

УДК 622.245

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТВОЛА ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ****В. С. Блохин, Е. В. Бандурина**

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

Первомайский проспект, 24, г. Полтава, 36001, Украина. E-mail: helena\_2005@ukr.net

Проведен анализ напряженно-деформируемого состояния глубоких скважин в породах, склонных к проявлению осложнений для использования при оперативном принятии решений как по скважинам, находящимся в бурении, так и по проектируемым с применением инженерного метода. Выполнен расчет напряженного состояния приствольной зоны исследуемых известняков с использованием данных гидроразрыва пород и пластового давления, замеренных по скважинам. Исходя из полученного напряженного состояния пород по стенкам и вблизи стенок скважины, выявлено, что будет проявляться интенсивное кавернообразование с шелушением пород и осыпями. Установлено, что размер шелушения пород определяется значениями и зоной действия максимальных напряжений.

**Ключевые слова:** инженерный метод расчета, напряженно-деформируемое состояние, глубокая скважина, ствол, осложнение.

**ОЦІНЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СТОВБУРА ГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ****В. С. Блохін, О. В. Бандуріна**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, 36001, Україна. E-mail: helena\_2005@ukr.net

Проведено аналіз напружено-деформованого стану глибоких свердловин у породах, схильних до проявлення ускладнень для використання при оперативному прийнятті рішень як по свердловинах, що знаходяться в бурінні, так і тих, що проектують із застосуванням інженерного методу. Виконано розрахунок напруженого стану пристовбурних зони досліджуваних вапняків з використанням даних гідророзриву порід і пластового тиску, вимірених по свердловинах. Виходячи з отриманого напруженого стану порід по стінках і поблизу стінок свердловини, виявлено, що буде проявлятися інтенсивне каверноутворення з лущенням порід і руйнуванням. Встановлено, що розмір лущення порід визначається значеннями і зоною дії максимальних напруг.

**Ключові слова:** інженерний метод розрахунку, напружено-деформується стан, глибока свердловина, стовбур, ускладнення.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Успешность освоения и эксплуатации нефтегазовых скважин, а также разведки месторождений нефти и газа в значительной мере определяется эффективностью строительства скважин. А в связи с ростом глубин и многообразием горно-геологических условий бурения возрастает актуальность проблемы обеспечения устойчивого состояния необсаженного ствола скважин. Исследования по предупреждению неплановых трудовых и денежных затрат при строительстве глубоких (нефтяных, газовых и др.) скважин в породах, склонных к проявлению осложнений, связанных с проработками ствола на данный момент являются наиболее актуальными. Поэтому прогнозирование напряжений, действующих по стволу и вблизи ствола вертикальной глубокой скважины, имеет большое практическое значение.

Напряжения совместно с физико-механическими и реологическими свойствами горных пород служат основой для расчета устойчивости стенок незакрепленных стволов скважин и расчетах на прочность обсадных колонн. Расчет напряженно-деформируемого состояния ствола скважины необходим для оценки рациональности принятой схемы разрушения пород на забое и надежности изоляции продуктивных пластов. Решением этой проблемы в той или иной мере посвящены работы Лехницкого С.Г., Макарова Л.В.[1, 2] но задача оценки напряженно-деформируемого состояния стволов глубоких скважин достаточно сложно описывалась аналитическими уравнениями. Известно, что проблема сохранения

устойчивости стенок скважины становится наиболее актуальной при бурении в глинистых породах различной степени литификации на нефтяных и газовых месторождениях Тимано-Печорской нефтегазодобывающей провинции [3] но решена она узко. Также проблема оценивания напряженно-деформируемого состояния решалась применимо к частным случаям Калашником А.И., Савченком Н.С. и др. [4–8]. Авторы подчеркивают, что анализ проходки скважин на площадях показал, что наиболее часто осложнения возникают вследствие нарушения устойчивости стенок скважин. По этой причине иногда скважины не достигают проектных глубин и подлежат ликвидации, не выполнив своего назначения при затратах на их строительство больших средств.

Цель работы – создание инженерной методики определения напряженно-деформируемого состояния ствола глубокой скважины.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Предлагаемая методика не требует использования дополнительного программного обеспечения и включает набор определенных математических операций, что и отличает ее от известных до сих пор. Она позволяет инженеру в процессе бурения скважины анализировать ее состояние и оперативно принимать решения по предупреждению аварийных ситуаций в скважине.

Нами решалась задача в следующей постановке (близкой задаче Ю.М. Либермана): исследовалось напряженное состояние тяжелого изотропного, од-

нородного упруго-пластического массива вблизи вертикальной круговой цилиндрической выработки конечной глубины, выполненной в этом массиве. Рассматривался элементарный участок (элемент) глубокой скважины как элемент с отверстием постоянного сечения радиусом  $r_1$ , нагруженным внутренним давлением  $P_1$ , постоянной толщины и наружным радиусом  $r_2$  нагруженным внешним давлением  $P_2$ . При решении исследовалась математическая модель, включающая уравнения равновесия, зависимости между компонентами деформаций и компонентами перемещений, уравнения, описывающие свойства среды, интенсивности напряжений и интенсивности деформаций, а также граничные условия: по стенкам скважины равномерно распределены напряжения  $\sigma_r = -P_1$ ; на границе упругих и пластичных деформаций соблюдается неразрывность значений напряжений и деформаций:  $\sigma_r^{nl} = \sigma_r^{yn}$ ,  $\sigma_t^{nl} = \sigma_t^{yn}$ ,  $u^{nl} = u^{yn}$ ,  $\sigma_t^{nl} + \sigma_r^{nl} = \sigma_t^{yn} + \sigma_r^{yn}$ , где  $\sigma_r^{nl}$ ,  $\sigma_r^{yn}$  – радиальные напряжения в пластичной и упругой области;  $\sigma_t^{nl}$ ,  $\sigma_t^{yn}$  – тангенциальные напряжения в пластической области;  $u^{nl}$ ,  $u^{yn}$  – радиальные перемещения в пластической и упругой области.

В основу расчета положены допущения о равномерном распределении нагрузки по толщине элемента и отсутствии нагрузок в плоскостях, параллельных продольной оси элемента.

Задача осесимметричная, поскольку вес является единственной внешней силой, действующей на массив, а деформационные перемещения в рассматриваемом полупространстве с вертикальной цилиндрической круговой выработкой имеют место только в плоскостях, проходящих через ось симметрии выработки. Во всех таких плоскостях распределение деформаций и напряжений будет одинаковым. Из принятых допущений следует, что напряженное состояние всех точек элемента двухосное. Это позволяет свести решение объемной задачи к решению распределения деформаций и напряжений в одной плоскости, проходящей через ось симметрии скважины (к плоскому деформированному состоянию). Допущение справедливо, если  $\frac{r_2}{t} \geq 2$  (где  $t$  – толщина элемента – деформированной части массива).

В связи с особенностями задачи, рассматривается упругопластический массив, в приствольной зоне скважины могут иметь место пластические, упруго-пластические и упругие деформации, поэтому нами исследованы пластическая и упругая зоны нагруженного массива со скважиной.

Значения напряжений, при которых на внутренних поверхностях отверстия появятся пластические деформации, находятся из условия пластичности Мизеса:

$$(\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 = 2\sigma_T^2 \quad (1)$$

Так как в рассматриваемом элементе нормальные напряжения  $\sigma_z$  не рассматриваются (они принимаются равномерно распределенными по всему массиву), то уравнение можно представить в виде (эк-

вивалентное напряжение по энергетической гипотезе возникновения пластических деформаций):

$$\sigma_i^2 - \sigma_r \sigma_t + \sigma_r^2 = \sigma_T^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала элемента скважины на рассматриваемой глубине.

По заданному давлению  $P_1$  из соотношения

$$-P_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cos(\varphi_1 + \frac{\pi}{6}) \quad (3)$$

находятся величина условной функции  $\varphi_1$ , а по заданному значению  $P_2$  из формулы

$$\frac{P_2}{\sigma_T} = \cos \varphi_c - \frac{e^{\sqrt{3}(\varphi_1 - \varphi_c)}}{\alpha^2 \sqrt{3}} \sin \varphi_1; \quad (4)$$

– условную функцию  $\varphi_c$ . После этого из соотношения

$$\beta = e^{\frac{\sqrt{3}}{2}(\varphi_1 - \varphi_c)} \sqrt{\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_c}} \quad (5)$$

находится безразмерный параметр  $\beta$ . Напряжения в пластической области подсчитываются по формулам

$$\sigma_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cos(\varphi - \frac{\pi}{6}) \quad \text{и} \quad \sigma_r = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cos(\varphi + \frac{\pi}{6}), \quad (6)$$

а в упругой – по уравнениям

$$\sigma_i = \sigma_T (\cos \varphi_c + \frac{\beta^2 \sin \varphi_c}{\sqrt{3} q^2}) \quad \text{и} \quad \sigma_r = \sigma_T (\cos \varphi_c - \frac{\beta^2 \sin \varphi_c}{\sqrt{3} q^2}). \quad (7)$$

Переход от  $\varphi$  к безразмерному радиусу  $q$  в пластической зоне осуществляется по выражению

$$q = e^{\frac{\sqrt{3}}{2}(\varphi_1 - \varphi)} \sqrt{\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi}} \quad (8)$$

Радиальное перемещение в пластической и упругой областях находится соответственно по уравнениям:

$$\frac{u}{r_1} = \frac{\sigma_T}{E} \beta e^{\frac{\sqrt{3}}{2}(\varphi - \varphi_c)} \sqrt{\frac{\sin \varphi_c}{\sin \varphi}} \sin(\varphi_c + \frac{\pi}{6}), \quad (9)$$

$$\frac{u}{r_1} = \frac{\sigma_T}{2E} (q \cos \varphi_c + \frac{\sqrt{3} \beta^2 \sin \varphi_c}{q}). \quad (10)$$

Поле напряжений, образующееся в приствольной зоне, отличается от первоначального концентрацией напряжений у стенок скважины, вследствие чего происходят упругие и пластичные перемещения горных пород. Изложенный метод справедлив только в случае наличия пластичных перемещений, в других случаях оценку напряженно-деформированного состояния пород можно выполнить с использованием следующих уравнений:

$$\sigma_i = \frac{P_1 - P_2 \alpha^2}{\alpha^2 - 1} + \frac{(P_1 - P_2) \alpha^2}{(\alpha^2 - 1) q^2}; \quad \sigma_r = \frac{P_1 - P_2 \alpha^2}{\alpha^2 - 1} - \frac{(P_1 - P_2) \alpha^2}{(\alpha^2 - 1) q^2}. \quad (11)$$

Радиальные перемещения при упругих деформациях элемента из несжимаемого материала могут быть найдены по формуле:

$$v = \frac{r_1}{E(\alpha^2 - 1)} [(1 + \mu)(P_1 - P_2)\alpha^2 + (1 - \mu)(P_1 - P_2\alpha^2)q^2] \frac{1}{q}. \quad (12)$$

Рекомендуемый метод расчета позволяет на достаточной (для инженерной практики) научной основе выполнить оценку напряженно-деформированного состояния ствола глубокой скважины и сформулировать, в частности, требования по его устойчивости.

С помощью предложенного инженерного метода исследовано напряженное состояние ствола глубокой скважины скв. № 503 и № 504 (рис. 1 и 2). В обеих скважинах рассмотрен один и тот же пласт, сложенный глинистыми известняками и залегающий примерно на равной глубине (Н=4160 м в скв. № 503 и Н=4280 м в скв. № 504). По скв. № 503 бурение известняков проходило без особых осложнений и с нормальным отбором керна. По скв. № 504 бурение сопровождалось проработками с вывалами и кавернообразованием (размер каверн достигал 500 мм при диаметре долота 215,9 мм), и низким процентом выхода керна. Естественно возникает вопрос – каковы причины различного поведения одинаковых пород, вскрытых соседними скважинами?

С этой целью для обеих скважин выполнен расчет напряженного состояния приствольной зоны исследуемых известняков с использованием данных гидроразрыва пород и пластового давления, замеренных по скважинам. Результаты расчета напряженного состояния для скв. № 504 приведены на рис. 2. Где приведены эпюры по поперечному сечению скважины, полученные при: геостатическом давлении  $P_z = 101,6$  МПа; внутреннем давлении  $P_1 = 56,2$  МПа; внешнем давлении  $P_2 = 65,3$  МПа; давлении гидроразрыва пласта  $P_{zp} = 84,5$  МПа; пластовом давлении  $P_{nl} = 54,0$  МПа; пределе прочности пород  $\sigma_T = 71,8$  МПа).

По скв. № 503 установлено (рис. 1). Приведенное значение, действующих по стволу в рассматриваемом сечении напряжений  $\sigma_i$  превышает предел текучести пород в условиях их залегания. Породы находятся в состоянии упругопластического деформирования [5, 7]. За пределами зоны влияния скважины на массив породы подвержен действию только напряженного состояния в пределах закона пропорциональности. По стенкам скважины распределяются сжимающие радиальные напряжения большой величины  $\sigma_r = -51,4$  МПа и незначительные окружные  $\sigma_t = 2,75$  МПа. Несмотря на наличие здесь растягивающих  $\sigma_t$ , на внутренней поверхности стенок скважины, за счет действующих  $\sigma_r$ , стенки находятся в достаточно устойчивом состоянии. В процессе бурения, в случае отсутствия больших перепадов давления в скважине, надежность стенок будет приемлемой для периода бурения скважины в проблемном интервале.

Общее напряженно-деформированное состояние ствола скв. № 503 обладает специфическими особенностями. Оно формируется в результате действия геостатического давления ( $P_z = 96,9$  МПа) и большого противодавления в скважине ( $P_1 = 51,6$  МПа  $>$   $P_2 = 25,6$  МПа). Под действием названных внешних сил

возникает неглубокая упрочняющаяся зона пород с упругопластической деформацией стенок скважины, далее следует зона разупрочненных пород ( $\sigma_i > \sigma_T$  и  $\sigma_i$  до 20,5 МПа), а за пределами зоны влияния скважины – массив с деформацией в пределах закона пропорциональности. Такое состояние пород и определяет ограниченную по времени устойчивость ствола скважины. Необходимо отметить, что излишнее противодавление (в данном случае  $\frac{P_1}{P_2} \approx 2$ ) также

как и недостаточное – нежелательно для пород, слагающих стенки скважины, с точки зрения их устойчивости. В рассмотренном случае, когда  $P_1 \approx 2P_2$  является глубинная зона на уровне поверхности  $r = r_c$  с максимальной величиной растягивающих напряжений  $\sigma_r$ , усложняющих напряженное состояние пород вблизи скважины.

Характерной особенностью рассматриваемого состояния пород по стволу скв. № 503 является наличие зоны для создания условия раскрытия первичных пор и трещин. Такое состояние пород необходимо учитывать при исследовании продуктивных горизонтов, т.к. оно более рационально для вскрытия пластов, их испытания и опробования (при испытании в скв. № 503 был зафиксирован приток, а в скв. № 504 – "Признаки"). Кроме того, в случае интерпретации результатов исследований пластов необходимо иметь в виду, что по отмеченной зоне, как «по колодцу», могут происходить перетоки между пластами, т.е. без анализа напряженного состояния массива вблизи ствола выводы по результатам испытаний будут не достаточно объективными. Приствольная зона с ее первичной и вторичной трещиноватостью еще не характеризует полностью коллекторские свойства испытываемого пласта. Они могут быть искажены за счет перетоков по "колодцу".

По скв. № 504 отмечено (рис. 2). В сравнении со скв. № 503 напряженное состояние пород резко меняется, причем в худшую сторону с точки зрения устойчивости стенок ствола. Примерно при равной величине напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_z$  здесь на стенках скважины появляются почти на порядок больше (по сравнению со скв. № 503) растягивающие напряжения  $\sigma_t$ . Порода по стенкам скважины находится в условиях упругопластических деформаций, затем по сечению вглубь массива идет небольшая зона упругих деформаций и далее – пластических. За пределами границ зоны влияния скважины на массив, в горных породах гидростатическое давление в точке ( $\sigma_0$ ) превышает предел текучести, установленный с учетом механических свойств пород в условиях их залегания, где  $\sigma_0 = -79,4$  МПа, а  $\sigma_T = 71,8$  МПа. Здесь (в горном массиве на рассматриваемой глубине скважины) порода имеет только пластические деформации и находится в условиях близких к всестороннему сжатию. Участок массива пород вблизи скважины ограниченный поверхностями  $r = r_1$  и  $r = 2r_1$  воспринимает действие окружных напряжений  $\sigma_\theta$ , характер распределения которых свидетельствует о наличии на этом участке пород чистого изгиба. Напряжения  $\sigma_r$  изменяются практически по линейному закону от +24,0 МПа на стенках скважины и до -71,3 МПа на поверхности с  $r = 2r_1$ . Проведенный анализ состояния пород свидетельствует о том, что в горном массиве, не находящемся в условиях равнове-

сия, действуют силы (в данном случае при оценке только  $\sigma_r$ , получено 650 кН), способные порвать или разрушить горные породы, слагающие стенки скважины. В исследуемой скважине, исходя из получен-

ного напряженного состояния пород по стенкам и вблизи стенок скважины, будет проявляться интенсивное кавернообразование с шелушением пород и осыпями.

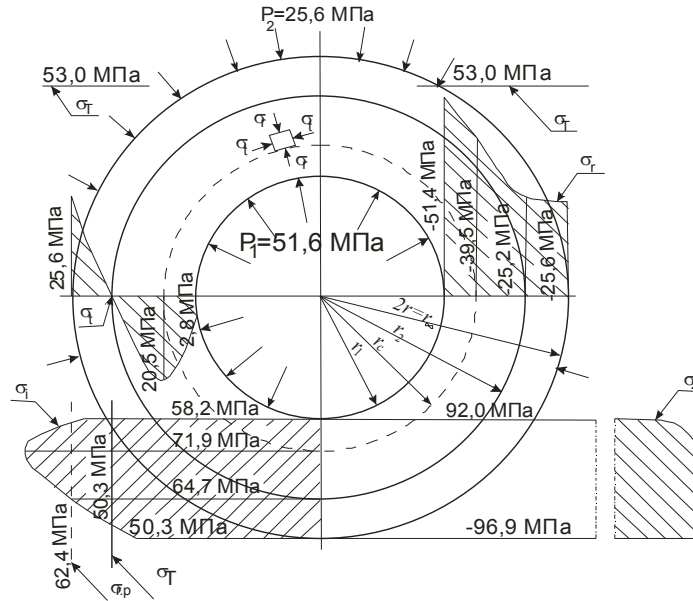


Рисунок 1 – Распределение напряжений в глинистых известняках скв.503 по сечению на глубине 4160 м

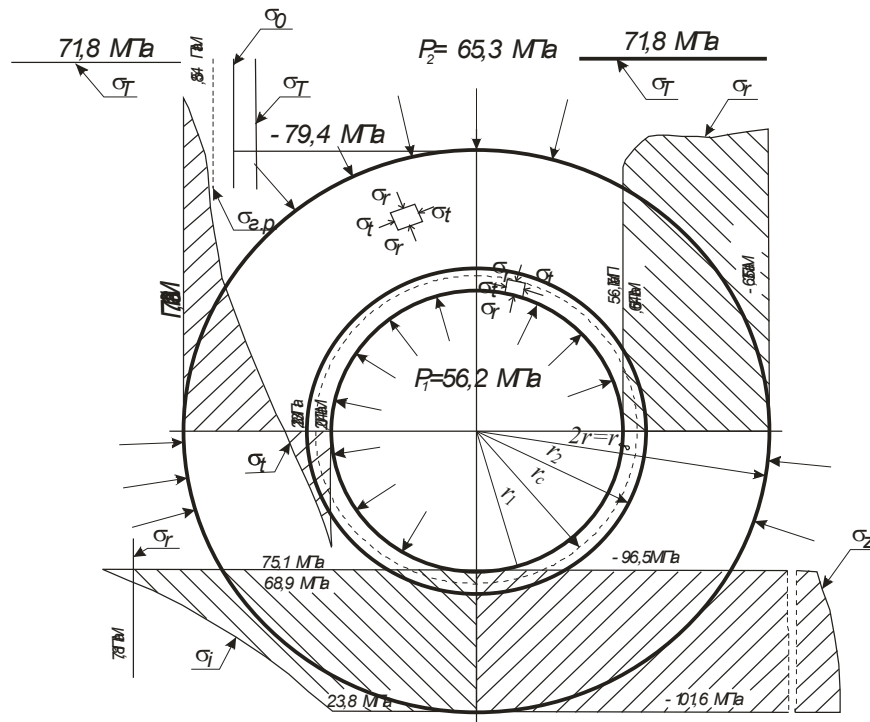


Рисунок 2 – Распределение напряжений в глинистых известняках скв.504 по сечению на глубине 4280 м

На стенках скважины будут формироваться каверны, характерные для хрупкого разрушения. Размер шелушения пород определяется значениями и зоной действия максимальных напряжений  $\sigma_i$ , зона действия которых  $r = r_c$ .

Кавернообразование и выколы, в свою очередь, являются следствием общего напряженного состояния пород, но определяющими при их зарождении и развитии будут  $\sigma_r$ . Приведенное напряженное со-

стояние пород нежелательно с точки зрения устойчивости стенок ствола скважины. Под действием  $\sigma_r$  и изгибающего момента возникают разнонаправленные трещины, как по стенкам скважины, так и вблизи их, происходят выколы пород протяженностью вплоть до зоны, где они подвержены только действию упругих деформации.

Последняя зона под влиянием давления породы горного массива, находящейся в пластическом со-

стоянии в условиях, близких к всестороннему сжатию, будет способствовать дальнейшему развитию каверн размером до двух диаметров скважины. Это и подтверждается практикой бурения скв. № 504.

**ВЫВОДЫ.** Рекомендуемый метод расчета позволяет на достаточной (для инженерной практики) научной основе выполнить оценку напряженно-деформированного состояния ствола глубокой скважины и сформулировать, в частности, требования по его устойчивости.

Ликвидировать начавшуюся неупругую деформацию стенок скважины очень трудно, а иногда остановить ее просто бывает невозможно. Гораздо эффективнее в подобных случаях предупредить возможность нарушения целостности массива, а для этого необходимо предварительно установить его напряженное состояние.

Полученные результаты исследований находятся в хорошем соответствии с промысловыми данными проходки скважин №№ 503 и 504.

Для борьбы с осложнениями в скв. № 504 могут быть использованы буровые растворы с повышенным удельным весом 1,28–1,36 г/см<sup>3</sup>. В данном случае для получения устойчивого состояния ствола скважины желательнее применять минерализованный буровой раствор повышенной плотности 1,34 г/см<sup>3</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лехницкий С.Г. Определение напряжений в упругом изотропном массиве вблизи вертикальной

цилиндрической выработки круглого сечения // Изв. АН СССР, ОТН. – 1938. – № 7. – С. 45–51.

2. Определение напряжений в упруго-пластическом тяжелом массиве вокруг вертикальной цилиндрической выработки конечной глубины /Л.В. Макаров, В.П. Прокопьев // Изв. Вуз. Горный журнал. – 1979. – № 4. – С. 43–48.

3. Деминская Н.Г. Разработка технологии сохранения устойчивости литифицированных глин на основе регулируемой кольматации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук по специальности 25.00.15 – «Технология бурения и освоения скважин». – Ухта, 2008. – 21 с.

4. Техногенное деформирование недр / А.И. Калашник, Н.А. Калашник // Рациональное освоение недр. – 2010. – № 2. – С. 34–38.

5. Физика нефтяного и газового пласта / А.Ф. Мирзаджанзаде, И.М. Ахметов. – Москва–Ижевск: Инст. компьютерных исследований, 2005. – С. 67–72.

6. Оценка напряженного состояния горных пород в окрестности газоконденсатного месторождения на морском шельфе / С.Н. Савченко, Н.А. Калашник // ФТПРПИ. – 2001. – № 4. – С. 45–49.

7. Шашенко А.Н. Механика горных пород: научное пособие. – Днепропетровск: Национальная горная академия Украины, 2002. – 302 с.

8. Water-based drilling fluid for use in shale formations. Pat. U.S. 5925598, MPK6 from 09 to 7/02. Baroid Technology Inc., Mody Fersheed K., Fisk James. № 08/742521: appl. 01.11.96, publ. 20.07.99.

#### ESTIMATION OF STRESS-STRAIN STATE OF DEEP BOREHOLE

**V. Blokhin, O. Bandurina**

Poltava Yuri Kondratyuk National Technical University

The article presents the analyses of the stress-strain state of deep rockholes, which could implicate the effectiveness of decision making both for the holes in the drilling and potential ones forecasting via engineering methods. The calculation of the stress state of nearwellbore area of the limestone studied using the data of rock fracturing and reservoir pressure measurements in wells are performed. Studying of stress state of rock walls and nearwellbore area revealed high possibility of intense caving formations with rock peeling and talus. It is found that the quantity of rock peeling is determined by values and area of the maximum stress.

**Key words:** engineering method of calculation, stressed-deformed state, deep well, borehole, implication.

#### REFERENCES

1. Deminskaya N.G. Development of technology for conservation sustainability of lithified clay-based adjustable mudding. Abstract of dissertation for the degree of candidate of sciences, Engineering, specialty 25.00.15 – "Technology of drilling and development wells." – Ukhta, 2008. – 21 p. [in Russian]

2. Maninduced deformationing interior /A.I. Kalashnik, N.A. Kalashnik // *Ratsionalnoe osvoenie neдр*. – 2010. – № 2. – PP. 34–38. [in Russian]

3. Lehnitsky S.G. Determination of stress in an elastic isotropic massif near the vertical cylindrical working of round section // *News of Academy of Sciences of USSR, OTN*. – 1938. – № 7. – PP. 45–51. [in Russian]

4. Determination of stress in elastic-plastic heavy massif around vertical cylindrical working of finite depth / L.V. Makarov, V.P. Prokopiev // *Mining journal*. – 1979. – № 4. – PP. 43–48. [in Russian]

5. *Fizika neflyanogo i gazovogo plasta* [Physics of oil and gas reservoir] / A.F. Mirzadzhanzade, I.M. Akhmetov. – Moscow–Izhevsk: Institute of Computer Sciences, 2005. – PP. 67–72. [in Russian]

6. *Estimation of the stress state of rocks in the vicinity of gas-condensate off-shore field* / S.N. Savchenko, N.A. Kalashnik // *FTPRPI*. – 2001. – № 4. – PP. 45–49. [in Russian]

7. Shashenko A.N. *Mekhanika gornyh porod* [Rock mechanics]. – Dnepropetrovsk: National Mining Academy of Ukraine, 2002. – 302 p. [in Ukrainian]

8. Water-based drilling fluid for use in shale formations. Pat. U.S. 5925598, MPK6 from 09 to 7/02. Baroid Technology Inc., Mody Fersheed K., Fisk James. Number 08/742521: appl. 01.11.96, publ. 20.07.99.

Стаття надійшла 10.01.2013.

