

6. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Расчеты в теоретической и прикладной механике. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2016. – 94 с.

7. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Применение электронных таблиц в расчетах нефтегазового оборудования // Современные технологии в нефтегазовом деле — 2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию филиала. – Уфа, 2016. – С. 10–13.

8. Арсланов И. Г., Хабибуллин М. Я. Информационные технологии в расчетах нефтепромышленного оборудования // Научное обозрение. – 2015. – № 6. – С. 74–83.

Сведения об авторах

Хабибуллин Марат Яхиевич, к. т. н., доцент кафедры нефтепромышленных машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

Сулейманов Рустэм Исакович, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой нефтепромышленных машин и оборудования, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, тел. 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

Филимонов Олег Владимирович, к. т. н., доцент, филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский

Information about the authors

Habibullin M. Ya., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of the Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 89177414994, e-mail: m-hab@mail.ru

Suleymanov R. I., Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of the Oil Field Machinery and Equipment, Oktyabrsky branch of Ufa State Petroleum Technical University, phone: 8(34767)65401, e-mail: rustamsul@rambler.ru

Filimonov O. V., Candidate of Engineering, Associate Professor, Oktyabrsky Branch of Ufa State Petroleum Technical University

УДК 539.3:622.243

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТАМ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК СКВАЖИНЫ

CRITERIAL METHOD OF CALCULATIONS OF LONG-TERM STABILITY OF THE BOREHOLE

О. А. Шипилова, С. В. Шафиева

O. A. Shipilova, S. V. Shafieva

Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск

Ключевые слова: длительная прочность; эквивалентное напряжение; горные породы

Key words: the long-term strength; voltage equivalent; rock mountain

Длительная прочность горных пород, разбуриваемых при проводке нефтяных скважин, является неотъемлемой составляющей безаварийных работ и должна оцениваться при выборе технологии бурения.

В настоящее время известны различные подходы к решению задачи длительной прочности. Один из них — кинетический — основан на использовании кинетической теории ползучести и длительной прочности. Для расчетов можно воспользоваться теорией Л. М. Качанова, в которой степенная зависимость долговечности от времени получена в виде

$$t_* = [A(n-1)\sigma_u^n]^{-1}, \quad (1)$$

где $A > 0$, $n \geq 0$ — постоянные коэффициенты; σ_u — интенсивность напряжений.

Особенности длительной прочности также достаточно хорошо описываются известной формулой С. Н. Журкова, отражающей термофлуктуационный характер процесса разрушения,

$$t_* = t_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma_u}{RT}\right), \quad (2)$$

где t_* — долговечность, время до разрушения; t_0 — период колебания атомов в твердых телах; u_0 — энергия активации процесса термодеструкции; γ — структурно-чувствительный параметр; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

Применение теорий (1) и (2) для определения времени длительной прочности затруднено определением численных значений постоянных коэффициентов A , n , u_0 , γ , которые зависят от физико-механических свойств материалов и достоверно могут быть определены только экспериментально, что не всегда выполнимо. В работе [1] предложена альтернативная методика определения коэффициентов, входящих в (1) и (2), и решены частные задачи длительной устойчивости открытых стволов скважин. Однако нельзя с полной уверенностью утверждать, что полученные результаты однозначны.

Другой известный подход к решению задач длительной устойчивости — критерий. Он основан на установлении критериев сопротивления материалов длительному разрушению и на концепции так называемого эквивалентного напряжения. При этом основное внимание уделяется установлению зависимости эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{экв}}$ от главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ при различных видах сложного напряженного состояния и от времени разрушения t_* . На основе выбранного критерия можно определить эквивалентные напряженные состояния, приводящие к разрушению за одинаковый период времени, а также вычислить сам период времени с использованием данных простых испытаний.

В настоящее время известны различные виды эквивалентных напряжений. В работе [2] приведены некоторые из них, применяемые в качестве критериев длительной прочности, и хорошо согласуются с экспериментальными данными:

- максимальное нормальное напряжение

$$\sigma_{\text{экв1}} = \sigma_1;$$

- интенсивность нормальных напряжений

$$\sigma_{\text{экв2}} = \sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 \right]^{\frac{1}{2}};$$

- полусумма интенсивности напряжений и максимального нормального напряжения

$$\sigma_{\text{экв3}} = (\sigma_{\text{экв1}} + \sigma_{\text{экв2}}) / 2;$$

- обобщенный критерий, включающий величины $\sigma_{\text{экв1}}$, $\sigma_{\text{экв2}}$ и некоторый коэффициент χ , зависящий от свойств материала,

$$\sigma_{\text{экв4}} = \chi(\sigma_{\text{экв2}} + \sigma_{\text{экв1}}) + \sigma_{\text{экв1}}.$$

В работах [3, 4] рассмотрены различные критерии прочности применительно к расчетам устойчивости скважин.

Хорошо известный в теории пластичности критерий Кулона — Мора используется в основном для расчетов кратковременной прочности горных пород и почти не применяется при исследовании длительной прочности. В работе [3] установлено, что для горных пород и грунтов, металлических материалов этот критерий дает приемлемую точность при определении предельных напряжений и направлений разрушения, которые отождествляются с характеристиками уравнений для поля скоростей.

Для произвольного напряженного состояния критерий Кулона — Мора имеет вид

$$|\tau_n| + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi = c, \quad (3)$$

где $|\tau_n|$, σ_n — касательное и нормальное напряжения в плоскости с нормалью n ; φ — угол внутреннего трения породы; c — сцепление породы.

Пронумеровав главные оси 1, 2, 3 — так чтобы выполнялось неравенство

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (4)$$

критерий (3) запишем в следующем виде:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi = c, \quad (5)$$

где $c = c(t)$.

В качестве эквивалентного напряжения примем левую часть уравнения (5) и определим его.

Из-за весьма высокой трудоемкости и продолжительности экспериментов на длительную прочность особое значение имеет проблема экстраполяции опытных данных, полученных при кратковременных испытаниях, на большую длительность в соответствии с заданным временем.

В работе [5] приведена аппроксимация кривой длительной прочности

$$\sigma_{сж}(t) = \sigma_{сж \infty} + (\sigma_{сж} - \sigma_{сж \infty}) e^{-a_0 t}, \quad (6)$$

где a_0 — параметр аппроксимации; $\sigma_{сж \infty}$ — предел длительной прочности на сжатие; $\sigma_{сж}$ — предел кратковременной прочности на сжатие.

По результатам экспериментов приводится отношение длительной прочности к кратковременной

$$\sigma_{сж \infty} / \sigma_{сж}. \quad (7)$$

Например, в результате длительных реологических испытаний, приведенных в работе [6], установлено: $\sigma_{сж \infty} / \sigma_{сж} = 0,08 \div 0,35$ — для мерзлых грунтов, $\sigma_{сж \infty} / \sigma_{сж} = 0,3 \div 0,7$ — для слабых и пластичных пород, $\sigma_{сж \infty} / \sigma_{сж} = 0,7 \div 0,95$ — для пород средней прочности и крепких. Исследования длительной объемной прочности горных пород показали, что угол внутреннего трения при длительном нагружении практически не изменяется, а коэффициент сцепления уменьшается. Результаты этих экспериментов показаны в таблице.

Результаты экспериментов

Порода	Влажность, %	$\sigma_{сж \infty} / \sigma_{сж}$	c_{∞} / c	$\varphi_{\infty} / \varphi$
Глина плотная	21,0	0,63	0,61	1,00
Глина кембрийская	12,7	0,71	0,67	0,94
Мел	25,7	0,62	0,61	1,00
Мергель глинистый	19,3	0,77	0,70	1,00
Мергель алевролитный	30,0	0,72	0,73	1,00

Из вышеприведенных результатов следует, что изменение сцепления при длительном нагружении подчиняется тем же закономерностям, что и изменение предела прочности, так как при постоянном угле внутреннего трения сцепление и предел прочности связаны зависимостью, близкой к линейной.

Учитывая эти выводы, определим параметры длительной прочности, входящие в уравнение (5). Для сцепления примем зависимость

$$c(t) = c_{\infty} + (c - c_{\infty}) e^{-a_0 t}, \quad (8)$$

где c_{∞} — сцепление при $t \rightarrow \infty$. Угол внутреннего трения φ будем считать постоянным.

Принимая $h = c_{\infty} / c < 1$, уравнение (8) приведем к виду

$$c(t) = c(h + (1 - h)e^{-a_0 t}). \quad (9)$$

Используя графоаналитический метод, описанный в работе [7], построим многоугольник длительной устойчивости, представляющий собой область прочного состояния породы на стенке скважины. Эта методика была использована в работах [8–10], где она применена для построения многоугольников кратковременной устойчивости вертикальных скважин.

Многоугольник строится в координатной системе $d - K_0$, где $d = \rho_{б.р.} / \rho_\Gamma$ — нормализованная плотность бурового раствора по отношению к средней плотности вышележащих горных пород; $\rho_{б.р.}$ и ρ_Γ — соответственно плотность бурового раствора и средняя плотность горной породы; K_0 — коэффициент бокового распора, определяемый как отношение общего горизонтального давления на общее вертикальное.

Рассмотрим возможные схемы разрушения вокруг вертикальной скважины [7].

Разрушение типа А. В этом случае $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$, то есть промежуточным является напряжение σ_z (σ_θ — тангенциальное (касательное), σ_r — радиальное, σ_z — осевое напряжения на стенке скважины). Тогда критерий (5) приводится к виду

$$\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \operatorname{tg} \varphi = c. \quad (10)$$

Решение задачи Ламе на стенке скважины с учетом пластового давления определяет

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= d - \beta u_0 \\ \sigma_\theta &= 2K_0 - d - \beta u_0 \\ \sigma_z &= 1 - \beta u_0 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где β — коэффициент Биота; $u_0 = p_\Pi / p_\Gamma$; p_Π — пластовое давление; p_Γ — давление горной породы.

Подставляя (11) в (10), получим

$$2K_0 - d(K_p + 1) = S_c - \beta u_0(K_p - 1), \quad (12)$$

где $K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$; $S_c = \frac{2c \cos \varphi}{\rho_\Gamma g z}$; g — ускорение свободного падения; z — координата точки рассмотрения.

Разрушение типа В. В этом случае между напряжениями существует связь $\sigma_z > \sigma_\theta > \sigma_r$, а критерий (5) приводится к виду

$$d = K_\alpha [1 - S_c + \beta u_0(K_p - 1)], \quad (13)$$

где $K_\alpha = \frac{1}{K_p}$.

Разрушение типа С. При таком типе разрушения $\sigma_\theta > \sigma_r > \sigma_z$. Тогда из критерия (5) получим

$$2K_0 - d = K_\alpha(1 - S_c) + \beta u_0(1 - K_\alpha), \quad (14)$$

При заданном значении K_0 стенки скважины будут устойчивыми, если плотность бурового раствора сохраняется между двумя предельными значениями: минимальное соответствует обрушению пород на стенке скважины, а максимальное — гидроразрыву пород.

Для конкретного примера рассмотрим алевролит ундытканской свиты Эльгинского месторождения. Механические характеристики горных пород этого месторождения для двух видов испытаний (на определение сцепления и угла внутреннего трения, а также пределов прочности при растяжении и сжатии для одной и той же горной породы): предел прочности при растяжении

$$\sigma_p = 8,2 \text{ МПа}; \sigma_{сж} = 72,1 \text{ МПа}; c = 22 \text{ МПа}; \varphi = 29,8^\circ.$$

Дополнительные данные для построения многоугольников устойчивости:

$$p_{II} = 19,6 \text{ МПа}; \rho_r = 2300 \text{ кг/м}^3; u_0 \approx 0,43; \beta = 1; z = 2000 \text{ м}.$$

По критерию Кулона — Мора (3) с использованием уравнений (12)–(14) построены многоугольники кратковременной устойчивости и длительной устойчивости для периодов времени $t = 1$ сутки, $t = 10$ суток, $t = 50$ суток и $h = 0,7$ (рисунок).

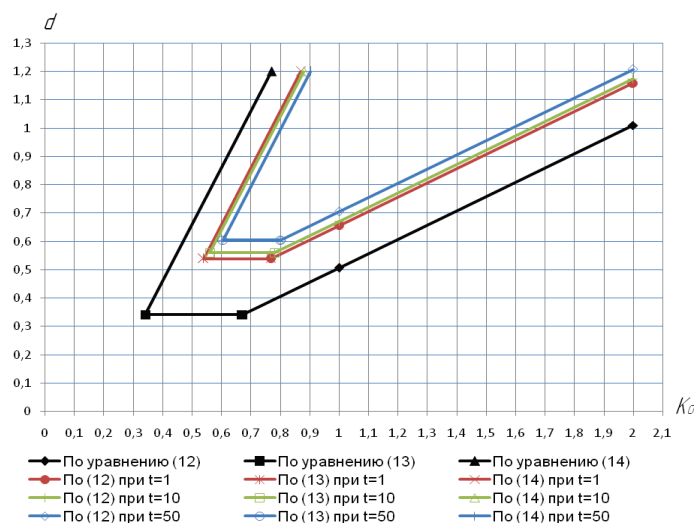


Рисунок. Многоугольники кратковременной и длительной устойчивости

Таким образом, результаты расчетов подтверждают, что при длительном нагружении сцепление породы уменьшается, а многоугольники длительной устойчивости постепенно смещаются внутрь многоугольника кратковременной устойчивости. Это означает, что плотность бурового раствора при увеличении периода времени необходимо увеличить. Минимальная плотность бурового раствора определяется уравнением (13).

Существенно отличаются многоугольники кратковременной устойчивости и длительной устойчивости лишь на небольшом промежутке времени до $t = 1$ сутки. При дальнейшем увеличении периода времени многоугольники меняются незначительно.

Библиографический список

1. Длительная устойчивость открытых стволов эксплуатируемых наклонных скважин / М. М. Алиев [и др.] // Ученые записки: сб. науч. тр. АГНИ. — Альметьевск: АГНИ, 2006. — С. 140–145.
2. Длительная прочность металлов и уравнения ползучести, основанные на критерии Кулона — Мора / А. М. Коврижных [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. — 2007. — Т. 48, № 6. — С. 115–123.
3. Алиев М. М., Шипилова О. А. Расчетные модели и критерии прочности горных пород, применяемые при расчете устойчивости ствола скважины // Материалы науч. сессии по итогам 2003 года. — Альметьевск: АГНИ, 2004. — С. 15.
4. Алиев М. М., Шипилова О. А. Влияние выбранного критерия прочности на величину плотности бурового раствора // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2005. — № 6. — С. 22–26.
5. Баклашов И. В. Деформирование и разрушение породных массивов. — М.: Недра, 1988. — 271 с.
6. Прочность и деформируемость горных пород / Ю. М. Карташов [и др.] — М.: Недра, 1979.

7. Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти / Под ред. В. Мори, Д. Фурментро. – М.: Мир, 1994. – 416 с.
8. Алиев М. М., Шафиева С. В. Обобщение графоаналитического метода оценки устойчивости скважин // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 117–120.
9. Алиев М. М., Шафиева С. В. Оперативный метод определения забойного давления в условиях депрессии // Техника и технология разработки нефтяных месторождений: сб. докл. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию разработки Ромашкинского нефтяного месторождения. – М.: ЗАО «Издательство «Нефтяное хозяйство», 2008. – С. 179–181.
10. Алиев М. М., Шафиева С. В., Каримова Н. Г. Применение линейного и параболического критериев разрушения для оценки устойчивости открытых стволов скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 2. – С. 9–16.

Сведения об авторах

Шипилова Ольга Александровна, к. т. н., доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(855)3310145, e-mail: o.shipilova@rambler.ru

Шафиева Светлана Владимировна, к. т. н., доцент кафедры нефтегазового оборудования и технологии машиностроения, Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, тел. 8(855)3310145, e-mail: shafieva_sv@mail.ru

Information about the authors

Shipilova O. A., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Equipment and Engineering Technology, Almet'yevsk State Oil Institute, phone: 8(855)3310145, e-mail: o.shipilova@rambler.ru

Shafieva S. V., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Equipment and Engineering Technology, Almet'yevsk State Oil Institute, phone: 8(855)3310145, e-mail: shafieva_sv@mail.ru

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

УДК 519.63+533.6

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫХОДА НА СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ИСКУССТВЕННОГО ТОРНАДО

NUMERICAL CALCULATIONS OF ENERGY CHARACTERISTICS FOR SIMULATION THE STEADY-STATE OUTPUT OF AN ARTIFICIAL TORNADO

Р. Е. Волков, А. Г. Обухов, Н. В. Терехова

R. E. Volkov, A. G. Obukhov, N. V. Terekhova

Тюменский государственный университет, г. Тюмень

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: полная система уравнений Навье — Стокса; краевые условия; параллельные вычисления; газодинамические характеристики

Key words: complete system of Navier — Stokes equations; boundary conditions; parallel computing; gas dynamic characteristics

Получение восходящего закрученного потока воздуха с помощью вертикального продува было предложено в работах [1–5] и успешно реализовано в лабораторных условиях [6, 7]. В этих работах было численно смоделировано возникновение восходящего закрученного потока именно с использованием вертикального продува воздуха. В работе [6] был экспериментально получен восходящий закрученный поток воздуха при продуве через трубу малого диаметра, а в работе [7] — через трубу диаметром 2 метра.

Предложенная модель газа как движущейся сжимаемой сплошной среды, обладающей диссипативными свойствами вязкости и теплопроводности, при численном моделировании возникающих при холодном вертикальном продуве сложных закрученных течений [8] дает основные газодинамические характеристики, совпадающие с данными натурных экспериментов [9]. Сопоставление рассчитанных и