

Влияние эксцентриситета на напряженно-деформированное состояние цементного кольца в буровой скважине

И. Б. Каринцев¹⁾, А. А. Жулев²⁾

^{1), 2)} Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, Украина, 40007

Article info:

Paper received:

22 March 2015

The final version of the paper received:

01 June 2015

Paper accepted online:

05 November 2015

Correspondent Author's Address:

¹⁾

²⁾ alexey.zhulyov@gmail.com

Конструкция скважины определяется количеством, диаметром и глубиной спуска обсадных колонн, диаметрами ствола скважины для каждой из обсадных колонн, интервалами цементирования обсадных колонн. Заколонное пространство обсадных колонн заполняется специальными цементными растворами, со временем твердеющими, чтобы обеспечить герметическое и прочное крепление. Стенки скважины становятся устойчивыми, перетекание флюидов из одних пластов или пропластков в другие будет предотвращаться, если качество цементирования высокое.

В реальной скважине кольцевое пространство заметно отличается своей конфигурацией от пространства между двумя соосными цилиндрами: колонна труб, как правило, расположена в скважине эксцентрично; по длине кольцевого пространства есть участки сужений и расширений.

В работе рассматривается решение задачи эксцентричного кольца под действием внутреннего и внешнего давления. Получены зависимости напряжений, деформаций и перемещений в эксцентричном кольце. Проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния эксцентричного и концентричного колец для случая цементного камня в скважине. Приведен пример распределения окружных, радиальных и касательных напряжений в радиальном и окружном направлениях в различных сечениях эксцентричного цементного кольца в условиях эксплуатации скважины. Дана оценка влияния эксцентриситета на напряженно-деформированное состояние цементного кольца в буровой скважине.

Ключевые слова: скважина, цементное кольцо, эксцентриситет, напряженно-деформированное состояние, перемещение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Заколонное (кольцевое) пространство скважины – это место, где формируется и впоследствии работает и разрушается тампонажный камень, оно представляет собой «сосуд» без строго «выраженного» дна, ограниченный стенками скважины и наружной поверхностью обсадной колонны.

Существующие методики расчета цементного кольца на прочность [4, 5, 7–9] используют в качестве расчетной модели идеализированную форму ствола вертикальной скважины, то есть прямой круглый цилиндр с постоянным диаметром, находящийся под действием внутреннего гидростатического и внешнего горного давлений.

В реальной скважине кольцевое пространство заметно отличается своей конфигурацией от пространства между двумя соосными цилиндрами: колонна труб, как правило, расположена в скважине эксцентрично, по длине кольцевого пространства есть участки сужений и расширений.

Естественно предположить, что для случая эксцентричного цементного кольца, типичного для условий скважины, допустимые давления, создаваемые техническими и технологическими факторами, будут ниже тех, которые определяются для случая

концентричного кольца. В работе [4] дана оценка максимальных напряжений в эксцентричном кольце. Влияние эксцентриситета кольца на его напряженно-деформированное состояние может оказаться существенным, поэтому данная задача представляет интерес.

Также не менее важной является герметичность скважины, обеспечиваемая контактом стенок скважины, цементного камня и обсадной колонны. Следует отметить, что герметизация неподвижных соединений достигается заполнением всех микронеровностей и дефектов контактной поверхности материала уплотнителя [10], т. е. в данном случае цементным камнем. Для этого, очевидно, уплотнитель должен быть сжат некоторой силой, создающей в поверхностных слоях напряжения, достаточные для их деформации до полного заполнения неровностей. То есть существует такое контактное давление, при котором регулярные микроканалы полностью перекрыты. С другой стороны, существует такое критическое давление, при котором происходит разгерметизация.

При этом одним из главных требований к цементным камням в скважине является их прочность,

ограничивающая величину максимальных напряжений, а герметичность требует превышения минимальных напряжений.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе [2] рассмотрено напряженно-деформированное состояние эксцентричного кольца, границы которого подвергнуты давлению. Также приводится зависимость окружных напряжений на краю отверстия в эксцентричном кольце под действием только внутреннего давления.

Максимальные напряжения эксцентричного цементного кольца, сформированного в скважине под действием внутреннего давления, рассмотрены в работе [5].

Целью данной работы является определение всех компонент напряженно-деформированного состояния эксцентричного кольца под действием внутреннего и внешнего давлений на примере цементного кольца скважины и проведение сравнительного анализа с напряженно-деформированным состоянием концентричного кольца.

Рассмотрена задача о напряжениях эксцентричного цементного кольца вокруг обсадной колонны. При этом полагалось, что горные породы и цементный камень в заколонном пространстве – тела линейно-упругие. В качестве нагрузки принималось внутреннее давление в колонне, зависящее от изменения в ней уровня жидкости. Внутреннее давление считалось независимым переменным; его начальное значение принималось равным гидростатическому давлению бурового и цементного растворов до затвердения последнего. Принималось, что давление на контакте эксцентричного цементного кольца с обсадными трубами распределяется равномерно по контактной поверхности. Этому благоприятствует отсутствие сил сцепления на контакте цемента с трубами, смоченными буровым раствором.

Цементный камень в заколонном пространстве скважины формируется из цементного раствора, затвердевая при полном гидростатическом давлении. Он подвергается деформированию при нагружении (в частности, со стороны горных пород) и склонен к пластическим деформациям вследствие наличия гелевой составляющей в ранние сроки твердения при невысоких температурах или дефектов (поверхностей скольжения) строения (структурно-минералогический фактор) при высоких температурах. Поэтому боковое давление в цементном камне изменяется и является функцией многих переменных, но к окончанию твердения приближается к нулю.

В качестве граничных условий должны быть заданы внутреннее давление, действующее на цементное кольцо со стороны обсадной колонны, и, например, горное боковое давление, действующее в ненарушенном массиве (на значительном удалении от ствола скважины). В некоторых случаях возможно точно оценить давление пород непосредственно на цементное кольцо скважины.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ НАПРЯЖЕНИЙ

Для решения данной задачи воспользуемся биполярными координатами ξ , η , рассмотренными в работе [1], которые можно использовать для задач, связанных с двумя неконцентрическими круговыми границами. Биполярные координаты определяются уравнениями

$$z = ia \operatorname{cth}\left(\frac{1}{2}\zeta\right), \quad \zeta = \xi + i\eta, \quad (1)$$

где a – действительная постоянная.

Рассмотрим диск с эксцентричным отверстием, подвергнутый действию давления p_0 по внешней границе и давления p_1 – по границе отверстия. Определим компоненты напряжений.

Внешняя граница будет окружностью $\xi = \xi_0$, принадлежащей семейству окружностей $\xi = \text{const}$, а контур отверстия будет окружностью $\xi = \xi_1$. По заданным радиусам и расстоянию между центрами можно определить a , ξ_0 и ξ_1 по следующим зависимостям:

$$a = \sqrt{\frac{(\delta + r_0 + r_1) \cdot (\delta + r_0 - r_1) \cdot (\delta - r_0 + r_1) \cdot (\delta - r_0 - r_1)}{2 \cdot \delta}}. \quad (2)$$

$$\xi_0 = \operatorname{arcsinh}\left[\frac{a}{r_0}\right], \quad \xi_1 = \operatorname{arcsinh}\left[\frac{a}{r_1}\right]. \quad (3)$$

Определение напряжений производится через комплексные потенциалы $\psi(z)$ и $\chi(z)$, рассмотренные в работе [2]:

$$\psi(z) = iB \operatorname{ch}(\zeta), \quad \chi(z) = aB \operatorname{sh}(\zeta). \quad (4)$$

$$\psi(z) = iC \operatorname{sh}(\zeta), \quad \chi(z) = aB \operatorname{ch}(\zeta). \quad (5)$$

$$\chi(z) = aD\zeta. \quad (6)$$

$$\psi(z) = Az. \quad (7)$$

Компоненты напряжений получим из уравнений Колосова – Мусхелишвили [2]:

$$\sigma_\xi + \sigma_\eta = 2[\psi'(z) + \bar{\psi}'(\bar{z})] = 4\operatorname{Re}\psi'(z). \quad (8)$$

$$\sigma_\xi - \sigma_\eta + 2i\tau_{\xi\eta} = 2e^{2i\alpha}[\bar{z}\psi''(z) + \chi''(z)]. \quad (9)$$

Определяя выражения (8–9) для комплексных потенциалов (4–7), разделяя полученные выражения на действительную и мнимую части, путем суммирования и вычитания выражений выделяем σ_ξ , σ_η и $\tau_{\xi\eta}$.

Решение рассматриваемой задачи можно теперь получить с помощью суперпозиции напряженного состояния, представленного комплексными потенциалами (4–7). В окончательном виде выражения для напряжений примут вид:

$$\sigma_{\eta} = \frac{2}{a} B \sinh(\xi) \left[2 \cosh^2(\xi) \cos(\eta) - 4 \cosh(\xi) \cos(\eta)^2 + \cosh(\xi) + \cos(\eta) \right] + \frac{D}{2a} \left[\sinh(2\xi) - 2 \sinh(\xi) \cos(\eta) \right] + 2A + \frac{2}{a} C \left[2 \cosh^3(\xi) \cos(\eta) - 4 \cosh^2(\xi) \cos^2(\eta) + \cosh^2(\xi) + 2 \cos^2(\eta) - 1 \right]. \quad (10)$$

$$\sigma_{\xi} = \frac{2}{a} B \sinh(\xi) \left[\cosh(\xi) - \cosh(2\xi) \cos(\eta) \right] + \frac{2}{a} C \left(\cosh^2(\xi) - 1 \right) \left(2 \cosh(\xi) \cos(\eta) - 1 \right) - D \frac{1}{a} \left[\sinh(2\xi) - 2 \sinh(\xi) \cos(\eta) \right] + 2A. \quad (11)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \frac{B}{a} \left[2 \cosh(2\xi) \cosh(\xi) \sin(\eta) - \cosh(2\xi) \sin(2\eta) \right] + \frac{2}{a} C \left[2 \sinh(2\xi) \cosh(\xi) \sin(\eta) - \sinh(2\xi) \sin(2\eta) \right] - D \frac{1}{a} \left[2 \cosh(\xi) \sin(\eta) - \sin(2\eta) \right]. \quad (12)$$

Константы B , C , D и A определим из граничных условий, а именно отсутствия касательных напряжений и действия равномерно распределённого давления на границах $\xi = \xi_0$ и $\xi = \xi_1$, тогда получим:

$$A = -\frac{1}{2} \frac{p_0 \sinh^2 \xi_1 + p_1 \sinh^2 \xi_0}{\sinh^2 \xi_1 + \sinh^2 \xi_0}. \quad (13)$$

$$D = -a \frac{(p_0 - p_1) \coth(\xi_1 - \xi_0)}{\sinh^2 \xi_1 + \sinh^2 \xi_0}. \quad (14)$$

$$B = -a \frac{2(p_0 - p_1) \cosh(\xi_0 + \xi_1)}{4 \sinh(\xi_0 - \xi_1) - \sinh(\xi_0 - 3\xi_1) - \sinh(3\xi_0 - \xi_1)}. \quad (15)$$

$$C = a \frac{2(p_0 - p_1) \sinh(\xi_0 + \xi_1)}{4 \sinh(\xi_0 - \xi_1) - \sinh(\xi_0 - 3\xi_1) - \sinh(3\xi_0 - \xi_1)}. \quad (16)$$

Отысканием всех постоянных завершается определение комплексных потенциалов.

Таким образом, подставляя (13)–(16) в уравнения (10), (11) и (12), получаем полностью определённые компоненты напряжений, а именно σ_{ξ} , σ_{η} и $\tau_{\xi\eta}$, где ξ_0 , ξ_1 и a определяются зависимостями (2) и (3) соответственно.

4. ДЕФОРМАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭКСЦЕНТРИЧНОГО КОЛЬЦА

Для получения выражений для деформации эксцентричного кольца при найденных выражениях напряжений достаточно воспользоваться обобщённым законом Гука для ортогональных криволинейных координат [7]. Будем считать, что эксцентричное кольцо находится под действием плоской системы сил ($\sigma_z = 0$). Тогда для биполярных координат обобщённый закон Гука примет такой вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\xi\xi} &= \frac{1}{2G(1+\nu)} (\sigma_{\xi} - \nu \sigma_{\eta}), \\ \varepsilon_{\eta\eta} &= \frac{1}{2G(1+\nu)} (\sigma_{\eta} - \nu \sigma_{\xi}), \\ \varepsilon_{z\xi} &= -\frac{\nu}{2G(1+\nu)} (\sigma_{\xi} + \sigma_{\eta}), \end{aligned} \quad (17)$$

где G – модуль упругости второго рода (модуль сдвига); ν – коэффициент Пуассона.

В дальнейшем будем рассматривать только деформации в радиальном и окружном направлениях. Для получения перемещений эксцентричного кольца воспользуемся выражением окружной деформации для концентричного кольца

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta}.$$

Очевидно, что влияние второго слагаемого в случае равномерно распределённого давления при малом эксцентриситете незначительно. Тогда в приближении данное выражение можно применить на случай эксцентричного кольца в биполярных координатах в следующем виде:

$$u_{\xi} = \frac{a}{\sinh \xi} \varepsilon_{\eta\eta}.$$

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

В качестве геометрических параметров скважины используем рекомендации для выбора диаметров обсадной колонны и скважины [4]. Примем следующие геометрические параметры цементного кольца: 1) внешний радиус кольца (радиус скважины) – $r_0 = 94$ мм; 2) внутренний радиус кольца (радиус эксплуатационной колонны) – $r_1 = 84$ мм.

Расположение обсадной колонны относительно стенок скважины может быть концентричным, а может принимать положение, при котором формиро-

вание сплошного цементного кольца становится практически невозможным.

Тем не менее рассматривать цементное кольцо с большой эксцентриситетностью вряд ли необходимо, так как в узком кольцевом зазоре не обеспечивается вытеснение бурового раствора при цементировании. Кроме того, с увеличением эксцентриситетности кольца снижается точность решения.

Примем, что для формирования сплошного кольца, то есть полного равномерного замещения бурового раствора тампонажным и его затвердевания, требуется, чтобы выполнялось следующее условие [5]:

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{\min}} \leq 4,$$

где δ_{\max} – максимальная толщина эксцентричного кольца; δ_{\min} – минимальная толщина эксцентричного кольца.

Данное условие не является обоснованным и требует учета дополнительных параметров и условий цементирования скважины. Для данной задачи это условие используется только для анализа зависимостей.

С учетом вышеуказанных параметров кольца максимальный эксцентриситет будет составлять $e = 6 \text{ мм}$. Величины давлений принимаем следующие: давление в обсадной трубе (внутреннее давление) $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$; давление, создаваемое массивом горных пород (внешнее давление), $p_0 = 6 \text{ МПа}$. Механические характеристики цементного камня примем следующие: модуль упругости первого рода (модуль Юнга) $E = 26 \text{ МПа}$; модуль упругости второго рода (модуль сдвига) $G = 10 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$.

Анализ полученных зависимостей имеет смысл приводить в сравнении с зависимостями для случая концентричного кольца. Данные зависимости известны и являются решением задачи Ламе [6].

Далее представлены графики распределений окружных, радиальных и касательных напряжений, а также окружных деформаций и радиальных перемещений. Приведены графики зависимости окружных напряжений от величины эксцентриситета. На рисунках распределения для эксцентричного кольца изображены сплошной линией, а для концентричного – пунктирной. Распределения в радиальном направлении рассмотрим для трех значений угла: $\eta = 0, \pi/2, \pi$, что соответствует сечениям с наибольшей, средней и наименьшей толщинами кольца соответственно.

ВЫВОДЫ

В данной статье рассмотрены компоненты напряженно-деформированного состояния эксцентричного кольца. Приведен пример распределения окружных, радиальных и касательных напряжений в радиальном и окружном направлениях в различных сечениях эксцентричного цементного кольца в условиях эксплуатации скважины. Впервые рассмотрены распределения компонент напряженно-деформированного состояния эксцентричного кольца

на примере цементного камня, формируемого в буровой скважине.

Из анализа рисунка 6 следует, что с увеличением эксцентриситета в сечении с наибольшей толщиной кольца величина окружных напряжений снижается, в то время как напряжения в сечении с наименьшей толщиной кольца существенно увеличиваются.

Анализ проводился в сравнении с зависимостями для концентричного кольца. Исходные данные были приняты на основе рекомендаций из литературных источников.

Анализ данных показал, что наиболее существенное влияние эксцентриситет оказывает на окружные напряжения, при этом наибольшее значение может превышать окружные напряжения для концентричного кольца почти в два раза.

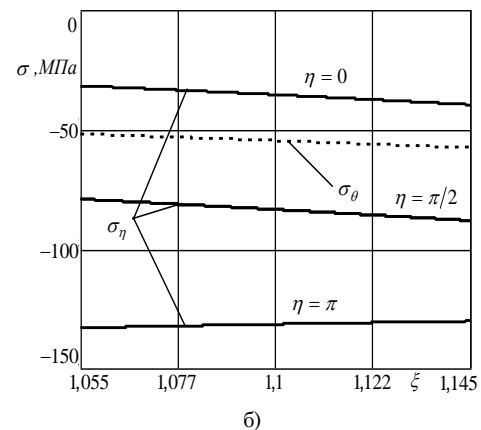
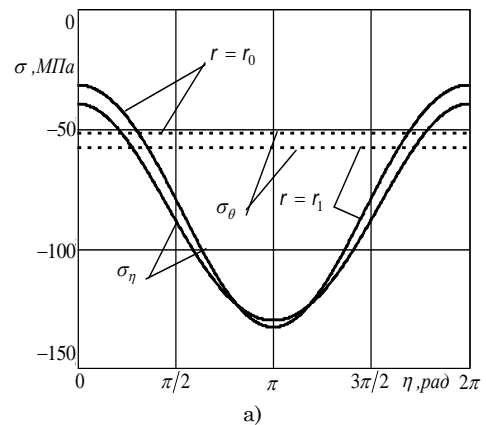


Рис. 1. Распределение окружных напряжений по окружности а) и в радиальном направлении б) на внутренней и внешней границах

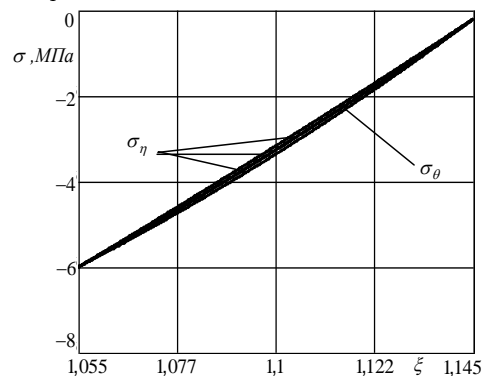
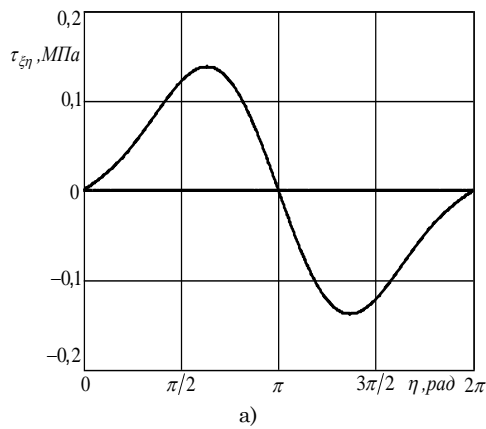
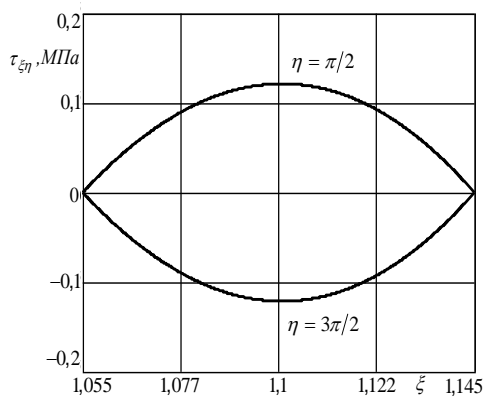


Рис. 2. Распределение радиальных напряжений в радиальном направлении



а)



б)

Рис. 3. Распределение касательных напряжений в окружном а) и радиальном б) направлениях на среднем радиусе

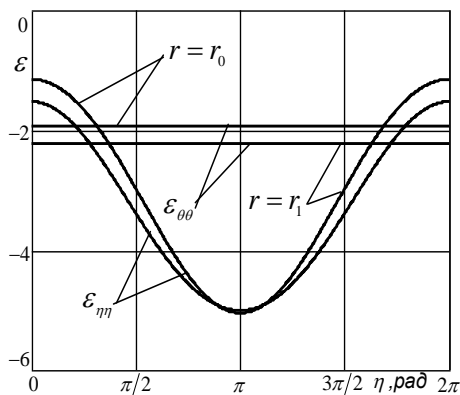


Рис. 4. Распределение окружных деформаций в окружном направлении на внешней и внутренней границах

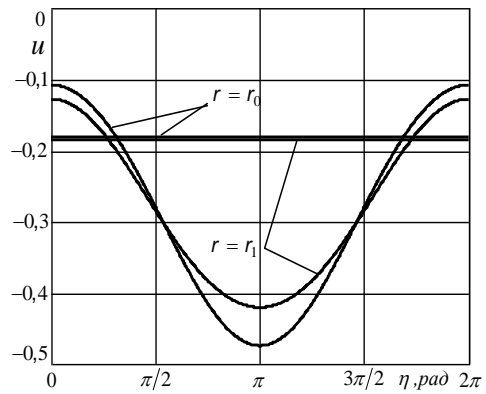


Рис. 5. Распределение радиальных перемещений в окружном направлении на внешней и внутренней границах

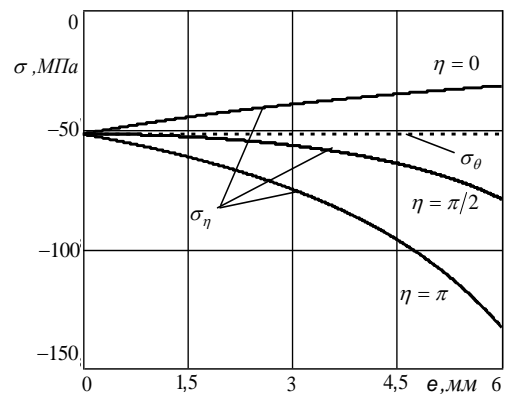


Рис. 6. Зависимость окружных напряжений на внешней границе при $\eta = 0, \pi/2, \pi$ от величины эксцентриситета

Influence of eccentricity on deflected mode of cement ring in bore

I. B. Karintsev¹⁾, A. A. Zhulyov²⁾

^{1), 2)} Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., Sumy, Ukraine, 40007

The design of a well is determined by the amount, diameter and depth of casing running, borehole diameter for each of the casing, cementing casing intervals. Casing annular space is filled with a special cement slurry that eventually harden, to ensure a hermetic and strong attachment. The walls of the wells are stable. The high quality of cementing protects flow of fluids from one seam or seams in others.

In real well annular space is noticeably different from the configuration of its space between two coaxial cylinders. It is usually eccentrically located in the well. There are sections of the restrictions and extensions along the annular space.

In this paper, the authors consider the solution of the eccentric ring under internal and external pres-

sure. The dependences of the stresses, strains and displacements in the eccentric ring are demonstrated. A comparative analysis of the stress-strain state of the eccentric and concentric rings in the case of cement stone in the well is given. An example of distribution of rotational, radial and tangential stresses in the radial and circumferential directions in different sections of the eccentric cement annulus in a well operation is described. The estimation of the influence of eccentricity on the stress-strain state of the cement ring in a borehole is given.

Keywords: bore, cement ring, eccentricity, stress-strain state, displacement.

Вплив ексцентриситету на напружено-деформований стан цементного кільця в буровій свердловині

І. Б. Карінцев¹⁾, О. О. Жульов²⁾

1), 2) Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007

Конструкція свердловини визначається кількістю, діаметром та глибиною спуску обсадних колон, діаметрами ствола свердловини для кожної з обсадних колон, інтервалами цементування обсадних колон. Заколонний простір обсадних колон заповнюється спеціальними цементними розчинами, які з часом тверднуть, щоб забезпечити герметичне й міцне кріплення. Стінки свердловини стають стійкими, вони будуть запобігати перетіканню флюїдів з одних шарів або прошарків в інші, якщо якість цементування висока.

У реальній свердловині кільцевий простір помітно відрізняється своєю конфігурацією від простору між двома співвісними циліндрами: колона труб, як правило, розташована у свердловині ексцентрично, по довжині кільцевого простору є ділянки звужень і розширень.

У цій роботі розглядається розв'язання задачі ексцентричного кільця під дією внутрішнього і зовнішнього тисків. Одержано залежності напружень, деформацій і переміщень в ексцентричному кільці. Проведено порівняльний аналіз напружено-деформованого стану ексцентричного і концентричного кільця для випадку цементного каменю у свердловині. Наведено приклад розподілу колових, радіальних і дотичних напружень в радіальному та коловому напрямках у різних перерізах ексцентричного цементного кільця в умовах експлуатації свердловини. Дана оцінка впливу ексцентриситету на напружено-деформований стан цементного кільця у свердловині.

Ключові слова: свердловина, цементний камінь, ексцентриситет, напружено-деформований стан, переміщення.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – [4-е изд.]. – М.: Наука, 1977. – 831 с.
2. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979.
3. Рекач В. Г. Руководство к решению задач по теории упругости / В. Г. Рекач. – М.: Высшая школа, 1966. – 229 с.
4. Булатов А. И. Формирование и работа цементного камня в скважине / А. И. Булатов. – М.: Недра, 1990. – 409 с.
5. Ашрафьян М. О. Совершенствование забоев конструкций скважин / Ашрафьян М. О., Лебедев О. А., Саркисов Н. М. – М.: Недра, 1987. – 156 с.
6. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1970. – Т. 2. – 568 с.
7. Дон Н. С. Разобшение пластов в нефтяных и газовых скважинах / Дон Н. С., Титков Н. И., Гайворонский А. А. – М.: Недра, 1973. – 272 с.
8. Ашрафьян М. О. Повышение качества разобшения пластов в глубоких скважинах / М. О. Ашрафьян. – М.: Недра, 1982.
9. Гайворонский А. А. Крепление скважин и разобшение пластов / А. А. Гайворонский, А. А. Цыбин. – М.: Недра, 1987.
10. Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / [Кондаков Л. А., Голубев А. И. Овандер В. Б. и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.

REFERENCES

1. Korn G., Korn T. (1977). Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov). M. Nauka. 831 p. [in Russian].
2. Timoshenko S. P., Dzh. Guder. (1979). Teoriya uprugosti. M. Nauka. [in Russian].
3. Rekach V. G. (1966). Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii uprugosti. M. Vysshaya shkola. 229 p. [in Russian].
4. Bulatov A. I. (1990). Formirovanie i rabota cementnogo kamnya v skvazhine. M. Nedra. 409 p. [in Russian].
5. Ashrafyan M. O., Lebedev O. A., Sarkisov N. M. (1987). Sovershenstvovanie zaboev konstrukcij skvazhin. M. Nedra. 156 p. [in Russian].
6. Sedov L. I. (1970). Mexanika sploshnoj sredy. M. Nauka. T. 2. 568 p. [in Russian].
7. Don N. S., Titkov N. I., Gajvoronskij A. A. (1973). Razobshhenie plastov v neftyanix i gazovyx skvazhinax. M. Nedra. 272 p. [in Russian].
8. Ashrafyan M. O. (1982). Povyshenie kachestva razobshheniya plastov v glubokix skvazhinax. M. Nedra. [in Russian].
9. Gajvoronskij A. A., Cybin A. A. (1987). Kreplenie skvazhin i razobshhenie plastov. M. Nedra. [in Russian].
10. Kondakov L. A., Golubev A. I. Ovander V. B. (1986). Uplotneniya i uplotnitelnaya texnika: spravochnik. M. Mashinostroenie. 464 p. [in Russian].