УДК 539.3

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КОЛЬЦА, ПРИМЫКАЮЩЕГО К СТВОЛУ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

А. М. Ильясов

Институт механики им. Р. Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН,
450054 Уфа, Россия
E-mail: amilyasov67@gmail.com

В рамках модели идеально пластического изотропного тела на основе решения задач Ламе для однослойной и двухслойной труб, а также критерия текучести Губера — Мизеса предложена модель для прогнозирования прочности цементного кольца, примыкающего к стволу добывающей скважины, без учета внутренних и температурных напряжений.

Ключевые слова: упругое идеально пластическое тело, задача Ламе, критерий текучести, цементное кольцо.

DOI: 10.15372/PMTF20170120

Введение. На поздних стадиях разработки нефтяных месторождений происходит обводнение большинства добывающих скважин, что обусловлено либо прорывом в скважину нагнетаемой воды по пропласткам с наибольшей проницаемостью, либо фильтрацией воды в скважины из ближайших к разрабатываемому участку пласта водонасыщенных пропластков вследствие разрушения цементного кольца между скважиной и породой. В обоих случаях возникает необходимость изоляции водонасыщенных пропластков, приводящих к обводнению скважины. В качестве материалов для водоизоляционных экранов используются отверждающиеся материалы, а именно цементные растворы и жидкие смолы.

После водоизоляции соответствующих пропластков добывающая скважина вновь вводится в эксплуатацию. Важной задачей является определение величин забойного и пластового давлений, а также свойств цементного камня, при которых цементное кольцо не будет разрушаться. В данной работе предложена модель для прогноза прочности цементного кольца и исследована зависимость его прочности от параметров работы скважины.

1. Условия текучести изотропного идеально пластического материала круглой трубы. Рассмотрим толстостенную трубу конечной высоты h с внутренним радиусом r_0 и внешним радиусом $R > r_0$, изготовленную из изотропного идеально пластического материала.

Известно аналитическое решение задачи Ламе для изотропной упругой трубы с защемленными торцами, находящейся в изотермических условиях под действием внутреннего p и внешнего P давлений. Предполагается, что внутренние и температурные напряжения отсутствуют. Решение данной задачи, полученное с использованием полуобратного метода

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-97027р-поволжье-а) и Федерального агентства по науке и инновациям РФ.

Сен-Венана, приведено в [1]. Выражения для компонент тензора напряжений в цилиндрической системе координат имеют вид

$$\sigma_{rr} = \frac{r_0^2 p}{R^2 - r_0^2}\Big(1 - \frac{R^2}{r^2}\Big) - \frac{R^2 P}{R^2 - r_0^2}\Big(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\Big),$$
$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{r_0^2 p}{R^2 - r_0^2}\Big(1 + \frac{R^2}{r^2}\Big) - \frac{R^2 P}{R^2 - r_0^2}\Big(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\Big), \tag{1.1}$$
$$\sigma_{zz} = 2\nu\, \frac{r_0^2 p - R^2 P}{R^2 - r_0^2},$$

где $r_0 \leqslant r \leqslant R$ — радиальная координата цилиндрической системы; $0 \leqslant \varphi \leqslant 2\pi$ — окружная координата; $0 \leqslant z \leqslant h$ — вертикальная координата; $\nu \in [0, 1/2]$ — коэффициент Пуассона материала. Недиагональные компоненты тензора напряжений равны нулю.

Локальный критерий Губера — Мизеса отсутствия течения в частице материала, записанный в главных компонентах тензора напряжений σ для функции нагружения $f(\sigma)$, имеет вид [1]

$$f(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 < 2\sigma_s^2, \tag{1.2}$$

где σ_s — предел текучести материала.

Поскольку в уравнениях (1.1) компоненты тензора напряжений являются главными, подставляя напряжения из этих уравнений в левую часть выражения (1.2), получаем следующую функцию нагружения для произвольной частицы цилиндра:

$$f(r) = \frac{4R^4 r_0^4 (P - p)^2}{(R^2 - r_0^2)^2}\, \frac{1}{r^4} + \Big[A\Big(1 - \frac{R^2}{r^2}\Big) - B\Big(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\Big) - C\Big]^2 + \\ + \Big[A\Big(1 + \frac{R^2}{r^2}\Big) - B\Big(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\Big) - C\Big]^2, \tag{1.3}$$

$$A = \frac{r_0^2 p}{R^2 - r_0^2}, \qquad B = \frac{R^2\, P}{R^2 - r_0^2}, \qquad C = 2\nu\, \frac{r_0^2 p - R^2 P}{R^2 - r_0^2}.$$

Вычислим производную функции $f(r)$:

$$f'(r) = -\frac{8}{r^5}\Big(\frac{2R^4 r_0^4 (P - p)^2}{(R^2 - r_0^2)^2} + (AR^2 - B r_0^2)^2\Big) < 0.$$

Таким образом, положительная по определению функция нагружения монотонно убывает при всех значениях $r \in [r_0, R]$. Следовательно, ее максимум достигается на внутренней границе цилиндра при $r = r_0$ и сначала пластическое течение возникает в частицах на этой границе.

Введем следующие безразмерные параметры задачи:

$$x = \frac{p}{P}, \qquad \Sigma_s = \frac{\sigma_s}{P}, \qquad \rho = \frac{R}{r_0}. \tag{1.4}$$

Силовой параметр x определяет отношение давлений на внутренней и внешней границах, прочностный параметр $\Sigma_s > 0$ — отношение предела текучести материала к давлению на внешней границе кругового цилиндра, а геометрический параметр $\rho > 1$ — отношение внешнего и внутреннего радиусов цилиндра.

Записав критерий Губера — Мизеса для максимального значения функции нагружения с использованием введенных безразмерных параметров, получаем глобальное условие отсутствия текучести во всем цилиндре в виде квадратичного трехпараметрического неравенства относительно переменной x с действительными коэффициентами:

$$\begin{gathered} a_1 x^2 + b_1 x + c_1 < 0, \\ a_1 = 3\rho^4 + (1-2\nu)^2, \qquad b_1 = -2[3\rho^4 + \rho^2(1-2\nu)^2], \\ c_1 = 4(\nu^2 - \nu + 1)\rho^4 - (\rho^2 - 1)^2 \Sigma_s^2. \end{gathered} \tag{1.5}$$

Обратное неравенство определяет область текучести по переменной x. Возможны две области изменения силового параметра: $x \in [0, 1]$ и $x > 1$.

Из (1.5) следует, что коэффициент $a_1 > 0$, а коэффициент $b_1 < 0$. Поэтому координата вершины параболы

$$x_0 = -\frac{b_1}{2a_1} = \frac{3\rho^4 + \rho^2(1-2\nu)^2}{3\rho^4 + (1-2\nu)^2} \tag{1.6}$$

положительна. Из (1.6) следует, что $x_0 > 1$, поскольку $\rho > 1$. При известных знаках параметров a_1 и x_0 решение неравенства зависит от знаков дискриминанта $D = b_1^2 - 4a_1c_1$ и свободного слагаемого c_1, а также от координаты вершины параболы x_0 и положения корней уравнения $a_1x^2 + b_1x + c_1 = 0$ относительно единицы.

Рассмотрим случай $x \in [0, 1]$. Если $D \leqslant 0$, то неравенство (1.5) не выполняется ни при каких значениях переменной x. Следовательно, пластическое течение материала цилиндра возникает при любых давлениях на его боковую поверхность.

Пусть $D > 0$. Обозначим через x_1, x_2 больший и меньший корни уравнения $a_1x^2 + b_1x + c_1 = 0$ соответственно:

$$x_{1,2} = \frac{-b_1 \pm \sqrt{D}}{2a_1}. \tag{1.7}$$

В случае $c_1 \geqslant 0$ и $x_0 > 1$ при $0 \leqslant x_2 \leqslant 1$ и $x_1 > 1$ материал цилиндра не разрушается (не достигается предел текучести), если $x_2 < x \leqslant 1$, и течет, если $0 \leqslant x \leqslant x_2$. При $x_1 > 1$, $x_2 > 1$ материал цилиндра течет при $0 \leqslant x \leqslant 1$, т. е. при любых давлениях на боковую поверхность цилиндра.

В случае $c_1 < 0$ при $x_0 > 1$, $x_2 < 0$, $x_1 > 1$ материал цилиндра не разрушается при $0 \leqslant x \leqslant 1$.

Итак, при $x \in [0, 1]$ возможны четыре случая. Области текучести и прочности цилиндра представлены в табл. 1. При $x > 1$ также возможны четыре случая. Области текучести и прочности цилиндра для этого случая представлены в табл. 2.

2. Сравнение прогнозируемой прочности цементного кольца с экспериментальными данными. Рассмотрим задачу о прочности цементного экрана после водоизоляции добывающей скважины цементным раствором. В результате химической реакции гидратации [2] и образования кристаллогидратной структуры (в основном гидросиликатов кальция) [3] цементный раствор превращается в цементный камень. В затвердевающем цементном камне всегда имеются внутренние напряжения, дефекты и микротрещины. Вследствие изменения состава связанной воды процессы затвердевания и разупрочнения продолжаются в течение всей “жизни” бетонов.

При длительном нагружении деформирование происходит в основном за счет накопления деформации ползучести. Однако прочностные параметры бетонов определяются в экспериментах при кратковременных воздействиях на образцы. Типичная (ε–σ)-диаграмма кратковременного ($20 \div 60$ мин) деформирования при одноосном сжатии цементного камня

Таблица 1

Области прочности и текучести цилиндра при $x \in [0,1]$

Номер области решения неравенства (1.5)	Области изменения D и c_1	Область изменения x_0	Положение корней x_1, x_2 относительно единицы	Область прочности	Область текучести
1	$D \leqslant 0$	$x_0 > 1$	—	—	$x \in [0,1]$
2.1	$D > 0,\ c_1 \geqslant 0$	$x_0 > 1$	$x_2 \in [0,1],\ x_1 > 1$	$x \in]x_2,1]$	$x \in [0,x_2]$
2.2	$D > 0,\ c_1 \geqslant 0$	$x_0 > 1$	$x_1 > 1,\ x_2 > 1$	—	$x \in [0,1]$
3	$D > 0,\ c_1 < 0$	$x_0 > 1$	$x_1 > 1,\ x_2 < 0$	$x \in [0,1]$	—

Таблица 2

Области прочности и текучести цилиндра при $x > 1$

Номер области решения неравенства (1.5)	Области изменения D и c_1	Область изменения x_0	Положение корней x_1, x_2 относительно единицы	Область прочности	Область текучести
1	$D \leqslant 0$	$x_0 > 1$	—	—	$x > 1$
2.1	$D > 0,\ c_1 \geqslant 0$	$x_0 > 1$	$x_2 \in [0,1],\ x_1 > 1$	$x \in [1,x_1[$	$x \geqslant x_1$
2.2	$D > 0,\ c_1 \geqslant 0$	$x_0 > 1$	$x_1 > 1,\ x_2 > 1$	$x \in]x_2,x_1[$	$x \in [1,x_2] \cup [x_1,\infty)$
3	$D > 0,\ c_1 < 0$	$x_0 > 1$	$x_1 > 1,\ x_2 < 0$	$x \in [1,x_1[$	$x \geqslant x_1$

и бетонов при постоянной скорости деформации содержит линейный нисходящий, нелинейный нисходящий и нелинейный восходящий участки [4]. На линейном участке не происходит образования новых микротрещин. На нелинейном участке вплоть до момента достижения максимального напряжения происходит процесс образования микротрещин (развитие псевдопластических деформаций). Наконец, на восходящем участке диаграммы происходят процессы неустойчивого развития микротрещин, их ветвления и слияния в неустойчивые макротрещины. На этой ветви деформационной диаграммы происходит разрушение цементного камня или бетона. В нормативных документах в качестве предела прочности бетона принимается максимальное напряжение на (ε–σ)-диаграмме [4].

При постоянной скорости нагружения на кривой ε–σ одноосного сжатия имеются только нисходящие участки. При этом скорость нагружения оказывает незначительное влияние на величину предела прочности. Так, увеличение скорости нагружения с 0,1 до 10,0 МН/(кг $\cdot$ м^2) приводит к увеличению предела прочности лишь на 10 % [2].

Для определения критических внешних параметров воздействия на цементный экран в общем случае трехосного напряженного состояния аппроксимируем поверхность нагружения поверхностью текучести Мизеса, т. е. будем использовать критерий Губера — Мизеса локального разрушения идеально пластического тела.

Приведем краткое описание конструкции добывающей скважины. Скважина представляет собой двухслойный круговой цилиндр, состоящий из стальной трубы (эксплуатационной колонны) с внешним радиусом R_e и толщиной стенок δ, и из цементного кольца с внешним радиусом $R_w > R_e$, заполняющего так называемое заколонное пространство между породой и эксплуатационной колонной. При водоизоляции цементный раствор через перфорационные отверстия заполняет пустоты в "заколонном" пространстве, образовавшиеся в результате работы скважины при депрессиях, превышающих критические, когда происходит разрушение цементного кольца. Однако в породу цементный раствор не проникает, поскольку минимальный характерный диаметр его дисперсных частиц, как правило, больше характерных размеров пор в породе. После отверждения цементного раствора проводится тестирование на герметичность "заколонного" пространства скважины. Если скважина не герметична, то процедура цементирования повторяется до тех пор, пока не будет достигнута полная герметизация скважины.

Далее будем считать, что на контактных границах между породой и цементным кольцом, а также между эксплуатационной колонной и цементным кольцом отсутствуют разрывы радиус-вектора и вектора перемещения. С учетом предположения об изотермичности задачи это означает, что рассматриваемые цилиндрические поверхности являются поверхностями идеального контакта [5]. Векторы напряжений $\boldsymbol{\sigma}_n$ на цилиндрических контактных границах порода — цементное кольцо и эксплуатационная колонна — цементное кольцо должны быть непрерывными, т. е. слева и справа от этих границ должны выполняться равенства

$$\boldsymbol{\sigma}_n(R_e - 0) = \boldsymbol{\sigma}_n(R_e + 0), \qquad \boldsymbol{\sigma}_n(R_w - 0) = \boldsymbol{\sigma}_n(R_w + 0). \tag{2.1}$$

Поскольку со стороны породы на цементное кольцо действует только пластовое (поровое) давление p_k, на контактной границе действует только нормальное напряжение: $\boldsymbol{\sigma}_n(R_w + 0) = -p_k\boldsymbol{n}$ ($\boldsymbol{n}$ — внешняя нормаль к контактной границе). Тогда с учетом второго условия (2.1) условие на внешней границе цементного кольца имеет вид

$$\boldsymbol{\sigma}_n(R_w) = -p_k\boldsymbol{n}. \tag{2.2}$$

Кроме того, на внешней границе эксплуатационной колонны должна быть непрерывна радиальная составляющая вектора перемещений:

$$u(R_e - 0) = u(R_e + 0). \tag{2.3}$$

Для того чтобы найти вектор напряжения на внутренней границе цементного кольца при $r = R_e$, нужно решить задачу Ламе для составной двухслойной трубы с условием (2.2) на внешней границе трубы при $r = R_w$ и условием

$$\boldsymbol{\sigma}_n(R_t) = -p_w\boldsymbol{n} \tag{2.4}$$

на внутренней границе трубы при $r = R_t = R_e - \delta$ (p_w — забойное давление в добывающей скважине, которое может быть равно пластовому давлению, в случае если скважина не работает). Граничные условия на торцах цилиндра и другие условия задачи аналогичны условиям описанной в п. **1** задачи Ламе в классической постановке.

Далее нижним индексом "1" отмечены параметры и физические величины, соответствующие эксплуатационной колонне, индексом "2" — аналогичные величины, соответствующие цементному кольцу. Как и в работе [1], примем, что в двухслойном цилиндре отличны от нуля только радиальные перемещения $u_i(r)$, $i = 1, 2$, зависящие только от радиальной координаты.

Следуя [1], можно решить задачу Ламе для двухслойного цилиндра с граничными условиями (2.2), (2.4) с учетом непрерывности перемещений (2.3). Приведем выражение для давления на внутренней границе цементного кольца:

$$p_e = p(R_e) = -\sigma_2^{11}(R_e) = -\frac{E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}\,G_2 + \frac{E_2}{(1+\nu_2)}\,\frac{1}{R_e^2}\,H_2,$$

$$H_2 = \Big(\frac{1}{1-2\nu_2}\,G_2 + \frac{1+\nu_2}{E_2}\,p_k\Big)R_w^2, \qquad G_2 = \frac{f_1a_{21} - f_2a_{11}}{a_{11}a_{22} + a_{21}a_{12}},$$

$$a_{11} = \frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)}\Big(1 - \frac{R_t^2}{R_e^2}\Big), \qquad a_{21} = 1 + \frac{1}{1-2\nu_1}\,\frac{R_t^2}{R_e^2}, \tag{2.5}$$

Таблица 3

Рабочие параметры скважины и характеристики ее материала

Номер скважины	p_k, МПа	p_w, МПа	σ_s, МПа	Σ_s	ρ
1	23,710	6,434	16,921	0,713	1,479
2	23,811	17,225	16,921	0,710	1,479
3	14,894	5,339	16,921	1,136	1,479
4	14,489	8,399	16,921	1,167	1,479

Таблица 4

Расчетные значения параметров для четырех добывающих скважин

Номер скважины	ν	D	c_1	x_0	x_1	x_2	p_e, МПа	x
1	0,1	−8,773	16,718	1,050	—	—	24,791	1,045
	0,2	13,168	15,377	1,029	1,152	0,905	23,770	1,002
2	0,1	−9,140	16,724	1,050	—	—	27,460	1,153
	0,2	12,808	15,383	1,029	1,150	0,907	26,400	1,108
3	0,1	57,527	15,614	1,050	1,303	0,798	15,883	1,065
	0,2	78,232	14,273	1,029	1,329	0,728	15,237	1,023
4	0,1	63,740	15,510	1,050	1,316	0,784	16,214	1,119
	0,2	84,329	14,169	1,029	1,340	0,717	15,575	1,074

$$a_{12} = \frac{E_2}{(1+\nu_2)(1-2\nu_2)}\Big(\frac{R_w^2}{R_e^2} - 1\Big), \qquad a_{22} = 1 + \frac{1}{1-2\nu_2}\,\frac{R_w^2}{R_e^2},$$

$$f_1 = \frac{R_t^2}{R_e^2}\,p_w - \frac{R_w^2}{R_e^2}\,p_k, \qquad f_2 = \frac{1+\nu_2}{E_2}\,\frac{R_w^2}{R_e^2}\,p_k - \frac{1+\nu_1}{E_1}\,\frac{R_t^2}{R_e^2}\,p_w.$$

Для того чтобы получить оценку прочности цементного кольца, в (1.4) нужно положить

$$p = p_e, \quad P = p_k, \quad R = R_w, \quad r_0 = R_e, \tag{2.6}$$

а в формулах (1.5)–(1.7) положить $\nu = \nu_2$ и использовать данные, представленные в табл. 1, 2.

Характерные значения внутреннего (внешний радиус эксплуатационной колонны) R_e и внешнего (внешний радиус скважины) R_w радиусов цементного кольца равны $r_0 = R_e = 0{,}073$ м и $R = R_w = 0{,}108$ м. Тогда $\rho = R_w/R_e = 1{,}479$. Далее значения параметров приводятся с точностью до трех знаков после запятой. Характерная толщина стенок эксплуатационной колонны равна $\delta = 0{,}007$ м, характерный внутренний радиус эксплуатационной колонны составляет $R_t = R_e - \delta = 0{,}066$ м.

В табл. 3, 4 приведены результаты расчетов для четырех добывающих скважин, для водоизоляции которых использовался цемент одной марки со средней семидневной прочностью $\sigma_s = 16{,}921$ МПа. Согласно данным работы [6] значение коэффициента Пуассона цементного камня находится в диапазоне $\nu_2 \in [0{,}1; 0{,}2]$. Поэтому в табл. 4 представлены результаты расчетов для двух предельных значений: $\nu_2 = 0{,}1$ и $\nu_2 = 0{,}2$. С использованием линейной экстраполяции данных работы [6] получено характерное значение модуля Юнга цементного камня $E_2 = 21\,500$ МПа.

В качестве эксплуатационных колонн используются трубы класса прочности J55 [7], пределы текучести которых при относительном удлинении $\delta l = 0{,}5$ % находятся в диапазоне $379 \div 552$ МПа и на порядок превышают прочность цементного камня. В качестве материала для этих труб используется углеродистая сталь марки Ст.45 [8] с характерным модулем Юнга $E_1 = 204\,000$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu_1 = 0{,}25$.

В табл. 4 приведены предельные значения коэффициента Пуассона, дискриминант и коэффициент c_1 уравнения (1.5), координата вершины параболы x_0, значения корней уравнения (1.5) x_1 и x_2, давление на внутренней границе цементного кольца p_e, значение силового параметра $x = p_e/p_k$. Из табл. 4 следует, что для всех скважин силовой параметр $x > 1$, т. е. давление на внутренней границе цементного кольца превышает давление на его внешней границе.

Если коэффициент Пуассона равен $\nu_2 = 0{,}1$, то цементное кольцо на первой и второй скважинах при данной прочности цементного камня σ_s будет разрушаться при любых забойных давлениях (случай 1 в табл. 2), если $\nu_2 = 0{,}2$, то цементное кольцо будет прочным, так как $x \in [1, x_1[$ (случай 2.1 в табл. 2).

Анализ обводнения первых двух скважин показывает, что они начали обводняться приблизительно через 1 мес после их ввода в эксплуатацию. Этот результат согласуется с экспериментальными данными об уменьшении коэффициента Пуассона цементного камня с течением времени [6]. Изначально прочный экран через некоторое время может начать разрушаться.

Результаты расчетов для третьей и четвертой скважин показывают, что цементные экраны на них должны быть прочными при значениях коэффициента Пуассона $\nu_2 \in]0; 0,2]$. Однако анализ обводнения этих двух скважин показывает, что они начали обводняться практически сразу после их пуска. Вероятно, для водоизоляции этих скважин использовались цементы, которые при отвердевании имеют меньшую прочность. Из результатов расчетов следует, что если, например, использовать цементный камень с прочностью $\sigma_s = 11{,}652$ МПа, то экран будет разрушаться на обеих скважинах: для третьей скважины реализуется случай 1 в табл. 2, для четвертой — случай 2.1 в табл. 2 при $x = 1{,}119$, $x_1 = 1{,}107$ $(x > x_1)$.

С использованием данной модели можно исследовать влияние коэффициента Пуассона цементного камня на его прочность при остальных фиксированных параметрах. Для первой скважины коэффициент Пуассона ν_2 изменялся в интервале от 0,001 до 0,499 с шагом 0,001. Расчеты показывают, что при $\nu_2 \in [0{,}001; 0{,}136]$ реализуется случай 1 в табл. 2, при этом экран разрушается. При $\nu_2 = 0{,}137$ реализуется случай 2.2 в табл. 2, при этом экран также разрушается. При $\nu_2 \in [0{,}138; 0{,}143]$ реализуется случай 2.2 в табл. 2, при этом экран не разрушается, так как $x \in]x_2, x_1[$. При $\nu_2 \in [0{,}144; 0{,}205]$ реализуется случай 2.1 в табл. 2, при этом экран не разрушается, так как $x \in [1, x_1[$. При $\nu_2 \in [0{,}206; 0{,}415]$ реализуется случай 2.1 в табл. 1, при этом экран также не разрушается, поскольку $x \in]x_2, 1]$. При $\nu_2 \in [0{,}416; 0{,}499]$ реализуется случай 2.1 в табл. 1, при этом экран разрушается, так как $x \in [0, x_2]$.

Таким образом, при изготовлении цементного экрана нужно подбирать материалы с умеренными значениями коэффициента Пуассона.

Предложенная в данной работе модель может быть использована при решении обратной задачи — определении необходимых прочностных и упругих свойств цементного камня.

Заключение. На основе решения задачи Ламе и локального критерия Губера — Мизеса течения идеально пластического тела выполнен анализ прочности изотропной круглой трубы в зависимости от предела прочности ее материала, внешнего радиуса и коэффициента Пуассона. Результаты проведенных расчетов можно использовать для определения прочности цементного кольца, примыкающего к стволу добывающей скважины, а также при подборе цементных растворов и режимов работы добывающих скважин после их водоизоляции, при которых цементный камень не будет разрушаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды: В 2 т. СПб.: Лань, 2004. Т. 2.
2. **Филин А. П.** Прикладная механика твердого деформируемого тела. М.: Наука, 1975. Т. 1.
3. **Ахвердов И. Н.** Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981.
4. **Карпенко Н. И.** Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996.
5. **Димитриенко Ю. И.** Нелинейная механика сплошной среды. М.: Физматлит, 2009.
6. **Невилль А. М.** Свойства бетона. М.: Стройиздат, 1972.
7. **ГОСТ-53366-2009.** Трубы стальные, применяемые в качестве обсадных или насосно-компрессорных труб для скважин в нефтяной и газовой промышленности. Введ. 01.03.10. М.: Стандартинформ, 2010.
8. **Третьяков А. В.** Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании: Справ. / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянова. М.: Машиностроение, 1971.

Поступила в редакцию 14/XI 2014 г.,
в окончательном варианте — 8/II 2016 г.