

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.27

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, СКЛОННЫХ К ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ЯВЛЕНИЯМ

К. Н. Трубецкой, М. А. Иофис, Е. Н. Есина

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН, E-mail: iofis@mail.ru,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Обоснована возможность эффективного и безопасного освоения месторождений, склонных к опасным газодинамическим явлениям, на основе использования собственной природной энергии массива горных пород для целенаправленного разрушения полезного ископаемого и предварительной дегазации угольных пластов с применением скважинного способа добычи при реализации ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий освоения недр. Приведены рекомендации по реализации этих возможностей. Предложена методика прогноза и контроля за развитием геомеханических процессов, учитывающая особенности формирования и развития выработанного пространства при скважинной добыче полезных ископаемых.

Ресурсосберегающие, ресурсовоспроизводящие геотехнологии, газодинамические явления, скважинная добыча полезных ископаемых, предварительная дегазация, горное давление

В последнее время в мировой горнодобывающей промышленности отмечается сокращение сырьевой базы, ухудшение горно-геологических, климатических и горнотехнических условий на действующих предприятиях вследствие перехода горных работ на более глубокие горизонты, недостатка инвестиционных ресурсов, внедрения высокопроизводительного технологического оборудования, интенсификации процесса добычи полезных ископаемых и возрастания опасности динамических проявлений — внезапных выбросов породы, газа и горных ударов.

Перспективным направлением является внедрение в производство ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых. Особый интерес представляют ресурсовоспроизводящие геотехнологии, под которыми обычно понимаются прямые действия или дополнительные технологические процессы, в результате которых создаются новые ресурсы недр. К ресурсовоспроизводящим технологиям относятся также геотехнологии, обеспечивающие освоение запасов полезных ископаемых с частичным воспроизводством или созданием новых видов ресурсов недр либо с переводом потенциальных ресурсов в реальные [1].

При реализации ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий освоения месторождений твердых полезных ископаемых актуален вопрос разработки месторождений полезных ископаемых, подверженных газодинамическим явлениям, таким как внезапные вы-

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-2918.2014.5 “Создание методологии обоснования масштабов техногенного преобразования недр Земли для устойчивого функционирования горнотехнических систем” под руководством академика К. Н. Трубецкого.

бросы породы, газа, горные удары. Он требует проведения специальных мероприятий, которые дополняют необходимый перечень производственных процессов, выполняемых для добычи полезного ископаемого.

Так, освоение месторождений, склонных к газодинамическим явлениям, с применением традиционного подземного способа разработки, заключающегося во вскрытии месторождения капитальными выработками с земной поверхности, проведении нарезных и очистных выработок в месте залегания полезного ископаемого, выемки полезного ископаемого, поддержании режима проветривания, управления кровлей и т. д., сопряжено с повышенным травматизмом при производстве горных работ в условиях высокой опасности газо- и геодинамических явлений [2]. Шахтная добыча характеризуется также долгой окупаемостью капитальных затрат.

В данных условиях целесообразен скважинный способ добычи, при котором все технологические процессы производятся без непосредственного нахождения людей в местах залегания полезного ископаемого. При этом создаются преимущества скважинной геотехнологии перед обычными способами добычи ресурсов, которые позволяют по-новому оценивать как известные месторождения полезных ископаемых, так и вновь открываемые, обеспечивая повышение технологической, экономической и экологической эффективности освоения недр.

Известны скважинные геотехнологии освоения месторождений, позволяющие вести добычу сырья без присутствия людей непосредственно в очистном забое. Существует опыт разработки угольных месторождений методом подземной газификации угля [3]. При этом уголь в пласте, под землей, превращается в горючий газ, обладающий достаточной калорийностью для энергетического и технологического использования. Однако недостатком данного способа являются трудности в управлении огневым забоем при выгазовывании угольных пластов и полнотой отработки пласта, что влечет за собой ограничения в извлечении ресурсов недр.

Анализ существующих способов добычи полезных ископаемых показал, что повышение эффективности ресурсосберегающих геотехнологий при освоении месторождений полезных ископаемых, склонных к газо- и геодинамическим явлениям, можно достигнуть путем использования собственной внутренней энергии массива горных пород — газо- и геодинамической энергии для разрушения полезного ископаемого [4].

Один из таких способов, разработанных в ИПКОН РАН, состоит из нескольких операций. Вначале с помощью скважин осуществляют вскрытие месторождений полезных ископаемых, склонных к газо- и геодинамическим явлениям (рис. 1) [5]. Затем создают полость с применением физического воздействия (взрывного, электрогидравлического разрушения и т. п.). Для дальнейшего разрушения полезного ископаемого при разработке таких пластов в качестве мощного физического воздействия используется собственная природная энергия, например высокая метаноносность угольных пластов. Являясь отрицательным фактором при традиционных способах добычи, она играет положительную роль для разрушения угольного пласта. Для этого контролируют содержание метана в образованной полости. При достижении наиболее взрывоопасной концентрации метана 10 % (метан взрывоопасен при концентрации в воздухе от 5 до 15 %) в полости инициируют взрыв, добиваясь разрушения полезного ископаемого. При этом снижается опорное давление в массиве горных пород, прилегающем к выработанному пространству (см. рис. 1).

Разрушенный уголь в полости переводят в гидросмесь, интенсивно перемешивают, осаждают пустую породу на дно созданной полости, далее подъем на поверхность водоугольной суспензии осуществляют либо самоподъемом раздробленного угля через смежные скважины при разрушении угля за счет энергии взрыва, либо разрушенный уголь переводят в гидросмесь, интенсивно перемешивают, затем отстаивают. Осаждение смеси происходит под собственной

силой тяжести пустой породы на дно вымытой полости. Пустая порода опускается на дно полости за счет большего удельного веса. Водоугольную суспензию подают на поверхность с помощью эрлифта или гидроэлеватора, в дальнейшем возможна ее транспортировка по системе трубопроводов на поверхности к потребителю в автоматическом режиме без выдачи отходов обогащения на поверхность.

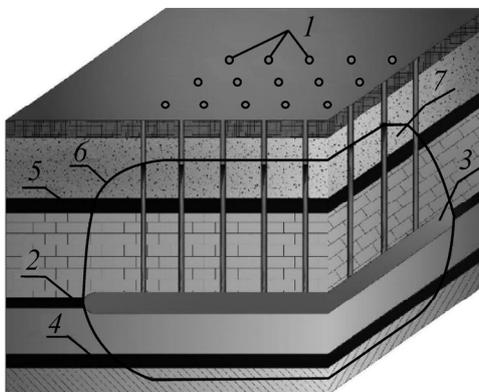


Рис. 1. Схема отработки защитного пласта: 1 — сеть вскрывающих скважин; 2 — отработываемый защитный пласт; 3 — выработанное пространство; 4 и 5 — соответственно надрабатываемый и подрабатываемый опасные пласты; 6 — контур защищенной зоны; 7 — защищенная зона

После откачки водоугольной суспензии выполняют второй цикл работ: контролируют достижение взрывоопасной концентрации метана во вновь образованной полости, инициируют повторный взрыв, повторяют ранее проведенные операции: переводят уголь в гидросмесь, интенсивно перемешивают, осаждают пустую породу на дно созданной полости, с помощью гидроэлеватора подают на поверхность водоугольную суспензию.

При концентрации метана более 15 % он горит, для предотвращения возгорания снижают его концентрацию до взрывоопасной путем выпуска метана по скважинам на поверхность к потребителю, где также возможно его дальнейшее использование для технологических целей.

Указанную последовательность операций проводят до тех пор, пока не произойдет обрушение основной кровли (генеральной посадки). После этого над обрушившейся основной кровлей образуется полость, равная по объему выработанному пространству, которая при разработке метанонасыщенных пластов заполняется газом. Скопившийся газ также откачивают по трубам на поверхность к потребителю.

Описанным способом создают выработанное пространство такого размера, в котором надрабатываемые и подрабатываемые угольные пласты попадают в контур защищенной зоны (см. рис. 1), где снижается давление газа в пластах, уменьшается газоносность угля, повышается его газопроницаемость. В дальнейшем данные подзащитные участки угольных пластов, попавшие в защищенную зону, разрабатывают подземным способом или предложенным скважинным, без применения дорогостоящих и не всегда достаточно эффективных противовыбросных локальных мероприятий.

Интенсивность отработки защитного пласта можно существенно повысить путем бурения направленных скважин, горизонтальные части которых располагаются в плоскости защитного пласта [6], как это показано на рис. 2. При этом эффективность дегазации существенно повышается за счет использования полостей разгрузки при условии расположения направленных скважин в зоны наибольшего скопления газа под экранирующими породами, но не ниже почвы подрабатываемого пласта.

Особую роль в предотвращении опасных газодинамических явлений играют оценка, прогноз и контроль геомеханического и газодинамического состояния массива горных пород. Дело в том, что разгрузка от горного давления не всегда гарантирует устранение опасности газодинамического явления, поскольку для обеспечения эффективной защиты от внезапных выбросов необходимо выполнить ряд дополнительных условий и прежде всего снизить давление и количество газа в опасном пласте. Практика горного дела показывает, что при деформациях опасного пласта, вызванных подработкой, в нем появляются многочисленные трещины, из которых выделяется (десорбируется) так называемый “свободный” газ. Скопление такого газа в пласте повышает опасность возникновения газодинамического явления.

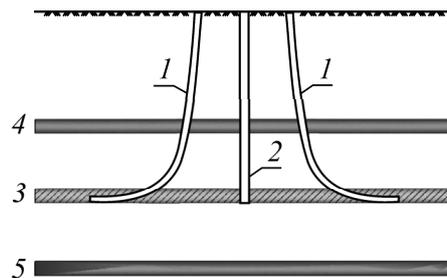


Рис. 2. Схема повышения интенсивности отработки защитного пласта: 1 — направленные скважины; 2 — вертикальная скважина; 3 — защитный пласт; 4, 5 — подрабатываемый и надрабатываемый опасный пласт соответственно

При традиционных подземных способах освоения месторождений полезных ископаемых обычно полного развития взаимно пересекающихся трещин не происходит. При скважинных способах добычи фронт ведения горных работ развивается в равной степени в двух взаимно перпендикулярных направлениях: как по простиранию пласта, так и вкрест простирания. При этом актуальным вопросом является механизм развития трещин в слоистом массиве горных пород (рис. 3).

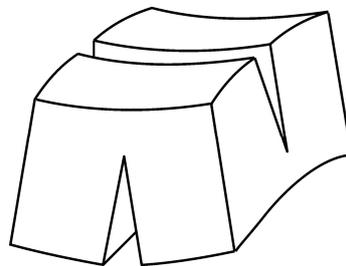


Рис. 3. Схема образования сквозных газопроводящих трещин

Период зарождения трещин характеризуется появлением небольших секущих трещин и трещин расслоения, не соединяющихся между собой. С увеличением изгиба слоя эти трещины растут и соединяются между собой, создавая газопроводящий канал. Дальнейшее увеличение изгиба слоя ведет к развитию деформационных процессов, в результате которых слой разбивается на отдельные блоки, создавая сквозной газопроводящий канал. По мере развития нагрузки на массив слой пород в результате изгиба приобретает форму седла, т. е. если в одном направлении (например, по падению) слой получает положительную кривизну (выпуклость вверх), то в другом (по простиранию) — отрицательную кривизну (выпуклость вниз). В этом случае две взаимно перпендикулярные трещины пересекаются и образуют сквозной газопроводящий канал.

Для предотвращения скопления газов бурятся специальные дегазационные скважины, что нарушает и усложняет технологические процессы по добыче полезного ископаемого и ведет к существенному удорожанию добываемой продукции. Поэтому очень важно знать, где и когда образуются эти опасные зоны, чтобы вовремя пробурить в них дегазационные скважины.

На основании многочисленных инструментальных измерений с привлечением положений механики горных пород установлено следующее условие образования газопроводящих трещин в подрабатываемых слоях при пологом залегании пластов — кратность, при которой давление газа в подрабатываемом и защитном пластах при подработке в условиях горизонтального залегания пород становится одинаковой:

$$\frac{M}{m} \leq \frac{250}{\varepsilon_{\text{кр}} \cdot 10^3}, \quad (1)$$

где M — мощность междупластья; m — вынимаемая мощность пласта; $\varepsilon_{\text{кр}}$ — относительная деформация растяжения, при которой происходит разрыв сплошности пород. Расчеты по этой формуле и натурные наблюдения показывают, что при соотношении $M/m \geq 80$ секущие трещины в массиве горных пород не образуют единую газопроводящую систему и газ от выбросоопасного пласта к защитному перестает поступать, в то время как при соотношении $M/m \leq 25$ в любых осадочных породах образуется сквозной газопроводящий канал. Удаление газа из образовавшихся скоплений производится с помощью серии специальных целенаправленных скважин. В рекомендуемом способе бурение таких скважин не требуется. Достаточно, чтобы имеющиеся скважины, используемые для разрушения массива горных пород, обладали в зоне скопления газа необходимой степенью перфорации (количество и размеры отверстий в обсадной трубе).

Отличительной особенностью геомеханического обеспечения скважинной геотехнологии является дистанционность процесса выемки полезного ископаемого и связанное с этим отсутствие возможности визуальных наблюдений и регистрации проявлений процесса сдвижения непосредственно в очистном забое. При этом с целью установления параметров процесса сдвижения и своевременного прогнозирования сдвижения земной поверхности необходимо определять местоположение и размеры выработанного пространства косвенным путем. При традиционных способах добычи решается прямая задача геомеханики: по известным параметрам выработанного пространства (форме, размерам и местоположению) определяются расчетным путем ожидаемые сдвижения и деформации земной поверхности, которые затем сравниваются с фактическими данными наблюдений на земной поверхности и с допустимыми их значениями. При скважинных способах освоения недр решается обратная геомеханическая задача, т. е. параметры выработанного пространства определяются по наблюдаемым сдвижениям и деформациям земной поверхности на основании использования установленных закономерностей развития геомеханических процессов. Так, в зависимости от соотношения местоположения характерных точек мульды сдвижения и границ выработанного пространства можно определять параметры выработки — местоположение, размеры, форму и т. д.

Для прогноза развития геомеханических процессов при скважинной добыче полезных ископаемых необходимо определять ожидаемые деформации и сдвижения земной поверхности. При этом традиционные методы расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности имеют ограниченное применение, поскольку форма выработанного пространства при геотехнологии имеет косоугольную форму в вертикальном сечении [7]. Поэтому потребовалось разработать специальный метод расчета ожидаемых деформаций земной поверхности, позволяющий учитывать специфику образования выработанного пространства при скважинной гидродобыче. В основу метода положены теоретические основы способа типовых кривых [8], но с существенными изменениями и дополнениями.

Выработанное пространство, имеющее треугольную форму в вертикальном сечении, оказывает неравномерное влияние на поверхность, т. е. вынимаемая мощность изменяется от геологической до нуля. Для решения этой задачи выработанное пространство разбивается на элементы $i_1, i_2, i_3 \dots$. Величина мощности элементов уменьшается от центра выработанного пространства в линейной зависимости $(1-z)m$ (рис. 4).

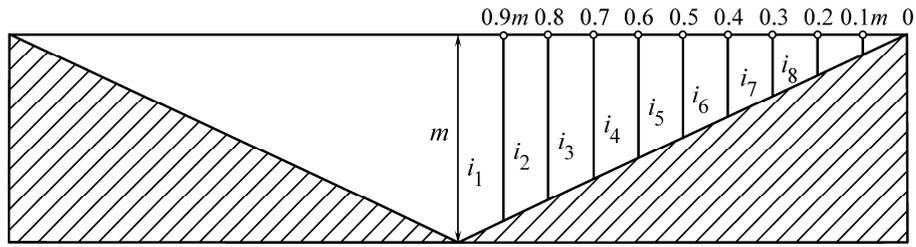


Рис. 4. Схема изменения мощности выработанного пространства при скважинной добыче полезных ископаемых

Деформации земной поверхности определяются по установленным зависимостям распределения деформаций в мульде сдвижения [9]:

— оседания
$$\eta_z = \eta_m S_z(1-z), \quad (2)$$

— наклоны
$$i_z = \frac{\eta_m}{L} (S'_z(1-z) - 0.1S_z), \quad (3)$$

— кривизна
$$K_z = \frac{\eta_m}{L^2} (S''_z(1-z) - 0.2S'_z), \quad (4)$$

— горизонтальные сдвигения
$$\xi_z = 0.5\alpha_0 \eta_m F_z(1-z), \quad (5)$$

— горизонтальные деформации
$$\varepsilon_z = \frac{0.5\alpha_0 \eta_z}{L} (F'_z(1-z) - 0.1F_z), \quad (6)$$

где η_z , i_z , K_z , ξ_z , ε_z — соответственно оседание, наклон, кривизна, горизонтальное сдвижение и относительная горизонтальная деформация в точке с относительной координатой z (начало координат в точке максимального оседания); $z = x/L$; x — текущая координата в мульде сдвижения; L — длина полумульды, определяемая графически; η_m — максимальное оседание; α_0 — отношение максимального горизонтального сдвижения к максимальному оседанию при полной подработке, горизонтальном залегании и закончившемся процессе сдвижения; $S(z)$, $S'(z)$, $S''(z)$, $F(z)$, $F'(z)$ — переменные коэффициенты (функциональные зависимости), отражающие характер распределения деформаций в мульде сдвижения.

Для контроля состояния основной кровли необходимо устанавливать условия и критерии ее устойчивости, а также механизм развития контура разгруженной зоны. Поскольку основным условием аварийного выброса газа из выработанного пространства является обрушение кровли очистной выработки, необходимо определить критериальные признаки, предшествующие потере устойчивости обнажения кровли в выработанном пространстве. При обнаружении этих признаков горные работы следует остановить, людей из потенциально опасных участков вывести, электроснабжение отключить. Для ускорения возобновления горных работ можно применить методы принудительного обрушения кровли. Таким образом, задача сводится, прежде всего, к определению степени устойчивости обнажений кровли в зависимости от размеров этих обнажений.

Так, по методу профессора В. Д. Слесарева трещины в наиболее опасном сечении появляются в условиях, когда растягивающие напряжения в нижнем волокне опасного сечения достигнут пределов прочности на разрыв [10]. Одним из недостатков метода В. Д. Слесарева является невозможность контроля состояния кровли выработанного пространства и управления этим состоянием на основании результатов инструментальных наблюдений. Для устранения этого недостатка нами более подробно рассмотрено влияние изгиба слоистого массива горных пород на характер и величины его деформаций.

Установлена зависимость предельного пролета от наблюдаемых горизонтальных деформаций на земной поверхности и прочностных свойств горных пород:

$$l = h \sqrt{\frac{3\varepsilon_T E}{0.4\tau_{\max}}}, \quad (7)$$

где h — мощность слоев кровли, м; ε_T — горизонтальные деформации слоя толщи горных пород; E — модуль упругости, МПа; τ_{\max} — максимальные касательные напряжения, МПа.

Получено выражение для определения величины обнажения кровли выработки при измеренном значении горизонтальных деформаций в данный момент времени:

$$l = l_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{\text{крит}}}},$$

где $\varepsilon_{\text{крит}}$ — значение критических горизонтальных деформаций для данных условий; l_1 — значение первого предельного пролета:

$$l_1 = h \sqrt{\frac{3\varepsilon_{\text{крит}} E}{0.4\tau_{\max}}}. \quad (8)$$

В результате проведенных исследований установлена зависимость значений горизонтальных деформаций поверхности рассматриваемого слоя толщи горных пород ε_T от измеренных деформаций на земной поверхности $\varepsilon_{\text{п}}$:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{\text{п}} \sqrt{\frac{H}{H_T}}, \quad (9)$$

где H — глубина залегания пласта, м; H_T — расстояние от плоскости пласта до рассматриваемого слоя толщи горных пород, м.

На этапе опытного опробования скважинной технологии необходимо установить оптимальные размеры выработанного пространства при заданных условиях деформирования земной поверхности и сохранности наземных элементов геотехнологии и сооружений на поверхности.

Для реализации этого рекомендуется создание площадной наблюдательной станции на земной поверхности (рис. 5) в виде сетки с реперами в вершинах квадратов над всей предполагаемой областью сдвижения.

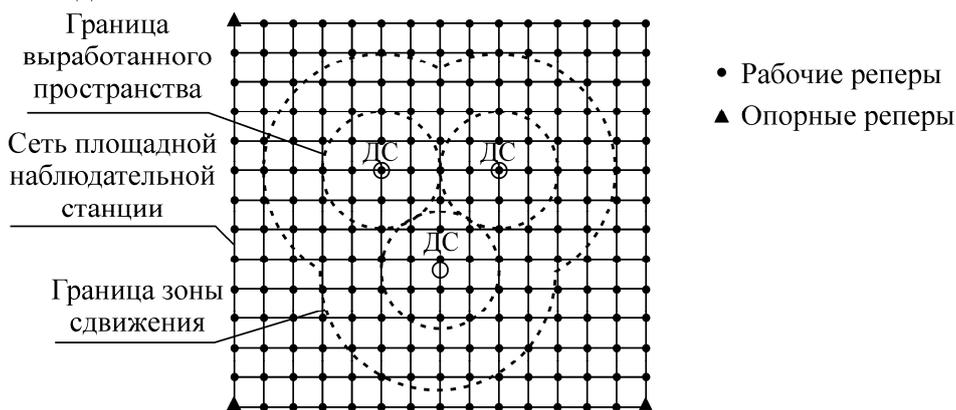


Рис. 5. Схема расположения площадной наблюдательной станции по отношению к выработанному пространству (ДС — добывающая скважина)

Основным методом наблюдений за сдвигениями на земной поверхности для применения на территории участков, обрабатываемых скважинными способами, являются маркшейдерские наблюдения с заданной периодичностью, проводимые до окончания процесса сдвижения, которые позволяют определять:

- оседания земной поверхности путем измерения высоты точек;
- горизонтальные деформации на основе измерения расстояний между точками.

Значения остальных показателей сдвижений вычисляются на базе полученных величин оседаний и планов оседаний поверхности [11].

В профильных линиях требуется проводить нивелирные измерения (методом технического и прецизионного нивелирования), а также измерения расстояний между точками. Это дает возможность определить оседания пунктов и горизонтальные деформации отрезков линий.

Для установления оптимального коэффициента извлечения следует анализировать графики зависимостей измеренных сдвижений и деформаций земной поверхности от объемов добываемого полезного ископаемого. Допустимым коэффициентом извлечения является такой, при котором обеспечивается устойчивость охраняемых объектов и сооружений в зоне влияния выработанного пространства.

ВЫВОДЫ

Научно обоснованное управление геомеханическими и газодинамическими процессами позволяет разрушительную энергию взрыва природного газа направить в русло созидательной работы по созданию ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих технологий освоения месторождений, склонных к опасным газодинамическим явлениям, что существенно повышает безопасность и эффективность горных работ по добыче полезных ископаемых.

При использовании установленных природы и механизма миграции и скопления газов в деформирующемся массиве горных пород эффективность управления указанными процессами существенно повышается.

Предложена методика прогноза и контроля за развитием геомеханических процессов, учитывающая особенности формирования и развития выработанного пространства при скважинной добыче полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых / под ред. акад. К. Н. Трубецкого. — М.: ИПКОН РАН, 2012.
2. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / под ред. К. Н. Трубецкого. — М.: Изд-во АГН, 1997.
3. Крейнин Е. В., Федоров Н. А., Звягинцев К. Н., Пьянкова Т. М. Подземная газификация угольных пластов. — М.: Недра, 1982.
4. Пат. 2474691 РФ. Способ скважинной добычи угля и газа из пластов, склонных к газо- и геодинамическим явлениям / К. Н. Трубецкой, М. А. Иофис, И. В. Милетенко, Е. Н. Есина, Б. Н. Поставнин, А. В. Гришин // Оpubл. в БИ. — 2013. — № 4.
5. Пат. 2363849 РФ. Способ подземной гидравлической разработки месторождений твердых полезных ископаемых / К. Н. Трубецкой, В. А. Чантурия, М. А. Иофис, Г. Д. Краснов, А. А. Лавриненко, Б. Н. Поставнин, Н. А. Милетенко // Оpubл. в БИ. — 2009. — № 22.
6. А. с. 1011865 СССР. Способ дегазации подрабатываемого угольного пласта / А. Т. Айруни, М. А. Иофис, А. В. Шестопапов, С. О. Касимов // Оpubл. в БИ. — 1982. — № 14.
7. Есина Е. Н. Результаты лабораторных испытаний по скважинной гидродобыче (СГД) угля // ГИАБ. — 2011. — № 6.
8. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ на угольных месторождениях. — СПб., 1998.
9. Иофис М. А., Есина Е. Н. Особенности расчета сдвижений и деформаций земной поверхности при скважинной гидродобыче полезных ископаемых // Вестн. РУДН. Серия инж. исслед. — 2012. — № 3.
10. Слесарев В. Д. Механика горных пород. — М.: Углетехиздат, 1948.
11. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03), 2003.