

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЦЕМЕНТНОГО КОЛЬЦА В БУРОВОЙ СКВАЖИНЕ

И. Б. Каринцев, канд. техн. наук, профессор;

А. А. Жулёв, студент,

Сумский государственный университет,

ул. Римского-Корсакова, 2, г. Сумы, 40007, Украина

Рассмотрена совместная работа системы обсадная труба – цементный камень – глинистая корка – порода. Получены зависимости контактных давлений от механических и геометрических характеристик системы. Приведены результаты расчетов контактных давлений, как при наличии корки, так и при её отсутствии. Дана оценка влияния глинистой корки на величину контактного давления.

Ключевые слова: скважина, контактное давление, цементное кольцо, глинистая корка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы буровых скважин в значительной степени зависит от методов их крепления и цементирования. Качественное цементирование должно надежно разобщить продуктивные пласты от водоносных, укрепить склонные к обвалам породы, предохранить от коррозии обсадную колонну и повысить её несущую способность и долговечность. Стоимость глубоких скважин (до 9000 метров) весьма высока, а ущерб от некачественного их крепления может быть ещё большим, вплоть до их полной потери. Поэтому проблема обеспечения качественного разобщения пластов является в настоящее время наиболее важной проблемой в достижении долговечности и продуктивности скважин. С целью повышения нефтеотдачи продуктивных пластов и стимуляции охваченных заводнением скважин используются различные методы интенсификации, связанные с повышением перепада давления, что приводит к увеличению напряженно-деформированного состояния цементного кольца скважины с одной стороны и нарушения герметичности в зонах контакта зацементированного заколонного пространства с другой.

В последнее время при цементировании нефтяных и газовых скважин стали использовать так называемые расширяющиеся тампонажные композиции, которые в значительной степени улучшают контакт с горной породой и обсадной трубой. Однако следует иметь в виду, что прочность цементного камня при его затвердении в замкнутом объеме уменьшается. В соответствии с требованиями ГОСТ 1581-96 прочность цементного камня на изгиб должна быть не менее 2,7 МПа. С другой стороны для повышения качества крепления скважин необходимо, чтобы цементный камень имел достаточное расширение (не менее 4-5%) для компенсации усадки фильтрационной глинистой корки при её обезвоживании и создания контактного давления цементного кольца со стенкой скважины. Таким образом, при применении расширяющихся тампонажных цементов возникают взаимоисключающие требования к прочности и расширению. Если прочность цементного камня определяет стойкость и долговечность скважины, то его способность к расширению повышает её герметичность. Как прочность, так и герметичность непосредственно связаны с напряженным состоянием цементного кольца.

Главными факторами, определяющими напряженно-деформированное состояние цементного кольца скважины, являются внутреннее давление в обсадной колонне и давление массива горных пород. В этой связи пробуренная скважина должна рассматриваться как сложный объект

цементно-металлической конструкции, нагруженной внутренним давлением и боковым давлением горных пород. Фильтрационная корка, возникающая на стенках скважины, также оказывает влияние на её напряженное состояние и должна быть учтена.

В процессе бурения и крепления скважины напряженное состояние массива горных пород существенно изменяется. В связи с большим числом разнообразных гипотез горного давления выбор коэффициента бокового давления в массиве представляет известные трудности. Задача осложняется и тем, что сооружение крепи скважины всегда отстает во времени от нарушения целостности массива, поэтому нагружения цементного кольца вследствие упругих деформаций горных пород не происходит. В таком горном массиве, где нет релаксации напряжений и ползучести, активными факторами являются изменения давления и температуры в скважине.

Однако для многих типов пород (глина, соленосные отложения, гипс, глинистые суспензии и др.) напряжения и деформации в приствольной зоне приобретают временные зависимости. В результате ползучести горный массив может создавать значительное давление на крепь скважины. [1]

Следует отметить, что герметизация неподвижных поверхностей достигается заполнением всех микронеровностей и дефектов контактной поверхности материала уплотнителя, т.е. в данном случае цементным камнем. Для этого очевидно уплотнитель должен быть сжат некоторой силой, создающей в поверхностных слоях напряжение, достаточное для их деформации до заполнения неровностей. То есть существует такое контактное давление, при котором регулярные микроканалы полностью перекрыты. С другой стороны, существует некоторое критическое давление, при котором, наоборот, происходит разуплотнение. Следовательно, герметизация неподвижных соединений осуществляется в основном за счет контактного давления между цементным камнем и ограничивающей поверхностью.

В процессе цементирования одним из негативных факторов, влияющих на качество крепления скважин, является наличие фильтрационной корки не только на стенках скважины, но и на поверхности труб в межтрубном пространстве.

В процессе ожидания затвердения цемента происходит обезвоживания оставшейся фильтрационной корки, в результате чего контактное давление между цементным кольцом и стенкой скважины значительно снижается.

В скважине одним из основных факторов, влияющих на герметичность крепи скважины является наличие глинистой корки, которая при контакте с цементным раствором усыхает и тем самым способствует возникновению неплотного контакта цементного кольца со стенкой скважины. Некачественный отмыв глинистой корки со стенок скважины и ограничивающих поверхностей может привести к перетокам и газопрорыву, и негативно сказывается на долговечности скважины в целом.

2. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрена задача о контактных давлениях в системе обсадная колонна – цементный камень – глинистая корка – порода. При этом полагалось, что горные породы, глинистая корка и цементный камень в заколонном пространстве — тела линейно-упругие. В качестве нагрузки принималось внутреннее давление в колонне, которое зависит 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. При этом цементируемая эксплуатационная колонна свободна от внешних сил.

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.

Принимаем, что скважина вертикальная, а нагрузки симметричны относительно оси. Тогда касательные напряжения на площадях действия указанных нормальных напряжений отсутствуют, а нормальные напряжения являются главными и определяют напряженное состояние цементного камня и пород в приствольной зоне скважины.

В качестве граничных условий должны быть заданы внутреннее давление в обсадной колонне 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, хотя в общей постановке задача о взаимодействии крепи с горным массивом является самостоятельной проблемой большой трудности.

К моменту затвердения цементного раствора его граничные поверхности — зоны контакта с обсадной колонной и горными породами — свободны от напряжений.

Для определения давления между обсадной трубой и цементным камнем, цементным камнем и глинистой коркой, а также давлением между глинистой коркой и пластом, принимаем расчетную схему, представленную на рисунке 1, где P_0 - давление в обсадной трубе, P_4 - давление создаваемое массивом горных пород.

Воспользуемся случаем плоского напряженного состояния ($\sigma_z = 0$), для которого справедливы формулы Ламе:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{array} \right\} = \frac{r_e^2 P_e - r_n^2 P_n}{r_n^2 - r_e^2} \mp \frac{P_e - P_n}{r_n^2 - r_e^2} \cdot \frac{r_e^2 r_n^2}{r}.$$

Радиальное перемещение в поперечном сечении

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \frac{r_e^2 P_e - r_n^2 P_n}{r_n^2 - r_e^2} r + \frac{1 + \mu}{E} \frac{P_e - P_n}{r_n^2 - r_e^2} \frac{r_e^2 r_n^2}{r}. \quad (1)$$

Тогда деформации будут равны

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_r = \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \end{array} \right.$$

Неизвестные давления P_1 , P_2 и P_3 на контактах колонна – цементный камень, цементный камень – глинистая корка и глинистая корка – порода найдем из условия неразрывности деформаций:

$$u_1(r_2) = u_2(r_2), \quad u_2(r_3) = u_3(r_3) \quad \text{и} \quad u_3(r_4) = u_4(r_4), \quad (2)$$

где радиальные перемещения контактных поверхностей задаются следующими выражениями.

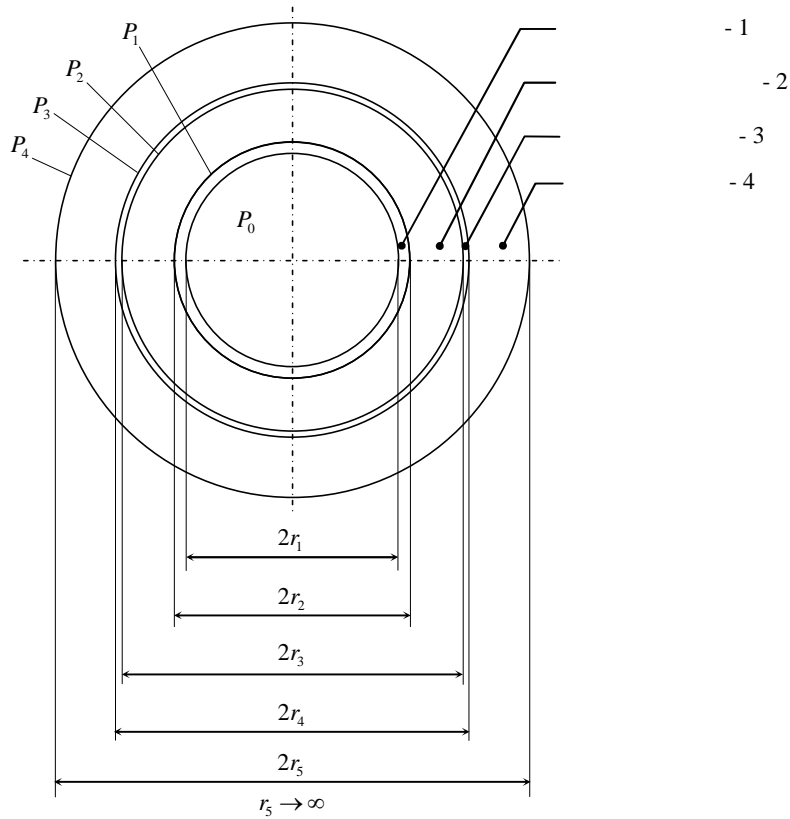


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения контактного давления

Контактирующая с цементным камнем поверхность обсадной колонны получит радиальное перемещение

$$u_1(r_2) = \frac{1 - \mu_1}{E_1} \frac{r_1^2 P_0 - r_2^2 P_1}{r_2^2 - r_1^2} r_2 + \frac{1 + \mu_1}{E_1} \frac{P_0 - P_1}{r_2^2 - r_1^2} \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2}; \quad (3)$$

внутренняя и наружная поверхности цементного кольца

$$u_2(r_2) = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_2^2 P_1 - r_3^2 P_2}{r_3^2 - r_2^2} r_2 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{P_1 - P_2}{r_3^2 - r_2^2} \frac{r_2^2 r_3^2}{r_2}, \quad (4)$$

$$u_2(r_3) = \frac{1 - \mu_2}{E_2} \frac{r_2^2 P_1 - r_3^2 P_2}{r_3^2 - r_2^2} r_3 + \frac{1 + \mu_2}{E_2} \frac{P_1 - P_2}{r_3^2 - r_2^2} \frac{r_2^2 r_3^2}{r_3}. \quad (5)$$

Перемещение глинистой корки на внутреннем и внешнем радиусе

$$u_3(r_3) = \frac{1 - \mu_3}{E_3} \frac{r_3^2 P_2 - r_4^2 P_3}{r_4^2 - r_3^2} r_3 + \frac{1 + \mu_3}{E_3} \frac{P_2 - P_3}{r_4^2 - r_3^2} \frac{r_3^2 r_4^2}{r_3}, \quad (6)$$

$$u_3(r_4) = \frac{1 - \mu_3}{E_3} \frac{r_3^2 P_2 - r_4^2 P_3}{r_4^2 - r_3^2} r_4 + \frac{1 + \mu_3}{E_3} \frac{P_2 - P_3}{r_4^2 - r_3^2} \frac{r_3^2 r_4^2}{r_4}. \quad (7)$$

Перемещение точек породы на стенке скважины составит

$$u_4(r_4) = \frac{1 - \mu_4}{E_3} \frac{r_4^2 P_3 - r_5^2 P_4}{r_5^2 - r_4^2} r_4 + \frac{1 + \mu_4}{E_4} \frac{P_3 - P_4}{r_5^2 - r_4^2} \frac{r_4^2 r_5^2}{r_4}. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$K_1 = \frac{r_1}{r_2}; \phi_1 = \frac{1 + K_1^2}{1 - K_1^2}; K_2 = \frac{r_2}{r_3}; \phi_2 = \frac{1 + K_2^2}{1 - K_2^2}; \quad (9)$$

$$K_3 = \frac{r_3}{r_4}; \phi_3 = \frac{1 + K_3^2}{1 - K_3^2}; K_4 = \frac{r_4}{r_5} \rightarrow 0; \phi_4 = \frac{1 + K_4^2}{1 - K_4^2}.$$

Подставляя выражения перемещений (3)-(8) с учетом введенных обозначений (9) в условия неразрывности деформаций (2) после упрощений получим:

$$P_1 \left[\frac{\phi_1 - \mu_1}{E_1} + \frac{\phi_2 + \mu_2}{E_2} \right] - P_2 \left[\frac{\phi_2 + 1}{E_2} \right] - P_0 \frac{\phi_1 - 1}{E_1} = 0; \quad (10)$$

$$P_1 \left[\frac{\phi_2 - 1}{E_2} \right] - P_2 \left[\frac{\phi_2 - \mu_2}{E_2} + \frac{\phi_3 + \mu_3}{E_3} \right] + P_3 \frac{\phi_3 + 1}{E_3} = 0; \quad (11)$$

$$P_2 \left[\frac{\phi_3 - 1}{E_3} \right] - P_3 \left[\frac{\phi_3 - \mu_3}{E_3} + \frac{1 + \mu_4}{E_4} \right] + P_4 \frac{2}{E_4} = 0. \quad (12)$$

и, вводя обозначения

$$a = \frac{\phi_3 - 1}{E_3}; b = \frac{\phi_3 - \mu_3}{E_3} + \frac{1 + \mu_4}{E_4}; c = \frac{2}{E_4} P_4; d = \frac{\phi_2 - 1}{E_2}; f = \frac{\phi_3 + 1}{E_3}; \quad (13)$$

$$e = \frac{\phi_2 - \mu_2}{E_2} + \frac{\phi_3 + \mu_3}{E_3}; g = \frac{\phi_1 - \mu_1}{E_1} + \frac{\phi_2 + \mu_2}{E_2}; h = \frac{\phi_2 + 1}{E_2}; i = \frac{\phi_1 - 1}{E_1} P_0,$$

получим систему уравнений для нахождения контактных давлений

$$\begin{cases} P_2 a - P_3 b + c = 0 \\ P_1 d - P_2 e + P_3 f = 0. \\ P_1 g - P_2 h - i = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Выражения решения системы (14) имеют вид

$$P_1 = \frac{a \cdot f \cdot i - c \cdot f \cdot h - b \cdot i \cdot e}{a \cdot f \cdot g + b \cdot d \cdot h - b \cdot g \cdot e},$$

$$P_2 = -\frac{b \cdot d \cdot i + c \cdot f \cdot g}{a \cdot f \cdot g + b \cdot d \cdot h - b \cdot g \cdot e}, \quad (15)$$

$$P_3 = \frac{c \cdot d \cdot h - a \cdot d \cdot i - c \cdot g \cdot e}{a \cdot f \cdot g + b \cdot d \cdot h - b \cdot g \cdot e}.$$

Подставляя в уравнения (15) введенные обозначения (13) можно получить выражения контактных давлений P_1 , P_2 и P_3 , в зависимости от геометрических и механических параметров системы колонна – цементный камень – глинистая корка – порода.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа полученных зависимостей примем следующие параметры: $r_1 = 69$ мм (труба); $r_2 = 73$ мм (камень); $r_3 = (102 - 107)$ мм (глинистая корка); $r_4 = 107$ мм (порода); $E_1 = 2 \cdot 10^5$ МПа; $E_2 = (1 \div 15) \cdot 10^3$ МПа; $E_3 = \sim 30 \cdot 10^3$ МПа.

Были получены зависимости контактных давлений от величины пластического давления P_0 при отсутствии (рис.2) и с учетом горного бокового давления P_3 (рис.3), а также от модуля упругости цементного кольца E_2 (рис.4) и глинистой корки E_3 (рис.5) с учетом бокового давления.

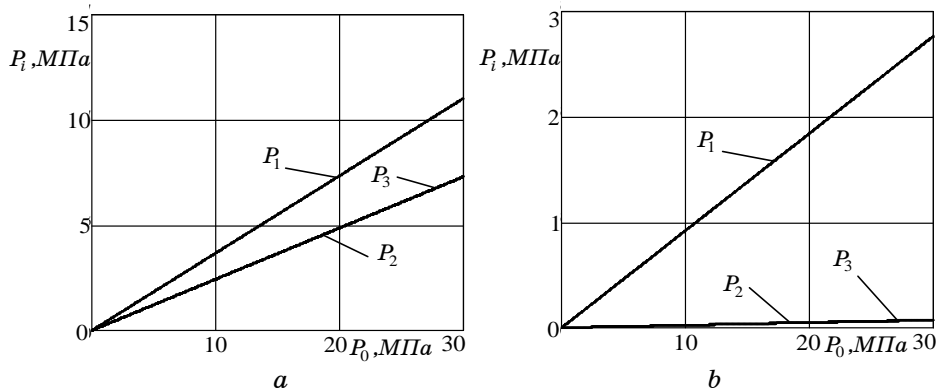


Рисунок 2 – Зависимость контактного давления от пластического давления P_0 при отсутствии горного бокового давления P_3 без глинистой корки (а) и с учетом корки (b)

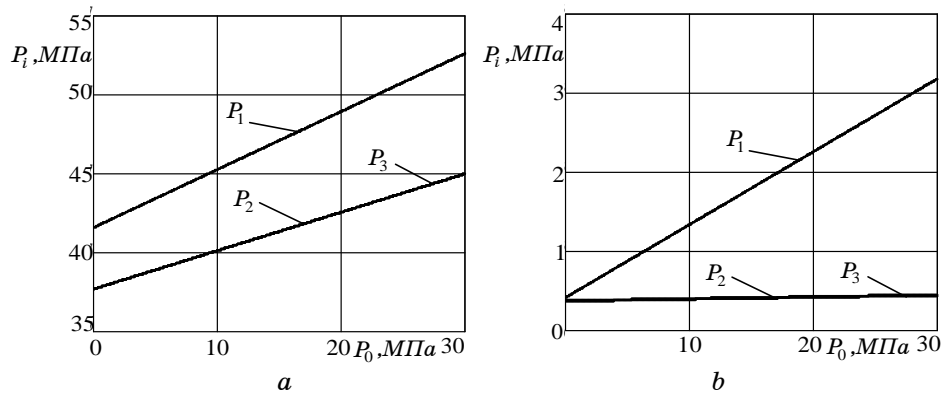


Рисунок 3 – Зависимость контактного давления от пластического давления P_0 с учетом горного бокового давления P_3 без глинистой корки (а) и с учетом корки (b)

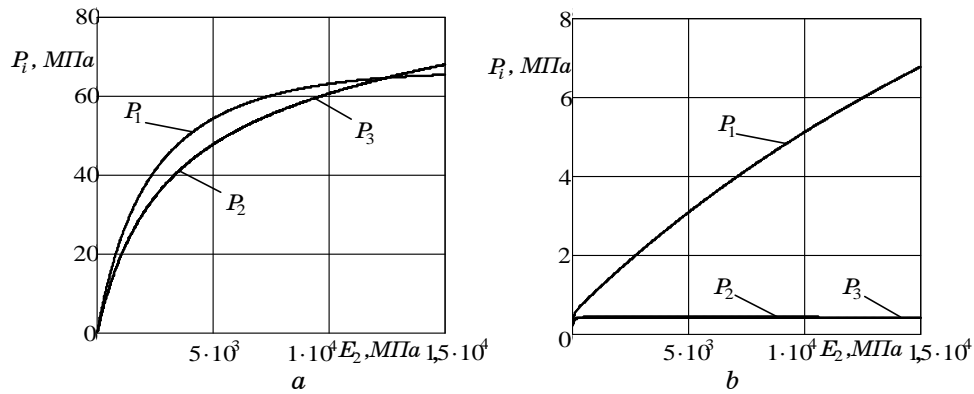


Рисунок 4 – Зависимость контактного давления от модуля упругости цементного кольца E_2 с учетом горного бокового давления P_3 без глинистой корки (а) и с учетом корки (б)

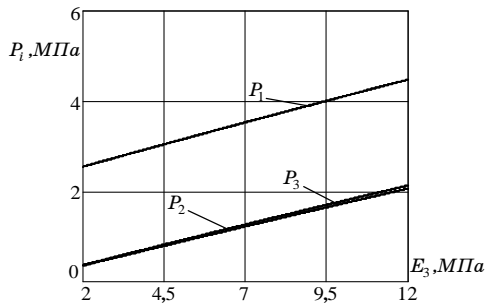


Рисунок 5 – Зависимость контактного давления от модуля упругости глинистой корки E_3

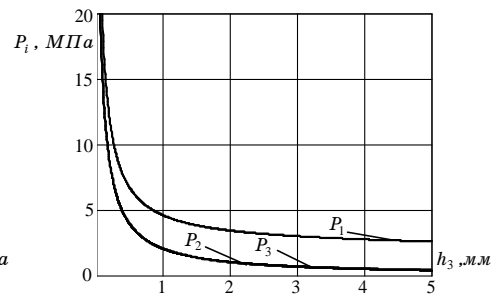


Рисунок 6 – Зависимость контактного давления от толщины глинистой корки

Зависимость контактных давлений P_1 , P_2 и P_3 от толщины глинистой корки представлена на рисунке 6. При увеличении толщины глинистой корки наблюдается сильное снижение контактного давления, при этом давление между поверхностями цементного кольца и глинистой корки и между глинистой коркой и породой практически не отличается. При наличии глинистой корки толщиной в 1 мм происходит падение контактного в 4-5 раз.

Как видно из приведенных данных наличие глинистой корки и ее толщина оказывает существенное влияние на герметичность скважины.

ВЫВОДЫ

Качественное крепление скважин и разобщение пластов, по определению многих ведущих специалистов отрасли – это, прежде всего, обеспечение герметичности заколонного пространства формированием монолитного цементного кольца, разобщающего флюидонасыщенные пласты, с герметичными контактами «цементный камень – порода», «цементный камень – обсадная колонна».

Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние параметров системы обсадная колонна – цементный камень – порода существенно сказывается на величине контактного давления.

Без отмыва глинистой корки даже применение расширяющейся добавки в количестве 10% не позволяет обеспечить герметичность. Качество отмыва оказывает существенное влияние на герметичность зацементированного участка.

Для предотвращения перетоков и гидропрорыва в процессе ожидания затвердевания цемента и после цементирования скважины между цементным кольцом и стенкой скважины должно сохраняться контактное давление. Одним из вариантов решения данного вопроса является применения расширяющегося тампонажного цемента.

Применение расширяющихся цементов в комплексе с мероприятиями по удалению части корок позволяет уплотнять контакты и упрочнять цементное кольцо, повышая герметичность заколонного пространства.

DEFLECTED MODE OF CEMENT RING IN BORE

I.B. Karintsev, A.A. Zhulyov,
Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine

The article shows the joint work of the system `pipe casing – cement stone – clay crust – rock`. Dependencies of contact pressures on mechanical and geometrical system parameters are obtained. The results of calculations for contact pressures in the presence and in the absence of crust are presented. The article gives evaluation of the influence of clay crust on contact pressure values.

Key words: bore, contact pressure, cement ring, clay crust.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН ЦЕМЕНТНОГО КІЛЬЦЯ В БУРОВІЙ СВЕРДЛОВИНІ

І. Б. Карінцев, О.О. Жульов,
Сумський державний університет,
вул. Р.-Корсакова 2, м. Суми, 40007, Україна

Розглянуті спільна робота системи обсадна труба – цементний камінь – глиниста кірка – порода. Отримано залежності контактних тисків від механічних та геометричних характеристик системи. Наведені результати розрахунків контактних тисків як при наявності глинистої кірки, так і при її відсутності. Дана оцінка впливу глинистої кірки на величину контактного тиску.

Ключові слова: свердловина, контактний тиск, цементний камінь, глиниста кірка.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Булатов А. И. Формирование и работа цементного камня в скважине / А. И. Булатов. – М.: Недра, 1990. – 409 с.
2. Булатов А. И. Технология цементирования нефтяных и газовых скважин/ А. И. Булатов. – М.: Недра, 1983.
3. Булатов А.И. Тампонажные материалы и технология цементирования скважин: учеб. для техникумов. – 4-е изд., перераб. и доп. / А. И. Булатов. – М.: Недра, 1991. – 336 с.
4. Булатов А. И. Тампонажные материалы: учебн. пособие для вузов / А. И. Булатов, В. С. Данюшевский. – М.: Недра, 1987. – 280 с.
5. Новохатский Д. Ф. Расширяющийся тампонажный цемент / Новохатский Д. Ф., Кривошей А. В., Рябова Л. И., и др.//. Нефть. х-во. – 2007. – № 6. – С. 42-43.

Поступила в редакцию 28 октября 2013 г.