

А.М. Гайдин. Институт горно-химической промышленности, Украина

Предложен способ скважинной добычи неустойчивых руд, основанный на вытеснении руды из ядра текучести закладочным материалом. Рассмотрен механизм образования ядра текучести при выемке из буровых скважин продуктов разрушения руды. Приведены результаты лабораторных и полевых испытаний.

Введение. Существуют месторождения полезных ископаемых, в которых руда и покрывающие её породы имеют малую прочность, рыхлые. Это древние морские или аллювиальные рассыпные месторождения золота, алмазов, титана, циркона, и др., а также коры выветривания коренных месторождений указанных элементов и апатита. Запасы этих полезных ископаемых на небольшой глубине со временем исчерпываются, что приводит к нерентабельности открытой разработки месторождений. Что касается подземного способа, то его на рассыпных месторождениях невозможно осуществлять вследствие неустойчивости горных выработок. Поэтому возможность добычи рыхлых руд через скважины приобретает всё большее значение.

Обзор литературы. Идея добычи твердых полезных ископаемых через буровые скважины согласно Горной Энциклопедии была предложена инженером В.Г. Вишняковым в 1935 г [1]. В 1962 г опубликована работа О.Ф. Васильева [2] из Новосибирска, в которой рассмотрено поведение вязкопластического рудного тела, раскрытого вертикальной выработкой. Показано, что под весом налегающих пород руда может перейти в текучее состояние и как из-под штампа выдавливаясь в горную выработку или буровую скважину. Течение породы происходит до тех пор, пока выработка не заполнится. Выемка разрыхленной породы создает условия для непрерывного потока. По концепции О.Ф. Васильева в основу скважинного способа положено понятие о деформациях, которые возникают в руде при давлении, превышающем её предел текучести.

В 1965 г начаты работы по скважинной гидродобыче (СГД) в Государственном институте горно-химического сырья ("ГИГХС", г. Люберцы) [3]. В основу процесса СГД положено разрушение руды высоконапорной струей, доставка гидросмеси до забоя и её подъем на поверхность. В отличие от концепции О.Ф. Васильева, о саморазрушении и выдавливании руды здесь речь не идет, для ее разрушения предлагается использовать водяную струю.

Эти две концепции отображают существование двух состояний горных пород, раскрытых выработками (буровыми скважинами): устойчивого или неустойчивого. Одна и та же порода может быть устойчивой или неустойчивой в зависимости от глубины залегания и способа вскрытия. В первом приближении к неустойчивым можно отнести породы, сопротивление сжатию которых меньше, чем геостатическое давление. Двум состояниям пород отвечают и два подхода к разработке технологии скважинной добычи. Работы, выполненные в "ГИГХС", относятся к скважинной гидродобыче полезных ископаемых, руда которых находится в устойчивом состоянии. Что касается руд, которые переходят в текучее состояние и выдавливаются в ствол скважин под влиянием геостатического давления и собственного веса, то для её добычи не нужно применять размыв. Основанная на этом процессе технология не является гидродобычей. За последние годы теме скважинной гидродобычи посвящены десятки публикаций в России и за рубежом [6]. В то же время проблемы добычи саморазрушающихся руд в известной автору литературе практически не освещались, за исключением моей статьи, опубликованной в «Горном журнале» в 2009 г [4].

Ядро текучести. Процесс движения неустойчивой породы к месту ее отбора или выпуска изучался нами на физических моделях, которые представляли собой прозрачные лотки, заполненные песком (условно называем его рудой), водой и покрывающей породой различной крепости. Исследования показали, что обводнённый песок вытекает в отверстие в нижней части лотка. Над отверстием «руда» разрыхляется, образуя ядро текучести овальной формы.

Размеры области пластической деформации оценил Ю.П. Желтов [5], который исследовал распределение напряжений в породах вокруг скважин. Показано, что размер области пластической деформации находится в прямой зависимости от глубины, и в обратной от предельного касательного напряжения пород. Кроме того, на размер области пластической деформации влияет градиент напора жидкости, заполняющей пласт. При откачке жидкости напор уменьшается и область пластической деформации увеличивается, а при нагнетании - уменьшается.

В однородной среде ядро текучести имеет форму эллипсоида со строго заданным соотношением вертикальной a и горизонтальной b осей [6]:

$$a/b=\lambda, \quad (1)$$

где λ – коэффициент бокового распора.

Для зернисто-сыпучего породного массива, в котором сцепление отсутствует,

$$\lambda = \operatorname{tg}^2(45-\varphi/2), \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения.

Например:

при $\varphi = 30^\circ$, $\lambda = 0,33$; при $\varphi=25^\circ$, $\lambda=0,40$; при $\varphi =20^\circ$, $\lambda=0,49$.

Свод ядра текучести скачкообразно обваливается. Продукты обваливания - разрыхленная руда - сползают по параболической поверхности скольжения к месту выпуска, а свод растет вверх.

Аналогом этого процесса может служить выпуск маганизированной руды в шахтах. Объем ядра текучести W_0 в момент, когда его вершина достигает кровли, определяется по формуле [7]:

$$W_0=0,524 m^3(1-\lambda^2), \quad (3)$$

где m - мощность пласта, λ - эксцентриситет овалоида - отношение длины горизонтальной оси к вертикальной.

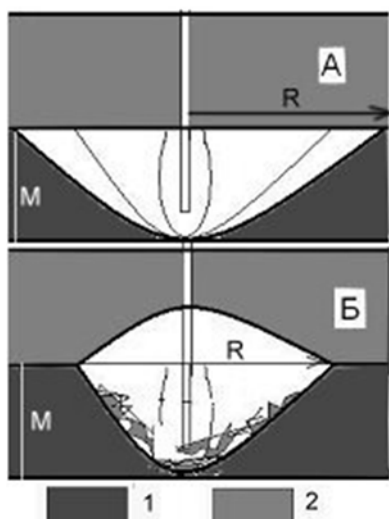


Рис.1. Развитие ядра текучести при скальной (А), и полускальной (Б) кровле. 1- руда, 2- вмещающие породы.

а объем

В проведенных нами экспериментах, где в качестве "руды" использовали чистый мелкозернистый песок, эксцентриситет овалоида составлял 0,45-0,55. После того, как свод овалоида достигает кровли пласта, развитие процесса определяется прочностью его кровли (рис.1).

При скальной кровле (рис.1 А) ядро текучести достигает кровли, после чего формируется конусоподобная полость. Последняя расширяется до тех пор, пока её склоны не достигнут угла естественного откоса руды. На практике этот процесс используют при сооружении так называемых бесфильтровых водозаборных скважин в условиях, когда водоносный песок залегает под скальными породами, например известняком. С помощью эрлифта откачивают смесь песка с водой до момента её осветления.

В результате образуется воронкообразная полость с большой водопримной поверхностью. Согласно справочнику [7] угол откоса воронки в крупнозернистых песках составляет 27° , в средних - 25° , в мелких - 20° . Зная угол откоса, легко рассчитать радиус и объем воронки. Приблизительно радиус воронки

$$R = 2*m, \quad (4)$$

$$V = 4*m^3, \quad (5)$$

где m - мощность пласта. Например, при мощности залежи 5 м объем воронки составляет 500 м³.

В случае полускальной кровли (Б) процесс вначале развивается так же, как и под скальной кровлей. Однако при достижении полостью некоторой площади обнажения кровли происходит отслаивание и вывалы кусков породы. Радиус полости R , при котором кровля сохраняет устойчивость, можно оценить эмпирической формулой [7, с. 472]:

$$R=(H-S)*f/((1-n)*\gamma+n), \quad (6)$$

где H - напор воды над кровлей, S - понижение напора при откачке гидросмеси, f - коэффициент прочности породы по М.М. Протоdjяконову, n - пористость пород кровли, γ - относительная удельная масса пород кровли.

Обломки разрушенной кровли падают, создавая на откосах полости своего рода крепление каменной наброской. Обломки также забутывают выдачное отверстие. В этом случае максимальный размер полости определяется устойчивостью кровли.

При неустойчивой кровле, когда породы кровли не цементированы, тогда в развитии ядра текучести различаются следующие фазы. 1) Ядро текучести растет в пределах рудного пласта. К месту отбора приплывает чистая руда. Это продолжается до момента, пока свод ядра не достигнет кровли пласта. 2) Ядро текучести продолжает развиваться в покрывающих породах. К руде примешивается пустая порода, доля которой в смеси постепенно возрастает. 3) Ядро текучести достигает земной поверхности. Образуется провал с нависающими стенками. 4) Стенки провала обваливаются, образуя воронку.

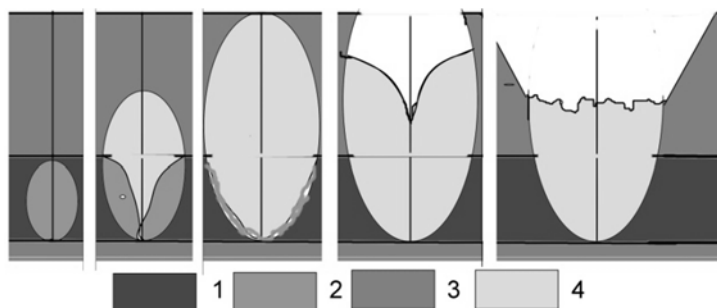


Рис.2. Развитие ядра текучести при неустойчивой кровле. 1-руда, 2- разрыхленная руда, 3- вмещающие породы, 4-то же в разрыхленном состоянии.

Образуется провал с нависающими стенками. 4) Стенки провала обваливаются, образуя воронку.

В ядре текучести руда находится в предельно разрыхленном состоянии.

Оценив объем овалоида по формуле (3), можно определить момент, в который его вершина достигнет кровли рудной залежи. Объем твердого скелета руды W_1 в естественном залегании равняется

$$W_1= W_0*(1-n_1), \quad (7)$$

где W_0 - объем овалоида, n_1 - пористость руды в естественном залегании, В разрыхленном состоянии объем твердого скелета W_2 составляет

$$W_2= W_0*(1-n_2), \quad (8)$$

где n_2 - пористость руды в разрыхленном состоянии.

Разность между объемами - это количество руды, которая добывается к моменту выхода ядра текучести под подошву покрывающих пород:

$$\Delta W = W_0*(n_2 - n_1). \quad (9)$$

Аналогичным образом можно высчитать момент, когда ядро текучести достигнет поверхности.

Стабилизация ядра текучести. Лабораторными опытами установлено, что процесс обрушения свода над текущей в скважину неустойчивой породой можно остановить путём

подачи под купол ядра текучести закладочного материала. При этом наблюдается квазистационарное течение породы в контуре ядра текучести. Это явление мы наблюдали в прозрачном лотке с песком (рис. 3). В нижней части лотка выпускали песок до образования небольшой полости (а). Затем выпуск прекращали. Кровля полости обрушалась, вершина ядра распространялась вверх до тех пор, пока за счёт разрыхления песка полость не заполнялась (б). Затем начинали закачку песчано-глинистой смеси пластической консистенции в верхнюю часть ядра с одновременным выпуском песка из нижней части (в). При этом наблюдали вытеснение песка закладочным материалом во всём объёме предварительно разрыхленного песка.

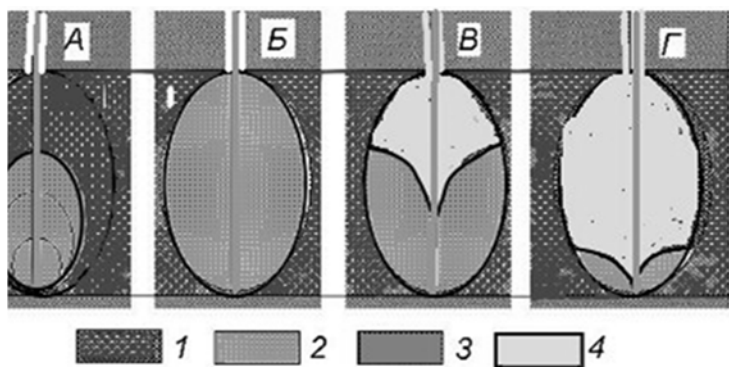


Рис.3. Стадии выемки руды под неустойчивой кровлей с замещением закладочным материалом.

А- развитие овалоида разрыхленной руды, Б- достижение вершиной овалоида кровли, В - вытеснение руды закладочным материалом, Г- конец замещения. 1- руда, 2- разрыхленная руда, 3- вмещающие породы, 4- закладочный материал

песков и супесей. Вода вскрыта на глубине 4 м. До глубины 12 м скважина была обсажена трубами диаметром 219 мм. Затем на глубину 16 метров спустили выдачную трубу диаметром 146 мм. Рядом с добычной скважиной, на расстоянии 0.6 м пройдена скважина для плотностного каротажа радиоактивными методами.

Сначала была проверена возможность подъёма песка шнеком. Как оказалось, песок находится в текучем состоянии и стекает с витков шнека, не достигая поверхности. Поэтому было принято решение проводить извлечение песка желонкой.

В соответствии с расчётом по формуле (9) из скважины извлекли 2.5 м³ песка. Проведенный затем плотностной каротаж показал, что разрыхление песка произошло точно до 12 - метровой глубины. После этого была продолжена добыча песка с одновременной закачкой по обсадной колонне глинистого раствора. Глинистый раствор плотностью 1.2 г/см³ приготовлен из бентонитовой глины. Закачано 5 м³ глинистого раствора и извлечено 6.3 м³ песка. Далее извлекли ещё 1.2 м³ песка без закладки, после чего обнаружили прорыв глинистой пасты к забою добычной колонны, что свидетельствовало о вытеснении песка из объёма ядра текучести. Контрольная скважина, пройденная на расстоянии 0.8 м от добычной, вскрыла интервал разрыхленных песков с 12 до 16.7 м. Спустя месяц после окончания работ на поверхности образовался провал незначительных размеров: глубиной до 10 см и диаметром 0.6 м, что, вероятно, обусловлено усадкой глинистого раствора.

Таким образом, полевые опыты подтвердили:

- возможность добычи песка без размыва, в результате самообрушения,
- возможность контроля процесса методом радиоактивного каротажа,
- правильность формул для расчёта объёма зоны разрыхления.

Главным недостатком проведенного опыта являлась низкая плотность и вязкость глинистого раствора, который использовали в качестве закладочного материала, а также отсутствие приборов

Поверхность раздела между песком и закладочным материалом имела форму, напоминающую форму депрессионной воронки при откачке воды из скважины. Причём крутизна воронки увеличивается с уменьшением вязкости закладочного материала. Наилучшее вытеснение наблюдали при высокой вязкости закладочного материала. Процесс заканчивался заполнением ядра текучести закладочным материалом (г).

Полевые опыты. В институте горно-химической промышленности (г. Львов) проведены опыты по добыче из скважины песка с замещением его глинистой пастой. В аллювиальных отложениях в долине речки Завадовки пробурили скважину глубиной 18 м, которая вскрыла переслаивание

для измерения объема добытого песка и закачанного глинистого раствора.

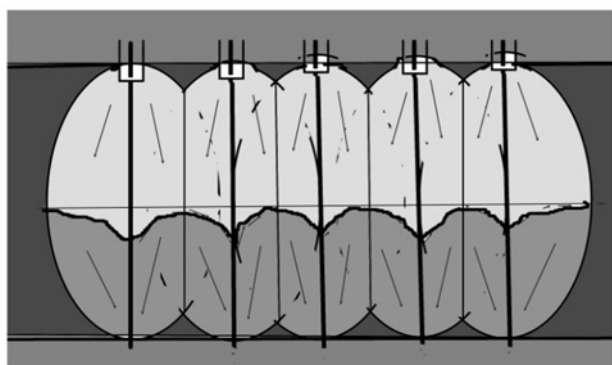
Степень извлечения. Если принять эксцентриситет овалоида в среднем равным 0,5, по формуле (1) получим объем добытой руды из одиночной скважины в зависимости от мощности рудной залежи (таблица 1).

Таблица 1.

Расчетный объем овалоида в зависимости от мощности рудного пласта

| | | | | | | |
|-----------------------|-----|----|-----|------|------|------|
| Толщина пласта, м | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Объем, м ³ | 3.1 | 49 | 393 | 1326 | 3144 | 8140 |

Расчет показывает, что возможное количество добытой руды способом замещения сильно зависит от мощности рудной залежи. Элементарные расчеты показывают, что при расположении буровых скважин по треугольной сетке таким образом, чтобы ядра текучести



1 2 3 4

Рис.4. Фигура выпуска при взаимодействии скважин. 1-вмещающие породы, 2- руда в естественном залегании, 3-руда в разрыхленном состоянии, 4 - закладочный материал

соприкасались между собой, извлечение руды будет составлять 34%.

Взаимодействие добычных скважин.

Аналогом процесса скважинной добычи является выпуск обрушенной руды при системе подземной разработки с магазинированием. Выпуск осуществляют из системы выпускных отверстий. Их размещают на таком расстоянии, чтобы зоны влияния (ядра текучести) пересекались между собой (рис.4). В этом случае извлечение зависит от расстояния между отверстиями. При расположении добычных скважин в прямолинейный ряд с малым между ними расстоянием овалоиды сольются в фигуру, которая в поперечном разрезе будет овальной, а в продольном - приближаться к прямоугольнику.

Принимая овал за эллипс с эксцентриситетом, равным 0,5, получим следующие площади поперечного разреза фигуры в зависимости от мощности пласта, таблица 2.

Таблица 2.

Расчетная площадь эллипса в зависимости от мощности рудного пласта

| | | | | | | |
|---------------------------------|------|----|----|----|-----|-----|
| Толщина пласта, м | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Площадь эллипса, м ² | 1,58 | 10 | 39 | 88 | 157 | 245 |

Коэффициент извлечения ориентировочно отвечает отношению площади эллипса к площади прямоугольника высотой, равной мощности и шириной, равной малой оси эллипса, равному 0,78. Таким образом, при отработке сближенными буровыми скважинами возможно достичь достаточно высокого извлечения запасов.

Для полного извлечения полезного ископаемого необходимо применять твердеющую закладку отработанного блока руды, после чего приступать к работе на следующем блоке. В качестве закладки целесообразно использовать отходы обогащения руды с добавлением связующего материала. По результатам лабораторных опытов добавление к песку всего 3-4% цемента марки 400 обеспечивает образование песчаника.

Анализ литературных данных и наши исследования позволяют сделать вывод о возможности применения предложенного нами способа замещения в условиях глубокого

залегания рассыпных руд, в частности на Мотроновско- Анновском титано-циркониевом месторождении, на Новополтавском месторождении апатита и др.

Извлечение руды из скважин может осуществляться с помощью станка шнекового бурения. Так, станок УГБХ -150 Б обеспечивает возможность бурения на глубину 75 м. Начальный диаметр скважины 490 мм, частота вращения инструмента до 175 об/мин. Производительность шнекового подъёмника может достигать 30 т/час.

Таким образом, на основании теоретических исследований и физического моделирования, а также анализа опытов применения скважинной добычи, предложен способ добычи неустойчивых руд, залегающих под неустойчивыми же породами. Он отличается тем, что для разрушения и доставки руды к входному отверстию выдачной колонны труб используются силы гравитации, а разрушение пород кровли предупреждается закачкой закладочного материала.

Ряд проблем этой технологии ещё требует решения и проверки в опытно-промышленных условиях. В частности, это касается способов непрерывного контроля за расходом и консистенцией руды и закладочного материала, выбора оптимальной сети добычных скважин, способов согласования параметров добычи руды и подачи закладочного материала. Для решения указанных задач необходимо проведение исследовательских работ в промышленном масштабе.

Выводы

1. Предложено понятие о двух состояниях горных пород: устойчивого и неустойчивого, которые зависят от прочности и глубины залегания. К неустойчивым относятся породы, у которых сопротивление сжатию меньше, чем геостатическое давление.

2. В неустойчивой руде не закрепленные стенки буровых скважин обваливаются. При выемке обрушенной руды вокруг скважины образуется ядро текучести овальной формы. Дальнейшее развитие ядра текучести зависит от устойчивости кровли.

3. Под скальной кровлей образуется конусовидная полость с радиусом около двух мощностей рудного пласта. Под полускальной кровлей образуется полость с радиусом, который зависит от радиуса устойчивого обнажения кровли. Под неустойчивой кровлей полость не образуется до тех пор, пока ядро текучести не выйдет на земную поверхность.

4. При подаче закладочного материала в вершину ядра текучести прекращается его развитие и происходит выдавливание разрыхленной руды из ядра текучести к месту отбора. Предложена формула для определения момента, в который нужно начинать подачу закладочного материала.

5. Приведены оценки коэффициента извлечения руды при различном расположении буровых скважин. Для обеспечения достаточного извлечения необходимо применять твердеющую закладку отработанных камер с последующей отработкой запасов между отдельными ядрами текучести.

6. Предложенный способ скважинной добычи может быть применен на глубоко залегающих рассыпных месторождениях и корах выветривания,

Литература

1. Скважинная гидродобыча. Горная энциклопедия, том 4. - М.: Советская энциклопедия, 1989. С.549.
2. Васильев О.Ф. К проектированию установки для безвскрышной добычи погребенных рассыпных месторождений полезных ископаемых. Изд. института гидродинамики СО АН СССР. Новосибирск, 1962. -32 с.
3. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твердых полезных ископаемых. - М.: Недра, 1980. - 229 с.
4. Гайдин А.М. Исследование оптимальных технологий скважинной добычи руд в различных горно-геологических условиях. //Горный журнал. 2009. №2. С. 28-30
5. Желтов Ю.П. Механика нефтегазоносного пласта. – М.: Недра. 1975. - 216 с.
6. Литвинский Г.Г. Свод естественного равновесия - объект изучения и прогноза. //Материалы международной конференции «Форум горняков – 2010» -Д.: Национальный горный университет, 2010. С. 10-18.
7. Бизов В.Ф., Корж В.А. Підземні гірничі роботи. – Кривий Ріг: Мінерал, 2003. - 286 с.
8. Справочник по бурению скважин на воду. Под редакцией Д.Н. Башкатова. - М.:Недра, 1979. - 560 с.
9. Palarski J, Plewa F, Kleta H. Uwarunkowania geotechnologiczne otworowej eksploatacji złoża węgla brunatnego. // Netradiční metody využití ložisek. Ostrava 1999. P. 108-115.