

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-1-137-143>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА ШЕЛЬФЕ

© В.И. Зайцев^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель данной статьи – обратить особое внимание на давление гидроразрыва ствола скважины при бурении на нефть и газ на шельфе. Оно существенно ниже, чем при бурении на суше, и может колебаться в значительных пределах. Статей по этому вопросу в отечественной литературе практически нет. Одна из причин этого заключается в том, что бурение по уже разведанным на шельфе месторождениям в настоящее время не производится из-за низких цен на нефть, а бурение с плавающих буровых установок требует огромных затрат. Кроме того, развитие буровых работ при бурении на северных и восточных морях сдерживается суровыми ледовыми условиями и несовершенством бурового оборудования для бурения на воде. Сказывается также недостаточный опыт российских бурильщиков при разработке нефтегазовых месторождений на море. **Методы.** Использован уточненный аналитический расчет давления гидроразрыва ствола скважины и его градиента. **Результаты.** Предлагается для определения давления гидроразрыва вносить поправки на глубину шельфа и высоту стола ротора над средним уровнем поверхности шельфа. Глубина шельфа часто не учитывается якобы из-за его малых глубин. Но кроме указанного фактора еще могут быть причины для кратковременного повышения гидростатического давления: ежедневные приливы, явление поршневания при спуско-подъемных операциях и др. В сумме они могут вызвать поглощение промывочной жидкости. Кроме того, в статье для облегчения расчетов осредненные градиенты горного и пластового давлений даны в табличных вариантах вместо графических. **Выводы.** Определение давления гидроразрыва при бурении скважин на шельфе («мокрых скважин») аналитическим способом является важной задачей, так как дает его реальные значения, что поможет предотвратить поглощение промывочной жидкости.

Ключевые слова: бурение скважин, долото, деформация, испытание, градиент разрыва.

Информация о статье. Дата поступления 7 ноября 2017 г.; дата принятия к печати 2 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2018 г.

Формат цитирования. Зайцев В.И. Определение давления гидроразрыва пласта при бурении скважин на шельфе // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 1. С. 137–143. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-137-143

FORMATION FRACTURE PRESSURE DETERMINATION WHEN DRILLING OFFSHORE HOLES

© V.I. Zaitsev

Irkutsk National Research Technical University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

^аЗайцев Виталий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, тел.: (3952) 405278, e-mail: zaicshev@istu.edu

Vitaliy I. Zaitsev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business, tel.: (3952) 405278, e-mail: zaicshev@istu.edu

ABSTRACT. The purpose of the article is to focus on the breakdown pressure of the well bore when drilling offshore for oil and gas. It is much lower than the one when drilling on shore and can vary significantly. Domestic articles on this topic are little to choose. One of the reasons of this situation is that drilling on the already explored offshore deposits is not performed now as the oil prices are low, and drilling from the floating drilling rigs is too expensive. Moreover, severe ice conditions and imperfection of drilling equipment for offshore drilling hinder the development of drilling works in the Northern and Eastern seas. We should also note the lack of experience of Russian drillers in the development of offshore oil and gas fields. **Methods.** The study uses a refined analytical calculation of the breakdown pressure of the well bore and its gradient. **Results.** To determine the breakdown pressure it is proposed to allow for the shelf depth and rotary table elevation above the average level of the shelf surface. The depth of the shelf is often not taken into account allegedly because of its small depths. But the described factor is not the only one that causes a short-term increase in the hydrostatic pressure. It could also be caused by daily tides, swabbing under RIH/POOH operations and etc. All together they can cause the loss of circulation. Besides, the article presents the average overburden and formation pressure gradients in tabular variants instead of graphical ones in order to facilitate the calculations. **Conclusions.** Analytical determination of the fracture pressure when drilling offshore wells (water holes) is an important task as it gives the real values of the fracture pressure. This can help to prevent the loss of circulation.

Keywords: well drilling, drilling bit, deformation, testing, fracture gradient

Article info. Received 7 November 2017; accepted for publication 2 March 2018; available online 30 March 2018.

For citation. Zaitsev V.I. Formation fracture pressure determination when drilling offshore holes. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2018, vol. 41, no. 1, pp. 137–143. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-1-137-143

Введение

При бурении нефтегазовых скважин на морском шельфе давление гидроразрыва стенок скважины значительно меньше такого же давления при бурении на суше. То есть уже при малых значениях давления гидроразрыва $P_{ер}$ возникают трещины в стволе скважины, что бывает часто неожиданностью для буровой бригады. Без учета этого явления может возникнуть катастрофическая ситуация с поглощением бурового раствора, неустойчивостью ствола скважины и прочими осложнениями и авариями. Экономические последствия при этом непредсказуемы, вплоть до полного отказа бурения в этой точке.

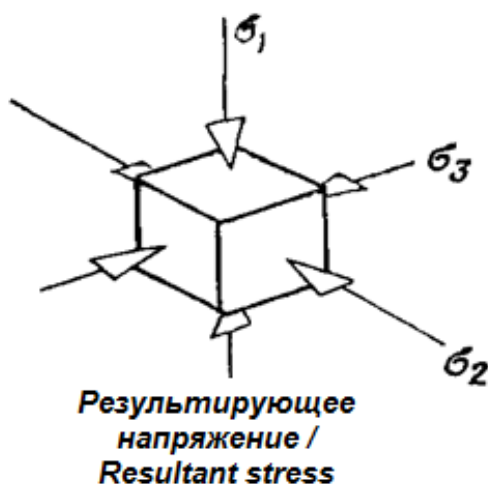
Для определения давления гидроразрыва (градиента давления гидроразрыва) также необходимо вносить поправки на глубину моря и высоту стола ротора над средним уровнем поверхности шельфа, что обычно не учитывается при буровых работах.

Средняя глубина шельфа при использовании морских гравитационных стационарных платформ составляет

60–100 м, а средняя высота стола ротора над поверхностью воды – 25–30 м. Как видно, расстояние от ротора до поверхности водоема может составлять значительную часть глубины акватории шельфа.

Давление гидроразрыва зависит от величины горного давления (рисунок), естественной трещиноватости горных пород, порового давления, проницаемости пород, реологических свойств и расхода жидкости разрыва.

При гидроразрыве связи между частицами породы разрушаются, раскрываются существующие и образуются новые трещины различной формы и простираения, составляя систему проводящих каналов. В процессе поглощения трещины размываются поступающим в пласт раствором. После гидроразрыва поглощения происходят за счет раскрытия трещин в пласте при значительно меньшем гидродинамическом давлении в скважине вследствие разрушения связей между частицами породы, размывости и фиксации их буровым раствором и шламом.



Напряжение элемента горного массива
Stress of the rock massif element

Прочность горной породы обусловлена пределом прочности на растяжение, пределом прочности при сжатии, прочностью на сдвиг или ударной прочностью.

В любой точке горного массива существует три взаимно перпендикулярных напряжения. Максимальное нормальное напряжение σ_1 направлено вертикально и равно давлению вышележащих пород в вертикальных скважинах. Значение давления вышележащих пород для зон с невысокой тектонической активностью и тектонически активных зон составляет 0,0226 и 0,0181 МПа/м соответственно [1].

Нормальные напряжения σ_2 и σ_3 расположены в горизонтальной плоскости и непосредственно влияют на разрыв породы. Теоретическое гидростатическое давление, необходимое для гидроразрыва ствола скважины, должно быть больше или равно минимальному нормальному напряжению σ_3 , однако бурение скважины приводит к увеличению напряжений вокруг стенок ствола настолько, что равнодействующие напряжения в несколько раз превышают минимальные главные нормальные напряжения.

Давление гидроразрыва пластов $P_{гр}$ приблизительно может быть определено по известной эмпирической формуле [1]:

$$P_{гр} \approx (0,49 : 0,91)P_{гор}.$$

Горное давление $P_{гор}$ при бурении скважин на море рекомендуется рассчитывать по формуле [2]

$$P_{гор} = [(\rho_n(H - H_m) + \rho_m \cdot H_m)] \cdot g,$$

где H_m – глубина шельфа, м; ρ_m – плотность морской воды, кг/м³; ρ_n – плотность твердой фазы горной породы, кг/м³;

$$H = \sum_{i=1}^n h_i + H_m,$$

где $\sum_{i=1}^n h_i$ – глубина скважины от дна водоема, м.

Данный метод не учитывает коэффициент Пуассона породы и соотношение напряжений σ_2 и σ_3 и поэтому может дать неверное решение.

Нарушение температурного режима в скважине и колебание гидродинамического давления при бурении скважины вызывают снижение давления гидроразрыва.

Для предупреждения гидроразрыва пластов гидродинамическое давление $P_{зд}$ в скважине рекомендуется поддерживать ниже давления гидроразрыва $P_{гр}$:

$$P_{гр} \leq (0,85 : 0,9)P_{гр}.$$

Повышение гидравлического давления в скважине может вызываться многими факторами, в том числе необходимыми, например утяжелением бурового раствора для борьбы с проявлениями. Явление поршневания при спуско-подъемных операциях может увеличить давление на 3–4 МПа.

Даже кратковременное повышение давления может вызвать поглощение промывочной жидкости. Для ликвидации незначительного поглощения иногда бывает достаточно откорректировать режим бурения.

Градиент давления гидроразрыва – это давление относительной устойчивости пород, то есть минимальное давление на участок ствола скважины, сложенный потенциально неустойчивой породой, при котором в течение продолжительного времени при данном составе бурового раствора не возникают серьезные проявления неустойчивости ствола скважины (прихваты, сужения, затяжки, посадки колонны).

Знание градиента давления гидроразрыва важно при выборе правильной глубины установки башмака обсадной колонны, для предотвращения потери циркуляции и при планировании операций по гидроразрыву пласта с целью повышения нефтеотдачи из зон пониженной проницаемости.

Градиент давления гидроразрыва зависит от типа горной породы, степени анизотропии, пластового (порового) давления, мощности покрывающих пластов и тектонического строения в пределах данной площади. Для получения реальных значений градиента разрыва любой аналитический метод прогнозирования должен учитывать эти факторы.

При бурении скважин градиент разрыва определяют как отношение минимального общего напряжения в пласте к глубине.

Величина значения градиента разрыва $\text{grad}P_{\text{гр}}$ важна для предупреждения

выбросов при регулировании статистического давления в скважине при закрытом устье.

Кроме того, трещина при разрыве пласта может распространяться, создавая сообщение между углеводородными коллекторами и достигая водоносной зоны, что крайне нежелательно. Поэтому определение градиента гидроразрыва, в том числе и аналитическим способом, является важной задачей.

Метод С.А. Кристмана [3] предназначен для расчета градиента разрыва на морских месторождениях. В соответствии с этим методом общая глубина равна сумме глубин морской толщи и скважины. Плотность воды меньше плотности породы, поэтому градиент разрыва на данной глубине меньше для морской скважины, чем для скважины, пробуренной на суше на той же глубине.

Давление вышележащих пород Кристман определяет по формуле

$$P_{\text{гор}} = 0,4335 \cdot \rho,$$

где ρ – средняя объемная плотность.

А градиент разрыва рассчитывает по уравнению:

$$\text{grad}P_{\text{гр}} = F \left(\frac{P_{\text{гор}} - P_{\text{пл}}}{H} \right) + \frac{P_{\text{пл}}}{H},$$

где H – общая глубина; $H = H_{\text{м}} + H_{\text{скв}}$; F – коэффициент соотношения напряжений.

При проникновении жидкости в пласт, то есть для «мокрых» скважин, соотношение радиально действующих на пласт нормальных напряжений b_2 и b_3 изменяется по сравнению с соотношением напряжений при бурении на «суше».

Необходимо отметить, что данное уравнение допустимо лишь для зон с невысокой тектонической активностью, где можно допустить равенство напряжений b_2 и b_3 .

В нефтяной промышленности чаще применяется метод Б.А. Итона [4]. В нем допускается, что давление вышележащих пород и коэффициент Пуассона – переменные величины. Коэффициент Пуассона характеризует свойство горной

породы изменять свои размеры в направлении, перпендикулярном к приложенному напряжению. Таким образом, учитывается действие напряжений в двух измерениях. Большинство пород имеют коэффициент Пуассона 0,25–0,28.

Практика показывает, что коэффициент Пуассона для определенного месторождения является постоянным и может быть получен по предыдущим скважинам того же месторождения.

Однако метод Итона отягощен наличием в нем ряда графиков. Например, график зависимости градиента горного давления от глубины скважины, график определения градиента гидроразрыва в зависимости от градиента пластового давления ($\text{grad}P_{пл}$). А таких параболических линий $\text{grad}P_{пл}$ на графике более 10. Они близко расположены друг к другу и с увеличением глубины чуть ли не сливаются. На производстве рациональнее и удобнее иметь дело с таблицами.

Метод

Приведем пример расчета градиента давления гидроразрыва применительно для морских месторождений с поправками на глубину моря и высоту ствола ротора над средним уровнем моря.

Имеем следующие данные:

- l – высота ствола ротора над уровнем моря – 30 м;
- ρ_m – плотность морской воды – 1060 кг/м³;
- H – глубина воды водоема – 600 м;
- L – глубина спуска обсадной колонны ниже дна моря – 1220 м;
- $\text{grad}P_{пл}$ – градиент пластового давления – 1,1 МПа/м (1120 кг/м³).

Преобразуем толщу воды в эквивалентную (по вкладу в горное давление) толщу пород суши.

Для этого рассчитаем гидравлическое давление морской воды P_m .

$$P_m = 10^{-6} \cdot \rho_m \cdot g \cdot H = \\ = 10^{-6} \cdot 1060 \cdot 9,8 \cdot 600 = 6,23 \text{ МПа.}$$

Определим градиент горного давления от среднего уровня моря до глубины спуска обсадной колонны. Для этого сначала определяем суммарную глубину бурения с учетом глубины акватории:

$$H' = l + H = 1220 + 600 = 1820 \text{ м.}$$

У американского исследователя Б.А. Итона зависимость градиента горного давления дается графически приблизительно в виде правой части параболы функции $y = 2x^n$. Для облегчения расчетов этот график представлен в виде табл. 1, где $\text{grad}P_{гор}$ в единицах (фунт/дюйм²) фут заменен на МПа/м.

Результаты

По табл. 1 определяем градиент горного давления для глубины 1820 м:

$$\text{grad}P_{гор} = 2,1 \text{ МПа/м.}$$

Затем рассчитываем глубину $h_э$, эквивалентную слою морской воды, для района, расположенного на суше, то есть определяем размер слоя породы, если его мысленно заменить слоем воды при сохранении гидростатического давления акватории.

Эквивалентное число метров суши равно:

$$h_э = P_m : (\text{grad}P_{гор} \cdot 10^{-2}) = \\ = (6,23 : 2,1 \cdot 10^{-2}) = 296 \text{ м.}$$

Для расчета градиента давления гидроразрыва определяем эквивалентную глубину $H_э$ с учетом замены глубины акватории на слой суши.

$$H_э = L + h_э = 1220 + 296 = 1516 \text{ м.}$$

Определяем градиент давления гидроразрыва на глубине 1516 м по табл. 2. Этой таблицей мы заменяем график Итона, где присутствует множество близкорасположенных параболических линий, обозначающих пластовое давление, а значения градиента давления гидроразрыва даны в единицах фунт/галлон.

Таблица 1

Осредненная градиента горного давления для всех осадочных бассейнов
с нормально уплотненными отложениями с непрерывным осадконакоплением

Table 1

Averaged gradient of overburden pressure for all sedimentary basins
with normally compacted depositions with continuous sedimentation

Суммарная глубина H , м / Total depth H , m	0	660	1120	1180	2240	3300	3360	4420	4480	5540	6600
Градиент горного давления $\text{grad}P_{\text{гор}}$, МПа/м / Overburden pressure gradient $\text{grad}P_{\text{гор}}$, MPa/m	1,48	1,72	1,94	2,1	2,23	2,35	2,46	2,57	2,68	2,76	2,83

Таблица 2

Градиент давления гидроразрыва в зависимости от глубины

Table 2

Depth-dependent breakdown pressure gradient

Глубина H_3 , м / Depth H_3 , m	Градиент пластового давления $\text{grad}P_{\text{пл}}$, МПа/м / Formation pressure gradient $\text{grad}P_{\text{пл}}$, MPa/m				
	1,10	1,45	1,7	2,0	2,3
0	1,33	1,58	1,80	1,91	2,0
600	1,50	1,70	1,87	1,96	2,05
1200	1,65	1,80	1,91	2,00	2,03
1800	1,76	1,87	1,96	2,04	2,09
2400	1,85	1,94	2,01	2,08	2,13
3000	1,93	2,01	2,05	2,12	2,16
3600	2,00	2,05	2,09	2,14	2,18
4200	2,06	2,10	2,013	2,17	2,2
4800	2,12	2,15	2,17	2,19	2,21
5400	2,18	2,19	2,20	2,21	2,22
6000	2,23	2,23	2,23	2,23	2,23
	Градиент давления гидроразрыва, МПа/м / Breakdown pressure gradient, MPa/m				

Для градиента пластового давления 1,1 МПа/м и глубины 1516 м градиент давления гидроразрыва равен 1,706 МПа/м (1741 кг/м³).

Определяем давление гидроразрыва:

$$P_{\text{гр}} = \text{grad}P_{\text{гр}} \cdot H_3 \cdot 10^{-2} = \\ = 1,706 \cdot 1516 \cdot 0,01 = 25,86 \text{ МПа.}$$

Пересчитаем градиент давления гидроразрыва в эквивалентную плотность бурового раствора, введя поправку на глубину от стола ротора:

$$\begin{aligned} \text{grad}P_{\text{гр}} &= 10^6 \cdot P_{\text{гр}} : [g \cdot (H' + l)] = \\ &= 10^6 \cdot 25,86 : [9,81 \cdot (1820 + 30)] = \\ &= 1425,0 \text{ кг} : \text{м}^3 (1,396 \text{ МПа/м}), \end{aligned}$$

где $\text{grad}P_{\text{гр}}$ – градиент давления гидроразрыва, исправленный с учетом глубины воды и расстояния от поверхности моря до стола ротора.

Выводы

В процессе бурения гидроразрыв породы может быть огромным. Существующие и новые разломы будут поглощать весь буровой раствор, закачиваемый

в скважину. Крайне нежелательно, если распространившаяся трещина соединит углеводородный коллектор с водоносным. Давно замечено, что давление гидроразрыва морских («мокрых») скважин намного ниже давления гидроразрыва скважин на суше («сухих»). Эта разница может достигать до 50 %. По-видимому, пропитанная водой порода является менее стойкой к давлению бурового раствора. Поэтому так важно при определении гидроразрыва породы и его градиента проводить уточненный аналитический расчет, то есть расчет с учетом глубины акватории и расстояния от ротора до среднего уровня моря.

Библиографический список

1. Раbia X. Технология бурения нефтяных скважин / пер. с англ. М.: Недра, 1989. 411 с.
2. Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Сердюк Н.И. Расчеты в бурении: справ. пособие. М.: Изд-во РГГРУ, 2007. 668 с.

3. Кристман С.А. Морской градиент разрыва // Технология нефти. 1973. Август. С. 910–914.
4. Итон Б.А. Расчет градиентов разрыва в третичных бассейнах // Нефтяной инженер. 1969. Май. С. 138–148.

References

1. Rabia Kh. Oil well drilling technology, 1989, 411 p (Russ. ed.: *Tekhnologiya bureniya neftnyanykh skvazhin*. Moscow: Nedra Publ., 1989, 411 p.).
2. Gandzhumyan R.A., Kalinin A.G., Serdyuk N.I. *Raschety v burenii* [Calculations in drilling. Reference book]. Moscow: Russian State Geological Prospecting University Publ., 2007, 668 p. (In Russian).

3. Kristman S.A. Offshore fracture gradient. *Tekhnologiya nefti* [Journal of Petroleum Technology], 1973, august, pp. 910–914. (In Russian).
4. Iton B.A. Fracture gradient calculation in tertiary basins. *Neftyanoi inzhener* [Petroleum Engineer], 1969, may, pp. 138–148. (In Russian).

Критерии авторства

Зайцев В.И. написал статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zaitsev V.I. has written the article and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.