ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(10):172-182

УДК 622.24 (622.28) DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-172-182

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ НАСТУПЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ОТКРЫТОГО СТВОЛА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА

Д.В. Хлопцов

НИТУ «МИСиС», e-mail: dkhloptsov@gmail.com

Аннотация: В силу принципиальной разномасштабной неоднородности породного массива, экономических и технологических ограничений информация о строении массива, вмещающего подземное хранилище газа, его напряженно-деформированном состоянии и свойствах слагающих массив горных пород всегда ограничена и носит вероятностный характер. Это неизбежно сказывается на качестве прогноза устойчивости открытого ствола скважин. Показано, что при бурении скважины возможны два критических состояния, которые возникают в результате реализации различных механизмов разрушения, связанных с образованием кольцевых или радиальных трещин вокруг скважины. В качестве подхода к исследованию устойчивости горных выработок с учетом случайных влияющих факторов выбрано имитационное моделирование. По результатам имитационного моделирования, проведенного методом Монте-Карло, выполнена количественная оценка коэффициента запаса прочности конструкций. Определены вероятности устойчивого состояния конструкции или ее разрушения. Рассмотрены критические состояния открытого ствола скважин при наличии или отсутствии в разрезе скважины водонасыщенных пластов. Выполнена оценка влияния случайных факторов на формирование критических состояний и устойчивость открытого ствола скважины. Определены вероятности устойчивого состояния открытого ствола скважины при различных относительных плотностях бурового раствора.

Ключевые слова: эксплуатационная скважина, открытый ствол скважины, вероятность устойчивости, плотность бурового раствора, давление горных пород.

Для цитирования: *Хлопцов Д. В.* Оценка вероятности наступления критических состояний открытого ствола эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 172–182. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-172-182.

Estimated probability of critical conditions in operating open holes of underground gas storages

D.G. Khloptsov

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia,
e-mail: dkhloptsov@gmail.com

Abstract: Owing to principal different-scale nonuniformity of rock mass, as well as due to economic and technological constraints, the information on the structure and stress state of enclosing rock mass of underground gas storages is always limited and probabilistic. This inevitably affects stability

© Д.В. Хлопцов. 2019.

prediction in operating open holes. It is shown that drilling can cause two critical states due to actualization of two failure mechanisms connected with initiation of ring or radial fractures around a hole. It is chosen to study stability of holes with regard to random influences by simulation modeling. By the results of the Monte Carlo simulation, the quantitative estimate of the structural safety factor is carried out. Probabilities of stability or failure of a structure are determined. The critical conditions of an open hole with or without water-saturated beds present in the hole section are analyzed. The influence of random factors on the occurrence of the critical state and safety of the open hole is estimated. The stability probabilities in the open hole are determined at different relative densities of drill mud.

Key words: operating hole, open hole, stability probability, drill mud density, rock pressure.

For citation: Khloptsov D. G. Estimated probability of critical conditions in operating open holes of underground gas storages. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):172-182. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-172-182.

Введение

На устойчивость открытого ствола эксплуатационных скважин подземных хранилищ газа влияет широкий спектр горно-геологических и горно-технических факторов [1—3]. Именно поэтому прогноз их устойчивости является необходимым условием экономически эффективной, экологически и технологически безопасной эксплуатации искусственно создаваемых в геологических структурах резервуаров. Надежность такого прогноза определяется, прежде всего, качеством информации о строении вмещающего массива, его напряженно-деформированном состоянии и свойствах слагающих массив горных пород. В силу принципиальной разномасштабной неоднородности породного массива, а также экономических и технологических ограничений при получении указанной информации, она всегда носит ограниченный и вероятностный характер, что неизбежно сказывается на качестве прогноза.

Одним из подходов к исследованию устойчивости горных выработок с учетом случайных влияющих факторов является имитационное моделирование, в основу которого положен метод Монте-Карло [4, 5]. Метод Монте-Карло представляет собой метод формализованного описания неопределенности, позволяющий создавать множество сценариев, которые согласуются с заданными ограничениями на исходные параметры. Метод способен наиболее полно отразить неопределенности реального процесса и максимально учесть имеющуюся в распоряжении специалистов информацию.

В общем виде алгоритм имитационного моделирования с применением метода Монте-Карло приведен ниже на рис. 1.

Данный метод достаточно гибок и позволяет решать сложные задачи с большим числом влияющих случайных факторов с любыми законами распределения. А в качестве прогнозных моделей могут использоваться как аналитические, так и численные геомеханические модели. Примеры применения метода имитационного моделирования к геомеханическим задачам могут быть найдены в [6—12].

Оценка надежности сооружений базируется на количественной оценке запаса прочности конструкции K, который в детерминированной постановке определяется следующим образом:

$$K = R - Q,\ K > 0, \qquad (1)$$

где Q — обобщенная нагрузка на конструкцию сооружения, R — обобщенное сопротивление или обобщенная прочность конструкции сооружения, K — запас прочности конструкции сооружения.

В общем случае обобщенная нагрузка и обобщенная прочность конструкции скважины представляют собой функции изменчивых параметров, которые следу-

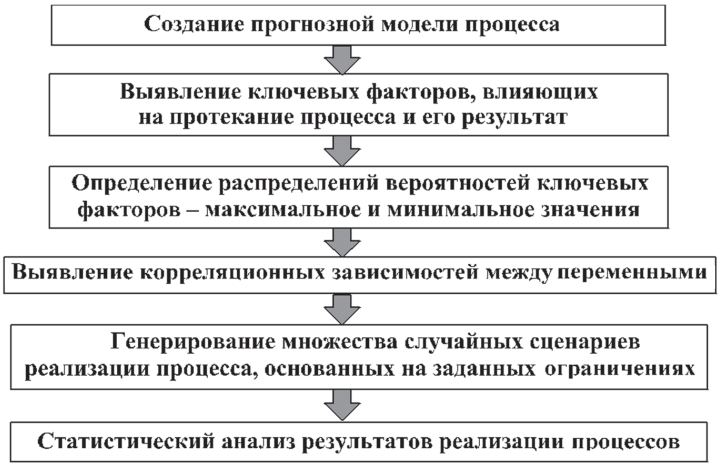

Рис. 1. Алгоритм выполнения имитационного моделирования с применением метода Монте-Карло
Fig. 1. Algorithm for performing simulation using the Monte Carlo method

ет рассматривать как случайные величины. Таким образом, нагрузка и прочность также являются случайными величинами. Тогда надежность конструкции следует оценивать по вероятностям наступления событий:

$$P_y = P(K > 0) = P(R - Q > 0),$$
$$P_p = P(K < 0) = P(R - Q < 0), \quad (2)$$

где P_y — вероятность устойчивого состояния конструкции, а P_p — вероятность ее разрушения, причем $P_y + P_p = 1$.

Примем, что распределения случайных величин Q и R задаются соответствующими функциями плотностей вероятностей $f_Q(Q)$ и $f_R(R)$.

Наступление критического состояния или исчерпание запаса прочности конструкции можно представить как пересечение двух функций плотностей вероятностей $f_Q(Q)$ и $f_R(R)$, как это показано на рис. 2.

Плотность вероятности запаса прочности конструкции $f_K(K)$ может быть определена через свертку функций плотностей вероятностей $f_Q(Q)$ и $f_R(R)$ следующим образом:

$$f_K(K) = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(R) \cdot f_Q(K-R)dR = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(K+Q) \cdot f_Q(Q)dQ \quad (3)$$

Вероятности устойчивого состояния конструкции или ее разрушения, то есть выполнения условий $K > 0$ и $K < 0$ соответственно, определяются как:

$$P_y = \int_0^{\infty} f_K(K)dK = \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} f_R(R) \cdot f_Q(K-R)dRdK = \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} f_R(K+Q) \cdot f_Q(Q)dQdK, \quad P_p = 1 - P_y \quad (4)$$

Анализ критических состояний открытого ствола скважин

При бурении скважины возможны два критических состояния в результате реализации двух механизмов разрушения, представленных на рис. 2 и определяемых условиями $\frac{\gamma_p}{\gamma} \le \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min}$ (I) и $\frac{\gamma_p}{\gamma} \ge \left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max}$ (II), в которых $(\gamma_p/\gamma)_{min}$ и $(\gamma_p/\gamma)_{max}$ определяются по формулам [13]:

$$\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min} = \lambda - \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) - \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\left(\frac{k}{\gamma h} + \frac{1}{3}(1+2\lambda) \cdot tg\delta\right), \quad (5)$$

$$\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max} = \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) + \\ + \frac{\sqrt{3}}{3}\cdot\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\left(\frac{k}{\gamma h}+\frac{1}{3}(1+2\lambda)\cdot tg\delta\right) \quad (6)$$

или, при наличии в разрезе скважины водонасыщенных пластов, по формулам:

$$\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{min} = \lambda - \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) - \\ -\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\left(\frac{k}{\gamma h}+\frac{1}{3}(1+2\lambda)tg\delta\right) - \quad (7) \\ -\omega\frac{p_{пл}}{\gamma h}\left(1-\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{6\sin\delta}{3-\sin\delta}\right)$$

$$\left(\frac{\gamma_p}{\gamma}\right)_{max} = \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) + \\ + \frac{\sqrt{3}}{3}\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\left(\frac{k}{\gamma h}+\frac{1}{3}(1+2\lambda)tg\delta\right) - \quad (8) \\ -\omega\frac{p_{пл}}{\gamma h}\left(1+\frac{\sqrt{3}}{3}\frac{6\sin\delta}{3-\sin\delta}\right)$$

где $\gamma_р$ — плотность бурового раствора; γ — плотность горных пород; λ — коэффициент бокового распора; δ — угол внутреннего трения; k — сцепление горных пород; h — расстояние от земной поверхности; ω — безразмерный коэффициент, учитывающий степень воздействия пластового давления на скелет породы; $p_{пл}$ — давление насыщающей воды.

При анализе условий наступления критического состояния (I), определяемого соотношением $\gamma_р/\gamma \le (\gamma_р/\gamma)_{min}$, следует положить, что:

• активная безразмерная нагрузка на конструкцию скважины будет определяться горизонтальной составляющей начального напряженного состояния:

$$Q_1 = \lambda; \quad (9)$$

• обобщенное безразмерное сопротивление конструкции скважины будет определяться прочностью горных пород в условиях объемного сжатия и противодавлением столба бурового раствора:

$$R_1 = \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) + \\ + \frac{\sqrt{3}}{3}\cdot\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\left(\frac{k}{\rho g h}+\frac{1}{3}(1+2\lambda)tg\delta\right)+\frac{\rho_p}{\rho} \quad (10)$$

При анализе условий наступления критического состояния (II), определяемого соотношением $\gamma_р/\gamma \ge (\gamma_р/\gamma)_{max}$, следует положить, что:

• активная безразмерная нагрузка на конструкцию скважины будет определяться относительным давлением столба бурового раствора:

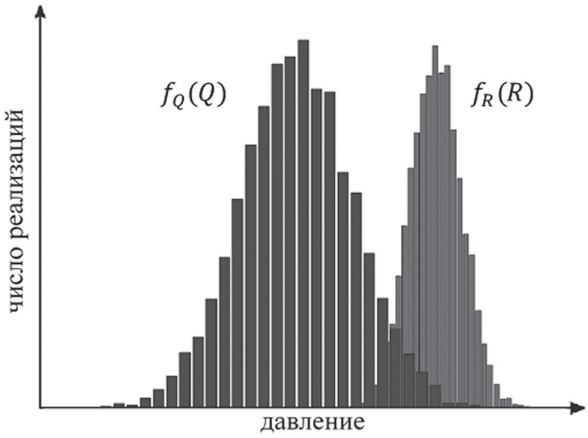

Рис. 2. Наступление критического состояния конструкции
Fig. 2. The onset of a critical condition of the structure

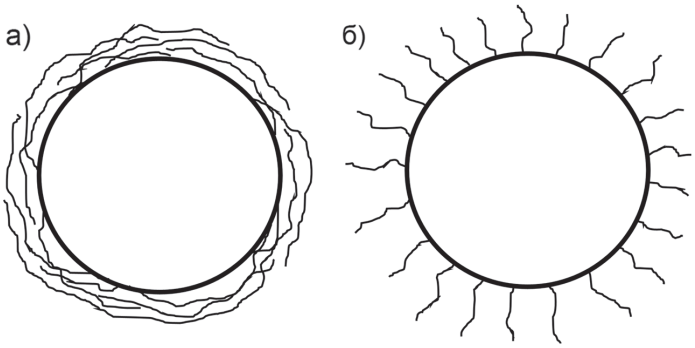

Рис. 3. Характер разрушения прискважинного массива при значениях относительной плотности бурового раствора: меньше минимальной (а); больше максимальной (б)

Fig. 3. The fracture near-well array with values of relative density of the drilling fluid: a — less than the minimum, b — greater than the maximum

$$Q_2 = \frac{\rho_p}{\rho}; \qquad (11)$$

• обобщенное безразмерное сопротивление конструкции скважины будет определяться прочностью горных пород в условиях объемного сжатия и горизонтальной составляющей начального напряженного состояния:

$$R_2 = \lambda + \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) + \frac{\sqrt{3}}{3}\cdot\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\left(\frac{k}{\rho g h} + \frac{1}{3}(1+2\lambda)tg\delta\right) \qquad (12)$$

Выполним оценку влияния случайных факторов на формирование критических состояний и устойчивость открытого ствола скважины, оценив вероятности устойчивого состояния ее стенок:

$$P_{y1} = P(R_1 - Q_1 > 0) = 1 \qquad (13)$$

$$P_{y2} = P(R_2 - Q_2 > 0) = 1 \qquad (14)$$

Равенства (13) и (14) достигаются при выполнении соотношений $\gamma_p/\gamma > (\gamma_p/\gamma)_{min}$ и $\gamma_p/\gamma < (\gamma_p/\gamma)_{max}$. Используя выражения (9) и (10) , перепишем (13) и (14) следующим образом:

$$P_{y1} = P\left(\lambda - \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) - \frac{\sqrt{3}}{3}\cdot\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\cdot\left(\frac{k}{\rho g h} + \frac{1}{3}(1+2\lambda)tg\delta\right) < \frac{\gamma_p}{\gamma}\right) = 1 \qquad (15)$$

$$P_{y2} = P\left(\lambda + \frac{\sqrt{3}}{3}(1-\lambda) + \frac{\sqrt{3}}{3}\cdot\frac{6\cos\delta}{3-\sin\delta}\cdot\left(\frac{k}{\rho g h} + \frac{1}{3}(1+2\lambda)tg\delta\right) > \frac{\gamma_p}{\gamma}\right) = 1 \qquad (16)$$

Таким образом, из соотношений (15) и (16) могут быть определены вероятности устойчивого состояния открытого ствола скважины при различных относительных плотностях бурового раствора.

Оценка вероятности устойчивости открытого ствола скважин

Как видно из (15) и (16), указанные вероятности зависят от напряженного состояния породного массива, характеризуемого величинами его вертикальной составляющей $\rho g h$ и коэффициента бокового распора λ, а также прочностных свойств вмещающих пород, характеризуемых величинами их коэффициента сцепления k и коэффициента внутреннего трения $tg\delta$ (и производных последнего $\cos\delta$ и $\sin\delta$).

Величина вертикальной составляющей начального напряженного состояния массива (литостатическое давление) определяется средневзвешенной плотностью вышележащих пород. При отсутствии зон аномальной плотности горных пород, которые связаны с зонами тектонических нарушений, литостатическое

давление монотонно возрастает с глубиной, в том числе, и по причине нормального уплотнения горных пород. При этом смена литологического состава не оказывает существенного влияния на средневзвешенную плотность горных пород. В качестве примера можно привести результаты исследований распределения литостатического давления в породах осадочного чехла, опубликованные в работе [14]. На рис. 4 приведены графики осредненных литостатических давлений в зависимости от глубины для пород осадочного чехла для месторождений о. Сахалин, заимствованные из работы [14].

Обработка указанных графиков дает следующие эмпирические зависимости для определения литостатического давления для различных глубин h:

- для глубин $h \le 1000$ м:
  $\rho g h = 0{,}021h$ (МПа);
- для глубин $1000 < h \le 2000$ м:
  $\rho g h = 0{,}022h$ (МПа);
- для глубин $2000 < h \le 3000$ м:
  $\rho g h = 0{,}022h$ (МПа).

Как уже отмечалось выше, величина коэффициента бокового распора зависит от литологического состава горных пород и при отсутствии тектонической составляющей может изменяться от $\lambda = 0{,}5$ для рыхлых несвязных пород типа песков до $\lambda = 1$ для пластичных и склонных к ползучести пород типа глин и солей.

Случайные величины бокового распора λ генерировались из предположения о его нормальном распределении в диапазоне изменения $0{,}5 \le \lambda \le 1$ на языке Python с помощью модуля из библиотеки *Numpy*. В результате получено нормальное распределение λ со следующими параметрами: среднее $\lambda_{ср} = 0{,}75$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma_\lambda = 0{,}083$, приведенное на рис. 5.

Генерация случайных величин коэффициента сцепления k и коэффициента внутреннего трения $\mathrm{tg}\delta$ также выполнялась из предположения об их нормальном распределении. При этом рассматривались породы II и III категорий буримости как наиболее распространенные для скважин подземных хранилищ газа глубиной до 3000 м. Диапазоны изменений этих прочностных характеристик: для пород II категории буримости $0{,}02 \le k \le 0{,}08$ (МПа) и $0{,}47 \le \mathrm{tg}\delta \le 0{,}58$, для пород III категории буримости $2{,}4 \le k \le 8{,}3$

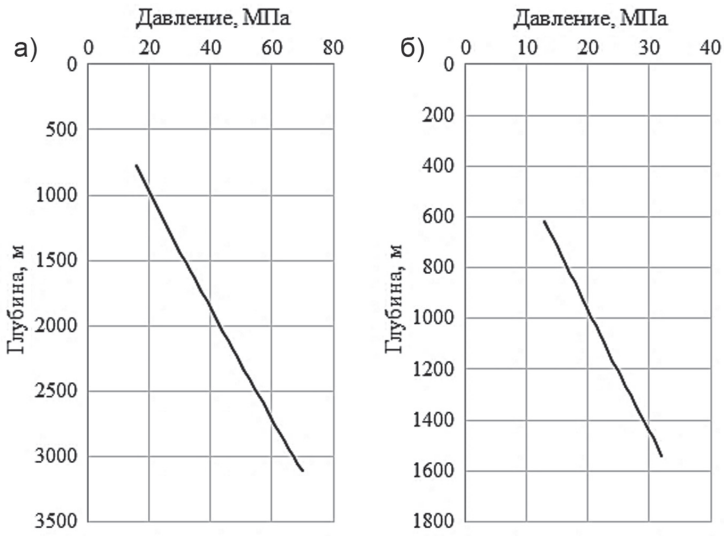

Рис. 4. Графики осредненных значений литостатического давления в зависимости от глубины
Fig. 4. Graphs of the averaged lithostatic pressure as a function of depth

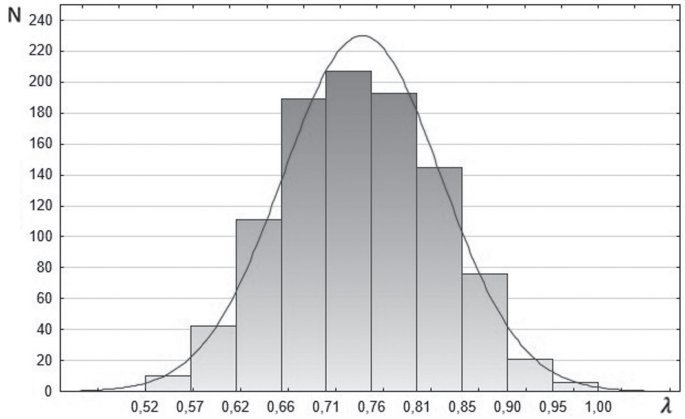

Рис. 5. Гистограмма распределения значений коэффициента бокового распора
Fig. 5. The histogram distribution values lateral expansion coefficient

и $0{,}58 \le \mathrm{tg}\delta \le 0{,}70$. В результате получены нормальные распределения k и $\mathrm{tg}\delta$ со следующими параметрами: для пород II категории буримости $k_{ср}$ = 0,05 МПа, σ_k = 0,01 и $\mathrm{tg}\delta_{ср}$ = 0,41, $\sigma_{\mathrm{tg}\delta}$ = 0,02; для пород III категории буримости $k_{ср}$ = 5,4 МПа, σ_k = 0,94 и $\mathrm{tg}\delta_{ср}$ = 0,64, $\sigma_{\mathrm{tg}\delta}$ = 0,02. Распределения указанных прочностных параметров приведены на рис. 6 и 7.

В результате многовариантных расчетов, выполненных с использованием приведенных выше распределений и эмпирических зависимостей, для скважин глубиной 1000, 2000 и 3000 м получены кривые вероятностей устойчивого состояния стенок скважин для пород II и III категорий по буримости, приведенные на рис. 8 и 9.

Обсуждение результатов исследования

Для пород II категории по буримости устойчивость открытого ствола скважины с вероятностью 100% достигается в диапазоне относительных плотностей бурового раствора:

$$0{,}5 \le \frac{\gamma_p}{\gamma} \le 1{,}0\,. \qquad (17)$$

При этом указанный диапазон справедлив для скважин глубиной 1000, 2000 и 3000 м, что отражает факт незначительного влияния на прочность по-

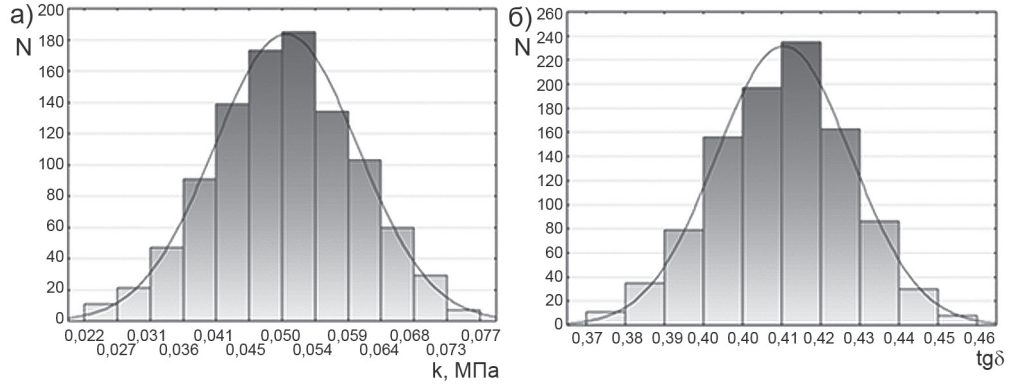

Рис. 6. Гистограмма распределения значений сцепления (а) и коэффициента внутреннего трения (б) для пород II категории буримости
Fig. 6. Histogram of the distribution of adhesion values (a) and coefficient of internal friction (b) for rocks of the II drillability category

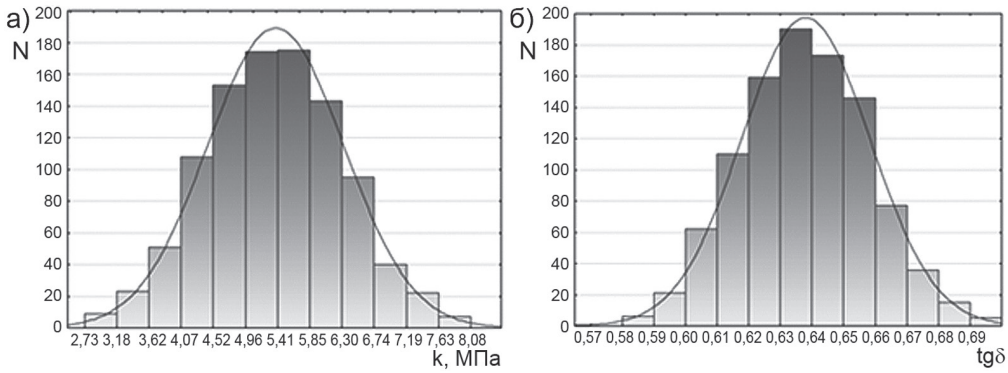

Рис. 7. Гистограмма распределения значений сцепления (а) и коэффициента внутреннего трения (б) для пород III категории буримости

Fig. 7. Histogram of the distribution of adhesion values (a) and coefficient of internal friction (b) for rocks of the III drillability category

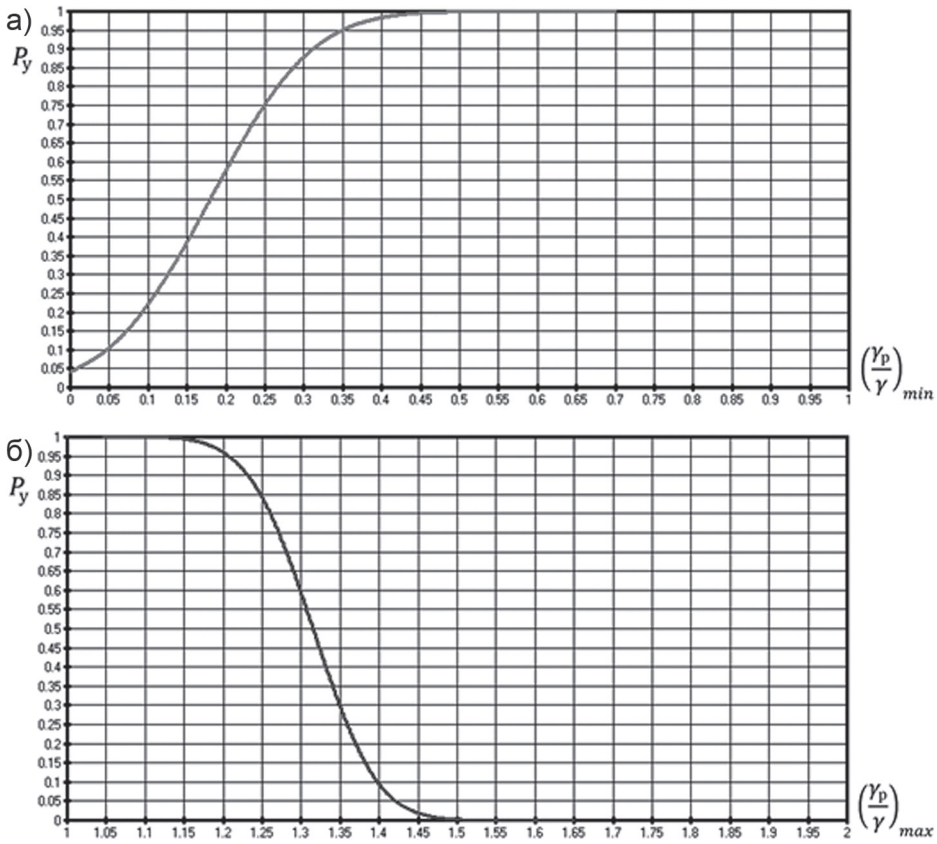

Рис. 8. Вероятности устойчивого состояния открытого ствола скважин глубиной 1000—3000 м для пород II категории буримости при различных минимальных (а) и максимальных (б) относительных плотностях бурового раствора

Fig. 8. The probabilities of a stable state of an open wellbore 1000—3000 m deep for rocks of the II drillability category at various minimum (a) and maximum (b) relative densities of the drilling fluid

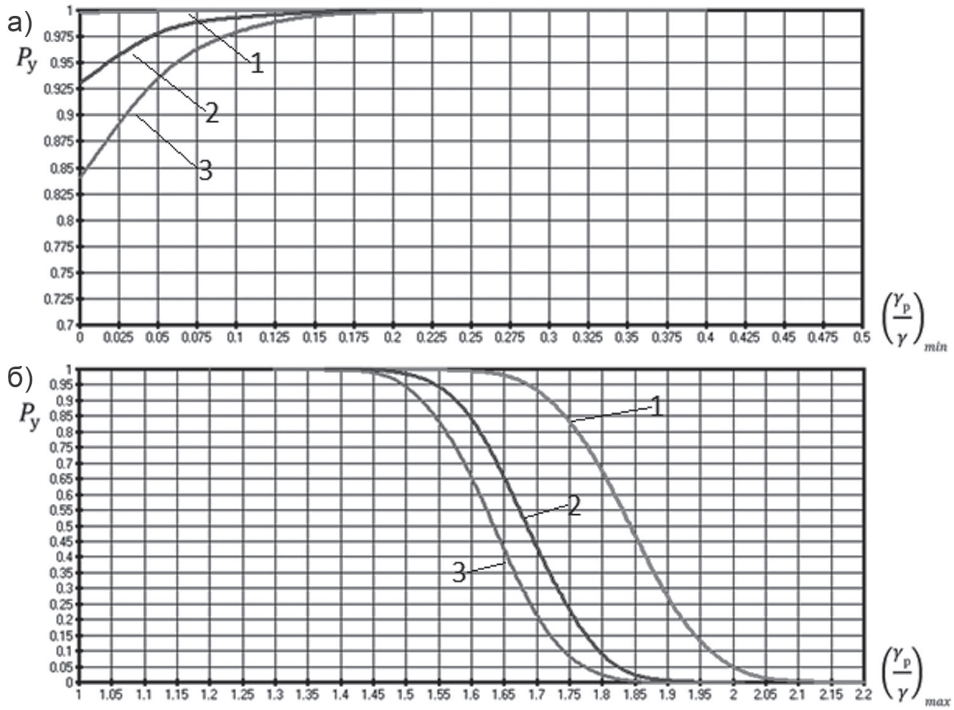

Рис. 9. Вероятности устойчивого состояния открытого ствола скважин глубиной: 1 — 1000 м, 2 — 2000 м, 3 — 3000 м, для пород III категории буримости при различных минимальных (а) и максимальных (б) относительных плотностях бурового раствора

Fig. 9. Probabilities of a steady state of an open wellbore depth: 1 — 1000m, 2 — 2000m, 3 — 3000m, for rocks of the III drillability category at various minimum (a) and maximum (b) relative densities of the drilling fluid

род отношения $k/g\rho h$ ввиду малых величин коэффициента сцепления k.

Для пород III категории буримости устойчивость открытого ствола скважины с вероятностью 100% достигается в следующих диапазонах относительных плотностей бурового раствора:

- для глубин $h \le 1000$ м
  $0{,}2 \le \gamma_p/\gamma \le 1{,}4$
- для глубин $1000 < h \le 2000$ м
  $0{,}3 \le \gamma_p/\gamma \le 1{,}3$
- для глубин $2000 < h \le 3000$ м
  $0{,}4 \le \gamma_p/\gamma \le 1{,}2$

Заключение

По результатам расчетов можно констатировать, что относительная плотность бурового раствора, лежащая в интервале, определяемом формулой (17), включает в себя диапазоны для пород III категории буримости и обеспечивает устойчивость открытого ствола скважин в породах II и III категорий по буримости. Кроме того, указанный диапазон может быть распространен и на более высокие категории вследствие большей прочности пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Azeez G. Aregbe.* Wellbore Stability Problems in Deepwater Gas Wells // World Journal of Engineering and Technology, 2017, 5, pp. 626—647.

2. *Alkamil E. H. K., Abbood H. R., Flori R. E., Eckert A.* Wellbore Stability Evaluation for Mishrif Formation / Paper Presentation at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Bahrain, 2017, pp. 1—15.

3. *Abbas Khaksar Manshad, Jalalifar H., Aslannejad M.* Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods // J. Petrol. Explor. Prod. Technol., 2014, 4, pp. 359—369.

4. *Соболь И. М.* Численные методы Монте-Карло. — М.: Наука, 1973. — 312 с.

5. *Mun J.* Modeling Risk: Applying Monte Carlo Simulation, Real Options Analysis, Forecasting, and Optimization Techniques. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 623 p.

6. *Шашенко А. Н., Тулуб С. Б., Сдвижкова Е. А.* Некоторые задачи статистической геомеханики. — К.: Пульсари, 2002. — 304 с.

7. *Половов Б. Д.* Совершенствование метода статистических испытаний при решении геомеханических и техникоэкономических задач освоения подземного пространства // Известия ТулГУ. Геомеханика. Механика подземных сооружений. — 2005. — № 3. — С. 119—126.

8. *Polovov B., Valiev N., Kokarev K.* Features of simulation analysis of geomechanical risk levels in mines // Gornyy Zhurnal, 2016, no 12, pp. 8—13.

9. *Половов Б. Д., Валиев Н. Г., Кокарев К. В.* Геомеханический анализ горнотехнических объектов на основе методов непараметрической статистики // Известия вузов. Горный журнал. — 2016. — № 1. — С. 66—74.

10. *Речицкий В. П., Корябин И. А.* Оценка надежности скальных массивов по методу Монте-Карло / Российская конференция по механике горных пород. — СПб., 1997. — С. 389—395.

11. *Половов Б. Д.* Имитационная геомеханика / Геомеханика в горном деле–2000: доклады международной конференции. — Екактеринбург: ИГД УрО РАН, 2000. — С. 78—85.

12. *Волков М. Н.* Определение параметров кольцевых обделок городских подземных сооружений на основе имитационного моделирования: Дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. — Екатеринбург, 2002. — 208 с.

13. *Хлопцов Д. В.* Устойчивость открытого ствола эксплуатационных скважин подземных хранилищ углеводородов с различной траекторией // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 238—246.

14. *Каринцев И. Б., Жулев А. А.* Напряженно-деформированное состояние цементного кольца в буровой скважине // Вісник СумДУ. Технічні науки. — 2013. — № 4. — С. 152—159. ГИАБ

REFERENCES

1. Azeez G. Aregbe. Wellbore Stability Problems in Deepwater Gas Wells. *World Journal of Engineering and Technology*, 2017, 5, pp. 626—647.

2. Alkamil E. H. K., Abbood H. R., Flori R. E., Eckert A. Wellbore Stability Evaluation for Mishrif Formation. *Paper Presentation at the SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*, Bahrain, 2017, pp. 1—15.

3. Abbas Khaksar Manshad, Jalalifar H., Aslannejad M. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *J. Petrol. Explor. Prod. Technol.*, 2014, 4, pp. 359—369.

4. Sobol' I. M. *Chislennye metody Monte-Karlo* [Numerical Monte Carlo methods], Moscow, Nauka, 1973, 312 p.

5. Mun J. *Modeling Risk: Applying Monte Carlo Simulation, Real Options Analysis, Forecasting, and Optimization Techniques*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 623 p.

6. Shashenko A. N., Tulub S. B., Sdvizhkova E. A. *Nekotorye zadachi statisticheskoy geomekhaniki* [Some problems of statistical geomechanics], Kiev, Pul'sari, 2002, 304 p.

7. Polovov B. D. Improvement of statistical testing technique in solution of geomechanical and technoeconomic problems of underground space development. *Izvestiya TulGU. Geomekhanika. Mekhanika podzemnykh sooruzheniy*. 2005, no 3, pp. 119—126. [In Russ].

8. Polovov B., Valiev N., Kokarev K. Features of simulation analysis of geomechanical risk levels in mines. *Gornyy Zhurnal*, 2016, no 12, pp. 8—13.

9. Polovov B. D., Valiev N. G., Kokarev K. V. Geomechanical analysis of geotechnical objects based on the methods of nonparametric statistics. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2016, no 1, pp. 66—74. [In Russ].

10. Rechitskiy V. P., Koryabin I. A. Assessment of rock mass integrity by the Monte Carlo method. *Rossiyskaya konferentsiya po mekhanike gornykh porod*. Saint-Petersburg, 1997, pp. 389—395. [In Russ].

11. Polovov B. D. Simulation geomechanics. *Geomekhanika v gornom dele–2000*: International Conference Proceedings. Ekakterinburg, IGD UrO RAN, 2000, pp. 78—85. [In Russ].

12. Volkov M. N. *Opredelenie parametrov kol'tsevykh obdelok gorodskikh podzemnykh sooruzheniy na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Determining parameters of ring lining in urban underground facilities based on simulation modeling], Candidate's thesis, Ekakterinburg, 2002, 208 p.
13. Khloptsov D. V. Stability of different-path open holes in underground storages of hydrocarbons. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 4, pp. 238—246. [In Russ].
14. Karintsev I. B., Zhulev A. A. Stress–strain state of cement ring in borehole. *Visnik SumDU. Tekhnichni nauki*. 2013, no 4, pp. 152—159.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Хлопцов Дмитрий Геннадьевич — аспирант,
e-mail: dkhloptsov@gmail.com, НИТУ «МИСиС».

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

D.G. Khloptsov, Graduate Student, e-mail: dkhloptsov@gmail.com,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

(2019, СВ 25, 28 с.)

Куркутов Сергей Анатольевич[1] — студент, e-mail: s.t.a.l.k.e.r.53@gmail.ru,
Горн Евгений Викторович[1] — ведущий инженер,
Агафонов Валерий Владимирович[1] — д-р техн. наук, профессор,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС».

Представлены результаты аналитических исследований в области совершенствования научно-методической базы проектирования горнодобывающих предприятий. Предложены логико-информационная модель проектирования прогрессивных функциональных структур угледобывающих предприятий с использованием эвристической оптимизационной процедуры выбора оптимальной пространственно-планировочной топологии сети горных выработок, оптимальных параметров работы основных подсистем и оптимального горнодобывающего оборудования, основные варианты формирования условного эталон-предприятия при оценочной процедуре эффективности работы угледобывающих предприятий, эвристический алгоритм синтеза технологических систем угольных шахт на основе обобщенной схемы угледобычи, который учитывает технологическую совместимость альтернативных и принятых к учету вариантов проектных решений, процедура обоснования оптимальной производственной мощности шахты на основе использования минимаксного критерия Сэвиджа.

METHODICAL MAINTENANCE OF DESIGNING MINING ENTERPRISE

S.*A. Kurkutov*[1], Student, e-mail: s.t.a.l.k.e.r.53@gmail.ru, *E.V. Horn*[1], Leading Engineer,
V.V. Agafonov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: msmu-prpm@yandex.ru.

The results of analytical researches in the field of improvement of scientific and methodical base of design of mining enterprises are presented. The proposed logic-information model design progressive functional structures of coal mines using a heuristic optimization procedure of choosing the optimal spatial-planning the topology of the network of mine workings, optimum parameters of operation of the main subsystems and optimal mining equipment main options for the formation of a conditional model of the enterprise in the evaluation procedure of efficiency of coal enterprises, a heuristic algorithm for the synthesis of technological systems of coal mines on the basis of the generalized scheme of coal mining, which takes into account the technological compatibility of alternative and accepted design solutions, the procedure for justifying the optimal production capacity of the mine based on the use of the minimax savage criterion.