

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/20-82

Ссылка для цитирования этой статьи:

Московский И.Г. Методика оценки значимости входных параметров на результаты прогноза устойчивости стенок скважины // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2018. №4

УДК 550.82

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК СКВАЖИНЫ

Московский И.Г.

Саратовский государственный университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, mosig@mail.ru

A METHOD FOR ESTIMATING THE SIGNIFICANCE OF INPUT PARAMETERS FOR THE RESULTS OF THE FORECAST OF THE STABILITY OF THE BOREHOLE WALLS

Moskowsky I.G.

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, mosig@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрена методика определения количественных оценок значимости входных параметров геомеханического моделирования на результаты прогноза устойчивости стенок скважины в условиях неопределенности исходных данных.

Ключевые слова: значимость входных параметров, вероятность разрушения горной породы, критерий прочности, устойчивость стенок скважины, напряженно-деформированное состояние горных пород.

Abstract. The article discusses the method of determining the quantitative estimates of the significance of the input parameters of geomechanical modeling on the results of predicting the stability of the walls of a well under conditions of uncertainty in the source data.

Key words: significance of input parameters, probability of rock failure, strength criterion, wellbore stability, rocks stressed-deformed state.

Прогноз возможных аварийных ситуаций, происходящих при бурении или эксплуатации нефтегазовых скважин обычно осложнен ограниченностью исходных данных для алгоритмов, выполняющих оценку прочности горных пород в окрестности скважины [1-5]. Неопределенность исходных данных может быть вызвана различными причинами, например, разбросом значений параметров в пределах одного геологического пласта, погрешностями приборов и методик определения значений петрофизических характеристик пород,

невозможностью сбора информации по всем входным параметрам из-за ограниченности финансирования и т.д. В таких условиях весьма важным вопросом является установление степени влияния (значимости) на результаты прогноза аварийной ситуации различных параметров геомеханического моделирования и выделения из них наиболее приоритетных для определения на практике.

Прогнозирование устойчивости стенок скважины в условиях неопределенности исходных данных может быть выполнено на основе расчета вероятности разрушения пород околоскважинного пространства [1-4]. Рассмотрим в качестве оценки значимости входных параметров геомеханического моделирования степень изменчивости вероятности разрушения горных пород при различных значениях этих параметров. Степень изменчивости функции на заданном отрезке изменения аргумента может характеризоваться различными критериями, например, разностью между наибольшим и наименьшим значениями функции на отрезке, максимальным значением модуля производной функции на отрезке и т.д. При этом можно выполнить совокупную оценку изменчивости функции по нескольким критериям.

Для расчета совокупной оценки значимости входных параметров по нескольким критериям изменчивости вероятности разрушения горной породы можно использовать метод анализа иерархий Т. Саати [6, 7]. Предположим, что выполнен расчет значений α_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ (табл. 1) нескольких критериев значимости (критериев изменчивости вероятности разрушения породы) для каждого из выбранных параметров (всего m параметров и n критериев). Кроме того каждый из критериев значимости может наделяться своим весовым коэффициентом ε_j , причем $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n = 1$, $0 \leq \varepsilon_j \leq 1$, $j = \overline{1, n}$. Весовые коэффициенты ε_j определяют степень влияния каждого из критериев (по сравнению с другими критериями) на итоговую оценку значимости. Так, например, если все n критериев в равной степени определяют значимость параметров, то в этом случае следует полагать весовые коэффициенты равными: $\varepsilon_j = 1/n$, $j = \overline{1, n}$.

Таблица 1

Данные для оценки величины значимости входных параметров

	Критерий 1	Критерий 2	...	Критерий n
Параметр 1	α_{11}	α_{12}	...	α_{1n}
Параметр 2	α_{21}	α_{22}	...	α_{2n}
⋮	⋮	⋮	...	⋮
Параметр m	α_{m1}	α_{m2}	...	α_{mn}

Величина значимости δ_i i -го параметра ($i = \overline{1, m}$) по выбранным n критериям может быть вычислена по следующей формуле:

$$\delta_i = \sum_{j=1}^n \left(\alpha_{ij} \left(\sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \right)^{-1} \varepsilon_j \right), \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Для оценки значимости входных параметров при прогнозе устойчивости стенок скважины будем использовать величину вероятности разрушения горной породы $P_f(x)$ по критерию прочности f как функции одного из входных параметров x , рассчитываемую по алгоритму приведенному в работе [4]. В простейшем случае алгоритм расчета вероятности разрушения горной породы работает по следующей схеме.

Фиксируем значение параметра $x = x_0$, а все остальные параметры меняем в заданных диапазонах, составляем N вариантов различных комбинаций значений этих параметров (разбивая диапазоны изменения на равные отрезки или используя генератор псевдослучайных чисел с равномерным законом распределения) и для каждой комбинации по выбранному критерию прочности f выполняем проверку – будет разрушение или нет. Подсчитываем количество $N_f(x_0)$ комбинаций параметров при которых будет разрушение породы и выполнив деление $P_f(x_0) = N_f(x_0)/N$ находим оценку вероятности разрушения породы в околоскважинном пространстве при $x = x_0$. Далее фиксируем следующее значение параметра $x = x_0 + \Delta x$ (Δx – шаг изменения параметра x), проводим вычисления, находим соответствующее этому значению параметра $P_f(x_0 + \Delta x)$ и т.д. Откладывая по одной оси величину x по другой величину P_f , получаем зависимость $P_f(x)$ вероятности разрушения горной породы от параметра x . Такие зависимости можно строить по каждому из входных параметров.

В качестве критериев значимости входного параметра $x \in X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_N\}$, где x_i ($i = \overline{0, N}$) – точки разбиения диапазона $x_0 \leq x \leq x_N$ возможных значений входного параметра x , будем рассматривать:

1) максимальное значение M_x вероятности разрушения горной породы:

$$M_x = \max_{x \in X} P_f(x); \quad (2)$$

2) размах R_x вероятности разрушения горной породы:

$$R_x = \max_{x \in X} P_f(x) - \min_{x \in X} P_f(x); \quad (3)$$

3) максимальное локальное изменение d_x вероятности разрушения горной породы:

$$d_x = \max_{1 \leq i \leq N} \left| \frac{P_f(x_i) - P_f(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} \cdot (x_N - x_0) \right|. \quad (4)$$

Выбранные критерии значимости в совокупности определяют меру неопределенности при проведении прогноза возможности обрушения стенок скважины по выбранному критерию прочности в условиях неполноты исходных данных. Наиболее значимыми будем полагать параметры, отсутствие информации по которым приводит к наибольшей неопределенности прогноза устойчивости стенок скважины.

Используя рассмотренную методику проведен численный эксперимент по расчету зависимости вероятности разрушения породы P_f от входных параметров для модели вертикальной скважины с непроницаемыми стенками (моделирование режима бурения скважины) и по оценке значимости входных параметров. В табл. 2 приведены диапазоны изменения значений входных параметров, соответствующие осадочным горным породам. Расчеты проводились для пяти критериев прочности (критерий Мора-Кулона, критерий Моджи-Кулона, критерий Друкера-Прагера и модифицированный критерий Ладе, критерий Хука-Брауна).

Таблица 2

Диапазон значений входных параметров, используемый в расчетах

Параметр	Диапазон изменения
z – глубина (м)	1000-5000
ρ – средняя плотность вышележащих пород (г/см ³)	1,2-3,6
ν – коэффициент Пуассона	0,1-0,45
m – коэффициент пористости (%)	0-40
C_0 – прочность на одноосное сжатие (МПа)	1-150
φ – угол внутреннего трения (градусов)	15-45
k_p – отношение порового давления к гидростатическому (коэффициент аномальности порового давления)	0,1-2
k_w – отношение давления в скважине к гидростатическому	0,1-3

При вычислении оценки значимости выбранные три критерия (максимальное значение относительной частоты разрушения M_x , размах R_x , максимальное локальное изменение d_x) имеют одинаковые весовые коэффициенты: $\varepsilon_j = 1/3$, $j = 1,2,3$. Весовые коэффициенты при общей оценке значимости: у критерия Мора-Кулона – 0.3; у критерия Моджи-Кулона – 0.2; у критерия Друкера-Прагера – 0.1; у модифицированного критерия Ладе – 0.1; у критерия Хука-Брауна – 0.3. Более высокие значения весовых коэффициентов

выбраны для тех критериев прочности, которые дают оценки безопасного режима работы с некоторым «запасом прочности», т.е. более гарантировано.

В табл. 3 приведены результаты расчета значений критериев значимости M_x , R_x , d_x по формулам (2)-(4) и совокупной оценки значимости δ по этим трем критериям. Величины совокупной оценки рассчитывалась по формуле (1). Результаты расчетов, приводимые в табл. 3, выполнены для критерия прочности Мора-Кулона. Аналогичные результаты получены и для других четырех критериев прочности.

Таблица 3

Ранжирование по значимости входных параметров
для критерия прочности Мора-Кулона

	Параметр	M_x	R_x	d_x	δ
1	z	0,7048	0,3788	0,8330	0,1321
2	ρ	0,6651	0,1670	0,4144	0,0803
3	ν	0,7587	0,3544	0,5151	0,1138
4	m	0,9458	0,5406	1,3883	0,1967
5	C_0	0,8616	0,5121	0,7030	0,1493
6	φ	0,6371	0,1448	0,2238	0,0651
7	k_p	0,7156	0,2949	0,4716	0,1018
8	k_w	0,8111	0,3721	1,2447	0,1608

В табл. 4 приведены итоговые результаты оценки значимости входных параметров по выбранным пяти критериям прочности для горных пород, характеризующихся значениями параметров из табл. 1.

Таблица 4

Ранжирование по значимости входных параметров в пяти критериях прочности

Параметр	Место в рейтинге параметра при оценке значимости по отдельному критерию					Оценка значимости
	Критерий Мора-Кулона	Критерий Моджи-Кулона	Критерий Друкера-Прагера	Модиф-ый критерий Ладе	Критерий Хука-Брауна	
z	4	4	6	4	4	0,1265
ρ	7	7	8	6	7	0,0829
ν	5	5	4	8	5	0,1064
m	1	1	1	1	2	0,2073
C_0	3	3	2	3	1	0,1583
φ	8	8	7	5	8	0,0684
k_p	6	6	5	7	6	0,1010
k_w	2	2	3	2	3	0,1491

Согласно полученным результатам (табл. 4) для модели вертикальной скважины с непроницаемыми стенками входные параметры геомеханического моделирования можно ранжировать по их значимости на оценку устойчивости стенок скважины:

1. коэффициент пористости;
2. прочность на одноосное сжатие;
3. отношение давления в скважине к гидростатическому;
4. глубина;
5. коэффициент Пуассона;
6. отношение порового давления к гидростатическому;
7. средняя плотность вышележащих пород;
8. угол внутреннего трения.

Таким образом, согласно результатам численного эксперимента (табл. 4) в режиме бурения скважины для горных пород, характеризующихся значениями параметров из табл. 1, наиболее значимыми на результаты прогноза устойчивости стенок скважины являются пористость породы и ее прочность на одноосное сжатие. Следовательно, эти параметры необходимо определять максимально точно для наибольшей достоверности прогноза.

Параметры с более низкой значимостью также требуют максимально возможной точности определения, так как из результатов расчетов следует, что для всех входных параметров, не существует значений в рассматриваемых интервалах, при которых, согласно критериям прочности, порода всегда только бы разрушалась либо только не разрушалась.

Рассмотренная в данной статье методика оценки значимости входных параметров на результаты прогноза устойчивости стенок скважины может быть использована при прогнозировании возможных аварийных ситуаций для скважин различной геометрии и работающих в различных режимах.

Литература

1. Aadnoy B.S., R. Looyeh. Petroleum rock mechanics: Drilling operations and well design. – Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2011. 350 p.
2. Moos D., Peska P., Finkbeiner T., Zoback M. Comprehensive wellbore stability analysis utilising quantitative risk assessment // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2003. Vol. 38, P. 97–109.
3. Ottesen S., Zheng R.H., McCann R.C. Wellbore stability assessment using quantitative risk analysis. SPE/IADC 52864, presented at the SPE/IADC Drilling Conference in Amsterdam, Holland, 9-11 March, 1999.
4. Московский И.Г. Вероятностный подход оценки прочности горных пород в условиях неопределенности исходных данных // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2016. № 3. С. 34-46.
5. Московский И.Г. К вопросу о математическом моделировании напряженно-деформированного состояния горных пород в оценке

устойчивости стенок скважины // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2017. № 3. С. 4-17.

6. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.