

УДК 622.276

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ В СКВАЖИНЕ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

Л. Яньцзюнь, В. В. Шелепов, Я. Чжаочжун*, Л. Цзяньшен**,
Х. Цзиньсюань, Л. Сяоган*, Г. Цзюньфэн***

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

* Главная государственная лаборатория геологии и эксплуатации
нефтегазовых месторождений Юго-Западного университета нефти,
610500 Ченду, Китай

** Третий нефтеперерабатывающий завод Китайской национальной
нефтегазовой корпорации, 750006 Иньчуань, Китай

*** Дочерняя компания корпорации SINOPEC по эксплуатации Шаньсиньского
угольно-метанового месторождения, 048000 Цзиньчэн, Китай
E-mails: lhmsu@mail.ru, shelepov_s@mail.ru, yzzycl@vip.sina.com,
ljs62_cq@petrochina.com.cn, pulinsd@mail.ru, swpuadam@126.com, mcq_gjf@petrochina.com.cn

С использованием модели распределения напряжений в угольно-метановом пласте в окрестности горизонтальной трещины определяется давление, при котором в пласте начинается разрушение. Рассматриваются различные типы разрушения: разрушение матрицы (вмещающей породы), образование трещины сдвига и трещины отрыва. Исследовано влияние параметров кливажа и пространственной ориентации скважины на характер разрушения.

Ключевые слова: угольно-метановый пласт, горизонтальная скважина, кливаж, давление, многоступенчатое разрушение.

DOI: 10.15372/PMTF20180617

Введение. Поскольку большинство угольных пластов слабопроницаемы, существуют различные способы увеличения их производительности. В частности, эффективным способом повышения производительности угольнопластовой метановой скважины является гидравлический разрыв [1].

При осуществлении гидроразрыва необходимо знать давление в скважине, при котором начинается разрушение пласта [2]. В работе [3] впервые выполнены исследования начального давления в слое и предложена формула для его определения (формула) Хуберта — Уиллиса. В работе [4], в которой исследовалась проницаемость горных пород, также получена формула для вычисления начального давления в предположении, что слои являются однородными изотропными и упругими. В [2] предложены критерий и модель начального разрушения. Аналитические решения задачи о распространении трещины при

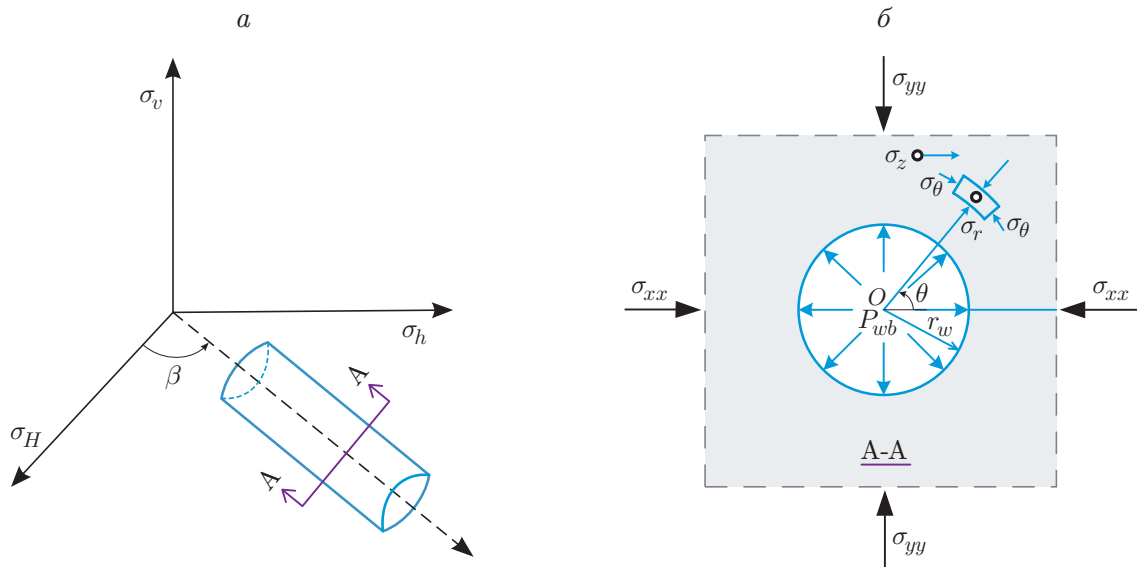


Рис. 1. Распределение напряжений в стволе скважины:
 а — ориентация скважины, б — поперечное сечение скважины

различных условиях закачивания жидкости в скважину получены в работе [5]. В [6] изучался многоступенчатый гидравлический разрыв скважины. В работе [7] в результате исследования начального давления в вертикальной и наклонной скважинах установлено, что в скважине может быть осуществлен гидравлический разрыв трех типов. В [8] предложена модель расчета начального давления в вертикальной скважине при наличии трещин.

Методы расчета начального давления в резервуарах, наполненных нефтью и газом, часто используются для расчета начального давления в угольнопластовых метановых скважинах. При этом не учитываются характеристики кливажа (совокупности трещин, образовавшихся при углефикации) в угольных пластах, вследствие чего расчетные значения начального давления не соответствуют реальным значениям. В работе [9] изучался процесс хрупкого разрушения в условиях одноосного сжатия с учетом механических свойств угольного пласта. В ряде работ при исследовании процесса разрушения угольных пластов использовался метод конечных элементов [10].

1. Вычисление распределения напряжений. Начальное давление, необходимое для осуществления гидравлического разрыва, определяется напряженным состоянием в стволе скважины. Схема распределения напряжений в окрестности ствола горизонтальной трещины приведена на рис. 1 (растягивающие напряжения отрицательные, сжимающие — положительные). При построении модели принимаются следующие предположения:

- 1) угольный пласт является однородной изотропной линейной упругой пористой средой;
- 2) ствол скважины в продольном направлении не деформируется (в стволе скважины реализуется состояние плоской деформации);
- 3) изменение физико-механических свойств вследствие взаимодействия жидкости с угольным пластом не учитывается.

В соответствии с данными предположениями напряжения в горизонтальном стволе скважины, расположенной под азимутальным углом β (см. рис. 1), вычисляются по

формуле [5]

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 \beta & \sin^2 \beta \\ 0 & \sin^2 \beta & \cos^2 \beta \\ 0 & -\sin \beta \cos \beta & \sin \beta \cos \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_v \\ \sigma_h \\ \sigma_H \end{bmatrix},$$

где σ_v — вертикальное главное напряжение, МПа; σ_h, σ_H — минимальное и максимальное горизонтальные главные напряжения соответственно, МПа.

Напряжения в стволе трещины являются суммой напряжений in-situ, гидравлического давления в скважине и напряжений, вызванных утечкой жидкости [11]:

$$\sigma_r = P_{Wb} + \varphi(P_{wb} - P_p),$$

$$\sigma_\theta = -P_{Wb} + \sigma_{xx} + \sigma_{yy} - 2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta - [\alpha(1 - 2\nu)/(1 - \nu) - \varphi](P_{wb} - P_p),$$

$$\sigma_z = -cP_{wb} + \sigma_{zz} - 2\nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \cos 2\theta - 4\nu\tau_{xy} \sin 2\theta - [\alpha(1 - 2\nu)/(1 - \nu) - \varphi](P_{wb} - P_p),$$

$$\tau_{z\theta} = 2(-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta), \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad \tau_{rz} = 0.$$

Здесь P_{wb} — внутреннее давление в стволе скважины, МПа; P_p — внутреннее поровое давление, МПа; φ — пористость; α — коэффициент Био; ν — коэффициент Пуассона для угля; $c = 0,9 \div 1,0$ — корректирующий множитель.

2. Вычисление начального давления в открытой скважине. Ниже приводятся формулы для вычисления давления, при котором происходят разрушения различного типа.

2.1. *Иницирование разрушения в угольном пласте.* В соответствии с принятой моделью главные напряжения в стволе открытой скважины вычисляются по следующим формулам:

$$\sigma_1 = \sigma_r,$$

$$\sigma_2 = [\sigma_\theta + \sigma_z + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{z\theta}^2}]/2, \quad \sigma_3 = [\sigma_\theta + \sigma_z - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{z\theta}^2}]/2.$$

Давление, при котором начинается разрушение в стволе скважины (начальное давление), можно вычислить по критерию максимального растягивающего напряжения, но при этом не учитывается кливаж породы. В соответствии с теорией упругости эффективное максимальное растягивающее напряжение, при котором начинается разрушение, вычисляется по формуле

$$\sigma_3 = [\sigma_\theta + \sigma_z - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\tau_{z\theta}^2}]/2.$$

Поскольку максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{\max}(\theta)$ является функцией угла θ , направление (угол θ_0), в котором начинается разрушение, можно вычислить из условия $d\sigma_{\max}(\theta)/d\theta = 0$. С учетом порового давления и критерия максимального растягивающего напряжения направление, в котором начинается разрушение, определяется из условия

$$\sigma_{\max}(\theta) - \alpha P_p \leq -\sigma_t.$$

2.2. *Иницирование сдвигового разрушения вдоль кливажа.* При нормальном давлении ширина кливажной пластины $10^{-1} \div 2 \cdot 10^3$ мкм, длина $10^{-4} \div 6$ см, высота $10^{-3} \div 3$ мм [12]. При бурении ствол скважины проходит сквозь кливажные пластины. Пусть H — угол в геодезических координатах между направлением действия горизонтального максимального главного напряжения σ_H и направлением на север, N — угол между кливажем и

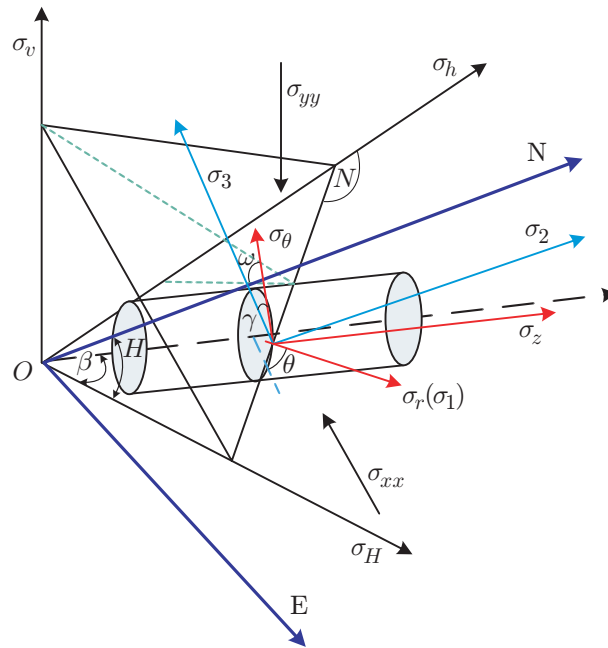


Рис. 2. Пространственная ориентация кливажа и ствола скважины

направлением горизонтального минимального главного напряжения σ_h , ω — угол наклона угольного пласта (скважина пересекает угольный пласт). Схема расположения угольного пласта и скважины приведена на рис. 2. Векторы \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} в геодезических координатах соответствуют направлениям на восток, север и вертикальному направлению, поэтому выражение для единичного вектора нормали к плоскости угольного пласта записывается в следующем виде [13]:

$$\mathbf{n} = -\sin(\omega) \sin(H + N)\mathbf{i} - \sin(\omega) \cos(H + N)\mathbf{j} + \cos(\omega)\mathbf{k}.$$

Выражения для единичных векторов, определяющих направления трех главных напряжений в стенке скважины, имеют вид

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1(\sigma_1) &= \cos(\theta) \cos(H - \beta)\mathbf{i} - \cos(\theta) \sin(H - \beta)\mathbf{j} + \sin(\theta)\mathbf{k}, \\ \mathbf{e}_2(\sigma_2) &= [k_1 - k_4 \sin(\theta)]\mathbf{i} + [k_2 + k_3 \sin(\theta)]\mathbf{j} + \sin(\gamma) \cos(\theta)\mathbf{k}, \\ \mathbf{e}_3(\sigma_3) &= -[k_3 + k_2 \sin(\theta)]\mathbf{i} + [-k_4 + k_1 \sin(\theta)]\mathbf{j} + \cos(\gamma) \cos(\theta)\mathbf{k}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} k_1 &= \cos(\gamma) \sin(H - \beta), & k_2 &= \cos(\gamma) \cos(H - \beta), \\ k_3 &= \sin(\gamma) \sin(H - \beta), & k_4 &= \sin(\gamma) \cos(H - \beta). \end{aligned}$$

Следовательно, углы между нормалью к плоскости угольного пласта и направлениями главных напряжений определяются равенствами [13]

$$\beta'_i = \arccos \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_i(\sigma_i)}{|\mathbf{n}| |\mathbf{e}_i(\sigma_i)|}, \quad i = 1, 2, 3.$$

С использованием приведенных выше соотношений можно вычислить главные напряжения и углы между направлениями, в которых они действуют, и нормалью к плоскости угольного пласта в любой точке стенки скважины. В [14] предложен критерий разрушения горных пород в результате сдвига вдоль пласта

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{2\sigma_c - 2\tau_{z\theta} \cos 2\beta' + 2\mu(\sigma_{\min} - \tau_{z\theta} \sin 2\beta' - p_0)}{\sin 2\beta'(1 - \mu \operatorname{ctg} \beta')}. \quad (1)$$

При $\tau_{z\theta} = 0$, $p_0 = 0$ уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \frac{2(\sigma_c + \mu\sigma_{\min})}{\sin 2\beta'(1 - \mu \operatorname{ctg} \beta')}.$$

При $\beta' = \chi$ или $\beta' = 90^\circ$ проскальзывания не происходит, при $\chi < \beta' < 90^\circ$ проскальзывание происходит, если напряжения удовлетворяют условию (1).

2.3. *Разрушение (образование трещины отрыва) вдоль пласта.* В случае если давление в пласте больше эффективного положительного напряжения, происходит разрушение вдоль пласта (образование трещины отрыва). В соответствии с теорией упругости положительное нормальное напряжение в пласте вычисляется по формуле

$$\sigma_n = \cos^2(\beta_1)\sigma_1 + \cos^2(\beta_2)\sigma_2 + \cos^2(\beta_3)\sigma_3,$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — углы между нормалью к пласту и главными направлениями тензора напряжений. При $p_f - \alpha P_p \geq \sigma_n$ может образоваться трещина отрыва.

3. Результаты вычислений и их анализ. В расчетах использовались следующие параметры горизонтальной скважины, расположенной на юге Циньшуйского бассейна: глубина скважины 1100 м, давление в угольном пласте $P_p = 8,5$ МПа, диаметр скважины $R = 0,1$ м, коэффициент Био $\alpha = 0,85$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,31$, когезионная прочность $\sigma_c = 7,04$ МПа, горизонтальное минимальное главное напряжение $\sigma_h = 22$ МПа, горизонтальное максимальное главное напряжение $\sigma_H = 25$ МПа, растягивающее напряжение $\sigma_t = 0,5$ МПа, внутренний угол трения $\chi = 22,43^\circ$. Ниже приведены результаты вычисления значений давления, при которых в окрестности открытой скважины происходит поэтапное разрушение: 1) разрушение породы (матрицы); 2) образование трещины отрыва; 3) образование трещины сдвига.

3.1. *Зависимость давления, при котором начинается разрушение, от азимутального угла скважины.* Зависимость давления, при котором начинается разрушение, от азимутального угла β приведена на рис. 3. При $\beta = 0$ (бурение скважины происходит в направлении, совпадающем с направлением максимального главного напряжения) давление, при котором начинается разрушение, минимальное, при $\beta = 90^\circ$ (бурение скважины происходит в направлении, совпадающем с направлением минимального главного напряжения) это давление максимальное.

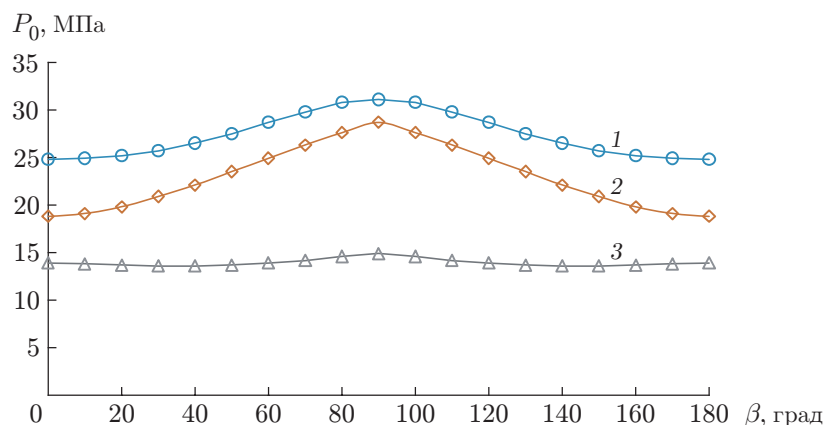


Рис. 3. Зависимость давления, при котором начинается разрушение, от азимутального угла ствола скважины:

1 — разрушение массива (угольного пласта), 2 — образование трещины сдвига (разрушение вдоль пласта), 3 — образование трещины отрыва (разрушение вдоль пласта)

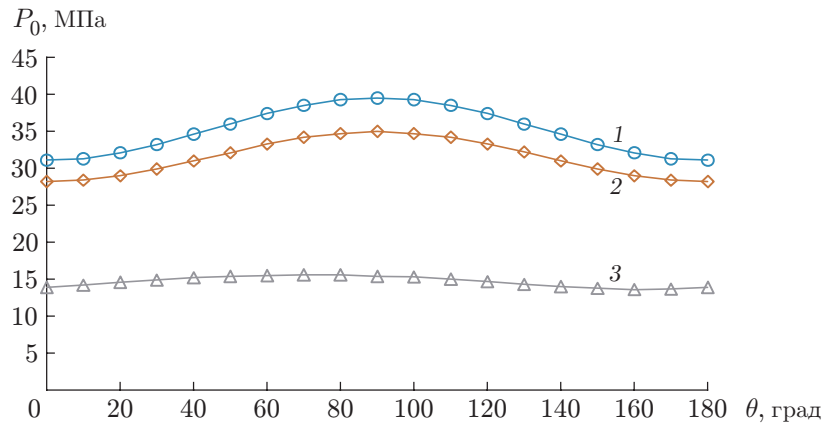


Рис. 4. Зависимость давления, при котором начинается разрушение, от полярного угла θ (обозначения те же, что на рис. 3)

При наличии кливажа в окрестности стенки скважины вдоль него может произойти разрушение (образование трещины сдвига). При угле наклона кливажа, равном 60° , давление, при котором образуется трещина сдвига, увеличивается при значении азимутального угла скважины, превышающем 145° . Если ствол скважины ориентирован в направлении максимального главного напряжения, давление, при котором образуется трещина сдвига, является минимальным.

В случае если кливаж и скважина пересекаются, образуется трещина отрыва. При любом азимутальном угле скважины давление, при котором возникает трещина отрыва, меньше давления, при котором начинается разрушение матрицы, и давления, при котором образуется трещина сдвига. Давление, при котором возникает трещина отрыва, практически не зависит от азимутального угла. Разность наибольшего и наименьшего давлений составляет 1,3 МПа. Наименьшее давление соответствует азимутальному углу, приближенно равному 30° , наибольшее давление — азимутальному углу, равному 90° .

3.2. *Давление, при котором на стенке скважины образуется трещина сдвига.* На рис. 4 приведена зависимость давления, при котором начинается разрушение на стенке скважины, от полярного угла при азимутальном угле, равном 90° . Если угол θ между радиус-вектором точки, находящейся на стенке скважины, и направлением максимального главного напряжения (вертикального главного напряжения) равен нулю, то давление, при котором начинается разрушение матрицы вдоль кливажа, минимальное. Если полярный угол равен $\theta = 90^\circ$ (горизонтальное главное направление), то давление, при котором начинается разрушение, максимально. Таким образом, разрушение начинается в верхней точке скважины. Зависимости давления, при котором начинается разрушение матрицы, и давления, при котором образуется трещина сдвига, от полярного угла θ аналогичны, но трещина сдвига образуется при меньшем давлении. Давление, при котором образуется трещина отрыва, максимально при $\theta = 60^\circ$ и минимально при $\theta = 160^\circ$.

3.3. *Влияние структуры кливажа на величину давления, при которой начинается разрушение.* На рис. 5 приведена зависимость давления, при котором образуется трещина сдвига, от азимутального угла кливажа ε при различных значениях угла его наклона в случае, когда азимутальный угол между стенкой скважины и направлением максимального главного напряжения в пласте равен $\beta = 90^\circ$, а полярный угол равен $\theta = 0^\circ$.

При азимутальном угле кливажа, меньшем (большем) 90° , большему углу наклона скважины соответствует меньшее (большее) давление, при котором образуется трещина сдвига. С увеличением угла наклона кливажа (при угле наклона, большем 90°) давление,

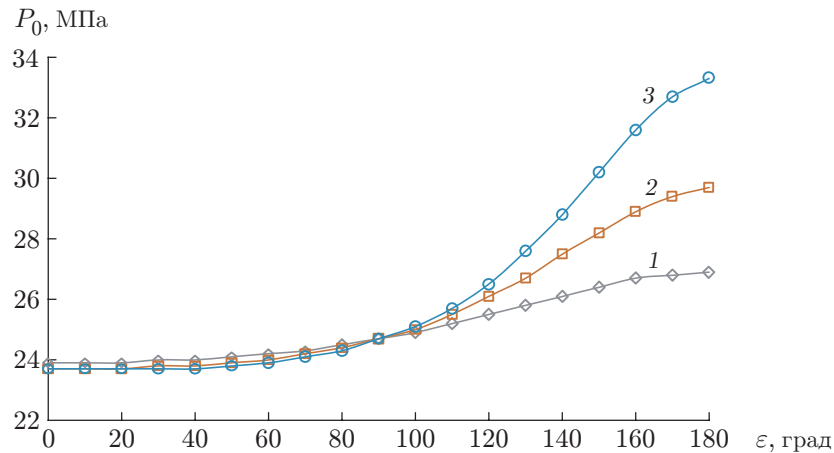


Рис. 5. Зависимость давления, при котором образуется трещина сдвига, от азимутального угла кливажа при различных значениях угла наклона угольного пласта:

1 — $\omega = 30^\circ$, 2 — $\omega = 50^\circ$, 3 — $\omega = 70^\circ$

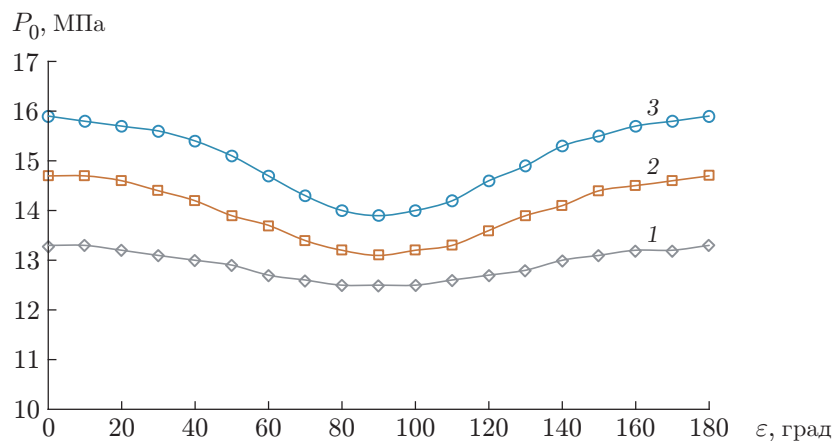


Рис. 6. Зависимость давления, при котором образуется трещина отрыва, от азимутального угла кливажа при различных значениях угла наклона угольного пласта (обозначения те же, что на рис. 5)

при котором образуется трещина сдвига, увеличивается. Этим объясняется тот факт, что при малых углах наклона кливажа трещина сдвига образуется быстрее, чем при больших углах.

3.4. Давление, при котором на стенке скважины образуется трещина отрыва. На рис. 6 приведена зависимость давления, при котором образуется трещина отрыва, от азимутального угла кливажа при азимутальном угле скважины, равном 90° , и полярном угле $\theta = 0^\circ$. Кривые 1–3 симметричны относительно азимутального угла кливажа, равного 90° . С увеличением угла наклона кливажа давление, при котором образуется трещина отрыва, увеличивается.

Закключение. Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы.

При азимутальном угле скважины, равном 90° (бурение скважины происходит в направлении, совпадающем с направлением минимального горизонтального напряжения), давление, при котором происходит разрушение, максимально.

При бурении скважины в угольном пласте возможны разрушения различного типа: разрушение матрицы, образование трещины отрыва и образование трещины сдвига. Образование трещины отрыва происходит при давлении, меньшем значений давления, при которых разрушается матрица и образуется трещина сдвига. Таким образом, наличие кливажа приводит к существенному уменьшению давления, при котором происходит разрушение пласта.

При выполнении условия $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ разрушение начинается в верхней точке стенки скважины.

Параметры кливажа влияют на величину давления, при которой начинается разрушение. С увеличением угла наклона кливажа давление, при котором образуется трещина отрыва, увеличивается. При азимутальном угле кливажа, равном 90° , давление, при котором образуется трещина отрыва, наименьшее. Давление, при котором образуется трещина сдвига, слабо зависит от угла наклона и азимутального угла кливажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liu Y. N., Zhang H.** Analysis on the CBM recovery technology for horizontal well in liulin block // China Coalbed Methane. 2013. V. 10, N 6. P. 13–17.
2. **Huang R. Z.** A model for predicting formation fracture pressure // East China Petroleum Inst. J. 1984. V. 4. P. 335–346.
3. **Hubbert M. K., Willis D. G.** Mechanics of hydraulic fracturing // Trans. AIME. 1957. V. 210. P. 153–163.
4. **Haimson B., Fairhurst C.** Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks // Soc. Petroleum Engrs J. 1967. V. 7, N 3. P. 310–318.
5. **Hossain M. M., Rahman M. K., Rahman S. S.** Hydraulic fracture initiation and propagation: Roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes // J. Petroleum Sci. Engng. 2000. V. 27, N 3. P. 129–149.
6. **Crosby D. G., Rahman M. M., Rahman M. K., et al.** Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells // J. Petroleum Sci. Engng. 2002. V. 35, N 3. P. 191–204.
7. **Jin Y., Zhang X. D., Chen M.** Initiation pressure models for hydraulic fracturing of vertical wells in naturally fractured formation // Acta Petrolei Sinica. 2005. V. 26, N 6. P. 113–114.
8. **Ren L.** Mechanism of fracture-network fracturing for naturally fractured reservoirs. Chengdu: South West Petroleum Univ., 2011.
9. **Li Z. G., Fu S. L., Wu X. M., et al.** Research on mechanical property test and mechanism of hydraulic fracture of gas well in coal beds // Petroleum Drilling Techniques. 2000. V. 28, N 3. P. 10–12.
10. **Zhu B. C., Tang S. H., Yan Z. F., et al.** Effects of crustal stresses and natural fractures on fracture pressure of coal reservoirs // J. China Coal Soc. 2009. V. 34, N 9. P. 1199–1202.
11. **Xu Yanbo.** Fundamental theory research of horizontal well hydraulic fracture. Chengdu: South West Petroleum College, 2004.
12. **Gamson P. D., Beamish B. B., Johnson D. P.** Coal microstructure and micropermeability and their effects on natural gas recovery // Fuel. 1993. V. 72, N 1. P. 87–99.
13. **You Chengye.** Analytic geometry. Beijing: Peking Univ. Press, 2008.
14. **Jaeger J. C.** Fundamentals of rock mechanics / J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, R. W. Zimmerman. Oxford: Blackwell Publ. Ltd, 2007.

*Поступила в редакцию 21/IX 2017 г.,
в окончательном варианте — 18/XII 2017 г.*