

УДК 622.35 © Ю.М. Леконцев✉, П.В. Сажин, 2024

UDC 622.35 © Yu.M. Lekontsev✉, P.V. Sazhin, 2024

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН»
(ФИЦ УУХ СО РАН), 650065, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: kvi194917@mail.ru

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Kemerovo, 650065, Russian Federation
✉ e-mail: kvi194917@mail.ru

Исследование траектории движения режущего органа щелеобразователя*

Research into the motion path of the fracture former cutter

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-115-86-90>

ЛЕКОНЦЕВ Ю.М.

Канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
Института угля ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр
угля и углехимии
Сибирского отделения
Российской академии наук»,
650065, г. Кемерово, Россия,
e-mail: kvi194917@mail.ru

САЖИН П.В.

Канд. техн. наук,
старший научный сотрудник
Института угля ФГБНУ «Федеральный
исследовательский центр
угля и углехимии
Сибирского отделения
Российской академии наук»,
650065, г. Кемерово, Россия,
e-mail: pavel301080@mail.ru

Шахтовые исследования по применению технологии направленного гидроразрыва (НГР) показали необходимость создания иницирующей щели (ИЩ) на стенках скважин максимально возможного диаметра в зависимости от диаметра скважины. Предложено осуществить увеличение этого параметра путем выбора рациональной траектории движения режущего органа в процессе выдвигания. С этой целью рассмотрены и проанализированы существующие схемы и определена наиболее рациональная из них. Приведены технические решения и теоретические обоснования параметров щелеобразователя, обеспечивающих повышение эффективности реализации метода направленного гидроразрыва. Проведены краткий обзор и анализ конструктивных особенностей устройств, предназначенных для нарезания ИЩ. Определены параметры перспективной конструкции щелеобразователя с рычажной кинематикой выдвигания режущего органа, обеспечивающие максимальный его выход по рациональной траектории нарезания иницирующей щели. Проведен прочностной расчет режущего органа щелеобразователя, по результатам которого были определены требуемые размеры его поперечного сечения.

Ключевые слова: направленный гидроразрыв, щелеобразователь, режущий орган, иницирующая щель, породный массив.

Для цитирования: Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Исследование траектории движения режущего органа щелеобразователя // Уголь. 2024;(115):86-90. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-86-90.



* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191).

Abstract

Mine studies into the application of the directional hydraulic fracturing (DHF) technology has proved the need to create initiating fractures (IF) on the borehole walls of the maximum possible diameter depending on the size of the borehole. It is suggested to increase this parameter by selecting a rational path of motion of the cutter during its extension. The existing schemes have been considered and analyzed for this purpose and the most rational one has been identified. Technical solutions and theoretical justifications of the fracture former parameters are presented, which ensure increased efficiency of implementing the directional hydraulic fracturing method. A brief review and analysis of the design features of devices intended to create the initiating fractures have been carried out. Parameters have been determined for a prospective design of the fracture former with lever kinematics of the cutter extension, which provide its maximum extension along the rational path to create the initiating fracture. Calculations of the cutter strength of the fracture former have been performed, and the required dimensions of its cross-section have been determined.

Keywords

Directional hydraulic fracturing, fracture former, cutter, initiating fracture, rock mass.

For citation

Lekontsev Yu.M., Sazhin P.V. Research into the motion path of the fracture former cutter. *Ugol*. 2024;(115):86-90. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-86-90.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее острых проблем современных технологий добычи угля подземным способом является снижение нагрузок на механизированные комплексы, охраняемые целики, призабойную зону пологих угольных пластов при ведении очистных работ со стороны основной кровли.

Наиболее перспективной, на наш взгляд, технологией, позволяющей управлять или влиять на опорное давление, является метод направленного гидроразрыва (НГР). Однако проводить НГР в породном массиве из пробурен-

ных скважин невозможно без нарезания на их стенках иницирующих щелей (ИЩ), в полости которых закладывается направленность искусственной трещины.

В настоящее время в широком ассортименте представлены устройства для нарезания иницирующих щелей на стенках скважин, разработкой которых заняты авторские коллективы в целом ряде научно-исследовательских институтов в России [1, 2]. В ФИЦ УУХ СО РАН и других институтах горного профиля для решения указанной задачи разработан ряд перспективных устройств, позволяющих производить щелеобразование в скважинах и обеспечивать развитие искусственных трещин в заданном направлении как вдоль, так и поперек центральной оси скважины. На *рис. 1* представлена схема гидравлического щелеобразователя разработки ФГБУ Институт угля СО РАН для прочных пород (более 4 ед. по шкале проф. М.М. Протодьяконова) [3].

Анализ подобных конструкций показывает, что они ограничены по возможности увеличения диаметра нарезаемой ИЩ вследствие своих конструктивных особенностей, и их использование с целью, например, проведения гидроразрывов для дегазации угольных пластов неэффективно.

Таким образом, в случае, когда появляется необходимость нарезания ИЩ в мягких породах (менее 4 ед. по шкале проф. М.М. Протодьяконова) встает вопрос разработки неординарных по кинематике выдвижения режущих органов конструкций щелеобразователей, обеспечивающих максимально возможный размер нарезаемой иницирующей щели из скважин среднего по диаметру размера (76-110 мм).

Как было показано в работах [4, 5], в горных породах с низкой прочностью и высокой естественной трещиноватостью необходимо создавать искусственные трещины большего диаметра (опытным путем установлено, что отношение диаметра ИЩ ($d_{инщ}$) к диаметру дегазационной скважины ($d_{ск}$) должно быть не менее пяти. Например, щелеобразователь (*рис. 2*) позволяет создавать ИЩ диаметром, равным пяти диаметрам дегазационной скважины [6].

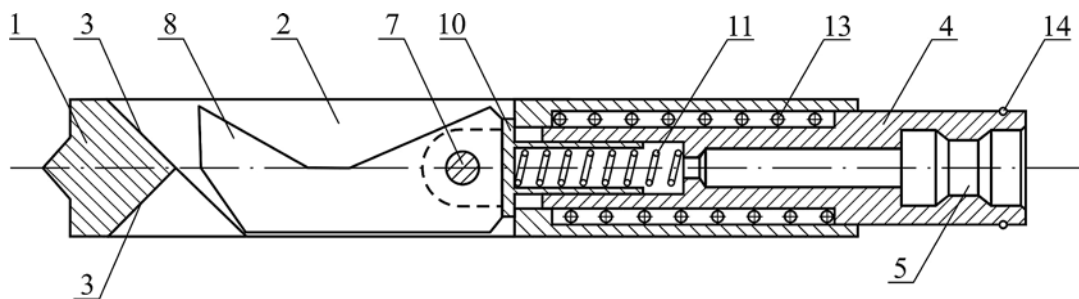


Рис. 1. Схема щелеобразователя разработки ФГБУ «Институт угля СО РАН»: 1 – стакан; 2 – продольное окно; 3 – перекрестные оппозитные направляющие уклоны; 4 – толкатель; 5 – резьбовое отверстие; 6 – проушины; 7 – ось; 8 – режущий орган; 9 – торцовая часть режущего органа; 10 – направляющая втулка; 11 – пружина; 12 – отверстие; 13 – пружина возврата; 14 – упорное кольцо

Fig. 1. A schematic diagram of the fracture former developed by the Coal Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences: 1 – a cup; 2 – a lengthwise window; 3 – cross oppositional guide slopes; 4 – a pusher; 5 – a threaded hole; 6 – lugs; 7 – an axis; 8 – the cutter; 9 – the end part of the cutter; 10 – a guide sleeve; 11 – a spring; 12 – a hole; 13 – a return spring; 14 – a thrust ring

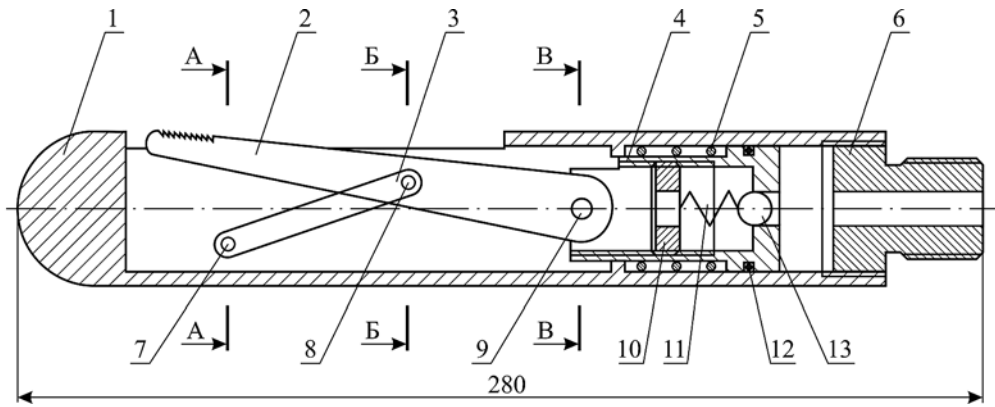


Рис. 2. Схема щелеобразователя гидравлического по углю (ЩГУ): 1 – корпус; 2 – режущий орган; 3 – кронштейн; 4 – поршень; 5 – пружина возврата; 6 – переходник; 7, 8, 9 – оси крепления; 10 – опорная регулирующая гайка; 11 – пружина; 12 – уплотнение; 13 – шарик

Fig. 2. A schematic diagram of the hydraulic fracture former for coal (SchGU): 1 – the body; 2 – the cutter; 3 – a bracket; 4 – a piston; 5 – a return spring; 6 – an adapter; 7, 8, 9 – axes of fastening; 10 – a supporting regulating nut; 11 – a spring; 12 – a seal; 13 – a ball

Щелеобразователь работает следующим образом. К переходнику 6 присоединяется жесткий буровой став станка, и устройство вводится в заранее пробуренную скважину на расчетную глубину. С пульта станка включаются подача рабочей жидкости и вращатель бурового става. Рабочая жидкость под давлением через внутренние отверстия в штангах бурового става поступает внутрь стакана 1. Поршень 4 под действием давления рабочей жидкости начинает движение, сжимая пружину возврата 5, и перемещает режущий орган 2, который, упираясь в ось 8, вызывает поворот кронштейна 3 относительно осей 7 и 8. Вращательное движение кронштейна 3 обеспечивает выход режущего органа 2 через продольное окно из корпуса 1 и нарезание им на стенках скважины инициирующей щели. Внутренний клапан щелеобразователя, состоящий из опорной регулирующей гайки 10, пружины 11 и шарика 13, предназначен для обеспечения промывки области скважины, в которой производится нарезание ИЩ, и настраивается индивидуально для каждой скважины, в зависимости от свойств массива, в котором производится работы.

Возвращаясь к технологическим особенностям реализации технологии гидроразрыва в прочных породах, основным неизменяемым общепринятым параметром является диаметр скважины, который составляет 45 мм. Это обусловлено тем, что при проведении НГР из скважин большего диаметра значительно усложняется процесс ее герметизации при проведении работ.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА ВЫДВИЖЕНИЯ НОЖА

Результаты физических экспериментов по исследованию режимов работы ножа показывают, что его выдвижение из корпуса устройства для эффективной резки породы должно осуществляться прямолинейно по нормали к оси корпуса [7]. Для определения зависимости траектории кончика ножа от перемещения его основания и положения точки крепления кронштейна к корпусу устройства рассмотрим следующую кинематическую схему (рис. 3).

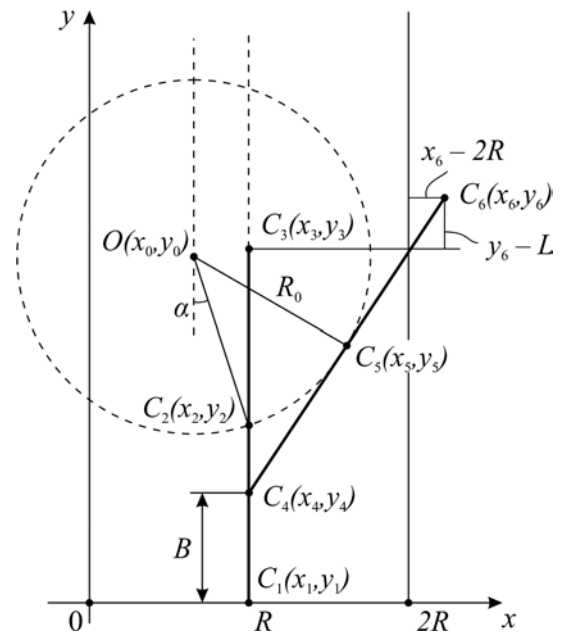


Рис. 3. Кинематическая схема выдвижения ножа
Fig. 3. A kinematic scheme of the knife extension

В процессе перемещения основания ножа вдоль оси корпуса устройства на величину B в точки C_1, C_2, C_3 переходят в точки C_4, C_5, C_6 соответственно, при этом их координаты принимают следующие значения:

$$\begin{aligned} C_1(x_1, y_1) &\rightarrow C_4(x_4, y_4), \\ C_2(x_2, y_2) &\rightarrow C_5(x_5, y_5) \\ C_3(x_3, y_3) &\rightarrow C_6(x_6, y_6) \end{aligned} \quad (1)$$

или

$$\begin{aligned} C_1(R, 0) &\rightarrow C_4(R, B), \\ C_1(R, L/2) &\rightarrow C_5(x_5, y_5), \\ C_1(R, L) &\rightarrow C_6(x_6, y_6), \end{aligned} \quad (1^*)$$

где R – радиус корпуса устройства, м; L – длина ножа, м.

С учетом того, что кронштейн длиной R_0 шарнирно крепится к середине ножа, запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} (x_5 - x_0)^2 + (y_5 - y_0)^2 = R_0^2 \\ (x_5 - R)^2 + (y_5 - B)^2 = \frac{L^2}{4}, \end{cases} \quad (2)$$

где x_0, y_0 – координаты точки $O(x_0, y_0)$ закрепления кронштейна в корпусе устройства.

Вычитая второе уравнение из первого, находим y_5 в виде:

$$y_5 = \frac{(R - x_0)}{(B - y_0)} x_5 + \frac{R^2 + R_0^2 + B - \frac{L^2}{4} - x_0^2 - y_0^2}{2(B - y_0)}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в первое уравнение системы (2) и решая получившееся квадратное уравнение, находим значение x_5 , а затем определяем y_5 из уравнения (3).

Координаты точек C_5 и C_6 связаны между собой следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x_6 &= 2x_5 - R \\ y_6 &= 2y_5 - B. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, можно рассчитать положение кончика ножа (точки C_6) в зависимости от R, L, B, R_0 и координат точки $O(x_0, y_0)$. Для удобства дальнейшего анализа введем угол α между вертикалью и осью кронштейна OC_2 в начальный момент времени (см. рис. 3), при этом:

$$\begin{aligned} x_0 &= R - R_0 \sin \alpha, \\ R_0 &= \left(y_0 - \frac{L}{2} \right) / \cos \alpha. \end{aligned}$$

На первом этапе расчетов оценивали влияние угла α на выход кончика ножа за пределы корпуса устройства при росте B от 0 до 90 мм (см. рис. 3). Согласно техническим особенностям разрабатываемого инструмента длина ножа L равна 150 мм, а радиус корпуса $R = 45$ мм. Значение y_0 принималось равным 150 мм. Для этого случая получены траектории движения кончика ножа в зависимости от угла α (рис. 4).

Полученные результаты показывают, что чем меньше угол α , тем больше выход ножа за пределы корпуса по горизонтальной оси. При увеличении угла α наблюдается значительный уход ножа по вертикали, это приводит к его неравномерному износу и дополнительным нагрузкам на инструмент при резке породы. Наименьший угол α , позволяющий ножу свободно выдвигаться из корпуса при перемещении его основания и при этом не заклиниваться в исходном положении, составляет 5° . Для этого значения были рассчитаны различные положения точки y_0 для оптимизации траектории перемещения точки C_6 (рис. 5).

В результате выполненных расчетов установлено, что оптимальная траектория движения кончика ножа для взаимодействия с массивом происходит при $y_0 = 160$ мм; его отклонение по вертикали при этом находится в пределах 3 мм и не приводит к негативному влиянию на работоспособность и надежность устройства.

Из графика, представленного на рис. 5, следует, что при рациональной кинематической схеме щелеобразовате-

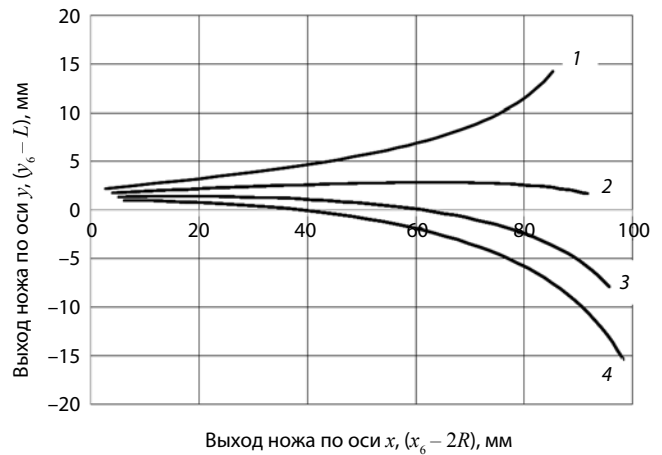


Рис. 4. Траектории кончика ножа при $y_0 = 150$ мм:

1 – $\alpha = 15^\circ$; 2 – $\alpha = 10^\circ$; 3 – $\alpha = 5^\circ$

Fig. 4. Paths of the knife tip at $y_0 = 150$ mm:

1 – $\alpha = 15^\circ$; 2 – $\alpha = 10^\circ$; 3 – $\alpha = 5^\circ$

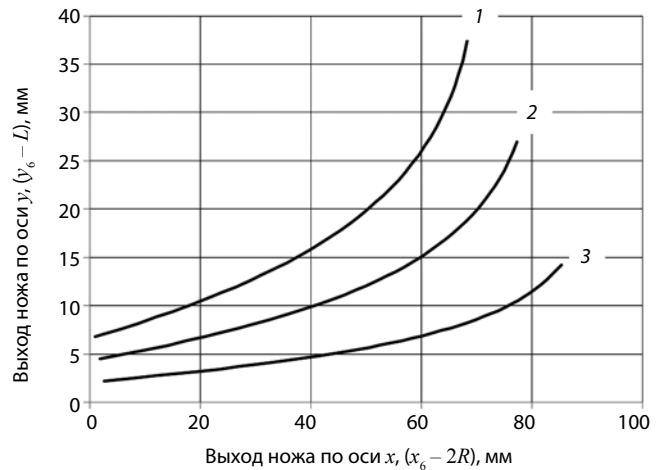


Рис. 5. Траектории кончика ножа при $\alpha = 5^\circ$: 1 – $y_0 = 150$ мм;

2 – $y_0 = 160$ мм; 3 – $y_0 = 170$ мм; 4 – $y_0 = 180$ мм

Fig. 5. Paths of the knife tip at $\alpha = 5^\circ$: 1 – $y_0 = 150$ мм;

2 – $y_0 = 160$ мм; 3 – $y_0 = 170$ мм; 4 – $y_0 = 180$ мм

ля максимальный выход ножа из его корпуса составляет 85–90 мм при диаметре скважины 45 мм. В ряде работ [8, 9, 10] приведены расчеты усилий, действующих на режущий орган щелеобразователя в процессе нарезания ИЩ. С помощью теории сопротивления материалов необходимо проверить прочность режущего органа при его максимальном выдвигении в процессе нарезания иницирующей щели. В [11] приведен прочностной расчет режущего органа щелеобразователя ЩМ-45, в соответствии с которым прочность режущего органа определяется по выражению:

$$\sigma = \frac{M_{\text{изг}}}{W_x} \leq [\sigma], \quad (5)$$

где $M_{\text{изг}}$ – изгибающий момент, возникающий в режущем органе при нарезании иницирующей щели, который определяется по выражению:

$$M_{изг} = k_1 P_n S_n \operatorname{tg} \varphi D \left(\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_0} - 1 \right) / 2k_2, \quad (6)$$

где k_1 – коэффициент сопротивления резанию, Н/м²; k_2 – коэффициент сопротивляемости внедрению, Н/м; φ_0 – угол при вершине режущего органа в момент его внедрения в массив, φ – текущий угол; D – диаметр щелеобразователя; P_n – давление рабочей жидкости, МПа; S_n – площадь торца поршня 4 (см. рис. 1), м².

Применив выражения (5) и (6), определим напряжения, возникающие в режущем органе при нарезании иницирующей щели, приняв: изгибающий момент $M_{изг} = 65$ Нм; размер поперечного сечения режущего органа $b = 6$ мм, $h = 20$ мм. Таким образом, предел прочности $\sigma_{пр} = 540$ МПа, следовательно, для надежной работы предложенной конструкции для изготовления режущего органа следует использовать сталь Ст 30 или Ст 35.

ВЫВОДЫ

В качестве выводов отметим, что моделирование процесса нарезания иницирующих щелей на стенках дегазационных скважин позволило более полно использовать ограниченные размеры щелеобразователя для максимального увеличения диаметра ИЩ. Это, в свою очередь, расширило область применения технологии НГР, так как повысило вероятность развития трещины в заданном направлении при проведении гидроразрывов в угольном массиве.

Список литературы • References

1. Леонтьев А.В., Попов С.Н. Опыт практического применения измерительного гидроразрыва // Горный журнал. 2003. № 3. С. 37-43. Leontyev A.V., Popov S.N. Practical experience of measurement hydrofracturing. *Gornyi Zhurnal*. 2003;(3):37-43. (In Russ.).
2. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород // ФТПРПИ. 1994. № 1. С. 3-20. Kurlenya M.V., Leontyev A.V., Popov S.N. Development of the hydraulic fracturing method to investigate the stress state of the rock mass. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1994; (1):3-20. (In Russ.).
3. Патент РФ № 129148. Щелеобразователь / Клишин В.И., Курленя М.В., Кокоулин Д.И. Оpubл. в бюл. № 17 от 20.06.2013.
4. Сердюков С.В., Шилова Т.В., Рыбалкин Л.А. Оценка снижения риска подземной разработки газоносных угольных пластов при использовании гидроразрыва // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2. № 5. С. 3-11. Serdyukov S.V., Shilova T.V., Rybalkin L.A. Risk reduction estimation for underground mining of gas-contained coal seams while using the hydraulic fracturing. *Interekspo GEO-Sibir'*. 2019;2(5):3-11. (In Russ.).

5. Gray I., Zhao X., Liu L. Mechanical properties of coal measure rocks containing fluids at pressure, Coal Operators' Conf., Wollongong, Australia, 2018, pp. 195-204.
6. Патент РФ № 2400624. Щелеобразователь / Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Оpubл. в бюл. № 27 от 27.09.2010.
7. Сажин П.В. Исследование траектории движения режущего органа щелеобразователя // Горняцкая смена. 2008. Т. 1. С. 8-14. Sazhin P.V. Studies of the motion path of the fracture former cutter. *Gornyatskaiya smena*. 2008;(1):8-14. (In Russ.).
8. О форме трещин гидроразрыва породного массива в окрестности цилиндрической полости / С.В. Сердюков, А.В. Азаров, Л.А. Рыбалкин и др. // ФТПРПИ. 2021. № 6. С. 72-84. Serdyukov S.V., Azarov A.V., Rybalkin L.A., Patutin A.V. Regarding the shape of the hydraulic fractures in rocks in vicinity of a cylinder-shaped void. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021;(6):72-84. (In Russ.).
9. Xia B., Zhang X., Yu B., Jia J. Weakening effects of hydraulic fracture in hard roof under the influence of stress arch. *Int. J. Min. Sci. and Tech*. 2018;28(6):951-958.
10. Chen Z., Li X., Dusseault M.B., Weng L. Effect of excavation stress condition on hydraulic fracture behavior // *Eng. Fracture Mech*. 2020;(226):106871.
11. Сажин П.В. Исследование режимов работы и герметических параметров режущего органа комбинированного устройства при создании иницирующих щелей // ФТПРПИ. 2018. № 2. С. 181-186. Sazhin P.V. Investigation of operation modes and sealing properties of the combined device cutter when creating initiating fractures. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2018;(2):181-186. (In Russ.).

Authors Information

Lekontsev Yu.M. – PhD (Engineering), Senior Researcher, Institute of Coal, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: kvi194917@mail.ru

Sazhin P.V. – PhD (Engineering), Senior Researcher, Institute of Coal, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: pavel301080@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024