ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(12):58-72
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.822 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_58

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ВЫВАЛОВ В СКВАЖИНЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КАЛИБРОВКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Д.В. Коношонкин[1], В.С. Рукавишников[1]

[1] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, e-mail: konoshonkindv@hw.tpu.ru

Аннотация: Одномерные геомеханические модели являются полезным инструментом при проектировании строительства скважин. В тоже время для качественного построения геомеханической модели необходим большой объем исходных данных, включающий напряженно-деформированное состояние массива и упруго-прочностные свойства горных пород. Часть необходимых данных можно получить на основе калибровки модели на фактическое поведение вывалов в скважине. Представлено два способа аппроксимации вывалов стенки скважин с помощью геометрических фигур: треугольника и эллипса. Геометрическая аппроксимация вывала позволяет ограничить размеры вывалов, а также связать угол вывала с его глубиной. Полученные ограничения и связи позволяют проводить калибровку одномерных геомеханических моделей не только по данным микросканеров, но и с использованием более доступных данных кавернометрии и профилеметрии по скважинам, что существенно снижает требования к полноте исходных данных для построения адекватных геомеханических моделей. Показано, что для корректного использования треугольной и эллиптической аппроксимации вывалов необходимо предварительно оценить форму вывалов, характерную для области исследования, по данным хотя бы одного исследования по акустическому микросканеру и подобрать характерные параметры аппроксимации для их дальнейшего использования в скважинах с отсутствием данных микросканеров. В случае полного отсутствия данных микросканеров предложены средние значения для аппроксимации, а также граничные значения для оценки неопределенности.

Ключевые слова: вывал, скважина, геометрическая аппроксимация, форма вывала, бурение, геомеханика, одномерное моделирование.

Для цитирования: *Коношонкин Д. В., Рукавишников В. С.* Геометрическая аппроксимация вывалов в скважине для проведения калибровки геомеханической модели // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 12. – С. 58–72. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_58.

Geometrical approximation of borehole collapses to perform calibration of geomechanical model

D.V. Konoshonkin[1], V.S. Rukavishnikov[1]

[1] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, e-mail: konoshonkindv@hw.tpu.ru

© Д.В. Коношонкин, В.С. Рукавишников. 2021.

Abstract: One-dimensional geomechanical models are the useful tools for the borehole planning and design. The high-quality geomechanical modeling requires a lot of initial data, including the stress–strain behavior of rock mass, its elasticity and strength characteristics. Some of these data can be obtained from the model calibration with respect to actual borehole collapses. This article offers two methods of borehole wall collapse approximation using geometrical figures of a triangle and an ellipse. The geometrical approximation of borehole collapse makes it possible to limit the collapse sizes and to correlate the angle and the depth of the collapse. The resultant limitations and correlations enable calibration of one-dimensional geomechanical models using the micro-scanning data, as well as more easily accessible caliper logs and section caliper logs per boreholes, which essentially reduces requirements imposed on completeness of input data for adequate geomechanical modeling. For the correct uses of the triangular and elliptical approximation of borehole collapses, it is necessary to preliminary estimate the shape of the collapse using the data of an acoustic micro-scanning test, and to select representative parameters of approximation to be used in boreholes in case of the lacking micro-scanning data. When the micro-scanning data are totally absent, the average values are proposed for the approximation and the limit values are offered for the uncertainty assessment.

Key words: collapse, borehole, geometrical approximation, collapse shape, drilling, geomechanics, one-dimensional modeling.

For citation: Konoshonkin D. V., Rukavishnikov V. S. Geometrical approximation of borehole collapses to perform calibration of geomechanical model. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12):58-72. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_12_0_58.

Введение

Устойчивость горных выработок и скважин зависит от напряженно-деформированного состояния (НДС) массива и от упруго-прочностных свойств горных пород [1, 2]. При наличии достоверных данных о НДС массива и упруго-прочностных свойств горных пород одномерное геомеханическое моделирование позволяет провести расчет стабильности выработок и предложить условия для предотвращения образования вывалов и каверн [3, 4]. НДС массива может быть изменчивым, что требует постоянную калибровку моделей на фактические данные [5, 6]. Также обязательным компонентом одномерной геомеханической модели является прочность горных пород на одноосное сжатие вдоль всего ствола скважины или исследуемого интервала [7, 8]. Прочность горных пород надежно определяется в лабораторных условиях на образцах керна. С целью получить непрерывную кривую изменения прочности горных пород вдоль ствола скважины чаще всего используется корреляция геофизических параметров с прочностью горной породы, полученной по керну [9, 10]. Такой подход имеет два основных недостатка:

- в большинстве случаев измерения прочности горной породы по керну либо отсутствуют, либо недостаточны для получения надежной корреляционной связи;
- получение достаточного объема для исследований возможно только в интервале отбора керна и практически всегда невозможно для вышележащих горных пород, где керн не отбирается.

Уточнить прочность горной породы можно так же, как и НДС массива, на этапе калибровки геомеханической модели путем подбора такой прочности

горных пород, которая позволит привести в соответствие расчетные параметры обрушения с фактически измеренными параметрами в выработке или скважине. В горной выработке с возможностью доступа в нее для визуальной оценки параметров вывала такой подход не имеет значительных ограничений, однако в случае строительства скважины информация об обрушении ствола скважины получается по косвенным и, в некоторых случаях, дорогостоящим измерениям. Для калибровки геомеханической модели для скважин необходимо оценить угол вывала, что может быть сделано с помощью скважинного акустического телевизора или акустического/электрического микросканера, позволяющих получить развертку стенки ствола скважины. Для глубоких скважин применение таких методов не является распространенной практикой. С другой стороны, в большинстве скважин диаметр ствола скважины измеряется с помощью каверномера или профилемера. Эти исследования позволяют определить глубину вывала стенки скважины, но не угол вывала. Соответственно, возникает необходимость в оценке связи между глубиной и углом (шириной) вывала.

В данной работе показан подход к оценке связи глубины и ширины вывала через геометрическую аппроксимацию формы вывала.

Методы

Поиск связи между глубиной вывала и его шириной выполнялся многими исследователями. В работе [11] авторы показали, что угол вывала можно рассчитать с использованием распределения напряжений вокруг стенки скважины и он зависит как от прочности горных пород, так и от соотношения главных нормальных напряжений до бурения скважины. Также было показано, что угол вывала не меняется во времени (не растет).

С другой стороны, теоретически рассчитанная глубина вывала меньше измеренной и изменяется со временем, т.е. глубина вывала растет до глубины своей стабилизации.

Механика образования вывала была детально исследована в экспериментах, описанных в работе [12]. Эксперименты были проведены для разного типа горных пород: гранита, известняка, аркозового и чистого кварцевого песчаника. Для всех горных пород, кроме кварцевого песчаника, характерна треугольная форма вывалов. Согласно работам [12] процесс образования вывалов в случае гранитной горной породы происходит в четыре этапа (рис. 1):

I. Сначала образуются дилатантные (с увеличением объема) межзерновые трещины отрыва за стенкой скважины, параллельные максимальному горизонтальному напряжению (σ_{Hmax});

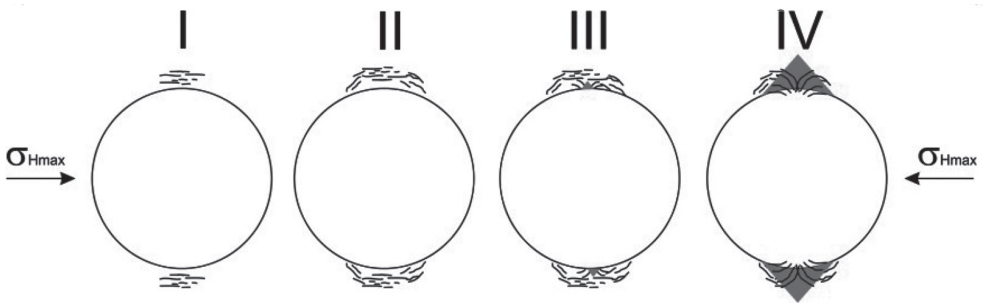

Рис. 1. Процесс образования вывала для гранита
Fig. 1. Borehole collapse in granite

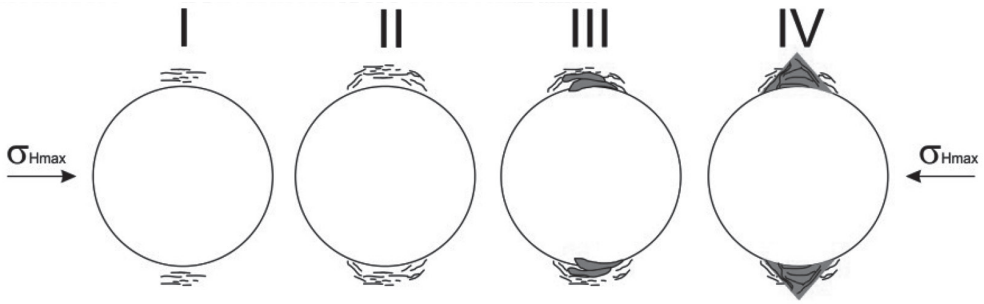

Рис. 2. Процесс образования вывала для прочного известняка или аркозового песчаника
Fig. 2. Borehole collapse in strong limestone or arcose

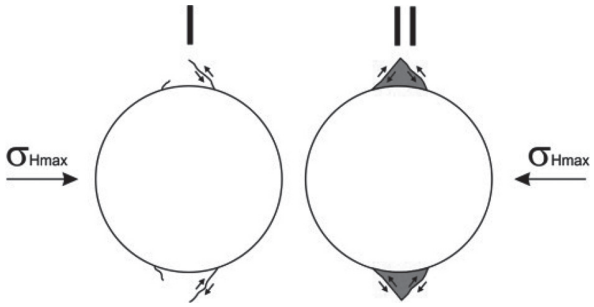

Рис. 3. Процесс образования вывала для мелового известняка
Fig. 3. Borehole collapse in cretaceous limestone

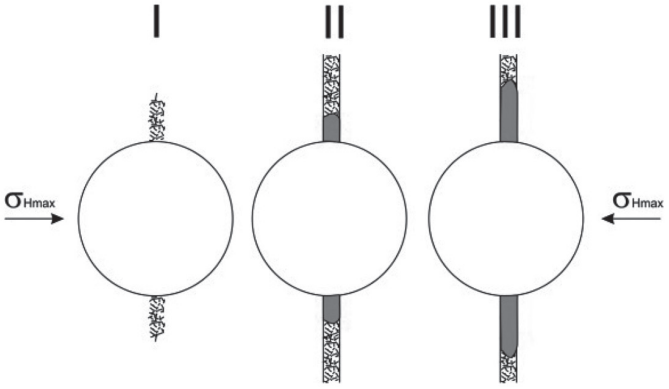

Рис. 4. Процесс образования вывала для кварцевого песчаника
Fig. 4. Borehole collapse in quartz sandstone

II. Затем трещины поворачиваются к стенке скважины;

III. После этого горная порода расслаивается на пластинки, которые, начиная с центра, вываливаются внутрь скважины;

IV. Процесс продолжается до тех пор, пока вывал не примет форму треугольника.

В случае прочного известняка или аркозового песчаника (рис. 2) процесс образования вывала аналогичен процессу, проходящему в гранитах, однако наблюдаются образование более крупных чешуек вываливающейся горной породы, а также наличие как межзернового, так и внутризернового растрескивания.

Другой вид образования вывала характерен для карбонатной породы типа мела (рис. 3). В данном случае образуются не трещины отрыва, а трещины сдвига, которые практически сразу ограничивают будущую зону вывала.

Совершенно другой процесс образования вывала и форма вывала наблюдается для высокопористого кварцевого (чистого) песчаника, в котором зерна сцементированы за счет сутурного сцепления зерен кварца (рис. 4). В этом случае образуется локализованная зона разрушения и уплотнения горных пород вдоль оси минимального горизонтального напряжения. Затем за счет промывки скважины буровым раствором разрушенная горная порода вымывается в скважину и происходит рост промытой зоны.

На основе фотографий вывалов по работе [12] были измерены геометрические параметры вывалов: глубина и ширина, а также угол треугольной аппроксимации. На рис. 5 показан пример вывалов для двух образцов гранита различной зернистости. Образованные вывалы хорошо аппроксимируются треугольной формой, при этом угол треугольной аппроксимации изменяется от 70° до 90°.

Аналогичная форма вывалов наблюдается для известняка и аркозового песчаника (рис. 6, 7), в то время как существенные изменения в форме вывалов наблюдаются для чистого кварцевого песчаника (рис. 8).

Результаты

Все измеренные геометрические параметры приведены в таблице. Также были оценены средние значения углов аппроксимации и соотношения радиуса вывала к радиусу скважины. При оценке средних соотношений не учитывались геометрические параметры для чистого высокопористого песчаника. Согласно таблице наблюдается ограниченность в параметрах треугольного вывала. Угол треугольной аппроксимации вывала из-

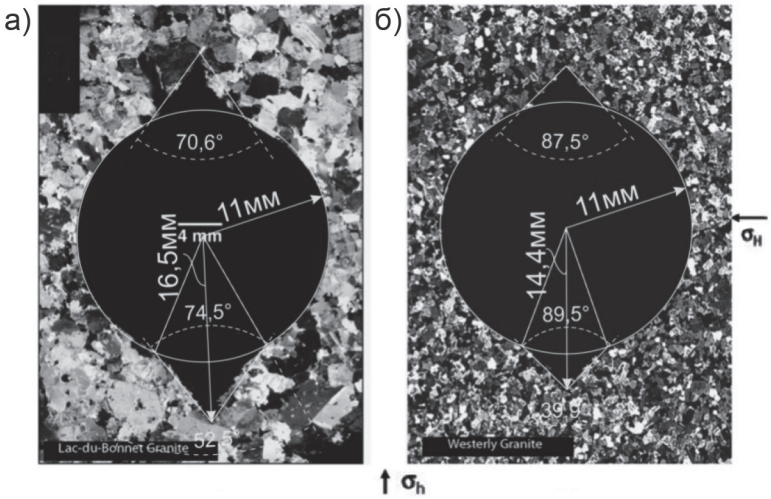

Рис. 5. Вывалы в образце гранита по данным [12]: угол вывала, wbo: 52,5° (а), 39,9° (б); глубина вывала, 2a: 16,5 мм (а), 14,4 мм (б); радиус скважины, R: 11 мм (а), 11 мм (б); угол треугольной аппроксимации вывала, γ: 74,5°; 70,6° (а), 89,5°; 87,5° (б)

Fig. 5. Collapses in granite sample by data from [12]: angle of collapse, wbo: 52,5° (a), 39,9° (b); depth of collapse, 2a: 16,5 mm (a), 14,4 mm (b); radius of borehole, R: 11 mm (a), 11 mm (b); tangle of triangular collapse approximation, γ: 74,5°; 70,6° (a), 89,5°; 87,5° (b)

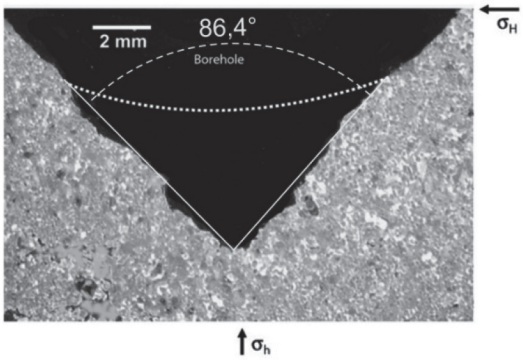

Рис. 6. Вывалы в образце известняка по данным [12]: угол треугольной аппроксимации вывала, γ: 86,4°
Fig. 6. Collapses in limestone sample by data from [12]: angle of triangular collapse approximation, γ: 86,4°

меняется в достаточно узких пределах (от 70,6° до 90,6°), а среднее значение угла треугольной аппроксимации вывалов равно порядка 80°, что на 30° меньше угла вывалов, при этом среднее соотношение глубины вывала к радиусу скважины составляет 1,4.

Обсуждение результатов

Рассмотрим работу [13], чтобы подтвердить возможность использования треугольной аппроксимации вывалов. В работе авторы анализируют фактические данные измерения глубины и ширины вывалов и проверяют связь между этими параметрами в зависимости от петрофизических и литологических факторов. Авторам не удалось найти модель связи, однако собранный ими фактический материал можно использовать для проверки геометрических ограничений.

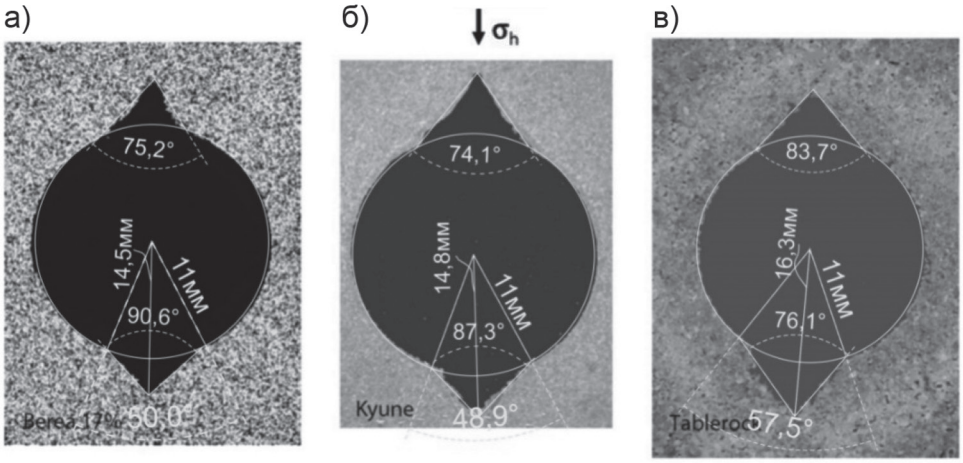

Рис. 7. Вывалы в образце аркозового песчаника по данным [12]: угол вывала, wbo: 50,0° (а), 48,9° (б), 57,5° (в); глубина вывала, 2a: 14,5 мм (а), 14,8 мм (б), 16,3 мм (в); радиус скважины, R: 11 мм (а), 11 мм (б), 11 мм (в); угол треугольной аппроксимации вывала, γ: 90,6°; 75,2° (а), 87,3°; 74,1° (б), 76,1°; 83,7° (в)
Fig. 7. Collapses in arcose sample by data from [12]: angle of collapse, wbo: 0,0° (a), 48,9° (b), 57,5° (v); depth of collapse, 2a: 14,5 mm (a), 14,8 mm (b), 16,3 mm (v); adius of borehole, R: 11 mm (a), 11 mm (b), 11 mm (v); tangle of triangular collapse approximation, γ: 90,6°; 75,2° (a), 87,3°; 74,1° (b), 76,1°; 83,7° (v)

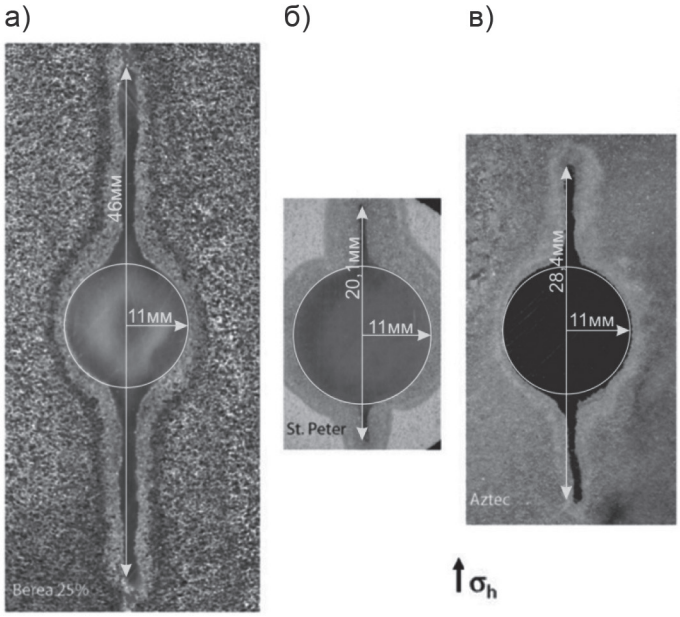

Рис. 8. Collapses in highly porous quartz sandstone sample by data from [12]: глубина вывала, 2a: 46 мм (а), 20,1 мм (б), 28,4 мм (в); радиус скважины, R: 11 мм (а), 11 мм (б), 11 мм (в)

Fig. 8. Breakouts in a quarts sandstone according to [12]: depth of collapse, 2a: 46 mm (a), 20,1 mm (b), 28,4 mm (v); radius of borehole, R: 11 mm (a), 11 mm (b), 11 mm (v)

Геометрические параметры вывалов
Geometrical parameters of collapses

Литология	Измеренные геометрические параметры					
	wbo	***2a***	***R***	γ	γ	***a/Rw***
Гранит	52,5	16,5	11	74,5	70,6	1,5
Гранит	39,9	14,4	11	89,5	87,5	1,3
Известняк	–	–	–	86,4	–	–
Аркозовый песчаник	50	14,5	11	90,6	75,2	1,3
Аркозовый песчаник	48,9	14,8	11	87,3	74,1	1,3
Аркозовый песчаник	57,5	16,3	11	76,1	83,7	1,5
Кварцевый песчаник	–	46	11	–	–	4,2
Кварцевый песчаник	–	20,1	11	–	–	1,8
Кварцевый песчаник	–	28,4	11	–	–	2,6
Минимальное*	39,9	14,4	11	70,6		1,3
Максимальное*	57,5	16,5	11	90,6		1,5
Среднее*	49,8	15,3	11	81,4		1,4

* Без учета кварцевого песчаника.
wbo — угол вывала, градусы; 2*a* — глубина вывала, мм; *R* — радиус скважины (отверстия в образце), мм; γ — угол треугольной аппроксимации, град.

На рис. 9 показаны фактические измеренные параметры вывалов (глубина вывала и ширина вывала) по данным [13].

По графику видно, что максимальная ширина вывалов ограничивается 150°, что соответствует критерию перехода скважины от вывала к каверне. Также наблюдается широкий разброс возможных соотношений глубин вывала и соответствующих им углов вывалов.

Для проверки работоспособности треугольной аппроксимации на график рис. 9 были нанесены расчетные линии соотношений в зависимости от различных углов треугольной аппроксимации (рис. 10).

Для расчета параметров вывалов треугольной геометрической формой выведены следующие уравнения связи:

$$a = R\frac{\sin\left(\frac{wbo+\gamma}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}; \qquad (1)$$

$$wbo = 2a\sin\left[\frac{a}{R}\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right]-\gamma,$$

где a — глубина вывала (половина измеренного диаметра каверномером), м; wbo — угол вывала, град; γ — угол треугольной аппроксимации вывала, град; R — радиус скважины, м.

По рис. 10 можно сделать следующие выводы:

- Минимальный угол треугольной аппроксимации (γ) составляет 50°.
- При угле β равном 90°, наблюдается касание треугольной аппроксимации и стенки скважины. Для увеличения угла вывала при постоянном γ в этом случае необходимо пересекать периферию скважины, что приводит к уменьшению глубины вывала. Соответственно, случай β = 90° показывает максимально возможную глубину вывала при заданном угле γ.

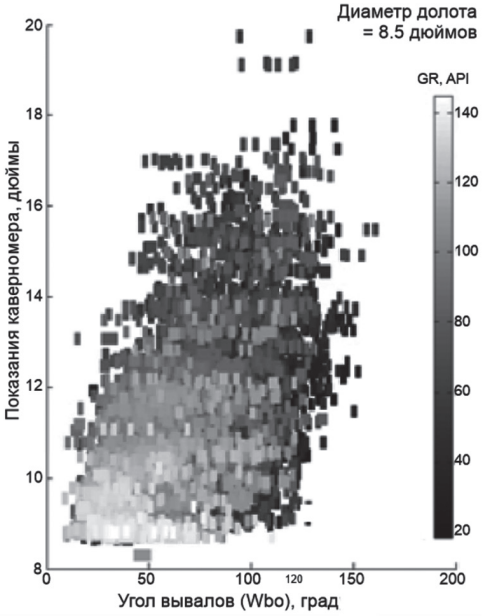

Рис. 9. Измеренные параметры вывалов по работе [13]
Fig. 9. Measured parameters of collapses as per [13]

- Вывалы при β < 30° или β > 150° переходят в каверны;
- Среднее значение γ = 80°, выявленное по таблице, проходит через середину облака точек, однако наблюдаются вывалы с большим и меньшим углом треугольной аппроксимации.

Для корректного использования треугольной аппроксимации необходимо убедиться в треугольной форме вывалов (по данным акустического сканера) и оценить угол аппроксимации γ. В случае отсутствия данных акустических сканеров можно использовать уравнения для случая β = 90:

$$a = \frac{R}{\cos\left(\frac{wbo}{2}\right)}; \; wbo = 2a\cos\left(\frac{R}{a}\right), \qquad (2)$$

При использовании уравнений (2) рекомендуется оценить неопределенности, используя ограничения по γ = 50° (поставив это значение в формулы (1))

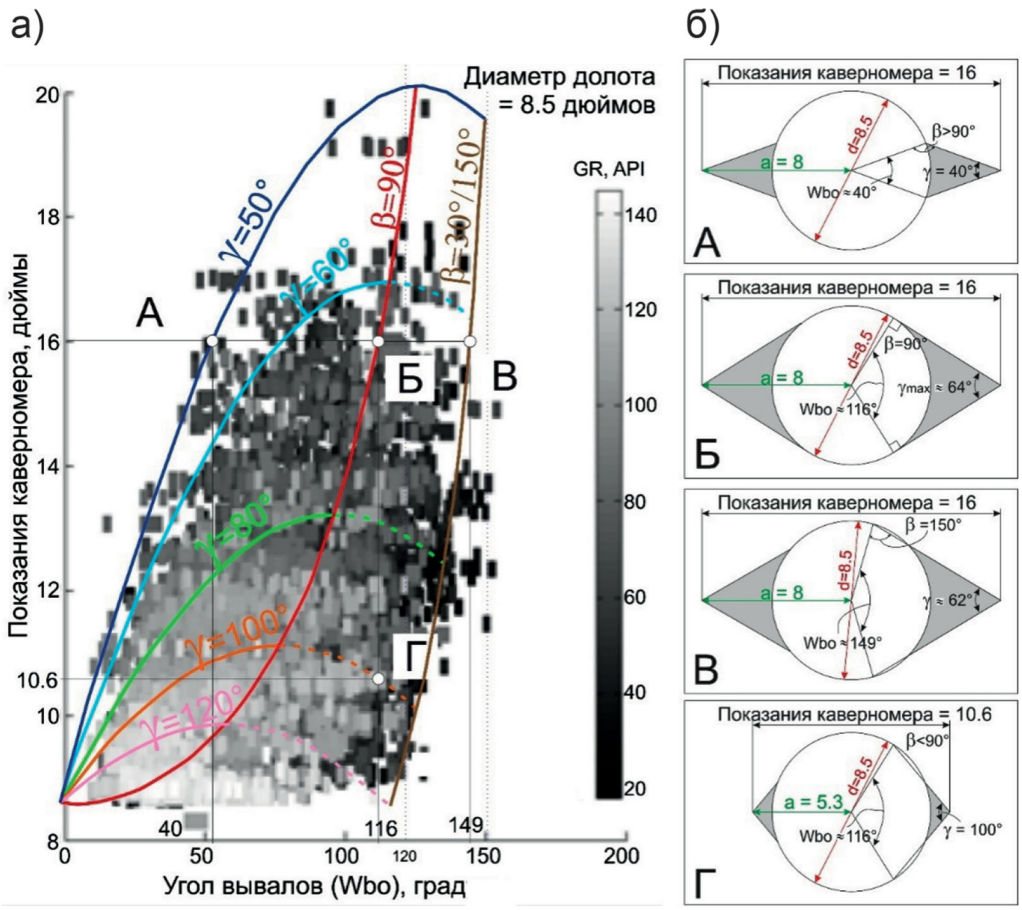

Рис. 10. Наложение расчетных линий треугольной аппроксимации вывалов на график по данным [13] (а) и схема геометрических соотношений для точек А, Б, В, Г (б)

Fig. 10. Superimposition of triangular collapse approximation on plot based on the data from [13] (a) and layout of geometrical relations for points A, B, V and G (b)

и по β = 30°, поставив это значение в формулы (3):

$$a = R\frac{\sin(\beta)}{\cos\left(\frac{wbo}{2}\right)};\ wbo = 2a\cos\left(\frac{R\cdot\sin(\beta)}{a}\right) \quad (3)$$

Часто фактическая геометрия вывалов, измеренная по данным акустических микросканеров, отличается от треугольной (рис. 11). В этом случае можно рассмотреть аппроксимацию с помощью эллиптической геометрии, при которой рекомендуется подбирать соотношение *a/b* по данным акустического микросканера.

При отсутствии акустического микросканера рекомендуется брать соотношение *a/b*, равное 2,1, как среднее соотношение и оценивать неопределенность с использованием соотношений 4,6 и 1,06 (рис. 12).

Для расчета параметров вывалов при аппроксимации эллиптической геометрией выведены следующие уравнения связи:

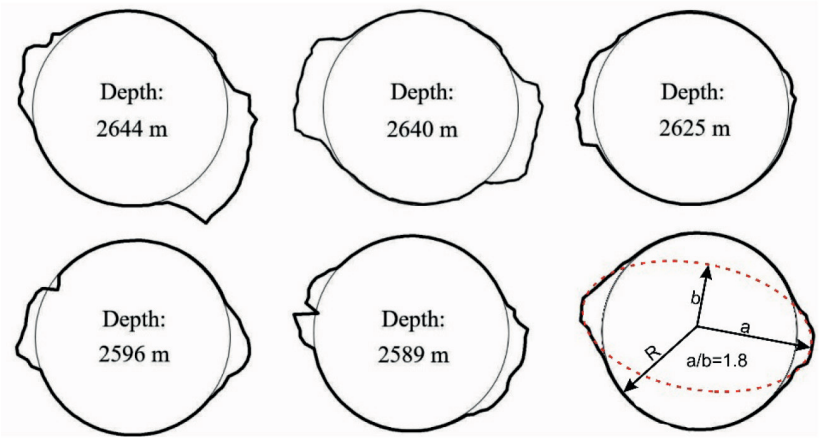

Рис. 11. Пример форм вывалов по данным UBI (акустический микросканер) [14] и наложение эллиптической аппроксимации с соотношением осей 1,8 для правого нижнего вывала

Fig. 11. Illustration of collapses by UBI data (acoustic micro-scanner) [14] and superimposition of elliptical approximation at a ratio of axes of 1.8 for the right-hand bottom collapse

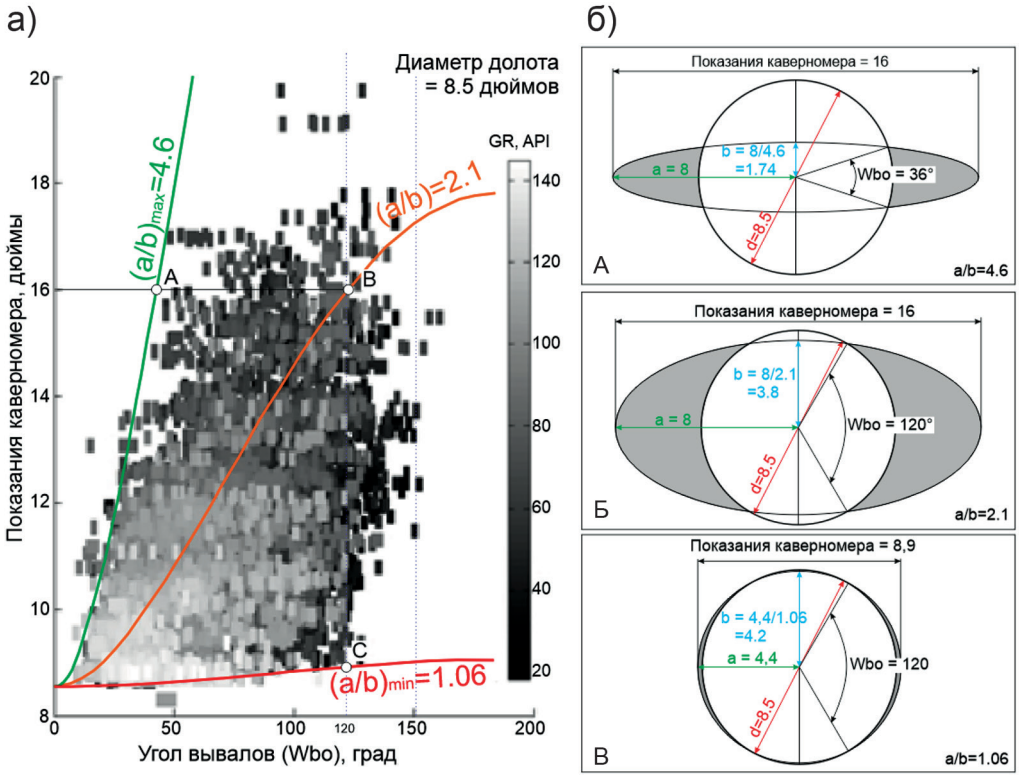

Рис. 12. Наложение расчетных линий эллиптической аппроксимации вывалов на график по данным [13] (а) и схема геометрических соотношений для точек А, Б, В (б)

Fig. 12. Superimposition of elliptical collapse approximation on plot based on the data from [13] (a) and layout of geometrical relations for points A, B and V (b)

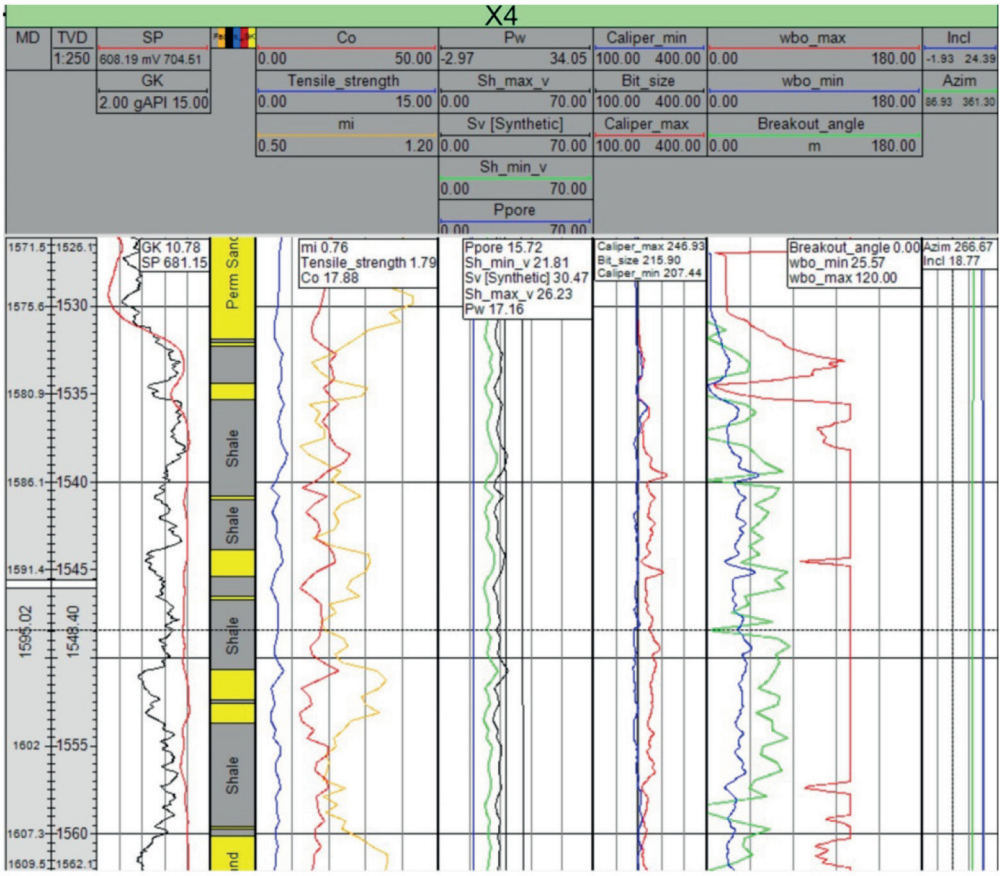

Рис. 13. Геомеханическая модель для скважины X4 Северо-Останинского месторождения
Fig. 13. Geomechanical model for borehole X4 in Severo-Ostaninskoe field

$$a = \sqrt{\frac{R^2\left((a/b)^2 \cdot \tan^2\left(\frac{wbo}{2}\right)+1\right)}{\tan^2\left(\frac{wbo}{2}\right)+1}};$$

$$wbo = 2a\tan\sqrt{\frac{a^2-R^2}{R^2(a/b)^2-a^2}}; \qquad (4)$$

$$a/b = \sqrt{\frac{a^2-R^2}{R^2\cdot\tan^2\left(\frac{wbo}{2}\right)}+\frac{a^2}{R^2}},$$

где a — длина большой полуоси эллипса, равная половине измеренного диаметра кавернометром, м; b — длина малой полуоси эллипса, м.

Пример практического применения геометрических ограничений

В качестве примера использования геометрических ограничений для калибровки скважин рассмотрим скважину X4 Северо-Останинского месторождения, расположенного в Томской области. В данном примере используем вариант эллиптической аппроксимации, для которой диапазон значений *a/b* лежит в пределах 4,6 — 1,06, при этом наиболее вероятно, что верхняя граница *a/b* не должна превышать 2,7 (рис. 12). Данные соотношения накладывают ограничение на возможные углы вывалов

при известных значениях большой оси эллипса.

Рассмотрим состояние напряжения на глубине TVD = 1548,4 м (рис. 13).

Используя данные каверномера (значение $2a$ = 246,93 мм) и максимальное соотношение $(a/b)_{max}$ = 2,7 и подставив их в формулу (4), получим минимальное значение угла вывала (формула справедлива и для диметров):

$$wbo_{min} = 2a\tan\sqrt{\frac{246,93^2 - 215,9^2}{215,9^2\left(2,7\right)^2 - 246,93^2}} = 25,57^\circ$$

Максимальное значение угла вывала определим, подставив соотношение 1,06:

$$wbo_{max} = 2a\tan\sqrt{\frac{246,93^2 - 215,9^2}{215,9^2\left(1,06\right)^2 - 246,93^2}} = 2a\tan\sqrt{-1,67}$$

В данном случае получим отрицательное число в подкоренном выражении. Это связано с тем, что при соотношении a/b = 1,06 глубина вывала 246,93 мм достигается только при условии образования каверны. Однако по данным минимального каверномера каверны в данной точке нет (*Calipermin* ≤ ≤ *Bitsize*), соответственно, максимальный угол wbo_{max} равен углу, при котором начинает образовываться каверна (120°). В формульном виде данное условие можно записать следующим образом:

В интервале вывалов:

если $\frac{Caliper_{max}}{\left(a/b\right)_{min}} > bit_{size}$, то wbo_{max} = 120°.

Теперь проанализируем расчетный угол вывала, используя параметры одномерной геомеханической модели (рис. 14). На графике рис. 14 представлены значения эффективных напряжений на стенке скважины, рассчитанные по уравнениям Кирша. Также рассчи-

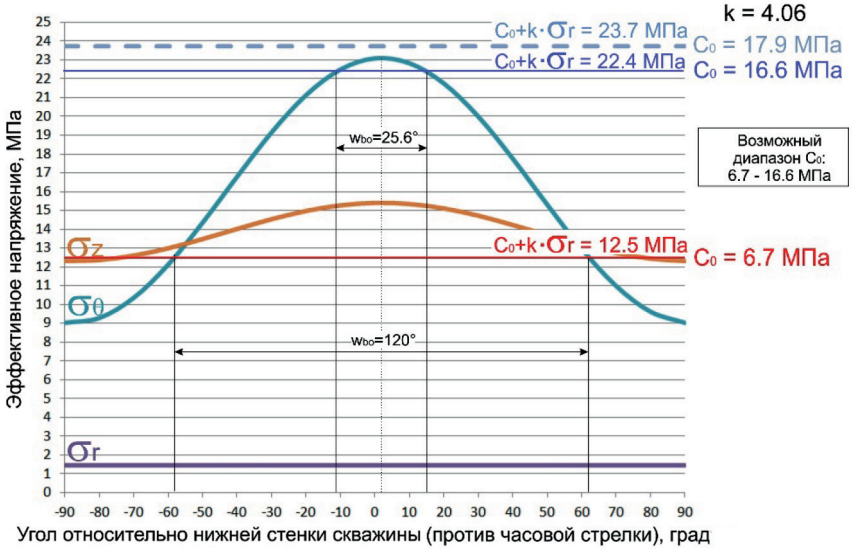

Рис. 14. Распределение напряжений на стенке скважины X4 для глубины TVD = 1548,4 м: C_0 — прочность на одноосное сжатие; k — коэффициент трехосного сжатия; σ_z — эффективное напряжение вдоль оси скважины; σ_θ — тангенсальное эффективное напряжение; σ_r — радиальное эффективное напряжение

Fig. 14. Stress pattern on X4 borehole wall at depth TVD = 1548.4 m: C_0 — uniaxial compression strength; k — triaxial compression coefficient; σ_z — effective stress along the borehole axis; σ_θ — tangential effective stress; σ_r — radial effective stress

таны линии разрушения стенки скважины по критерию Кулона ($C_0 + k\sigma_r$). Соответственно при текущих параметрах геомеханической модели расчетный угол разрушения стенки скважины равен нулю (стенка не разрушается). Однако, как было показано выше, угол разрушения должен быть как минимум 25,27°, соответственно, текущая геомеханическая модель не адекватна, т.е. либо занижено соотношение горизонтальных напряжений (S_{Hmax}/S_{hmin}), либо завышена прочность горной породы на одноосное сжатие (C_0). Если допустить, что соотношение S_{Hmax}/S_{hmin} определено верно, тогда возможный диапазон C_0 = 6,7—16,6 МПа. Аналогичный анализ проводится для всех интервалов скважин с имеющимися данными кавернометрии, что позволяет уточнить возможный диапазон прочности горных пород на одноосное сжатие во всем интервале с данными кавернометрии.

Заключение

В данной работе показаны два метода геометрической аппроксимации вывалов: треугольная и эллиптическая. Для корректного использования показанных подходов рекомендуется сопоставить фактически измеренную форму вывалов по данным акустических сканеров с аппроксимируемой геометрией. При отсутствии данных о фактической форме вывалов предлагается использовать средние значения геометрических параметров: для треугольной аппроксимации — угол γ = 80° или β = 90°; для эллиптической аппроксимации — соотношение осей a/b = 2,1. В случае использования средних значений рекомендуется также оценивать неопределенность по максимальному и минимальному параметру аппроксимации.

Вклад авторов

Коношонкин Д.В. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования, систематизация материала, получение данных для анализа, анализ результатов исследования и подготовка данных, написание текста статьи.

Рукавишников В.С. — проверка материалов, курирование подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дрибан В. А.* Устойчивость горных выработок в структурно-неоднородных массивах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № 9. — С. 305–312.

2. *Курленя М. В.*, *Барышников В. Д.*, *Гахова Л. Н.* Развитие экспериментально-аналитического метода оценки устойчивости горных выработок // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 20–29.

3. *Вашкевич А. А.*, *Жуков В. В.*, *Овчаренко Ю. В.*, *Бочков А. С.* Развитие комплексного геомеханического моделирования в ПАО «Газпром нефть» // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 12. — С. 16–19.

4. *Давлетова А. Р.*, *Киреев В. В.*, *Кнутова С. Р.*, *Пестриков А. В.*, *Федоров А. И.* Разработка корпоративного геомеханического симулятора для моделирования устойчивости скважин // Нефтяное хозяйство. — 2018. — № 6. — С. 88–92. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-6-88-92.

5. *Козырев А. А.*, *Савченко С. Н.*, *Панин В. И.*, *Семенова И. Э.*, *Рыбин В. В.*, *Федотова Ю. В.*, *Козырев С. А.* Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. — Апатиты: КНЦ РАН, 2019. — 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

6. *Лукин С. В.*, *Есипов С. В.*, *Жуков В. В.*, *Овчаренко Ю. В.*, *Хомутов А. Ю.*, *Шевчук Т. Н.*, *Сусляков И. В.* Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений в бурении // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 6. — С. 70–73.

7. *Moore J. C., Chang C., Mcneill L., Thu M. K., Yamada Y., Huftile G.* Growth of borehole breakouts with time after drilling: Implications for state of stress, NanTroSEIZE transect, SW Japan // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2012, vol. 12, no. 4. DOI: 10.1029/2010GC003417.

8. *Guerra C., Fischer K., Henk A.* Stress prediction using 1D and 3D geomechanical models of a tight gas reservoir. A case study from the Lower Magdalena Valley Basin, Colombia // Geomechanics for Energy and the Environment. 2019, vol. 19, article 100113. DOI: 10.1016/j.gete.2019.01.002

9. *Salimov M., Konoshonkin D.* The ratios of the main stresses in the Wellbore in carbonate rocks // Conference Proceedings. Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences; Time for Breakthrough. 2018, vol. 2018. pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201800124.

10. *Tashkinov V., Konoshonkin D.* The rock strength properties determination of the jurassic formation sandstones by updating empirical relations for mechanical earth model construction // Conference Proceedings. Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences; Time for Breakthrough. 2018, vol. 2018. pp. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.201800162.

11. *Zoback M. D., Moos D., Mastin L., Anderson R. N.* Well bore breakouts and in situ stress // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 1985, vol. 90, pp. 5523–5530. DOI: 10.1029/JB090iB07p05523.

12. *Haimson B.* Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007, vol. 44, no. 2. pp. 157–173. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.06.002.

13. *Moos D., Barton C. A., Willson S.* Impact of rock properties on the relationship between wellbore breakout width and depth // Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands. 2007, vol. 2. pp. 1677–1683. DOI: 10.1201/noe0415444019-c211.

14. *Zoughy P., Molladavoodi H., Nikoosokhan S., Fatahi Mehraban L.* Numerical modeling of logged wellbore breakouts using cohesion-weakening frictional-strengthening models // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021, vol. 198, no. 4, article 108206. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108206. ГИАБ

REFERENCES

1. Driban V. A. Stability of mines in structurally heterogeneous massifs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2008, no. 9, pp. 305–312. [In Russ].

2. Kurlenya M. V., Baryshnikov V. D., Gakhova L. N. Experimental and analytical method for assessing stability of stopes. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no. 4, pp. 20–29. [In Russ].

3. Vashkevich A. A., Zhukov V. V., Ovcharenko Yu. V., Bochkov A. S. Development of integrated geomechanical modeling approaches at PJSC Gazprom Neft. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2016, no. 12, pp. 16–19. [In Russ].

4. Davletova A. R. Kireev V. V., Knutova S. R., Pestrikov A. V., Fedorov A. I. Development of corporate geomechanics simulator for wellbore stability modeling. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2018, no. 6, pp. 88–92. [In Russ]. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-6-88-92.

5. Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I.E., Rybin V. V., Fedotova Yu. V., Kozyrev S. A. *Geomekhanicheskiye protsessy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravleniye geodinamicheskimi riskami* [Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and management of geodynamic risks], Apatity, KNTs RAN, 2019. 431 c. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

6. Lukin S. V., Esipov S. V., Zhukov V. V., Ovcharenko Yu. V., Khomutov A. Yu., Shevchuk T. N., Suslyakov I. V. Borehole stability prediction to avoid drilling failures. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2016, no. 6, pp. 70–73. [In Russ].

7. Moore J. C., Chang C., Mcneill L., Thu M. K., Yamada Y., Huftile G. Growth of borehole breakouts with time after drilling: Implications for state of stress, NanTroSEIZE transect, SW Japan. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2012, vol. 12, no. 4. DOI: 10.1029/2010GC003417.

8. Guerra C., Fischer K., Henk A. Stress prediction using 1D and 3D geomechanical models of a tight gas reservoir. A case study from the Lower Magdalena Valley Basin, Colombia. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019, vol. 19, article 100113. DOI: 10.1016/j.gete.2019.01.002

9. Salimov M., Konoshonkin D. The ratios of the main stresses in the Wellbore in carbonate rocks. *Conference Proceedings. Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences; Time for Breakthrough*. 2018, vol. 2018. pp. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201800124.

10. Tashkinov V., Konoshonkin D. The rock strength properties determination of the jurassic formation sandstones by updating empirical relations for mechanical earth model construction. *Conference Proceedings. Saint Petersburg 2018: Innovations in Geosciences; Time for Breakthrough*. 2018, vol. 2018. pp. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.201800162.

11. Zoback M. D., Moos D., Mastin L., Anderson R. N. Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1985, vol. 90, pp. 5523–5530. DOI: 10.1029/JB090iB07p05523.

12. Haimson B. Micromechanisms of borehole instability leading to breakouts in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2007, vol. 44, no. 2. pp. 157–173. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.06.002.

13. Moos D., Barton C. A., Willson S. Impact of rock properties on the relationship between wellbore breakout width and depth. *Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*. 2007, vol. 2. pp. 1677–1683. DOI: 10.1201/noe0415444019-c211.

14. Zoughy P., Molladavoodi H., Nikoosokhan S., Fatahi Mehraban L. Numerical modeling of logged wellbore breakouts using cohesion-weakening frictional-strengthening models. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021, vol. 198, no. 4, article 108206. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108206.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коношонкин Дмитрий Владимирович[1] — инженер,
e-mail: KonoshonkinDV@hw.tpu.ru,
http://orcid.org/0000-0002-9939-2301,
Рукавишников Валерий Сергеевич[1] — PhD, доцент,
заместитель директора по развитию инженерной школы
природных ресурсов, e-mail: RukavishnikovVS@hw.tpu.ru,
http://orcid.org/0000-0001-7063-9756,
[1] Национальный исследовательский
Томский политехнический университет.
Для контактов: Коношонкин Д.В., e-mail: KonoshonkinDV@hw.tpu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.V. Konoshonkin[1], Engineer, e-mail: KonoshonkinDV@hw.tpu.ru,
http://orcid.org/0000-0002-9939-2301,
V.S. Rukavishnikov[1], PhD, Assistant Professor,
Deputy Director of the School of Natural Resources,
e-mail: RukavishnikovVS@hw.tpu.ru,
http://orcid.org/0000-0001-7063-9756,
[1] National Research Tomsk Polytechnic University,
634050, Tomsk, Russia.
Corresponding author: D.V. Konoshonkin, e-mail: KonoshonkinDV@hw.tpu.ru.

Получена редакцией 27.07.2021; получена после рецензии 05.08.2021; принята к печати 10.11.2021.
Received by the editors 27.07.2021; received after the review 05.08.2021; accepted for printing 10.11.2021.