

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-6-15-19

УДК 622.324.5

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ КУЗБАССА

GEOMECHANICAL ESTIMATION OF HYDRAULIC FRACTURE'S INFLUENCE ON PERMEABILITY OF COAL SEAM IN CONDITIONS OF KUZBASS

Шевцов Александр Григорьевич¹

аспирант, e-mail: lexshevtsov@mail.ru

Aleksandr G. Shevtsov, postgraduate student

Хямяляйнен Вениамин Анатольевич¹

доктор техн. наук, профессор, e-mail: vah@kuzstu.ru

Veniamin A. Khyamyalyaynen, Dr. of Techn. Sciences, professor

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Аннотация: При добыче метана угольных пластов наиболее распространенной технологией повышения проницаемости коллектора является гидравлический разрыв пласта. При реализации данной технологии в угольном пласте происходит расширение природного кливажа и образование новой сети трещин. В данной работе исследовано влияние указанных трещин на напряженно-деформированное состояние массива горных пород в условиях Кузнецкого угольного бассейна методом численного геомеханического моделирования с помощью программного комплекса ANSYS. Выполнены расчеты для четырех случаев проведения гидроразрыва, проведен сравнительный анализ результатов моделирования. Результаты анализа показали, что трещины гидроразрыва одинаковой геометрии в различных условиях могут приводить к различному изменению напряжений. Выполнена оценка изменения проницаемости целевых угольных пластов в результате образования трещин гидроразрыва, выделены зоны повышенной и пониженной проницаемости. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для эффективного извлечения метана угольных пластов с применением технологии гидроразрыва необходимо создание протяженных трещин, которые будут вызывать разгрузку угольного пласта от напряжений, и увеличение его проницаемости. Наличие в массиве выше- и нижележащих угольных пластов небольшой мощности благодаря разгрузке массива в целом будет также вносить свой вклад в дебит скважины даже без проведения в них гидроразрыва. Интерес представляет продолжение работ в части исследования влияния на напряженно-деформированное состояние угольного пласта и его проницаемость различных конструкций метаногольных скважин.

Ключевые слова: метан угольных пластов, угольный пласт, проницаемость, гидравлический разрыв пласта, трещина, напряженно-деформированное состояние, геомеханическое моделирование.

Abstract: In coalbed methane production, the most common technology for increasing permeability of reservoir is hydraulic fracturing. With the implementation of this technology in coal seam is the expansion of natural cleats and the formation of a new network of fractures. In this article, the influence of hydraulic fractures of coal seams on the stress-strain state of the rock massif in the conditions of the Kuznetsk coal basin is investigated by the method of numerical geomechanical modeling using the ANSYS software. Calculations were carried out for four fracturing cases, a comparative analysis of modeling results was carried out. The results of the analysis showed that hydraulic fractures of the same geometry under different conditions lead to different stress changes. Estimated permeability changes of the target coal seams in results of the formation of hydraulic fractures, identified areas of high and low permeability. The obtained results allow us to conclude that for the effective extraction of coalbed methane with the use of hydraulic fracturing technology it is necessary to create extended fractures that will cause the unloading of the coal seam from stresses and increase its permeability. The presence in the massif of higher and lower coal seams of low thickness due to the unloading of the massif as a whole, will also contribute to the production of the well even without hydraulic fracturing. Of interest is the con-

tinuation of work in the part of the study of the impact on the stress-strain state of the coal seam and its permeability of various constructions of coalbed methane wells.

Keywords: coalbed methane, coal seam, permeability, hydraulic fracturing, fracture, stress-strain state, geomechanical modeling.

Промысловая добыча метана угольных пластов, как и любого нетрадиционного источника газа, для обеспечения рентабельных дебитов требует применения различных технологий воздействия на коллектор. В связи с тем, что газ в угольных пластах находится преимущественно в сорбированном состоянии, среди данных технологий выделяют методы интенсификации газоотдачи угольных пластов (например, замещение сорбированного метана углекислым газом) и методы повышения их проницаемости (пневмогидродинамическое воздействие с образованием каверн, гидравлический разрыв пласта) [1]. В мировой практике разработки метаноугольных месторождений [2-5], в т. ч. и в Кузбассе, на первых месторождениях метана угольных пластов в Российской Федерации [6], наибольшее распространение получила технология гидравлического разрыва пласта (ГРП).

В процессе реализации технологии ГРП в угольный пласт под высоким давлением нагнетается технологическая жидкость (в основном вода) для расширения существующего кливажа и образования новой сети трещин, которые на следующей стадии заполняют расклинивающим агентом

ким образом, после проведения ГРП в метаноугольной скважине ее дебит будет зависеть не только от проницаемости угольного пласта, но и от проницаемости закрепленной трещины гидроразрыва.

Определение проницаемости трещины ГРП регламентируется международным стандартом ISO 13503-5 [7], что позволяет на основе лабораторных испытаний определить проницаемость упаковки пропанта при различных значениях горного давления, в т. ч. и в соответствующих пластовым. Что касается проницаемости угольного пласта, ее прямое определение возможно лишь в рамках гидродинамических исследований (ГДИС) в открытом стволе скважины до работ по гидроразрыву. Значения, полученные в результате ГДИС после ГРП, будут характеризовать лишь проницаемость прискважинной зоны, закрепленной пропантом. Таким образом, вопрос изменения проницаемости угольного пласта после проведения гидроразрыва является достаточно актуальным.

С целью оценки влияния трещины гидроразрыва на проницаемость угольного пласта в условиях Кузбасса был проведен анализ литературных

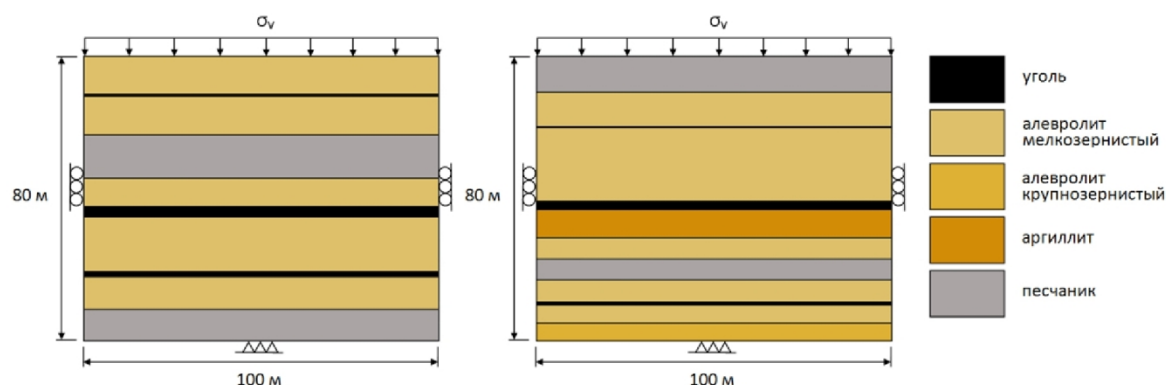


Рис. 1. Расчетные модели массивов горных пород
 Fig. 1. Design models of rock massifs

Таблица 1 – Принятые физико-механические свойства горных пород
 Table 1 – Accepted physical and mechanical properties of rocks

Горная порода	песчаник	алевролит		аргиллит	уголь
		крупно-зернистый	мелко-зернистый		
Модуль Юнга, МПа	$0,327 \cdot 10^5$	$0,304 \cdot 10^5$	$0,251 \cdot 10^5$	$0,166 \cdot 10^5$	$0,084 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,232	0,220	0,180	0,203	0,061

(керамическим пропантом или преимущественно кварцевым песком) для сохранения их проводящих свойств после прекращения нагнетания. Та-

источников по данному вопросу. По результатам анализа определено, что проницаемость угольных пластов в значительной степени зависит от дей-

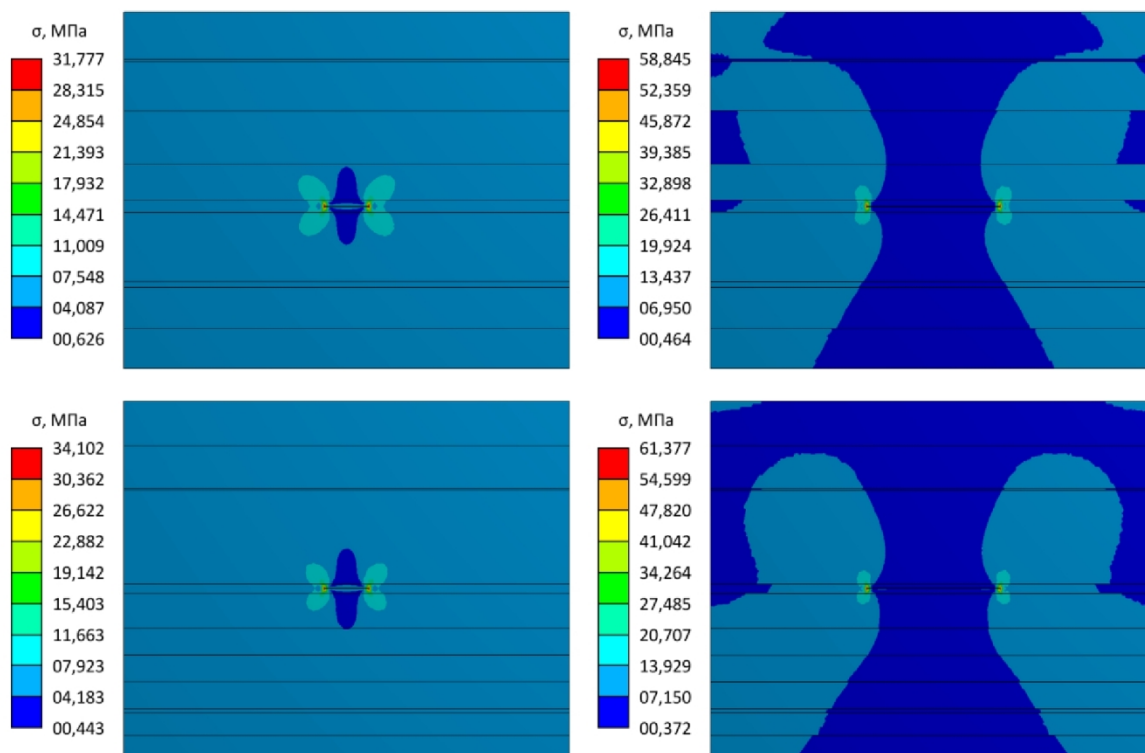


Рис. 2. Результаты геомеханического моделирования
Fig. 2. Results of geomechanical modeling

ствующего в массиве горных пород напряженно-деформированного состояния (НДС) [8]. В свою очередь, для исследования НДС в настоящее время широко используется численное геомеханическое моделирование [9].

Так, в работе [10] с целью выбора оптимальных схем разгрузки массива горных пород от напряжений путем создания трещин гидроразрыва при проведении шахтной дегазации представлены результаты численного геомеханического моделирования в программном комплексе FLAC, реализующем расчет методом конечных разностей. Применение результатов данной работы для условий Кузбасса накладывает ряд недостатков. В частности, разрез углепородного массива в основе расчетной модели и физико-механические свойства пород взяты для условий США, где основными углеводородными породами являются песчаники, известняки и сланцы, в то время как в Кузбассе, помимо песчаников, это преимущественно аргиллиты и алевролиты.

Для исключения указанных недостатков на примере методики, изложенной в работе [10], были подготовлены две расчетные модели, за основу которых взят один из стратиграфических разрезов Ерунаковского геолого-экономического района Кузбасса [11]. Первая модель (рис. 1, слева) содержит целевой угольный пласт мощностью 2,74 м, вторая (рис. 1, справа) содержит целевой угольный пласт мощностью 2,08 м. Различие в стратиграфии расчетных моделей обусловлено возмож-

ностью последующего сравнительного анализа.

Высота моделей составляет 80 м, ширина – 100 м. В качестве граничных условий для обеих моделей нижняя граница принята неподвижной, боковые стороны могут перемещаться по вертикали. К верхней границе приложено давление, соответствующее горному. Физико-механические свойства горных пород (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) также взяты для условий Ерунаковского геолого-экономического района [11] и приведены в таблице 1.

На основе подготовленных расчетных моделей было выполнено численное геомеханическое моделирование в программном комплексе ANSYS R19.2 Academic, реализующем расчет методом конечных элементов. Данный метод расчета был выбран благодаря возможности построения геометрии любой сложности и степени детализации. В данном случае и в перспективе получение результатов, адекватно описывающих реальное распределение напряжений при моделировании угольных пластов с трещинами гидроразрыва (раскрытие которых может составлять и порядка нескольких миллиметров), невозможно без обеспечения должной степени детализации.

Для каждой расчетной модели были смоделированы по два варианта горизонтальной трещины ГРП раскрытием 0,1 м – длиной 10 м и 30 м. Влиянием ствола скважины на НДС было решено пренебречь. С учетом того, что горизонтальные трещины гидроразрыва образуются на сравни-

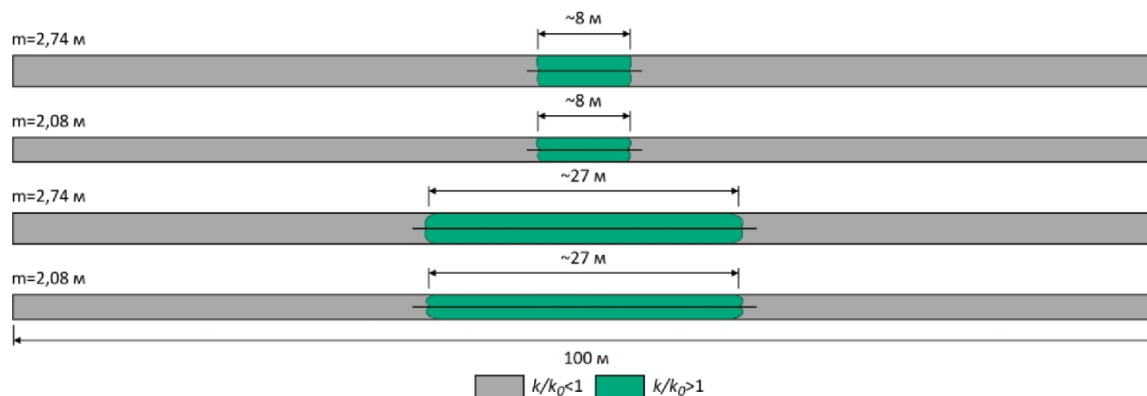


Рис. 3. Результаты оценки изменения проницаемости угольных пластов
Fig. 3. Results of estimation of coal seams permeability

тельно небольшой глубине (когда горизонтальные напряжения превышают геостатическое), горное давление было принято 7,063 МПа (что соответствует глубине порядка 300 м). Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Как видно из полученных результатов, увеличение длины трещины гидроразрыва значительно снижает действующие в массиве горных пород напряжения. Более того, при создании трещины длиной 30 м наблюдается разгрузка как в наработанном, так и в подработанном угольных пластах небольшой мощности. Что касается различия в слагающих массивы горных породах, при создании трещины длиной 10 м особых изменений не наблюдается. При увеличении длины трещины заметно, что форма области разгрузки меняется – наличие в массиве мощного пласта песчаника, сближенного с угольным пластом, вызывает распределение напряжений вдоль плоскости напластования.

Для оценки изменения проницаемости исследуемых угольных пластов была использована следующая формула [8]:

$$\frac{k}{k_0} = e^{-\alpha C_f (\sigma - \sigma_0)} \quad (1)$$

где k/k_0 – отношение проницаемости угольного пласта при текущем напряжении к начальной проницаемости угольного пласта; α – коэффициент чувствительности угольного пласта к напряжениям (~3); C_f – коэффициент сжимаемости угольного пласта (~0,058 МПа⁻¹); σ – текущее напряжение, действующее на угольный пласт; σ_0 – начальное напряжение (6,429 МПа по результатам моделирования без трещин ГРП для обеих расчетных моделей).

Результаты оценки изменения проницаемости для исследуемых угольных пластов приведены на рис. 3 в виде рассчитанных по формуле (1) обла-

стей разгрузки (отношение k/k_0 для которых выше единицы) и областей повышенных напряжений (k/k_0 для которых ниже единицы).

Различие вмещающих пород в двух вариантах горно-геологических условий влияет на величину области разгрузки всего массива, при этом в целевых пластах с трещинами гидроразрыва разгрузка является практически одинаковой. В случае с трещиной длиной 10 м ширина области разгрузки составила ~8 м, в случае с трещиной длиной 30 м, составила ~27 м. Увеличение проницаемости наблюдается по всей мощности целевых угольных пластов вдоль простирания трещины ГРП, за исключением концов трещин, являющихся концентраторами напряжений.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для эффективного извлечения метана угольных пластов скважинами с поверхности с применением технологии ГРП необходимо создание протяженных трещин, которые будут вызывать разгрузку угольного пласта от напряжений и увеличение его проницаемости. Наличие во вскрытом массиве выше- и нижележащих угольных пластов небольшой мощности благодаря разгрузке массива в целом будет также вносить свой вклад в дебит скважины даже без проведения в них гидроразрыва.

В заключение стоит отметить, что геомеханическое моделирование является подходящим инструментом для оценки проницаемости угольного пласта вследствие изменения его напряженно-деформированного состояния. Возможный интерес представляет продолжение работ в данном направлении, в т. ч. в части исследования влияния на НДС угольного пласта и его проницаемость различных конструкций метаноугольных скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ножкин, Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 271 с.
2. Кузнецкий бассейн – крупнейшая сырьевая база промышленной добычи метана из угольных пластов / А.М. Карасевич, В.Т. Хрюкин, Б.М. Зимаков, Н.Г. Матвиенко, С.С. Золотых, В.Г. Натура, Т.С. Попова. – М.: Издательство Академии горных наук, 2001. – 64 с.
3. Rudy E. Rogers, Kumar Ramurthy, Gary Rodvelt, Mike Mullen. Coal Bed Methane: Principles and Practices. 2nd ed. Starkville, MS: Oktibbeha Publishing Co., 2007. 504 p.
4. Coal Bed Methane: From Prospect to Pipeline. 1st ed. Edited by Pramod Thakur, Steve Schatzel, Kashy Aminian. San Diego, CA, USA: Elsevier Inc., 2014. 440 p.
5. Pramod Thakur. Advanced reservoir and production engineering for coal bed methane. 1st ed. Morgantown, USA: Elsevier Inc., 2017. 210 p.
6. Золотых, С.С. Из недр кузбасских кладовых – горючий газ метан / С. С. Золотых, В. С. Арнаутков, Е. В. Сурин. – Кемерово: АИ «Кузбассвуиздат», 2015. – 247 с.
7. ISO 13503-5:2006. Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 5: Procedures for measuring the long-term conductivity of proppants, International Organization for Standardization, 2006, 25 p.
8. John Seidle. Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering. 1st ed. Tulsa, USA: PennWell Corporation, 2011. – 401 p.
9. Mark D. Zoback. Reservoir Geomechanics. 1st ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. – 461 p.
10. Зиновьев А.А. Численное моделирование процесса разгрузки угленосного массива / А.А. Зиновьев, А.В. Патутин, С.В. Сердюков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. Т.2. Новосибирск: СГГА. – 2012. – С. 174-178.
11. Угольная база России. Том II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский, бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.

REFERENCES

1. Nozhkin, N.V. Advance degasation of coal fields. – Moscow: Nedra, 1979. – 271 p.
2. Kuznetsky basin – the largest raw material base for commercial production of methane from coal seams / A.M. Karasevich, V.T. Khryukin, B.M. Zimakov, N.G. Matvienko, S.S. Zolotykh, V.G. Natura, T.S. Popova. – Moscow: Publishing of Academy of mining sciences, 2001. – 64 p.
3. Rudy E. Rogers, Kumar Ramurthy, Gary Rodvelt, Mike Mullen. Coal Bed Methane: Principles and Practices. 2nd ed. Starkville, MS: Oktibbeha Publishing Co., 2007. 504 p.
4. Coal Bed Methane: From Prospect to Pipeline. 1st ed. Edited by Pramod Thakur, Steve Schatzel, Kashy Aminian. San Diego, CA, USA: Elsevier Inc., 2014. 440 p.
5. Pramod Thakur. Advanced reservoir and production engineering for coal bed methane. 1st ed. Morgantown, USA: Elsevier Inc., 2017. 210 p.
6. Zolotykh, S.S. From the depths of Kuzbass storages – fuel methane gas / S. S. Zolotykh, V.S. Arnautov, E.V. Surin. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2015. – 247 p.
7. ISO 13503-5:2006. Petroleum and natural gas industries – Completion fluids and materials – Part 5: Procedures for measuring the long-term conductivity of proppants, International Organization for Standardization, 2006, 25 p.
8. John Seidle. Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering. 1st ed. Tulsa, USA: PennWell Corporation, 2011. – 401 p.
9. Mark D. Zoback. Reservoir Geomechanics. 1st ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. – 461 p.
10. Zinoviev, A.A. Numerical modeling of the unloading process of coal rock massif / A.A. Zinoviev, A.V. Patutin, S.V. Serdyukov // Interexpo GEO-Siberian-2012. Vol. 2. Novosibirsk: SSGA. – 2012. – S. 174-178.
11. Coal base of Russia. Volume II. Coal basins and fields of Western Siberia (Kuznetsky, Gorlovsky, West Siberian basins; fields of Altai and Altai Republic). – Moscow: Geoinformtsentr LLC, 2003. – 604 p.

Поступило в редакцию 20.12.2018

Received 20 December 2018