

сти в боках, почве и переходе сводчатой части кровли в плоскую. Наибольший размер этой зоны ориентирован субгоризонтально вглубь массива и составляет около 0,7 м в пласте сильвинита.

Установлено, что в кровле, почве, боках выработок в момент проходки возникают зоны растягивающих напряжений, значения которых могут достигать 1,5 МПа и более, что в слабых соляных породах может потребовать применения дополнительных способов охраны и крепления горных выработок.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И.Л. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт. – Киев: Техника, 1972. – 156 с.
2. Свидзинский С.А., Музалевский М.М., Ковальский Ф.И. Гремячинское месторождение сильвинитов // Новые данные по геологии соленосных бассейнов Советского Союза. – М., 1986. – С. 204-219.
3. Кутырло В.О. Особенности строения калийной залежи Гремячинского месторождения // Литасфера. – 2009. – № 1 (30). – С. 86-94.
4. Андреев Г.Н., Иванкин А.В. Особенности строения отложений кунгура в пределах Гремячинского месторождения калийных солей по материалам высокоразрешающей сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 3. – С. 89-93.
5. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: МГУ, 2004. – 208 с.
6. Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 438 с.: ил.
7. Бельтюков Н.Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: дис. ...к.т.н.; 25.00.20: защищена 11.04.19 / Бельтюков Николай Леонидович. – Пермь, 2019. – 159 с.
8. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 10. – С. 144-148.
9. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / ГИ УрО РАН; [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
10. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2020.2.7

### ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

В.Н. Токсаров

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведены результаты интерпретации геофизического исследования скважин, пробуренных на нефтяных месторождениях Верхней Камы. Установлено, что в Соликамской впадине максимальные горизонтальные напряжения сжатия действуют в субширотном направлении, при этом азимутальные углы варьируются в диапазоне 225°-300°. Максимальными главными напряжениями являются вертикальные. Промежуточные главные напряжения ориентированы в субширотном направлении, минимальные – в субмеридиональном.

**Ключевые слова:** разрушение стенок скважин, овализация, кавернометрия, осадочные породы, оценка напряжений, коэффициент бокового распора.

## 1. Введение

В случае отсутствия непосредственного доступа к массиву из выработок информация о напряженном состоянии горных пород может быть получена по результатам изучения параметров разрушения стволов глубоких нефтяных скважин [1-3].

Так, при проведении экспериментальных исследований в условиях Хибинских рудников [4, 5] установлено, что, в случае если напряжения на контуре скважины в зонах концентрации достигают или превышают половину предела прочности пород при сжатии, порода на соответствующих участках разрушается и контур скважины нередко приобретает эллипсоидную форму.

В работе [6] приведены результаты моделирования процесса неупругого деформирования круглого отверстия (скважины) при неравнокомпонентном напряженном состоянии массива горных пород. Анализ этих результатов показывает, что форма и размеры контура пристволевой зоны скважины зависят от величины и соотношения напряжений, действующих в плоскости, перпендикулярной ее оси. В большинстве случаев максимальное главное напряжение действует вдоль короткой оси эллипса, а минимальное – вдоль длинной [3, 4].

В настоящее время по результатам наблюдения за характером разрушения стенок вертикальных скважин и выработок можно провести относительную оценку главных напряжений, определить соотношение компонент и направление действия максимального главного напряжения. Анализ овализации нефтяных и других скважин в 1990 г. признан за рубежом одним из средств изучения анизотропности полей напряжений «in situ» [7].

## 2. Анализ разрушения стенок скважин, пробуренных на нефтяных месторождениях в Соликамской впадине

Для оценки поля напряжений проведен анализ результатов геофизических исследований скважин (ГИС), проводимых опытно-промышленной партией ОАО «Пермнефтегеофизика» на нефтяных месторождениях, расположенных в пределах Соликамской впадины. Установлено, что информацию о размерах и ориентировке разрушения контура скважин можно получить при совместной интерпретации результатов изучения состояния скважин ориентированным акустическим телевизором (САТ) и кавернометрией (рис. 1) [8].

При проведении ГИС использовался акустический телевизор марки «АВФ-14». Разрешающая способность акустического телевидения приблизительно равна 4-5 мм. Фотографирование стенок проводилось в скважинах, заполненных глинистым раствором без утяжелителей плотностью 1,25 г/см<sup>3</sup>. Диаметр скважин измерялся каверномером марки СКО (рис. 1).

По результатам анализа данных ГИС установлено наличие вертикальных желобов в глубоких нефтяных скважинах (рис. 1) [8-10]. Протяженные зоны вертикальных желобов, отражающиеся в диаграммах САТ в виде темных полос, свидетельствуют об упорядоченном разрушении контура скважин в виде эллипса. САТ позволяет определять направления осей эллипса в пространстве. Форма контура скважины определялась по результатам проведения кавернометрии (рис. 1). На участках с наличием вертикальных желобов результаты измерения диаметров скважин в двух взаимно перпендикулярных направлениях существенно различаются между собой. Средние значения диаметров скважин в двух взаимно перпендикулярных направлениях на данных участках в первом приближении можно принять в качестве размеров длинной и короткой осей эллипса разрушения контура скважины.

Ориентировка положения участка в вертикальной плоскости определялась по результатам инклинометрических измерений [8]. Для геомеханической интерпретации материалов интервалы вертикальных желобов увязывались с геологическим разрезом по скважине (рис. 1).

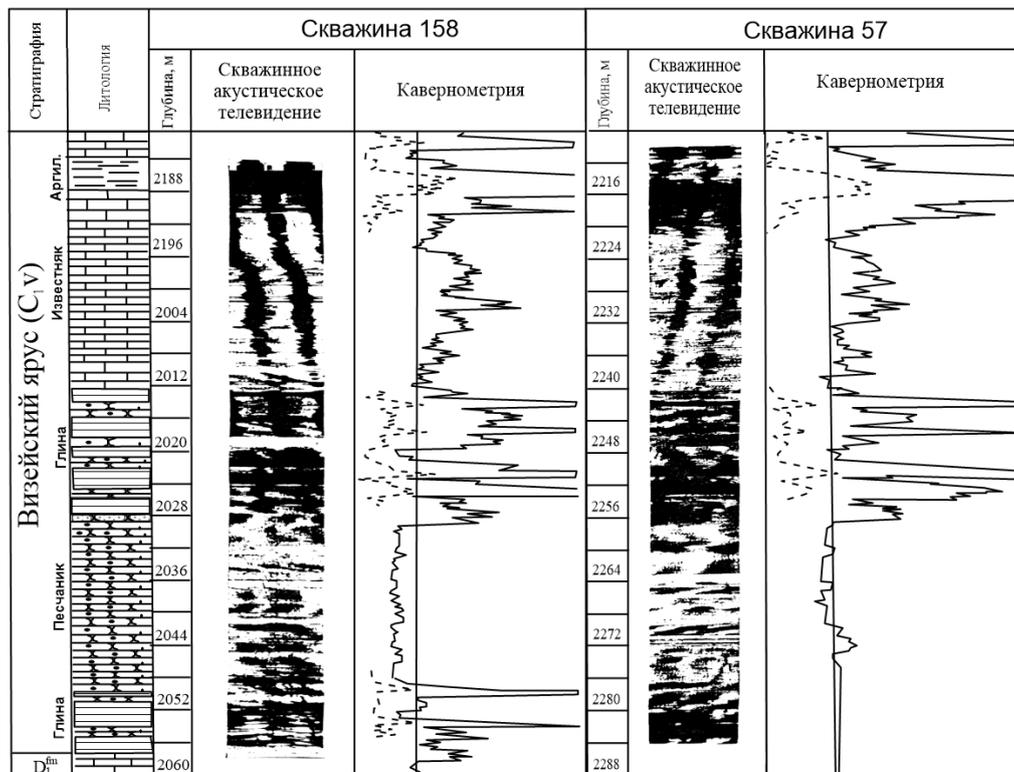


Рис. 1. Некоторые результаты геофизического изучения скважин № 57 и 158, пробуренных в Соликамской впадине

Результаты выборочного анализа разрушения контура стволов скважин приведены в табл. 1. Установлено наличие желобов как на больших глубинах (2000 м и более), в толще турне-фаменских и визейских отложений, так и в верхней части разреза, в соляных породах. Длина желобов изменяется в пределах от 1 до 100 м. Овальзация проявляется, как правило, по всему кусту скважин.

Таблица 1

Характеристика условий проявления вертикальных желобов в скважинах

№ скв.	Глубина, м	Порода	Ориентировка желоба, град.	Увеличение диаметра, мм	Диаметр скважины, мм	Примечание
Юрчукское нефтяное месторождение						
867	2104-2116 2132-2136	Алевриты Аргиллиты пересл. с песчаником	- -	20 50	216	3°30' от верт. Сев.ч.
711	2069-2073 2086-2088 2116-2118	Карбонатные пор. Терригенные пор. Глинистые пор.	10-15° СЗ - -	20 20 25	216	3° 00' от вертик.
710	2192-2208 2232-2240 2260-2280 2296-2308	Карбонатные пор. Алевриты Известняки Известняки	- - - -	10+20 10+15 10+15 5+10	216	14-15° от верт. на Юг

Сибирское нефтяное месторождение						
517	1900-2000 2200	Верейские отлож. Турнейские отлож.	45° СЗ С-Ю	40 40-80	219	Уч. по 10 м
607	2260	Известняки	С-Ю	30-40	219	-
503	2304	Известняки	С-Ю	40	219	-
	2360	Турнейские отлож.	30° СВ	20-40		-
	2405	Песчаники	С-Ю	20		-
501	390-540	Каменная соль	-	5-10	295	-
	310-340	Карналлиты	-	5-10		-
	670-680	Каменная соль	-	10		-
590	440-620	Каменная соль	-	15-25	219	-
	510-530	-	-	15		-
	530-560	-	-	20		-
	700 и бол.	-	-	10		-
607	380-480	Каменная соль	-	15	219	-
	530-580	-	-	10		-
	600-680	-	-	10-30		-
Уньвинское нефтяное месторождение						
647	-	Тульские отлож.	С-Ю	20-40	219	-
	-	Известняки	С-Ю	15-20, max 40		-

### 3. Методика и результаты оценки главных напряжений

При определении главных напряжений в нетронутом массиве использовалось решение упругопластической задачи о напряженно-деформированном состоянии в тонкой пластинке, ослабленной круговым отверстием. Расчетная схема задачи приведена на рис. 2.

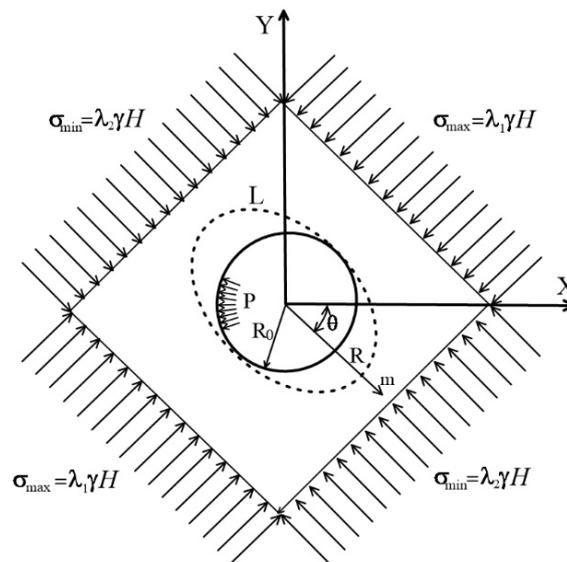


Рис. 2. Расчетная схема к определению напряжений в окрестности скважины

К границам плоскости приложены напряжения, соответствующие компонентам исходного (естественного) поля, под действием которого в окрестности скважины формируется зона неупругих деформаций эллипсовидной формы. Предполагается, что наличие зоны неупругих деформаций обуславливает овализацию скважины. Условие пластичности дается соотношением

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq C^*, \quad (1)$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение;  $\sigma_1, \sigma_3$  – соответственно, максимальное и минимальное главное напряжение;  $C^*$  – коэффициент сцепления породы. Точное аналитическое решение такой упругопластической задачи впервые получено Л. А. Галиным [11].

Отношение большой полуоси эллипса неупругих деформаций к малой определяется соотношением

$$\frac{a}{b} = \frac{1 + \beta}{1 - \beta}, \quad (2)$$

где

$$\beta = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 4C^*. \quad (3)$$

С учетом (3) из (2) следует

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 4C^* (a/b - 1) / (a/b + 1) \quad (4)$$

Известно, что на больших глубинах главные напряжения выравниваются, а вертикальная компонента становится преобладающей. В частности, в работе [12] показано, что начиная с глубины порядка 1,5 км величина максимальных горизонтальных напряжений сжатия приближается к значению  $\gamma H$ , а минимальные горизонтальные напряжения не превосходят  $0,5\gamma H$  и могут оцениваться по литостатическим величинам. Тогда, предполагая, что малая полуось эллипса неупругих деформаций равна радиусу скважины ( $2R_0$ ), из выражения (4) можно оценить величину максимального горизонтального напряжения

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} + 4C^* (a/R_0 - 1) / (a/R_0 + 1). \quad (5)$$

Результаты оценочных расчетов главных напряжений по параметрам овализации стволов глубоких нефтяных скважин, пробуренных в Соликамской впадине, приведены в таблице 2. Коэффициенты сцепления определены по каталогам физико-механических свойств горных пород. Вертикальная составляющая напряжений принималась равной весу вышележащих пород  $\sigma_{\text{верт.}} = \gamma H$ .

Таблица 2

Результаты расчета главных напряжений по данным овализации стволов скважин

№ скв.	Глубина, м	Порода	Азимут направ. $\sigma_{\max}$	Главные напряжения, МПа		
				$\sigma_{\text{верт.}}$	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$
867	2104-2116	Алевролиты отлож.	-	55	25	20
	2132-2136	Аргиллиты	-	55	30	20
517	1900-2000	Верийские отлож.	225	50	25	20
	2200	Турнейские отлож.	270	55	40	25
607	2260	Известняки	270	55	30	20
503	2304	Известняки	270	60	35	25
	2360	Турнейские отлож.	300	60	35	25
710	2192-2208	Карбонатные отлож.	-	55	25	20
	2232-2240	Алевролиты	-	55	25	20
	2260-2280	Известняки	-	55	25	20
	2296-2308	Известняки	-	60	30	25

#### 4. Заключение

Установлено, что в Соликамской впадине максимальные горизонтальные напряжения сжатия действуют в субширотном направлении, при этом азимутальные углы варьируются в диапазоне 225°-300°. Максимальными главными напряжениями являются вертикальные. Промежуточные главные напряжения ориентированы в субширотном направлении, минимальные – в субмиридианальном.

#### Благодарности

Автор выражает благодарность д.т.н. Жуланову И.Н. за предоставленные материалы и живое обсуждение статьи.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гено. А. Напряжения и разрушения в стенках нефтяных скважин // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. – М., 1994. – С. 73-87.
2. Galera J.M. Natural stress field evaluation using borehole ovalisation analysis and its comparison with hydrofract measurements // In-Situ Rock Stress Measurement, Interpretation and Application: International Symposium on in-Situ Rock stress. – London, 2006. – P. 241-2487. – (Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences). DOI: 10.1201/9781439833650.ch32.
3. Zoback M.D., Barton C.A., Brudy M., Castillo D.A., Finkbeiner T., Grollmund B.R., Moos D.B., Peska P., Ward C.D., Wiprut D.J. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2003. – № 40. – P. 1049-1076.
4. Панин В.И., Горбунов Ю.Г., Павлов В.П. Геомеханическая интерпретация материалов геологоразведочного бурения // Геомеханическое обеспечение разработки месторождений Кольского полуострова: сб. ст. – Апатиты, 1989. – С. 14-19.
5. Панин В. И. Прогноз напряженного состояния пород в массиве на стадии геоло-горазведочных работ // Механика горных пород при подземном строительстве и освоении месторождений на больших глубинах.- Л.: Наука, 1983. – С. 68-75.
6. Жиленков А. Г., Капустянский С. М., Николаевский В. Н. Деформации скважин в поле разрушающих горизонтальных напряжений // Изв. РАН. Физика Земли. – 1994. – № 7/8. – С. 142-147.
7. Мори В. Механизмы разрушения в стенках скважин, подземных сооружений и выработок // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. – М., 1994. – С. 361-412.
8. Жуланов И.Н. Скважинные акустические исследования в гетерогенных средах / [отв. ред. В.М. Новоселицкий]; ГИ УрО РАН, ПИТЦ «Геофизика». – Пермь: [Пресстайм], 2006. – 144 с.
9. Жуланов И.Н., Губина А.И., Гуляев П.Н. Деформации пород, их проявление в скважинах и влияние на показания методов ГИС // Геофизический вестник, 2005, № 8, с. 9-11.
10. Жуланов И.Н., Губина А.И., Гуляев П.Н. О деформациях горных пород и связанных с ними особенностях развития трещинных зон // Геофизический вестник. – 2005. – № 7. – С.13-16.
11. Галин Л.А. Плоская упруго-пластическая задача // Прикладная математика и механика. – 1946. – Т. 10, вып. 3. – С.
12. Brown E.T., Hoek E. Trends in relationships between measured in situ stresses and depth // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 1978. – № 15. – P. 211-215.