



**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ГЕРМЕТИЗАЦИИ
ИНТЕРВАЛА ГИДРОРАЗРЫВА ПОЛИМЕРНЫМИ МОСТАМИ
С УЧЕТОМ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СО СТЕНКАМИ СКВАЖИНЫ**

А. В. Азаров, А. В. Патутин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: antonazv@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Рассмотрено распределение напряжений в окрестности необсаженной скважины при проведении операции гидроразрыва. В качестве герметизирующих элементов использованы несъемные мосты из полимерного материала. Применяемая математическая модель учитывает поршневое вытеснение мостов при подаче давления в изолированный интервал. Полученные результаты позволяют оптимизировать технические решения шахтного гидроразрыва для интенсификации дегазации угольных пластов.

Угольный пласт, необсаженная скважина, гидравлический разрыв, напряженное состояние, интервал гидроразрыва, несъемный мост

**STRESS DISTRIBUTION DURING HYDROFRAC
INTERVAL SEALING WITH POLYMERIC BRIDGES CONSIDERING THEIR INTERACTION
WITH BOREHOLE WALLS**

A. V. Azarov and A. V. Patutin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: antonazv@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The paper discusses the stress distribution in the vicinity of an uncased borehole during hydraulic fracturing. Fixed bridges made of polymeric material are used as sealing elements. The applied mathematical model takes into account piston displacement of bridges when pressure is applied to an isolated interval. The results obtained allow optimization of engineering solutions of in-mine hydraulic fracturing to intensify the degassing of coal seams.

Coal seam, uncased borehole, hydraulic fracturing, stress state, hydrofrac interval, fixed bridge

При проведении интервального гидравлического разрыва пласта (ГРП) в шахтных условиях с целью дегазации угольного массива актуальна задача качественной герметизации заданного интервала необсаженной скважины. Сильная изменчивость поперечного сечения вдоль ее оси (максимальное и минимальное значение может отличаться в три раза) не позволяет использовать стандартные надувные пакеры, поскольку их расширяемые оболочки, армированные кордом, не способны полностью перекрыть скважину. Увеличение длины пакеров до нескольких метров осложняет работы в подземных выработках и не гарантирует надежной герметизации интервала разрыва, давление рабочей жидкости в котором может достигать нескольких сотен атмосфер.

Одним из эффективных способов проведения интервальных ГРП в таких случаях является герметизация скважины несъемными мостами из твердеющего материала [1, 2]. Отчасти это возврат к способам гидроразрыва, применявшимся в начальный период его истории в нефтедобыче, но на основе современных технических решений и новых химических составов [3]. Важным элементом создания данной технологии является разработка математической модели, учи-

тывающей поршневое вытеснение мостов при подаче давления в изолированный интервал. Это дает возможность оптимизировать технические решения шахтного ГРП для интенсификации дегазации угольных пластов.

В [4] распределение напряжений в окрестности изолированного интервала рассчитывалось в предположении, что мосты и стенка скважины полностью связаны и ведут себя как единое тело. В этом случае при некоторых параметрах вмещающей среды и полимерных мостов, расположенных на расстоянии 0.01 м друг от друга, получались высокие осерастягивающие напряжения, превышающие по своим значениям осесимметричные.

В данной работе учитывается адгезионное взаимодействие, существующее между мостами и стенкой скважины, которое позволяет мостам выдерживать некоторое давление в герметизированном интервале и не перемещаться. Будем считать, что это взаимодействие нарушается при достижении некоторых критических значений напряжений при увеличении давления рабочей жидкости. На рис. 1 приведены параметры задачи для расчета поршневого вытеснения полимерных мостов.

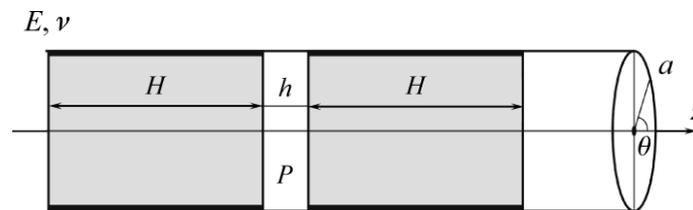


Рис. 1. Постановка задачи для расчета поршневого вытеснения полимерных мостов и напряженного состояния в окрестности скважины: a — радиус скважины, м; θ — угол поворота в цилиндрической системе координат, м; H — длина моста, м; h — расстояние между мостами, м; P — давление рабочей жидкости, Па; E, ν — модуль упругости, Па и коэффициент Пуассона вмещающей среды соответственно

Моделирование адгезионного взаимодействия проводилось с помощью специального слоя, который располагался между мостом и стенкой скважины. Поведение слоя описывается линейно упругим законом следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{pmatrix} = K\varepsilon, \quad (1)$$

где σ_n — напряжение в нормальном направлении к плоскости слоя; σ_s, σ_t — напряжения в двух сдвиговых направлениях, лежащих в плоскости слоя; K — матрица упругости. Обозначим u_n, u_t, u_s — смещения согласно действующим напряжениям $\sigma_n, \sigma_s, \sigma_t$; T_0 — начальная толщина когезионного слоя в один элемент. Тогда компоненты вектора деформаций ε запишутся:

$$\varepsilon_n = \frac{u_n}{T_0}, \quad \varepsilon_s = \frac{u_s}{T_0}, \quad \varepsilon_t = \frac{u_t}{T_0}. \quad (2)$$

Матрица упругости K обеспечивает полностью связанное поведение между всеми компонентами вектора напряжений и вектора деформаций. В случае несвязного поведения все компоненты вне диагонали устанавливаются равными нулю. В рамках данной работы использовалась несвязная модель, поэтому требовалось задать модуль упругости на растяжение/сжатие K_{nn} и модули упругости на сдвиг K_{ss}, K_{tt} , которые для изотропного тела равны. При расчетах упругие параметры K_{nn}, K_{ss}, K_{tt} брались такими же, как у полимерных мостов.

При достижении некоторых критических значений напряжений введенный соединительный слой способен разрушаться, приводя к снижению силы адгезионного взаимодействия. Моделирование данного процесса выполнялось с помощью когезионной модели разрушения (CZM —

Cohesive Zone Model) [5]. При использовании такого подхода предполагается, что существует зона разупрочнения материала непосредственно перед трещиной. В этой зоне возникают напряжения σ , которые связаны со смещениями u по некоторому закону (рис. 2а). Чтобы определить этот закон, требуется задать два параметра: σ_c и G_c . Параметр σ_c является критическим напряжением, а G_c — критической энергией, высвобождаемой при разрушении, которая вычисляется как $G_c = \int_0^{u_f} \sigma du$, где u_f — скачок смещений, соответствующий полному разрушению материала. В данной задаче считается, что при нагрузке материал может испытывать как нормальные, так и сдвиговые напряжения, поэтому для расчетов необходимо определить критическую энергию разрушения в нормальном направлении G_{Ic} и сдвиговом G_{IIc} , а также критическое нормальное напряжение σ_{Ic} и сдвиговое σ_{IIc} .

Характер разрушения материала слоя определяется переменной разрушения D , которая зависит от деформаций за пределом зоны линейной упругости. На рис. 2б приведен примеры функции $D(u)$, где $D = 0$ соответствует неразрушенному состоянию, а $D = 1$ — полному разрушению.

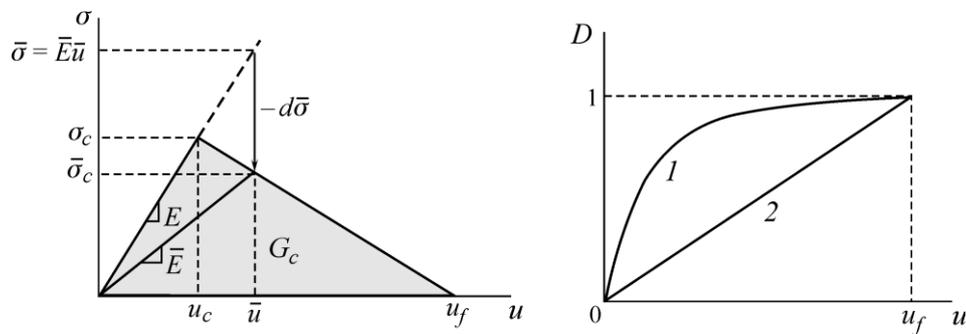


Рис. 2. Зависимость напряжений σ от смещений u (а) и примеры функции разрушения $D(u)$ (б): 1 — экспоненциальный закон разрушения, 2 — линейный закон разрушения

В работе использовался линейный закон разупрочнения материала слоя, основанный на анализе энергии разрушения, и переменная D , которая определяется как

$$D = \frac{e}{u \left(\frac{u - u_c}{u_f - u_c} \right)}, \quad (3)$$

где $e = 2G/\sigma$. Расчет энергии разрушения G может проводиться различными способами. Например, при смешанном типе нагружения и равенстве критических энергий в двух сдвиговых направлениях ($G_{IIc} = G_{IIIc}$) часто используют формулу Бензекгага и Кенане (ВК) [6]

$$G = G_{IIc} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_S}{G_T} \right)^\eta, \quad (4)$$

где η — параметр ВК; $G_T = G_I + G_{II} + G_{III}$ — суммарная энергия; $G_S = G_{II} + G_{III}$ — энергия при сдвиговой нагрузке.

Для инициации процесса разрушения использовался критерий максимальных главных напряжений. Рассмотрим схему, согласно которой определяется развитие разрушения материала слоя. После выполнения критерия инициации разрушения происходит вычисление напряжения согласно линейно упругому закону $\sigma = K\varepsilon$. Далее вычисляется значение переменной D , необходимое для расчета нового состояния материала, при котором критическое напряжение и жесткость K будут определены по правилу

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{Ic} &= (1-D)\sigma_{Ic}, \\ \bar{\sigma}_{IIc} &= (1-D)\sigma_{IIc}, \\ \bar{K}_{ii} &= (1-D)K_{ii},\end{aligned}\tag{5}$$

где $\bar{\sigma}_{Ic}$, $\bar{\sigma}_{IIc}$ — новые значения нормального и сдвигового критических напряжений соответственно; \bar{K}_{ii} — новые параметры матрицы упругости K . Процесс осуществляется на каждом шаге по времени до тех пор, пока не будет достигнуто состояние полного разрушения материала, т. е. выполнено условие $\bar{\sigma}_{Ic} = \bar{\sigma}_{IIc} = 0$, $\bar{K}_{ii} = 0$.

Рассмотрим пример расчета напряжений в окрестности герметизированного интервала, где будем использовать описанный подход для моделирования взаимодействия между стенкой скважины и полимерными мостами через соединительный слой. Для численной реализации модели развития трещины выбран метод конечных элементов. Задача рассматривалась в осесимметричной постановке, где ось симметрии z совпадала с осью скважины. Ось y проходит через центр межпакерного интервала. Дискретизация расчетной области и некоторые параметры задачи представлены на рис. 3.

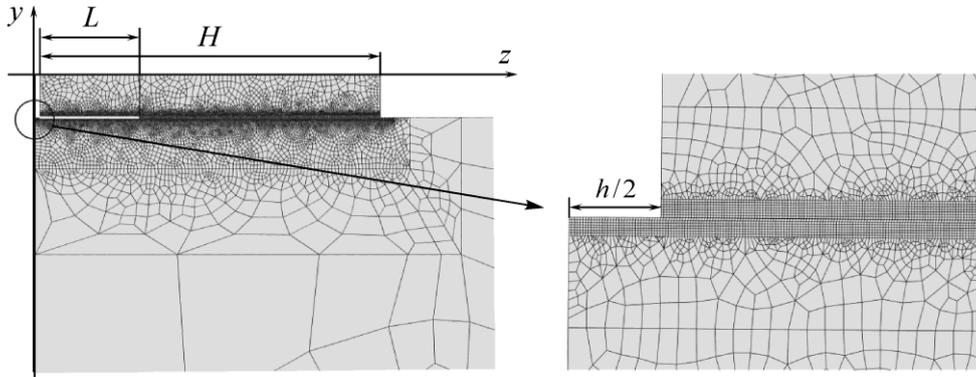


Рис. 3. Пример дискретизации расчетной области и некоторые параметры задачи (L — длина разрушения когезионного слоя)

При расчетах моделировался слой между мостом и стенкой скважины мощностью $T_0 = 10^{-5}$ м. Во всех дальнейших экспериментах использовались следующие общие параметры: $h = 0.01$ м; $H = 0.4$ м; $E = 3.6 \cdot 10^9$ Па; $\nu = 0.3$; $a = 0.05$ м. Критическая энергия разрушения $G_c = 200$ Н/м. Упругие параметры слоя принимались такими же, как у полимерных мостов.

В первом численном эксперименте исследовалось влияние критического сдвигового напряжения на длину разрушенной части соединительного слоя. Рассматривались два основных случая: мост с модулями упругости $E_1 = 2.5 \cdot 10^8$ Па и $E_2 = 2.5 \cdot 10^{10}$ Па. В обоих случаях коэффициент Пуассона был равен 0.3. В серии экспериментов изменялось критическое напряжение на сдвиг в долях от давления жидкости в интервале разрыва P . Результаты приведены на рис. 4а. Значение 0.4 по вертикальной оси соответствует полному разрушению связи между мостом и стенкой скважины, так как в эксперименте использовались мосты длиной 0.4 м. Видно, что при низких значениях критических сдвиговых напряжений длина разрушенной части слоя для жесткого моста меньше, чем для мягкого. На рис. 4б показано состояние соединительного слоя, характеризующееся значением переменной разрушения D в зависимости от расстояния вдоль моста l для $E_1 = 2.5 \cdot 10^8$ Па. При этом критическое сдвиговое напряжение σ_{IIc} равнялось 0.075 от давления жидкости в интервале разрыва P . Значение, равное 1, соответствует полному разрушению слоя.

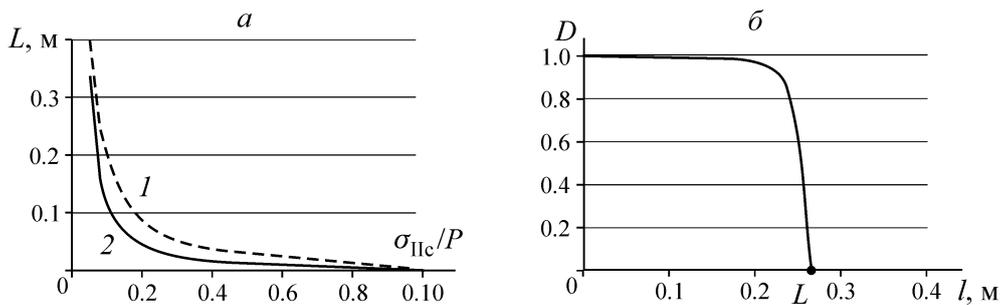


Рис. 4. Зависимости длины разрушенной части слоя L от критического сдвигового напряжения (a) $1 — E_1 = 2.5 \cdot 10^8$; $2 — E_2 = 2.5 \cdot 10^{10}$ Па, и график переменной разрушения D от расстояния вдоль моста l (b)

Далее проводилась серия численных экспериментов, в которых исследовалось, как изменяется напряженное состояние на стенке скважины при различной степени разрушения соединительного слоя, при этом модуль упругости моста $E_2 = 2.5 \cdot 10^{10}$ Па. Степень разрушения слоя измерялась с помощью критического сдвигового напряжения σ_{IIc} . Уменьшение σ_{IIc} приводит к увеличению разрушенной области соединительного слоя и наоборот (рис. 4а). На рис. 5 представлены осерастягивающие и осесимметричные напряжения при различных критических значениях напряжений на сдвиг.

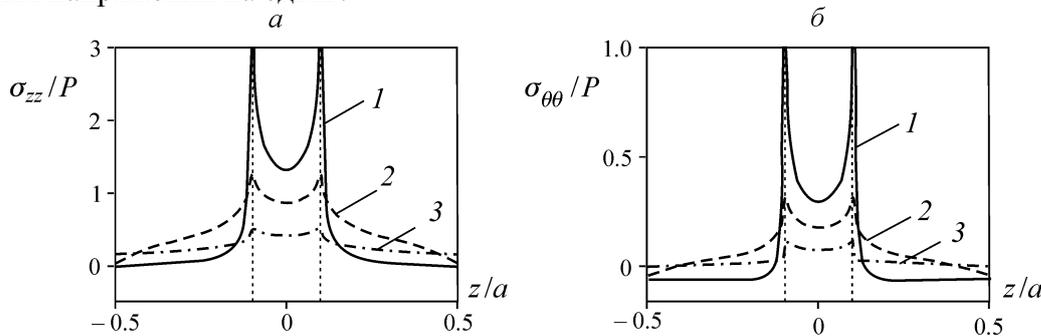


Рис. 5. Осерастягивающие (a) и осесимметричные (b) напряжения вдоль стенки скважины: $1 — \sigma_{IIc} = P$; $2 — \sigma_{IIc} = 0.3P$; $3 — \sigma_{IIc} = 0.1P$

Видно, что при увеличении степени разрушенности соединительного слоя значения осевых и осесимметричных напряжений в окрестности герметизированного интервала уменьшаются. Использование мягкого моста, т. е. моста с модулем упругости E_1 , дает схожие результаты с рис. 5. Дополнительно рассчитывались напряжения при изменении модуля упругости моста в диапазоне $2.5 \cdot 10^8 - 2.5 \cdot 10^{11}$ Па, а также при изменении модуля упругости слоя в том же диапазоне. Результаты показали, что это практически не влияет на решение.

ВЫВОДЫ

С помощью метода конечных элементов выполнен расчет действующих в окрестности скважины напряжений при герметизации интервала гидроразрыва несъемными мостами из полимерного материала. В ходе численных экспериментов учитывалось адгезионное взаимодействие между поверхностью моста и стенкой скважины, что препятствует перемещению мостов под действием давления рабочей жидкости.

Полученные результаты позволяют оценить влияние критического сдвигового напряжения на длину разрушенной части соединительного слоя в зависимости от его упругих свойств. Установлено, что длина разрушенной части слоя в случае жесткого моста меньше, чем в случае мягкого. Определена зависимость переменной разрушения, характеризующей состояние слоя, от расстояния вдоль моста. Расчеты показали, что при увеличении степени разрушенности соединительного слоя значения осевых и осесимметричных напряжений в окрестности герметизированного интервала уменьшаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kurlenya M. V., Serdyukov S. V., Patutin A. V., and Shilova T. V.** Stimulation of underground degassing in coal seams by hydraulic fracturing method, *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 975–980. [Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В., Шилова Т. В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 3–9.]
2. **Serdyukov S. V., Azarov A. V., and Patutin A. V.** A method of underground hydraulic fracturing based on polymer bridges, *Interexpo Geo-Siberia*, 2018, vol. 6, pp. 180–187. (in Russian) [Сердюков С. В., Азаров А. В., Патутин А. В. Способ шахтного гидравлического разрыва пласта на основе полимерных мостов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2018. — Т. 6. — С. 180–187.]
3. **Kehle O. R.** The determination of tectonic stresses through analysis of hydraulic well fracturing, *J. Geophys. Research*, 1964, vol. 69, no. 2, pp. 259–273.
4. **Serdyukov S. V., Azarov A. V., and Patutin A. V.** Sealing of hydraulic fracturing interval with polymer bridges in coal seam, *IOP Conf. Ser., Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 262, Paper 012065.
5. **Ortiz M. and Pandolfi A.** Finite deformation irreversible cohesive elements for three dimensional crack propagation analysis, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 1999, vol. 44, no. 9, pp. 1267–1282.
6. **Benzeggagh M. L. and Kenane M.** Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus, *Compos. Sci. Technol.*, 1996, vol. 56, no. 4, pp. 439–449.