

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.243.273

И. В. Воевидко, Я. М. Кочкодан, А. И. Васько

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БУРОВОГО ИНДЕКСА АНИЗОТРОПИИ И ОЦЕНКА ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ОРИЕНТИРОВАНИЕ СКВАЖИН

UDC 622.243.273

I. V. Voievidko, Y. M. Kochkodan, A. I. Vasko

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR DETERMINING THE DRILLING INDEX OF ANISOTROPY AND ESTIMATION OF ITS EFFECT ON THE SPATIAL ORIENTATION OF WELLS

Аннотация

Описано влияние анизотропии горных пород как одной из главных геологических причин на искривление вертикальных скважин. Показано влияние анизотропии на буримость горных пород. Приведены аналитические исследования для определения бурового индекса анизотропии при бурении наклонно залегающих пластов. Показана взаимосвязь между буровым индексом анизотропии, зенитным углом, углом наклона пластов, геометрическими размерами скважины, компоновкой низа бурильной колонны и осевой нагрузкой на долото. Проведены аналитические расчёты бурового индекса анизотропии на основании промышленных данных различных отложений и площадей. Описана методика и приведены результаты лабораторных исследований по определению бурового индекса анизотропии натуральных образцов горных пород и показано, что экспериментальные исследования подтвердили правильность аналитических расчётов.

Ключевые слова:

анизотропия, буримость, буровой индекс анизотропии, горная порода, зенитный угол, угол наклона пласта, нагрузка на долото, плоскость напластования, скважина, твёрдость породы.

Abstract

The article describes the influence of geological material anisotropy, as one of the main causes of the deviation of vertical wellbores. The effect of anisotropy on rock drillability is shown. The analytical research is presented for determining drilling index of anisotropy when drilling inclined formations. The relationship between the drilling index of anisotropy, the zenith angle of the well, the inclination angle of formations, geometric characteristics of the well, the bottom hole assembly of the drill string and the axial load on a bit is shown. Analytical calculations of the drilling index of anisotropy have been made on the basis of field data on different deposits and sludge. The technique is described and results of the laboratory studies to determine the drilling index of anisotropy of natural rock samples are given; it is also shown that experimental studies have confirmed the correctness of analytical calculations.

Keywords:

anisotropy, drillability, drilling index of anisotropy, geological material, zenith angle, formation inclination angle, bit load, layer of stratification, well, rock hardness.

При бурении любым из способов в той или иной мере имеет место самопроизвольное искривление ствола сква-

жин от заданного направления. Бурение искривлённой скважины связано со многими трудностями и поэтому меро-



приятия, осуществляемые с целью предотвращения её искривления, имеют важное значение в эффективности проведения буровых работ.

Степень и интенсивность искривления скважин определяется действием сложного комплекса факторов. На сегодняшний день считается, что на самопроизвольное искривление скважин влияют геологические, технические и технологические факторы. Поэтому для предотвращения произвольного искривления скважин нужна разработка комплекса технико-технологических мероприятий.

К основным геологическим причинам, которые влияют на самопроизвольное искривление скважин, относят анизотропность, слоистость, сланцеватость, трещиноватость горных пород, а также чередование горных пород разной твёрдости и угол залегания пластов.

Впервые степень влияния геологических факторов на самопроизвольное искривление скважин определили американские учёные А. Лубинский и Г. Вудс [2], которыми было предложено ввести понятие бурового индекса анизотропии. Ими была рассмотрена задача бурения в условиях наклонной скважины. Ученые проводили исследования с небольшими зенитными углами скважины и большой жёсткостью колонны труб, что достигается небольшими зазорами между колонной труб и стенкой скважины и минимальным внутренним диаметром колонны труб, а это на практике бурения существенно усложняет процесс промывки скважины. В научных работах А. Лубинского и Г. Вудса при определении значений бурового индекса анизотропии не были учтены углы залегания пластов и режимно-технологические параметры, такие как осевая нагрузка на долото и зазоры между колонной труб и стенкой скважины. Определение значения бурового индекса анизотропии в промышленных условиях – задача довольно трудоёмкая, поскольку возникает необходимость в обработке значительного

объёма геологического материала в лабораторных условиях.

Кроме А. Лубинского и Г. Вудса, этими исследованиями занимались такие учёные, как Н. Г. Серeda, Е. И. Ишем-гужин, А. Г. Калинин, С. С. Сулакшин, О. А. Марков, И. А. Васько, Н. И. Орынчак, М. П. Гулизаде, С. А. Оганов, В. Г. Григулецкий, В. Г. Лукьянов, Т. М. Боднарук, В. О. Белоруссов, В. В. Кривошеев, В. М. Мойсышин, В. В. Нескромных [1, 3–5, 7–18] и др.

Цель работы – разработка методики для определения бурового индекса анизотропии, включающей в себя как геологические, так и режимно-технологические факторы. Использование в будущем указанной методики должно обеспечить надёжное управление искривлением скважин в различных геологических условиях.

При бурении в анизотропных горных породах направление бурения не совпадает с направлением силы, которая действует на долото, как это происходит в изотропных породах. Для определения степени влияния анизотропии горных пород на произвольное искривление скважин были проведены аналитические исследования, где был рассмотрен случай бурения на границе пластов, в которой происходит изменение твёрдости и других свойств горных пород и наблюдается тенденция к изменению направления бурения скважины.

На рис. 1 представлена плоскость напластования горных пород, находящаяся под некоторым углом. O – текущая точка забоя наклонной скважины, H – нормальная составляющая забоя на долото, K – коэффициент пропорциональности, который зависит от свойств горных пород, r – зазор между нижней частью бурильной колонны и стенкой скважины, h_a – буровой индекс анизотропии, x_a – расстояние от долота до точки касания бурильной колонны со стенкой скважины, R – равнодействующая сил, действующих на долото,

γ – угол залегания пластов горных пород, φ – угол между вертикалью и вектором нагрузки на забой, Ψ – поточный зенитный угол на выходе долота из пробуренного пласта горной породы, $H \cdot K(1-h_a)$ – нормальная составляю-

щая реакции забоя на долото с учётом коэффициента пропорциональности и бурового индекса анизотропии, $G_0 \cdot H$ – нагрузка на долото с учётом коэффициента пропорциональности.

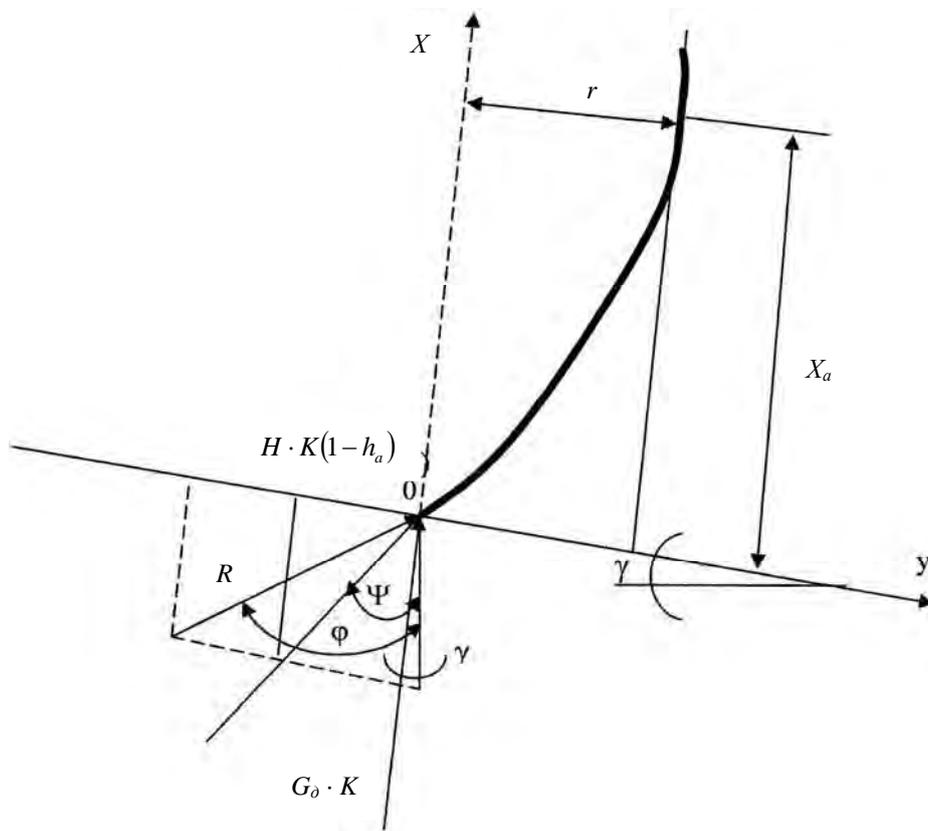


Рис. 1. Расчётная схема для определения бурового индекса анизотропии

При бурении в изотропных горных породах компоненты реакции забоя на долото будут охарактеризованы равнодействующей R , которая расположена к вертикали под углом φ .

$$\frac{H}{G_0} = \operatorname{tg}(\varphi - \gamma) = \frac{h}{X_2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

При бурении в анизотропных горных породах вследствие разницы направлений перпендикулярного и параллельного к залеганию пластов направление бурения не будет совпадать с направлением равнодействующих сил, а с направлением равнодействующих скоростей.

Считая, что скорость бурения в направлении координатных осей будет пропорциональна величине силы в этих же направлениях и то, что бурение параллельно в плоскости наслоения будет меньше на величину $(1-h_a)H \cdot K$, получим

$$\frac{K \cdot H(1-h_a)}{K \cdot G_0} = \operatorname{tg}(\psi - \gamma). \quad (2)$$

В результате проведённых аналитических исследований была выведена формула для определения бурового индекса анизотропии, которая отличается



от уже известной тем, что в ней учтены угол залегания пластов и режимно-технологические параметры бурения скважины. Данная формула включает в себя нормальную составляющую реакции забоя на долото и нагрузку на долото в безразмерных единицах. Чтобы определить значение бурового индекса анизотропии, нужно знать эти составляющие. Буровой индекс анизотропии определяется по результатам ранее пробуренных скважин на той или иной площади и его значение может быть принято за основу при расчленении геологического разреза за степенью влияния его на искривление скважин в зависимости от использованных компоновок низа буровой колонны, режимно-технологических параметров и элементов залегания пластов.

$$h_a = \frac{\frac{h}{x_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos^2(\gamma - \alpha) \cdot \left[\frac{h}{x_2} \cdot \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(\gamma - \alpha) \right]}, \quad (3)$$

где h – нормальная составляющая реакции забоя на долото в безразмерных единицах; x_2 – осевая нагрузка на долото в безразмерных единицах; α – зенитный угол скважины, град; γ – угол падения пластов, град.

$$h = \rho \left(\frac{x_2}{x_a} - 1 + \frac{2}{\pi} \right) - \frac{x_a}{2}, \quad (4)$$

где ρ – зазор между колонной труб и стенкой скважины в безразмерных единицах; x_a – расстояние от долота до точки касания буровой колонны со стенкой скважины в безразмерных единицах.

$$\rho = \frac{r}{m \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (5)$$

где r – зазор между нижней частью буровой колонны и стенкой скважины, м; m – коэффициент для перевода

значений из размерных единиц в безразмерные.

$$r = \frac{D_c - d_3}{2}, \quad (6)$$

где D_c , d_3 – диаметр скважины и внешний диаметр буровой колонны труб соответственно, м.

$$m = \sqrt[3]{\frac{E \cdot I}{q \cdot \cos \alpha}}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; I – осевой момент инерции, м⁴,

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (d_3^4 - d_6^4). \quad (8)$$

Вес единицы длины в буровом растворе

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot (d_3^4 - d_6^4) \cdot (\rho_m - \rho_{np}), \quad (9)$$

где d_3 , d_6 – внешний и внутренний диаметры буровой колонны труб соответственно, м; ρ_m , ρ_{np} – плотности материала труб (стали) и промывочной жидкости соответственно, кг/м³.

$$x_a = 8 \frac{\rho}{x_a} - Ax_2 - Bx_a; \quad (10)$$

$$A = \frac{12}{\pi^2} - 1; \quad (11)$$

$$B = \frac{36}{\pi^2} \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} - \frac{36}{\pi} - \frac{36}{\pi^2} \right); \quad (12)$$

$$x_2 = \frac{G_d}{m \cdot q \cdot \cos \alpha}, \quad (13)$$

где G_d – осевая нагрузка на долото, Н.

Уравнение (10) является трансцендентным, поэтому его решение возможно только методом итерации.

Таким образом, если известны зенитный угол α , угол залегания пластов γ



и режимно-технологические параметры h и x_2 , в соответствии с формулой (3) можно определить буровой индекс анизотропии, а также степень его влияния на процесс изменения направления вектора движения долота и, как следствие, на процесс искривления скважин.

Рассчитав конкретное значение бурового индекса анизотропии при заданных значениях зенитного угла, угла залегания пласта, геометрических размерах скважины и компоновки низа бурильной колонны, представляется возможным определить осевую нагрузку на долото для конкретной КНБК по формуле

$$X_2 = \frac{h \cdot \operatorname{tg} \alpha [h_a \cdot \cos^2(\gamma - \alpha) - 1]}{h_a \cdot \cos^2(\gamma - \alpha) \cdot \operatorname{tg}(\gamma - \alpha)}. \quad (14)$$

Так как буровой индекс анизотропии определяют по результатам анализа

промышленных данных ранее пробуренных скважин, был собран промышленный материал результатов бурения скважин на месторождениях Прикарпатского региона. Для анализа были выбраны скважины с одинаковыми геологическими разрезами и приблизительно одинаковыми физико-механическими свойствами горных пород. Кроме того, бурение указанных скважин производилось однотипными КНБК и при одинаковых режимно-технологических параметрах.

Используя собранный промышленный материал, были проведены аналитические расчёты по определению бурового индекса анизотропии для различных горных отложений и площадей, а результаты этих расчётов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения бурового индекса анизотропии по данным ранее пробуренных скважин, рассчитанные аналитическим путём

Горные отложения	Площадь (месторождение)				
	Северная Долина	Луква	Пасечная	2-Гвозд	Делятын
Быстрицкие	0,0405 ± 0,001	0,0138 ± 0,0081	0,045 ± 0,004	–	–
Выгодские	0,035 ± 0,001	–	–	–	–
Воротищенские	0,021 ± 0,005	–	–	0,05 ± 0,0015	0,0407 ± 0,001
Добротворские	–	–	–	0,045 ± 0,001	0,025 ± 0,001
Менилитовые	0,026 ± 0,001	0,038 ± 0,0015	0,028 ± 0,0019	–	–
Манявские	0,013 ± 0,005	–	0,058 ± 0,013	–	–
Ямненские	–	–	0,04 ± 0,0015	–	–
Поляницкие	0,025 ± 0,001	0,015 ± 0,0016	0,026 ± 0,0019	–	–
Слободские	–	–	–	0,03 ± 0,001	0,018 ± 0,0025

Для подтверждения полученных результатов аналитических расчётов бурового индекса анизотропии был проведен ряд лабораторных экспериментов по исследованию прочностных характеристик натуральных образцов горной породы (керн), отобранных из одинаковых

отложений при бурении различных скважин. Из отобранных кернов изготавливали цилиндрические образцы горной породы диаметром 40 мм и высотой 50 мм таким образом, чтобы площадь наложения была расположена перпендикулярно и параллельно высоте.



В соответствии с [6] в образец горной породы посредством пресса со скоростью 0,5 МПа/с вдавливали цилиндрический штамп диаметром 2,5 мм до момента разрушения образца. В то же время фиксировали давление с помощью манометра и деформацию с помощью индикатора. Сначала вдавливание штампа производили перпендикулярно наслоению, а потом для той же породы параллельно напластованию. По данным экспериментальных исследований строили график зависимости изменения деформации от нагрузки, определяли твердость горной породы и коэффициент пластичности. Также определяли условные показатели буримости по формуле

$$\delta = \frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш} \cdot K_{пл}}, \quad (15)$$

где δ – буримость горной породы; A – абразивность горной породы, мг; $p_{ш}$ – твердость горной породы, Па; $K_{пл}$ – коэффициент пластичности горной породы.

Следует отметить, что абразивность и коэффициент пластичности горной породы одинаковы как при исследовании перпендикулярно наслоению, так и параллельно наслоению. Поэтому буровой индекс анизотропии можно определять при проведении лабораторных исследований по давлению, при котором разрушался образец горной породы перпендикулярно и параллельно наслоению. Например, при вдавливании цилиндрического штампа диамет-

ром 2,5 мм в подготовленный образец горной породы из менилитовых отложений перпендикулярно наслоению разрушение произошло при давлении 34,4 МПа, а при параллельном наслоении – при давлении 35,3 МПа.

$$\left. \begin{aligned} h_a &= 1 - a = 1 - \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} = 1 - \frac{\delta_{\perp}}{\delta_{\parallel}}; \\ h_a &= 1 - \frac{\frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш\parallel} \cdot K_{пл}}}{\frac{10^{10}}{A \cdot p_{ш\perp} \cdot K_{пл}}} = 1 - \frac{p_{ш\perp}}{p_{ш\parallel}}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $p_{ш\perp}$, $p_{ш\parallel}$ – твердости образца горной породы перпендикулярно и параллельно наслоению соответственно, МПа; V_{\perp} , V_{\parallel} – механические скорости бурения перпендикулярно и параллельно наслоению соответственно, м/ч.

Для образца горной породы из менилитовых отложений получено следующее значение бурового индекса анизотропии:

$$h_a = 1 - \frac{34,4}{35,3} = 0,0255.$$

Аналогично были проведены экспериментальные исследования прочностных характеристик образцов различных отложений горных пород с целью определения бурового индекса анизотропии, а результаты расчетов представлены в табл. 2.

Табл. 2. Значения бурового индекса анизотропии по результатам экспериментальных исследований

Горные отложения	Буровой индекс анизотропии
Менилитовые	0,0255
Поляницкие	0,018
Манявские	0,015
Выгодские	0,028
Ямненские	0,033
Быстрицкие	0,041



Анализируя результаты проведённых лабораторных исследований, можно сделать вывод, что значения бурового индекса анизотропии, определённые экспериментальным путём, совпадают с результатами аналитических расчётов с допустимой для практических расчётов погрешностью.

На основании проведённых расчётов значений бурового индекса анизотропии различными методами, обработав данные посредством ЭВМ, были построены номограммы, с помощью которых графоаналитическим методом можно определять нужную создаваемую осевую нагрузку на долото при различных компоновках низа бурильной колонны и параметрах залегания пластов горных пород для достижения проектных зенитных углов скважины или создания условий для их стабилизации. Также данные номограммы в дальнейшем можно использовать для определения места установки опорно-центрирующих приспособлений с целью обеспечения стабильной работы низа бурильной колонны и пространственного ориентирования оси скважины с учётом режимно-технологических параметров и углов залегания пластов горных пород.

Следовательно, при бурении скважин в наклонно залегающих пластах при проектировании осевой нагрузки на долото и КНБК с целью предотвращения самопроизвольного искривления скважин необходимо учитывать буровой индекс анизотропии.

Для промышленного подтверждения действенности разработанной методики определения бурового индекса анизотропии было проведено

бурение некоторых интервалов на скважинах Струтынской площади Прикарпатского региона с учётом бурового индекса анизотропии, рассчитанного за предложенной методикой. Для промышленных исследований была выбрана скважина № 122 – Струтын, которая по результатам рядом пробуренных скважин закладывается в условиях интенсивного естественного набора кривизны. Для сравнения полученных результатов выбрана скважина № 111 – Струтын, которая находится поблизости и имеет аналогичный геологический разрез.

В результате бурения скважины № 112 – Струтын с учётом бурового индекса анизотропии для выбранных интервалов было обеспечено уменьшение интенсивности искривления ствола скважины. Значения зенитных углов в интервалах, пробуренных с использованием разработанных рекомендаций, были близки к ожидаемым и находились в пределах от 1 до 6° против 12...13° в скважинах, которые бурились без учёта указанных рекомендаций. Осложнений в процессе бурения скважин при внедрении рекомендаций не наблюдалось. Результаты инклинометрических измерений зенитного и азимутального углов в скважинах № 111 и 112 – Струтын приведены в табл. 3.

Достоверность эффективности практического применения разработанной методики была подтверждена протоколом передачи методики определения бурового индекса анизотропии Прикарпатскому управлению буровых работ.



Табл. 3. Результаты инклинометрии скважин № 111 и 112 – Струтын

Скважина № 112 – Струтын					Скважина № 111 – Струтын				
Глубина, м	Кривизна		Нагрузка на долото, кН	Средняя проходка	Глубина, м	Кривизна		Нагрузка на долото, кН	Средняя проходка
	угол	азимут, град				угол	азимут, град		
200	1°15'	–	40	24	200	2°15'	80	40	24
250	1°15'	45	50	70	250	4°30'	110	50	66
300	1°30'	95	60	52	300	5°30'	98	60	62
350	1°30'	82	60	58	350	6°15'	90	60	63
400	1°30'	80	60	58	400	6°00'	85	60	58
450	1°30'	75	60	62	450	4°30'	73	60	58
500	1°30'	82	60	66	500	4°15'	62	60	62
550	1°45'	63	60	88	550	4°15'	52	60	93
600	1°45'	45	80	90	600	4°00'	42	80	93
1200	5°15'	171	80	87	1200	8°00'	234	80	87
1250	5°45'	162	80	32	1250	11°15'	190	80	27
1300	5°30'	167	80	70	1300	13°00'	200	80	73
1350	5°00'	167	80	65	1350	12°3'	203	80	73
1400	6°15'	173	80	45	1400	12°15'	200	80	25
1450	6°30'	180	80	86	1450	12°00'	202	80	90
1500	6°00'	185	80	45	1500	12°30'	212	80	34
1550	6°45'	175	80	70	1550	12°15'	200	80	76
1600	7°15'	168	80	72	1600	12°00'	202	80	63
1650	8°00'	170	80	27	1650	12°30'	212	80	19

Выводы

1. Выведена формула для определения бурового индекса анизотропии в наклонно залегающих пластах.

2. Установлена взаимосвязь между буровым индексом анизотропии, зенитным углом, углом наклона пластов, компоновкой низа бурильной колонны, геометрическими размерами скважины и осевой нагрузкой на долото.

3. Значения бурового индекса анизотропии, определённые экспери-

ментальным путём, совпадают с результатами аналитических расчётов с допустимой для практических расчётов погрешностью.

4. Достоверность эффективности практического применения разработанной методики определения бурового индекса анизотропии была подтверждена результатами бурения скважин с её учётом на площадях Прикарпатского региона.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Калинин, А. Г.** Естественное и искусственное искривление скважин / А. Г. Калинин, В. В. Кульчицкий. – Москва : Регулярная и хаотическая динамика ; Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2006. – 640 с.
2. **Вудс, Г.** Искривление скважин при бурении / Г. Вудс, А. Лубинский. – Москва : Гостоптехиздат, 1960. – 161 с.
3. **Калинин, А. Г.** Бурение наклонных скважин : справочник / А. Г. Калинин, Н. А. Григорян, Б. З. Султанов. – Москва : Недра, 1990. – 348 с.
4. **Кривошеев, В. В.** Искривление скважин в анизотропных породах / В. В. Кривошеев. – Томск : НТЛ, 1999. – 86 с.
5. **Сулакшин, С. С.** Направленное бурение / С. С. Сулакшин. – Москва : Недра, 1987. – 272 с.
6. **Спивак, А. И.** Механика горных пород / А. И. Спивак. – Москва : Недра, 1967. – 192 с.
7. Влияние анизотропии пород на процесс пространственного искривления / М. П. Гулизаде, Г. М. Зельманович, Л. Я. Кауфман, Л. Я. Сушон // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1975. – № 8. – С. 13–16.
8. **Белоруссов, В. О.** Прогнозирование и расчёт естественного искривления скважин : справочное пособие / В. О. Белоруссов, Т. М. Боднарук. – Москва : Недра, 1988. – 175 с.
9. **Воевідко, І. В.** Оцінка впливу анізотропних геологічних структур на тенденцію похилоспрямованих свердловин до зміни азимута / І. В. Воевідко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 3 (8). – С. 28–31.
10. **Григулецкий, В. Г.** Проектирование компоновок нижней части буровой колонны / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – Москва : Недра, 1990. – 302 с.
11. **Калинин, А. Г.** Влияние анизотропности пород на искривление буровых скважин / А. Г. Калинин, В. О. Белоруссов // Нефтяное хозяйство. – 1963. – № 3. – С. 8–12.
12. **Крижанівський, Є. І.** Вплив анізотропії гірських порід на зенітне викривлення свердловин з врахуванням їх орієнтації відносно геологічної структури / Є. І. Крижанівський, І. В. Воевідко // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 6. – С. 20–22.
13. Определение индекса анизотропии пород и фрезерующей способности долота по темпам искривления стволов скважин / М. П. Гулизаде, Г. М. Зельманович, Л. Я. Кауфман, Л. Я. Сушон // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1972. – № 10. – С. 20–46.
14. **Александров, М. М.** О факторах, влияющих на искривление скважин / М. М. Александров, В. Г. Григулецкий, В. Г. Лукьянов // Тр. УфНИИ. – 1980. – Вып. 7. – С. 16–20.
15. **Боярко, Ю. Л.** Анизотропия механических свойств пород как причина искривления / Ю. Л. Боярко // Нефтяное хозяйство. – 1964. – № 3. – С. 15–18.
16. **Фоменко, И. К.** Математическое моделирование напряжённого состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами : дис. ... канд. геолого-минералог. наук / И. К. Фоменко. – Москва, 2000.
17. **Литвинский, Г. Г.** Слоистость и анизотропия прочности горных пород / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. тр. Донбас. гос. техн. ун-та. – Алчевск, 2015. – Вып. 45. – С. 5–12.
18. **Нескромных, В. В.** Анализ влияния анизотропии горных пород на процесс искривления скважин при их разрушении механическими и термическими способами / В. В. Нескромных // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 323, № 1.

Статья сдана в редакцию 20 декабря 2018 года

Игорь Владимирович Воевидко, д-р техн. наук, проф., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +0342-72-71-37.

Ярослав Михайлович Кочкодан, канд. техн. наук, доц., Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Тел.: +0342-72-71-37.

Андрей Иванович Васько, ассистент, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. E-mail: super.vasko1970@ukr.net.

Igor Vladimirovich Voievidko, DSc (Engineering), Prof., Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. Phone: +0342-72-71-37.

Yaroslav Michajlovych Kochkodan, PhD, (Engineering), Associate Prof., Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. Phone: +0342-72-71-37.

Andrij Ivanovych Vas'ko, assistant lecturer, Ivano-Frankovsk National Technical University of Oil and Gas. E-mail: super.vasko1970@ukr.net.

