исследований в целом можно согласиться. Однако в них отсутствуют анализ распространения нормальных сдвиговых напряжений по телу колонны, цементному камню, прогибу, влияние сцепления (наличие/отсутствие) цементного камня с обсадной колонной + совместный их вклад в прочностные свойства крепи скважины как единого сооружения. Изложенное, а также появление этого вида осложнения явились основанием для исследования.

Проявление сминающих наружных давлений, как об этом было изложено выше, обусловлено в интервалах мерзлых горных пород возникновением давления обратного промерзания, а в интервалах пластичных пород (солевые отложения, глины и др.) — горным давлением. Как правило, они носят локальный характер, и для них вполне возможно использование основ механики сплошной среды [4, 5].

Предельное состояние крепи скважины может характеризоваться возникновением в трубах внутренней обсадной колонны пластических деформаций, предшествующих смятию. А ее несущая способность сохраняется, если трубы других обсадных колонн и скрепляющий их цементный камень находятся в области упруго-пластических или полностью пластических деформациях. Надежность крепи повышается за счет перехода механизма всего пакета из хрупкого состояния в вязкое в результате появления пластичности при объемном сжатии цементного камня, который начинает работать как упругопластический материал. Из механики разрушений по теории Гриффица известно, что разрушение материала начинается с микротрещин, которые при пластичном состоянии одного слоя не переходят в другой до тех пор, пока напряжения во втором слое не достигнут предельного значения. В случае перехода какого-либо слоя крепи в пластичное состояние давление полностью передается через него на следующий слой [4].

В зависимости от величины давления, конструкции крепи скважины и физико-механических характеристик составляющих ее слоев возможны различные варианты распределения зон упругости, пластичности в обсадных трубах и цементе. Обычно в область упругопластических деформаций вначале переходят трубы внешней обсадной колонны, а затем последовательно и другие слои крепи.

Согласно гипотезе плоских сечений, частицы материала, находящиеся до деформаций в одной плоскости, после деформаций также оказываются в одной плоскости. Силовая деформация ε_z в направлении оси составной крепи значительно меньше деформаций в радиальном ε_r и тангенциальном ε_θ направлениях, математически это выражается в том, что в решении задач о деформации составной крепи все функции считаются не зависящими от координаты z (по оси). Особен-

ность этой задачи в том, что крепь трехслойная с различными физико-механическими характеристиками каждого слоя. Для таких неоднородных труб принят следующий метод. Рассматривается каждый слой отдельно. Для определения в неоднородной трубе нужно обеспечение сопряжения решений по каждому слою в отдельности, поэтому на границе каждого слоя должны быть непрерывными радиальное напряжение — σ_r и радиальное перемещение — w_r .

Компоненты деформаций по направлению главной оси составной крепи будут

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{rj} &= \frac{dw_{rj}}{dr}, \\ \varepsilon_{\theta j} &= \frac{w_{rj}}{r}, \\ \varepsilon_{zj} &= 0, \end{aligned} \right\} r_j \leq r \leq r_{j+1} \quad (1)$$

где ε_{rj} , $\varepsilon_{\theta j}$, ε_{zj} — радиальная, тангенциальная и осевая деформация обсадной трубы и цементного камня.

Согласно задаче Ляме для односторонней трубы

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rj} &= A_j - \frac{B_j}{r^2}, \\ \sigma_{\theta j} &= A_j + \frac{B_j}{r^2}, \\ \sigma_{zj} &= 2\mu_j A_j. \end{aligned} \right\} r_j < r \leq r_{j+1} \quad (2)$$

Напряжение в упругих зонах обсадной трубы и цементного камня составной крепи определим аналогично (2) с учетом радиуса пластичности $\rho_j < r \leq r_j$, где ρ_j — радиус пластичности.

Напряжения в пластических зонах трех слоев составной крепи определяются для каждого слоя, для внутренних и внешних.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rej} &= -\sigma_{rij} + \aleph_j \frac{2 \cdot \sigma_{sj}}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{r}{r_j}, \\ \sigma_{\theta ej} &= -\sigma_{rij} + \aleph_j \frac{2 \cdot \sigma_{sj}}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \ln \frac{r}{r_j} \right), \\ \sigma_{zej} &= -\sigma_{rij} + \aleph_j \frac{2 \cdot \sigma_{sj}}{\sqrt{3}} \cdot \left(0,5 + \ln \frac{r}{r_j} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ρ_j — радиусы пластичности; σ_{rij} — значения радиальных напряжений (давлений) на внутренних поверхностях наружной обсадной трубы и цементного кольца; σ_{rj+1} — значение радиальных напряжений (давлений) на наружных поверхностях следующей трубы и цементного кольца; σ_{rij} — значение предела текучести материала j -го слоя; $\aleph = 1, 0, -1$.

В качестве примера в таблице 1 приведены расчетные значения наружных давлений, при которых в обсадных трубах трехколонной конструкции скважины возникают различные по величине зоны пластичности. Представлены два варианта: в первом варианте цементный камень между обсадными колоннами имеет модуль упругости $E_1 = 1 \cdot 10^3$ МПа, во втором — $E_2 = 1 \cdot 10^4$ МПа.

Таблица 1

Несущая способность крепи скважин в области упругих и упругопластических деформаций

Зоны пластичности (%) в обсадных трубах диаметром и толщиной стенки, мм			Давление (наружное), МПа	
168 · 12,0	245 · 13,8	324 · 14,0	$P_{(E_1)}$	$P_{(E_2)}$
0	0	0	44,80	88,24
0	0	50	57,89	241,10
0	0	100	66,04	277,72
0	50	100	146,51	555,33

Как видно из таблицы, наружные давления для крепи, работающей в области упругопластических деформаций, превышают давления, вызывающие только упругие деформации. Однако развитие зон пластичности в трубах обсадных колонн крепи может привести к возникновению не равномерной нагрузки или потери их продольной устойчивости и, как следствие, стать причиной тяжелых аварий в скважине. В этой связи расчет прочности крепи на смятие рекомендуется проводить из условий ее работы в области упругих деформаций.

Математическая модель изгиба для составной крепи можно свести к решению дифференциальных уравнений однослойной конструкции [5]

$$D \left(\frac{d^4 w}{dx^4} + 4w\beta \right) = q, \quad (4)$$

где D — интегральная характеристика жесткости на изгиб составной оболочки; $w(x)$ — функция прогиба оболочки, м; q — локально распределенная нагрузка на рассматриваемом участке, МПа.

Для монослоя данное выражение имеет вид

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{E^{(i)} h^{(i)^3}{12(1-\nu^{(i)^2})} + \frac{2E^{(i)} \cdot h^{(i)}}{(1-\nu^{(i)^2})} \cdot C^{(i)^2} \cdot \lambda. \quad (5)$$

Первое слагаемое представляет собой приведенную жесткость монослоя, а второе — учитывает жесткость межслойных связей, где λ — коэффициент приведения, может быть определен из следующего выражения [4]:

$$\lambda = \frac{\frac{d^2 w}{dx^2} \cdot \eta}{\frac{d^2 w}{dx^2} \cdot \eta - \frac{E^{(i)} h^{(i)}}{(1-\nu)} \cdot \frac{d^4 w}{dx^4}}, \quad (6)$$

где C^i — расстояние между серединными поверхностями смежных слоев, м; $E^{(i)}$ — модуль упругого i -го слоя; ν^i — коэффициент Пуассона материала i -го слоя; $h^{(i)}$ — толщина i -го слоя, м; R — радиус кривизны оболочки, м; η — коэффициент жесткости связи сдвига при сцеплении цемента с обсадной трубой, Н/мм³.

$$\beta = \sum_{i=1}^n \frac{E^{(i)} h^{(i)}}{4R^2 D}. \quad (7)$$

Расчет задачи изгиба составной цилиндрической оболочки проведен по торцам конструкции для шарнирного опорного условия, а функции прогиба $w(x)$ и нагрузки представлены в виде ряда синусов (6, 7).

$$W(x) = \sum_{m=1}^{\infty} W_m \sin \frac{m\pi x}{\alpha}, \quad (8)$$

$$q(x) = \sum_{m=1}^{\infty} q_m \sin \frac{m\pi x}{\alpha}. \quad (9)$$

Определив величину прогиба, можно вычислить радиальное напряжение в слоях

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{(1)} &= \frac{d^2 W}{dx^2} \left(C^{(1)} \alpha + \frac{h^{(1)}}{2} \right) \frac{E^{(1)}}{(1-\nu^{(1)^2})}; \\ \sigma_x^{(2)} &= \frac{d^2 W}{dx^2} \frac{h^{(2)}}{2} \frac{E^{(2)}}{(1-\nu^{(2)^2})}; \\ \sigma_x^{(3)} &= \frac{d^2 W}{dx^2} \left(C^{(3)} \alpha + \frac{h^{(3)}}{2} \right) \frac{E^{(3)}}{(1-\nu^{(3)^2})}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где α — длина участка локальной нагрузки.

Сдвигающие напряжения на границах смежных слоев могут быть записаны в виде

$$\left. \begin{aligned} \tau_{x(xy)}^{(1)} &= \eta_{x(xy)} \left[C^{(1)} \frac{\partial w}{\partial x} + \int_0^x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} (Z_x^0 - C_x^{(1)} \alpha_x^{(1)}) dx + (A_2 - A_1) \right]; \\ \tau_{y(xy)}^{(1)} &= \eta_{y(xy)} \left[C^{(1)} \frac{\partial w}{\partial y} + \int_0^x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} (Z_y^0 - C_y^{(1)} \alpha_y^{(1)}) dy + (A_4 - A_3) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где A_m — постоянные, которые зависят от краевых условий крепления отдельных слоев.

При условии единого крепления для всего пакета разность $A_{m+1} - A_1 = 0$; $Z^i \in (-h^i/2; h^i/2)$ — координата точки в i -м слое, где определяются компоненты напряженного состояния. Для примера проведен расчет напряженного состояния, широко применяемый для перекрытия криолитозоны составной крепи скважины

168 · 245 · 324 мм в случае промерзания водяного пояска за средней колонной (рисунок).

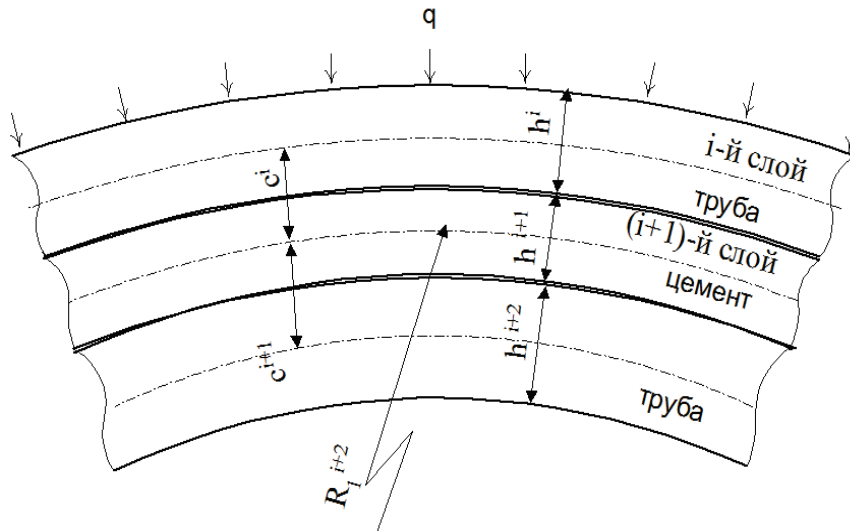


Рисунок. Расчетная схема напряженно-деформированного состояния крепи скважины при локальной осесимметричной нагрузке

В качестве основных были приняты следующие факторы: толщина стенок труб $h^{(1)}$, $h^{(3)}$ и толщина слоя цементного камня $h^{(2)}$; модуль упругости материала труб $E^{(1)}$, $E^{(3)}$ и цементного камня $E^{(2)}$. Нижний и верхний уровень толщин стенок обсадных труб варьировался в соответствии со стандартом, модуль упругости цемента в соответствии с работой [4].

$h^{(1)} = h^{(3)} = 8,9 \cdot 10^{-3}$ м; $h^{(2)} = 29,6 \cdot 10^{-3}$ м; $R = 98,8 \cdot 10^{-3}$ в; $E^{(1)} = E^{(3)} = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $a = 12,0$ м; $C^{(1)} = C^{(2)} = 23,7 \cdot 10^{-3}$ м; $q = 50$ МПа; $\eta = 0, 100, 10^6$ Н/мм³; $E^{(2)} = 10^3, 5 \cdot 10^3, 1 \cdot 10^6$ МПа. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

Максимальные значения параметров напряженно-деформированного состояния крепи скважины

E_u , МПа	η , Н/мм ³	W, мм	τ , МПа	$\sigma^{(1)}$, МПа	$\sigma^{(2)}$, МПа
1·10 ³	0,0	0,2345	0,0	-115,7	-8,5
	100	0,2344	0,5	-113,8	-6,6
	10 ⁶	0,1162	14,1	-102,8	-1,9
5·10 ³	0,0	0,2187	0,0	-107,1	-39,0
	100	0,2187	0,4	-105,3	-30,8
	10 ⁶	0,109	13,0	-95,6	-8,7
1·10 ⁴	0,0	0,1956	0,0	-97,5	-71,6
	100	0,1956	0,4	-96,3	-55,7
	10 ⁶	0,098	11,8	-86,6	-15,8

Анализ представленных результатов расчетов показывает, что основную нагрузку испытывает участок крепи скважины в интервале $0,4 \div 0,6$ х/а, то есть вблизи приложения локального сминающего давления (рассмотрена схема приложения сминающей нагрузки в точке $x/a = 0,5$). Отмечено, что возникающие напряжения по абсолютной величине в колонне значительно выше, чем в цементном камне. В первом случае они достигают 100 МПа и почти не зависят от наличия сцепления цементного камня с обсадной колонной и его прочностных свойств. Во втором случае картина носит обратный характер. При наличии сцепления цементного камня с колонной, значения нормальных сжимающих напряжений в цементном камне значительно ниже по сравнению с отсутствием сцепления, и чем выше механическая прочность цементного камня, тем выше величины возникающих напряжений сжатия, что говорит о самостоятельности восприятия нагрузки элементами крепи скважины. При наличии сцепления цементного камня с обсадной колонной система воспринимает нагрузку как единое целое, и величина механической прочности цементного камня существенного влияния на величину генерируемого сжимающего напряжения почти не оказывает. Максимальная величина нормальных (сжимающих) напряжений вдоль цементного кольца достигает 70 МПа (при отсутствии его сцепления с обсадной колонной). По-видимому, возникающие от сминающей нагрузки напряжения релаксируются обсадной колонной, а при наличии ее сцепления с цементным камнем — системой цементный камень ÷ обсадная колонна.

Что касается сдвигающих (касательных) напряжений в зоне контакта обсадной колонны с цементным камнем, характер их распределения более сложный. Во-первых зависимость от механической прочности камня отсутствует. Во-вторых, имеет волнообразный характер, что объясняется различным направлением их действий (по часовой/против часовой стрелки)

В конечном итоге действия возникаемых напряжений проявляются на прогибе крепи скважины. При этом прогиб отмечен не на всем рассматриваемом интервале, а на расстоянии порядка $\pm 0,15$ х/а от точки приложения сминающей нагрузки.

Таким образом, по результатам проведенных теоретических исследований можно считать, что возникновение осложнений, обусловленных внешними локальными сминающими нагрузками связан с генерированием в обсадной колонне и цементном камне нормальных напряжений, в основном сжатия. По абсолютной величине они могут превышать механические прочностные показатели элементов системы обсадная колонна — цементный камень. При этом большое значение имеет наличие сцепления между ними. Отсюда основное направление совершенствования технологического процесса цементирования обсадных колонн — это обеспечение плотного, долговременного контакта формирующегося в заколонном пространстве цементного камня с обсадной колонной.

Библиографический список

1. Напряженно-деформированное состояние крепи скважин в криолитозоне: учеб. пособие / В. Г. Кузнецов [и др.]. — М.: Недра, 2003. — 154 с.
2. РД 00158758-207-99. Методика выбора конструкции скважин в зоне мерзлых пород. — Тюмень: ООО «ТюменьНИИгазпрогаз», 1999. — 31 с.
3. Победра Б. Е. Механика композиционных материалов. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 400 с.
4. Сооружение скважин на месторождениях шельфа морей и океанов: учеб. / В. П. Овчинников [и др.]. — Тюмень: ТИУ, 2018. — 370 с.
5. Герасимов Д. С. Научно-техническое обследование методов подбора обсадных колонн при воздействии на них локальных и равномерно распределенных нагрузок. — Тюмень: ТИУ, 2017. — 211 с.

Сведения об авторах

Герасимов Дмитрий Семенович, к. т. н., доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89199355013, e-mail:

Information about the authors

Gerasimov D. S., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, phone: 89199355013, e-mail: 8904@mail.ru

Овчинников Василий Павлович, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89199418359, e-mail: ovchinnikovvp@tyuiu.ru

Кузнецов Владимир Григорьевич, д. т. н., профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Овчинников Павел Васильевич, главный специалист управления бурения и заканчивания скважин, ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», г. Москва, e-mail: OvchinnikovPV@mail.ru

Клещенко Иван Иванович, д. г.-м. н., профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)200989, e-mail: kleschenkoii@tyuiu.ru

Спасибов Виктор Максимович, д. т. н., профессор кафедры кибернетических систем, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)283983, e-mail: spasibovvm@tyuiu.ru

Ovchinnikov V. P., Doctor of Engineering, Professor, Industrial University of Tyumen, phone: 89199418359, e-mail: ovchinnikovvp@tyuiu.ru

Kuznetsov V. G., Doctor of Engineering, Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)390363, e-mail: burenie@rambler.ru

Ovchinnikov P. V., Chief Specialist at the Department of Drilling and Pumping, LLC «LUKOIL-Engineering», Moscow, e-mail: OvchinnikovPV@mail.ru

Kleshchenko I. I., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)200989, e-mail: kleschenkoii@tyuiu.ru

Spasibov V. M., Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybernetic Systems, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)283983, e-mail: spasibovvm@tyuiu.ru