

## **ВЛИЯНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОРОД НА РАЗРУШЕНИЕ ПЕСЧАНИКА ВО ВРЕМЯ БУРЕНИЯ**

*Олег Борисович Бочаров*

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат физико-математических наук, заместитель директора, тел. (383)332-94-43 (доп. 179), e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

*Александр Викторович Серяков*

Новосибирский технологический центр компании «Бейкер Хьюз», 630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4А, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)332-94-43 (доп. 143), e-mail: Alexander.Seryakov@bakerhughes.com

Проведено трехмерное численное моделирование напряженного состояния и изменения порового давления в окрестности скважины с учетом образования корки бурового раствора в неоднородном пласте, а также моделирование зоны внедрения в тех же условиях. Установлено, что зона внедрения в плотном песчанике значительно глубже, чем в более проницаемом слое. Численные эксперименты показали, что именно учет изменения прочностных свойств в прискважинной зоне в результате смачивания (эффект Ребиндера) позволяет объяснить эффект разрушения плотного песчаника.

**Ключевые слова:** стабильность скважины, разрушение, песчаник, пороупругая модель, двухфазная фильтрационная модель, эффект Ребиндера, корка бурового раствора.

## **THE ROCK WETTABILITY INFLUENCE ON THE SANDSTONE FORMATION BREAKOUTS WHILE DRILLING**

*Oleg B. Bocharov*

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Deputy Director, tel. (383)332-94-43 (int. 179), e-mail: Oleg.Bocharov@bakerhughes.com

*Alexander V. Seryakov*

Baker Hughes Novosibirsk Technology Center, 630128, Russia, Novosibirsk, 4A Kutateladze, Ph. D., Scientist, tel. (383)332-94-43 (int. 143), e-mail: Alexander.Seryakov@bakerhughes.com

A 3D stress and pore pressure simulation in near wellbore zone has been conducted with mudcake taken into account and comparing with invasion zone numerical modeling for the same conditions. It has been determined that invasion zone width in tight sands is greater than in more permeable layers. The numerical experiments show it is rock failure properties changing caused by wetting (the Reh binder effect) that can explain the breakouts in the tight sandstones.

**Key words:** wellbore stability, breakouts, tight sandstone, poroelastic model, two phase filtration model, Reh binder effect, mudcake.

Бурение скважин на нефтегазовых месторождениях связано с изменением как гидродинамического режима пласта, так и напряженного состояния прискважинной зоны. Если величина внутреннего давления в скважине достигает критического значения, происходит обрушение стенок, при котором дальней-

шая эксплуатация невозможна. Целостность ствола скважины при бурении достигается поддержанием давления бурового раствора выше величины порового давления и ниже границы гидроразрыва пласта. Тем не менее даже при соблюдении технологии устойчивого бурения на стенках отверстия возникают разрушенные участки, которые могут значительно осложнить дальнейшие технологические операции и эксплуатацию. Понимание причин подобных разрушений в значительной степени помогает планированию и корректировке работ по всему месторождению.

Мотивацией представленной работы послужила проблема интерпретации данных, полученных для скважин на газосодержащем месторождении Северной Африки. Формация месторождения преимущественно сложена сланцами и песчаником. Продуктивный пласт представляет собой песчаник с проницаемостью, изменяющейся на порядок. Особенностью наблюдений является тот факт, что в интервале, где порода достаточно плотная и малопроницаемая, происходят разрушения, в то время как при прохождении более рыхлого слоя с большей проницаемостью образуется корка бурового раствора, под которой разрушений не наблюдается. Для объяснения данного явления проведены детальные численные эксперименты.

### *Используемые математические модели*

Для совместного описания фильтрации флюида и деформации породы использовалась пороупругая модель [1], в которой уравнение для изменения порового давления имеет вид

$$S_e \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{k}{\mu} \nabla^2 p + \alpha \frac{\partial e}{\partial t} = 0,$$

где  $S_e$  – коэффициент флюидоотдачи,  $p$  – поровое давление,  $k$  – проницаемость среды,  $\mu$  – вязкость флюида,  $\alpha$  – коэффициент Био-Уиллиса,  $e$  – объемная деформация.

Для полных напряжений рассматриваются уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = \rho_m \mathbf{g},$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора полных напряжений,  $\rho_m$  – плотность пористой среды,  $\mathbf{g}$  – вектор гравитации.

Физические уравнения связи напряжений, деформаций и порового давления в форме обобщенного закона Гука

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda e\delta_{ij} - \alpha p\delta_{ij},$$

где  $G$ ,  $\lambda$  – параметры Ламе,  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций.

Для определения толщины корки бурового раствора на стенке скважины используется двухпараметрическая модель

$$\frac{\partial h}{\partial t} = aq - \tau,$$

здесь  $h(t)$  – толщина корки бурового раствора,  $a$  – параметр роста корки, определяющийся через концентрацию твердых частиц в растворе и пористость корки,  $q$  – величина скорости фильтрации, направленной по нормали к контуру скважины,  $\tau$  – параметр смыва корки.

Расчеты напряжений и порового давления проводились с помощью трехмерного конечноэлементного пакета Geofluid [2]. Разрушение материала оценивалось по величине эквивалентного напряжения, записанного для критерия Кулона-Мора

$$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_3 \operatorname{ctg} \psi,$$

где  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение,  $\sigma_1, \sigma_3$  – максимальное и минимальное главные напряжения,  $\operatorname{ctg} \psi = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)$ ,  $\varphi$  – угол внутреннего трения. Разрушение (сдвиговое) наступает при достижении  $\sigma_e$  величины предела прочности на одноосное сжатие  $S_0$ .

Моделирование двухфазной зоны внедрения выполнены с помощью двумерной программы на основе модели Баклея-Левретта [3]. Уравнение для насыщенности  $s$ :

$$\frac{\partial(\rho_1 sm)}{\partial t} + \operatorname{div} \left( -\rho \frac{k k_1(s)}{\mu_1} (\nabla p - \rho_1 \frac{\rho}{g}) \right) = 0.$$

Уравнение для давления  $p$  :

$$\frac{\partial((\rho_1 - \rho_2)sm + \rho_2 m)}{\partial t} - \operatorname{div} \left( k \left[ \rho_1 \frac{k_1(s)}{\mu_1} + \rho_2 \frac{k_2(s)}{\mu_2} \right] \nabla p - k \left[ \frac{\rho_1^2 k_1(s)}{\mu_1} + \frac{\rho_2^2 k_2(s)}{\mu_2} \right] \frac{\rho}{g} \right) = 0,$$

где  $\rho_i$  – плотности флюидов,  $k_i, \mu_i, i=1,2$  – фазовые проницаемости и вязкости флюидов.

### Результаты моделирования

Все необходимые параметры определялись для участка скважины на глубине 2334 м, пересекающего три слоя песчаника: с низкой проницаемостью ( $k=7$  мD), высокой проницаемостью ( $k=62$  мD) и снова с низкой ( $k=7$  мD). Мощность слоев 2 м. Величина угла внутреннего трения для всех слоев одинакова –  $\varphi=35^\circ$ . Параметр  $S_0$  в проницаемом слое ниже, чем в плотном. Значения исходных напряжений на указанной глубине: вертикальное 55 МПа, минималь-

ное горизонтальное 44 МПа, максимальное горизонтальное напряжение 80 МПа (предполагаем, что сжимающие напряжения положительны).

Регулятором стабильной работы скважины во время бурения является давление бурового раствора. Влияние этого параметра на напряженное состояние и нарушенность пласта и было исследовано. На контуре скважины задавался перепад давления  $dP$ . Первоначально поведено моделирование напряженно-деформированного состояния прискважинной зоны без учёта двухфазности зоны внедрения. Численные эксперименты показали, что для типичных значений  $dP$  при бурении песчаников на таких глубинах, с одной стороны, не возникает растягивающих тангенциальных напряжений, то есть гидроразрыв отсутствует, что подтверждается данными наблюдений. С другой стороны, быстрое гидродинамическое изолирование прискважинной зоны от фильтрата бурового раствора вследствие образования корки переносит сжимающую нагрузку на пористый скелет. Величина эквивалентного напряжения, характеризующего степень предразрушения формации, увеличивается с уменьшением перепада давления в скважине, поскольку внутреннее давление на стенках отверстия поддерживает формацию, не давая ей деформироваться в исходном поле сжимающих напряжений.

Также получено, что зоны сдвиговых нарушений должны возникать вдоль направления действия минимальных горизонтальных напряжений. При этом значение функции  $\sigma_e$  в слое с проницаемостью  $k=62\text{mD}$  на 8-9 МПа превосходит показатель в плотном песчанике, что указывает на большую вероятность образования разрушения в пористой породе под слоем корки. Таким образом, в моделировании имеет место эффект, обратный наблюдаемому. Тем не менее предела  $S_0$  функции  $\sigma_e$  не достигают, поэтому в данном случае существует лишь вероятность возникновения нарушения.

Рассмотрим теперь зону внедрения. Двухфазное моделирование с учетом корки показало, что глубина зоны проникновения в более плотном песчанике больше на 40 %, чем в хорошо проницаемом. Это объясняется более толстым (на 30 %) слоем корки бурового раствора над высокопроницаемым участком. Проникновение фильтрата, представляющего полярную жидкость (например, вода, спирт и т. д.), в плотный слой вызывает изменение прочностных свойств породы, так называемый эффект Ребиндера. Наибольшее его проявление имеет место при использовании буровых растворов на водной основе (WBM). Учтем это изменением угла внутреннего трения и напряжений на разрыв в слабопроницаемом песчанике. Так, при уменьшении угла внутреннего трения  $\varphi$  с  $35^\circ$  до  $25^\circ$  величина эквивалентного напряжения в плотном песчанике превышает на 6 МПа значения в высокопроницаемом пористом слое. На рис. 1 представлен пример расчета, когда давление в скважине кратковременно падает, что происходит при технологических операциях и в ходе, например, спуско-подъемных работ. При этом разрушение в направлении минимального сжимающего напряжения уже может начаться, если величина  $S_0$  станет меньше значения 104 МПа. Вывалы породы инициируются вблизи границы контакта двух песчаников со стороны менее проницаемого слоя.

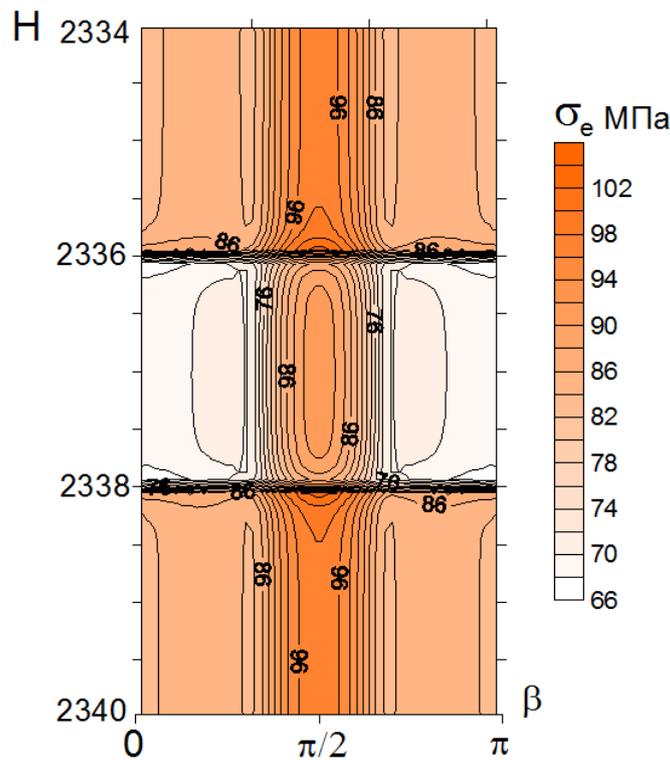


Рис. 1. Развертка значений эквивалентного напряжения  $\sigma_e$ , определяющего разрушение, по внутренней поверхности скважины для случая кратковременного понижения давления бурового раствора.

$H$  – глубина залегания,  $\beta$  – азимутальный угол, отсчитываемый от направления действия максимального горизонтального напряжения

Данный факт можно наблюдать на развертке значений  $\sigma_e$  по внутренней поверхности скважины (рис. 1). Форма ожидаемого нарушения согласуется с наблюдаемыми контурами вывалов на азимутальных логах плотности.

Таким образом, показано, что при оценке стабильности скважины стандартная пороупругая модель должна учитывать как двухфазность процесса внедрения, так и изменение прочностных характеристик породного скелета при смачивании (эффект Ребиндера).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang H.F. Theory of linear poroelasticity. - London: Princeton University Press, 2000. - 287 p.
2. Совместное моделирование процессов геомеханики и фильтрации в прискважинной зоне во время бурения / В. Я. Рудяк, А. В. Манаков, А. В. Серяков // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Всерос. конф., посвященной 80-летию ак. М.В. Курлени (3–6 октября 2011 г.). В 2 т. - Новосибирск: Ин-т горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 2011. - Т. I. - С. 383–388.
3. Бочаров О.Б., Пеньковский В.И. Введение в теорию фильтрации жидкостей и газов в пористых средах: учеб. пособие. - Новосибирск: НГУ, 2005. - 132 с.

© О. Б. Бочаров, А. В. Серяков, 2015