Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института, том XXX, вып. 1, 1955 г.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВЫПУСКНОЙ ВОРОНКИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПУСКА РУДЫ

Канд. техн. наук Н. З. Галаев

В разработке рудных месторождений все большее значение приобретают системы с массовым обрушением, позволяющие эффективно разрабатывать мощные рудные тела. Практика рудников, применяющих в настоящее время эти системы, показывает большой рост производительности труда, снижение эксплуатационных расходов по добыче и часто — повышение извлечения запасов. Многие из этих систем в значительной степени улучшают безопасность ведения работ и санитарно-гигиенические условия труда рабочих. Перечисленные достоинства способствовали внедрению в горнорудную практику систем с магазинированием руды, с подэтажной отбойкой и систем с обрушением.

Системы с массовым обрушением связаны не только с отбойкой и магазинированием значительных количеств руды, но также с проведением массового ее выпуска, часто при условии контакта с обрушенными пустыми породами.

Выпуск руды из выработанного пространства при наличии окружающих горных пород является одним из наиболее ответственных моментов, от которого зависят количественные и качественные потери руды. Некоторое понижение качества добываемой руды в завершающий момент выпуска не снижает преимуществ систем с массовым обрушением и массовым выпуском, так как прогресс технологии обогащения позволяет более смело применять массовые способы добычи с дальнейшей переработкой полезного ископаемого на обогатительных фабриках.

Результаты выпуска руды определяются не только соответствующей организацией и контролем при проведении данного процесса, но также и правильным выбором отдельных конструктивных элементов — «горизонта выпуска руды». К числу этих конструктивных элементов можно отнести расстояние между выпускными воронками, угол откоса стенок воронки, величину диаметров нижнего и верхнего оснований воронки, разность отметок между «горизонтом выпуска» и горизонтом подсечки и др.

Изучение вопросов выпуска руды развивалось в основном двумя путями: 1) лабораторными исследованиями движения сыпучих тел при выпуске их из отверстий, т. е. моделированием процесса выпуска руды, и 2) наблюдениями за выпуском руды непосредственно в производственных условиях.

Ученые и инженеры при изучении закономерностей процесса выпуска руды шли по пути исследования их в лабораторных условиях с дальней-

шей проверкой выводов на практике, так как производственные опыты не дают возможности непосредственных наблюдений за передвижением руды в очистном пространстве, требуют затрат значительных средств и занимают очень большие промежутки времени.

1. Краткая историческая справка

Широкое внедрение систем с массовым обрушением руды в Советском Союзе началось с момента применения так называемой «системы сплошного магазинирования» в 1937 г. на апатитовом руднике им. С. М. Кирова, с успешных опытов принудительной отбойки руды глубокими скважинами в 1940—1941 гг. и с применения системы естественного блокового обрушения в 1948 г. на рудниках Кривого Рога.

Первые лабораторные исследования выпуска руды как в СССР, так и за границей производились в районах, осваивавших новые высокопроизводительные системы с массовым обрушением руды. В Советском Союзе они были начаты в 1938 г. в Криворожском НИГРИ (С. С. Минаев и Д. Л. Тартаковский) и почти в то же время на апатитовом руднике им. С. М. Кирова (А. А. Атрашкевич, П. И. Городецкий, И. А. Кадученко). Результаты исследований выпуска руды на апатитовом руднике сохранились в виде рукописей, притом неполностью.

Остановимся кратко на работах отдельных исследователей процесса выпуска руды.

Установление внутренних перемещений руды С. С. Минаев [3] проводил на моделях со стеклянными стенками. Он впервые правильно подметил закономерность выхода отдельных частиц руды и определил форму последовательно выходящих объемов из выпускной воронки в виде эллипсоидов вращения. С. С. Минаев правильно установил характер распределения скоростей движения отдельных кусков относительно вертикальной оси отверстия.

Касаясь равномерного выпуска из нескольких смежных отверстий, он отмечает наличие так называемой «критической» высоты, ниже которой плоскость горизонтального контакта приобретает волнообразный характер.

Выводы С. С. Минаева о последовательно выходящих объемах руды при выпуске расходятся с выводами Д. Л. Тартаковского [6], сделанными раньше и заключающимися в том, что истечение частиц при выпуске происходит из зоны в виде расширяющегося конуса (верхнее широкое основание которого лежит в плоскости контакта с пустыми породами, нижнее — в плоскости выпускного отверстия).

Опыты, проведенные рядом исследователей на апатитовом руднике им. С. М. Кирова, имели целью изучение вопросов механики движения отбитой руды — правильного установления режима выпуска, определения извлечения и разубоживания руды. Движение апатитовой руды изучалось в зависимости от расстояния между выпускными отверстиями, угла плоскости выпуска или угла наклона плоскости контакта руды и пустых пород, влажности и крупности руды. Исследователи, особенно И. А. Кадученко, проделали значительную работу по определению физических свойств апатитовой руды (угла естественного откоса, объемного веса, гранулометрического состава, влажности и др.). Были проведены эксперименты по установлению дозы выпуска, влияния скорости и равномерности выпуска на извлечение и разубоживание, влияния кусковатости руды и налегающих пород на режим выпуска.

Большую работу по проведению лабораторных и производственных опытов по выпуску руды (1940—1951 гг.), которая позволила создать первые основы теории выпуска руды, выполнил Г. М. Малахов для условий Криворожского железорудного бассейна [2]. Он не только обобщил опыт предыдущих исследователей, но дал правильное толкование многих неясных вопросов. Закономерности выпуска сыпучих тел им проверялись при движении отбитой руды в отдельных блоках. Основываясь на подобии явлений и принимая за исходную инстанцию эллипсоид выпуска, Г. М. Малахов дает расчетные формулы для определения разубоживания руды и потерь.

В 1949—1951 гг. выпуск руды исследовался работниками Криворожского научно-исследовательского геолого-разведочного института (НИГРИ) (Б. Е. Гордон и П. М. Вольфсон), уделившими значительное внимание вопросу подобия истечения сыпучих тел при лабораторных исследованиях движению руды в производственных условиях. К исследованию выпуска руды были привлечены рентгенография и радиография процесса. Расчетные формулы извлечения и разубоживания, так же как и у Г. М. Малахова, были построены на основе представления об объеме фигур выпуска в виде эллипсоидов вращения.

Ряд новых положений процесса выпуска руды, не освещенных в работах предыдущих исследователей, рассмотрен позже Н. С. Деминым и В. В. Куликовым.

Исследование выпуска руды в лабораторных условиях и непосредственно на апатитовом руднике им. С. М. Кирова проводил с 1952 по 1954 г. Всесоюзный научно-исследовательский горнометаллургический институт (ВНИИГОРМЕТ).

Практика выпуска руды и лабораторные исследования закономерностей этого процесса указывают на большое число факторов, определяющих и протекание процесса выпуска и его конечные результаты. Несмотря на многочисленность проведенных работ, полной ясности картины выпуска пока еще нет, так как до сих пор остается невыявленной физическая сторона процесса. Недостаточно изучены вопросы подобия явлений при моделировании, мало освещено влияние конструктивных элементов днища и пр.

2. Общие положения и методика исследований

Выпускная воронка и ее отдельные элементы в целом определяют конструкцию днища блока.

Вопрос влияния выпускной воронки и отдельных ее элементов на результаты выпуска руды в работах предыдущих исследователей либо не освещался совсем, либо ему не придавали большого значения.

В предлагаемой статье приводятся результаты лабораторных исследований выпускной воронки.

Роль выпускной воронки и ее отдельных конструктивных элементов (угла откоса бортов, нижнего и верхнего диаметров, высоты) выяснялась при сравнении с выпуском в таких же условиях через круглое отверстие без воронки.

Результаты выпуска определялись на основании получаемых фигур выпуска. Под фигурами выпуска понимаются объемы, поверхность которых представляет геометрическое место частиц, одновременно выходящих из выпускного отверстия или выпускной воронки (рис. 1).

Лабораторные опыты проводились на моделях различных масштабов (1 : 200; 1 : 100; 1 : 67). В качестве сыпучих материалов применялись кварцевый песок при крупности частиц 0,5—1,5 *мм* и апатитовая руда следующих классов крупности: 0,5—1,5 *мм;* 1,5—3,0 *мм*; 3,0—5,0 *мм*.

В зависимости от масштаба модели изменялись высота засыпки, диаметр выпускных отверстий и размеры воронок. Для фиксирования формы фигур выпуска в массу сыпучего материала через 5 *см* по высоте укладывались горизонтальные слои марок с обозначением координат их положения. Непосредственные наблюдения выпуска руды проводились также у стеклянной стенки модели. Аналогичная методика была применена в Кривом Роге и в институте ВНИИГОРМЕТ.

Основной предпосылкой, явившейся исходным моментом исследований влияния выпускной воронки, было следующее.

Сыпучий материал (руда) до начала выпуска находится в состоянии покоя, равновесия. При выпуске сыпучего материала (или руды) равновесие нарушается и наблюдаются явления, аналогичные происходящим при смещении подпорной стенки [4], т. е. в массе сыпучего материала происходят сдвиги по плоскостям, наиболее вероятный угол наклона которых с направлением главного напряжения составляет $\pm\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\rho}{2}\right)$. Касательная к криволинейной поверхности скольжения с горизонтальной плоскостью составляет «угол выпуска»

$$\theta=\frac{\pi}{4}+\frac{\rho}{2}, \qquad (1)$$

где ρ — угол внутреннего трения.

Угол внутреннего трения ρ сыпучего материала по своей величине меньше угла естественного откоса (табл. 1).

Зная ρ, можно определить угол выпуска θ по формуле (1).

Несколько завышенные значения угла выпуска можно определить, исходя из угла естественного откоса φ:

$$\theta_1=\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}. \qquad (2)$$

В практике рудников определение угла естественного откоса не представляет трудностей. Поэтому с небольшой погрешностью определение угла выпуска можно производить по формуле (2).

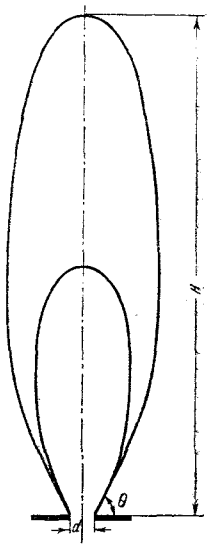


Рис. 1. Фигура выпуска руды:
θ — угол выпуска; H — высота рудного слоя; d — диаметр выпускного отверстия

Таблица 1

Сыпучий материал	Крупность частиц, *мм*	Средние значения	
		угла естественного откоса φ	угла внутреннего трения ρ*
Апатитовая руда . . .	0,5—1,5	38°00′	36°00′
Апатитовая руда . . .	1,5—3,0	37 30	33 40
Апатитовая руда . . .	3,0—5,0	34 15	31 00

3. Влияние угла откоса выпускной воронки

Как сказано выше, при истечении сыпучего материала (или руды) из отверстия образуется криволинейная поверхность скольжения между отдельными частями материала (покоящегося и движущегося).

* Угол внутреннего трения определялся на приборе Гидропроекта для следующих значений нормального давления: 1, 3, 5 *кг/см*^{2}.

Сопротивление движению материала характеризуется внутренним трением между частицами. При введении в массу сыпучего материала наклонной плоскости скольжения, в виде борта воронки, сопротивление скольжению движущегося к выпускному отверстию потока сыпучего материала уменьшается.

Выпуск руды через воронку с углом откоса, превышающим угол выпуска руды, т. е. $\alpha > \theta$ (где α — угол откоса воронки), приводил к сужению фигуры и уменьшению веса извлекаемого материала (рис. 2). Если же угол откоса выпускной воронки был меньше угла выпуска руды, т. е. $\alpha < \theta$, сфера влияния выпускной воронки увеличивалась, так как расширение фигуры выпуска в части, непосредственно прилегающей к воронке, вызывало расширение лежащих выше частей. Увеличение сферы влияния выпускной воронки в наших опытах при общей высоте засыпки материала 50 *см*, высоте воронок 6 *см* и диаметре нижнего отверстия 2 или 3 *см* наблюдалось в том случае, когда разность $\theta - \alpha = 5—10°$ (большее значение разности относится к материалу более крупному).

Дальнейшее уменьшение угла откоса выпускной воронки (в наших опытах уже для угла 45°) приводило к прекращению влияния выпускной воронки на протекание процесса выпуска — результаты выпуска были одинаковы с результатами выпуска без воронки.

На рис. 2 показаны фигуры выпуска для воронок с углами откоса 70 и 55°. Для сравнения на чертеже показаны контуры фигуры выпуска для отверстия без воронки.

Сделанные выше выводы подтвердились при непосредственном наблюдении процесса выпуска через стеклянную стенку модели. Фигуры разрыхления, образовавшиеся в результате выпуска, как бы повторяют фигуры выпуска, поэтому по их размерам можно судить о влиянии выпускной воронки.

На рис. 3 показаны фигуры разрыхления для выпускных воронок с углом откоса 45, 70 и 60°.

Изогнутые полоски окрашенной руды показывают, что в случае выпуска через воронку с углом откоса $\alpha = 60°$ (рис. 3, *в*) фигура разрыхления (а следовательно и фигура выпуска) будет наибольшей, а при $\alpha = 70°$ (рис. 3, *б*) — наименьшей. Выпуск через воронку с углом откоса $\alpha = 45°$ (рис. 3, *а*) протекает так же, как и в случае круглого отверстия, так как между воронкой и движущимся потоком руда остается неподвижной.

Опыты показали, что для каждого сыпучего материала существуют оптимальные углы откоса воронок, которые увеличивают извлечение сыпучего материала. Значение оптимального угла откоса воронки $\alpha_{опт}$ лежит между углом выпуска θ и предельным углом сползания руды по поверхности воронки $\alpha_{пред}$, т. е.

$$\theta > \alpha_{опт} > \alpha_{пред}. \qquad (3)$$

На основании выражения (3) на практике можно определить верхний и нижний пределы углов откоса воронки в каждом конкретном случае: угол θ из выражения (2), а $\alpha_{пред}$ — при испытании перепуска руды по рудоспускам с различным углом наклона.

Лабораторные исследования выпуска руды через воронки с различным углом откоса позволили определить оптимальные углы для имевшихся сыпучих материалов (табл. 2) [1].

---

[1] Исследования проводились при высоте засыпки 50 *см*, при воронке высотой 6 *см* и диаметре нижнего отверстия 2 *см*.

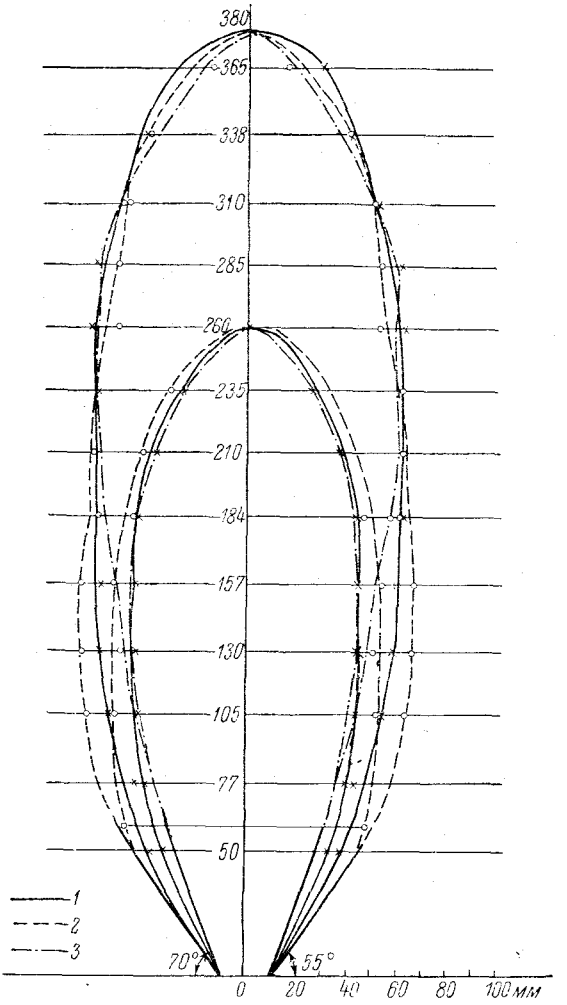


Рис. 2. Изменение фигур выпуска в зависимости от угла откоса воронки:

1 — при выпуске без воронки; *2* — при выпуске с воронкой ($\alpha = 55°$); *3* — при выпуске с воронкой ($\alpha = 70°$)

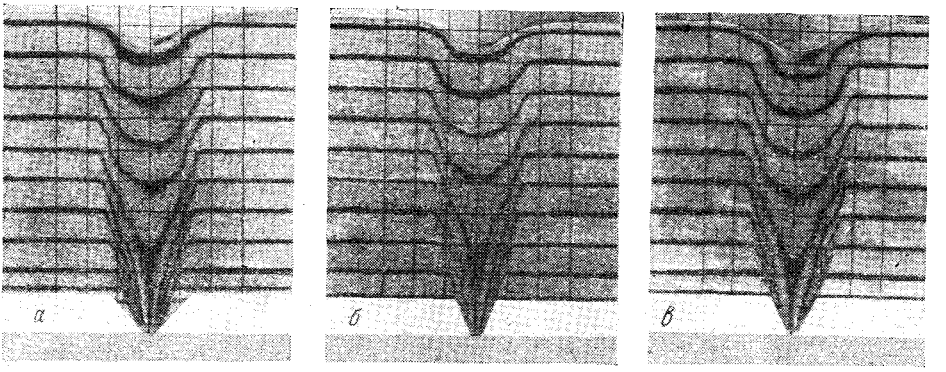


Рис. 3. Фигуры разрыхления:

а — $\alpha = 45°$; *б* — $\alpha = 70°$; *в* — $\alpha = 60°$

Таблица 2

Сыпучий материал	Крупность частиц, мм	Угол выпуска $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$	Оптимальный угол откоса воронки $\alpha_{опт}$
Кварцевый песок . . .	0,5—1,5	63°00′	60°00′
Апатитовая руда	1,5—3,0	61 50	55 00
Апатитовая руда	3,0—5,0	60 30	50 00

Уменьшение угла откоса воронки ниже оптимального приводит к ухудшению результатов выпуска.

4. Влияние крупности сыпучего материала на результаты выпуска

Выпуск сыпучего материала определенной крупности характеризуется соответствующим углом выпуска, который определяет сферу влияния выпускного отверстия — размеры фигур выпуска. Опыты с выпуском апатитовой руды крупностью 0,5—1,5 *мм*, 1,5—3,0 *мм* и 3,0—5,0 *мм* показали, что с увеличением размера частиц (при прочих равных условиях) объем фигур выпуска увеличивается (рис. 4).

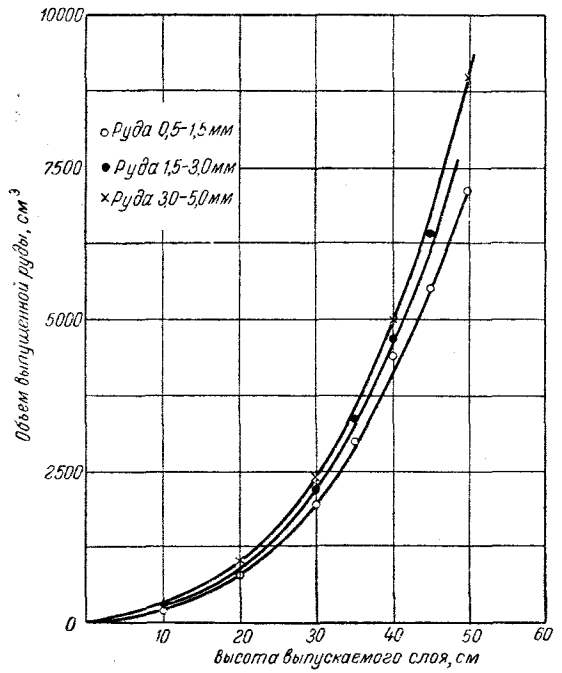


Рис. 4. Зависимость объемов выпуска от крупности материала ($d = 3$ *см*)

Следовательно, при выпуске более крупной руды сфера влияния выпускного отверстия расширяется, т. е. для достижения одинаковых результатов выпускные отверстия при крупной руде можно располагать реже, чем при мелкой.

Уменьшение оптимального угла откоса выпускной воронки с повышением крупности сыпучего материала подтверждает известное в практике систем разработки положение о возможности увеличения диаметра выпускных воронок (а следовательно и расстояния между ними) при крупнокусковатой руде.

5. Влияние шероховатостей стенок воронки на результаты выпуска руды

При движении руды к выпускному отверстию в области воронки, кроме трения между отдельными кусками движущейся руды, имеет место трение скольжения массы руды по поверхности воронки. Уменьшение трения скольжения при хорошем выполнении поверхности воронки облегчает сползание массы руды и повышает интенсивность выпуска.

В противном случае неровности поверхности препятствуют движению руды, уменьшают скорость потока и приводят к сокращению сферы влияния воронки.

Для проверки этих положений были проведены специальные опыты с воронками, имеющими различную шероховатость поверхности.

Апатитовая руда крупностью 1,5—3,0 *мм*, загруженная в модель до высоты 58 *см*, выпускалась через воронки, сделанные из различных материалов (картона, алебастра, картона с наклеенными рудными частицами). Вытекающие объемы определялись по выходу марок. О величине трения между рудой и поверхностью воронки судили по среднему углу сползания частиц руды (крупностью 1,5—3,0 *мм*) по различного рода поверхностям. На основании опытов были получены следующие средние величины углов сползания:

руда по насыпанной руде	33°40′
руда по приклеенной руде	45 00
руда по алебастру (гладкому)	29 00
руда по картону	28 00

Результаты опытов показали, что при выпуске руды до одного и того же уровня извлекаемые объемы увеличиваются, если поверхность воронки оказывает меньшее сопротивление скольжению материала. В табл. 3 приводится сравнение результатов (по весу извлеченного сыпучего материала) выпуска через воронки с выпуском через круглое отверстие (в этом случае имеет место сползание руды по свободно насыпанной руде).

При выпуске через воронку, внутренняя поверхность которой представляла приклеенные к картону рудные частицы, сопротивление движению увеличилось настолько, что выпускаемые объемы при одинаковых высотах были меньше объемов, получаемых при выпуске через круглое отверстие.

Отсюда следуют практические выводы:

1) поверхность воронки после разделки должна быть гладкой — обеспечивающей повышение сферы влияния воронки, улучшение выпуска, уменьшение вероятности заторов;

2) воронка, поверхность откоса которой имеет значительные впадины и выступы, затрудняет выпуск, сокращает извлечение (в наших опытах на 10—40%), особенно при небольшой высоте рудного слоя;

3) уменьшение поперечного сечения вытекающего потока за счет плохой разделки воронок приводит к более быстрому наступлению разубоживания руды.

6. Исследование влияния нижнего и верхнего оснований воронки на результаты выпуска

Нижний диаметр выпускной воронки (или выпускного отверстия) определяет количество одновременно вытекающего материала.

В табл. 4 приводятся данные по извлечению апатитовой руды крупностью 1,5—3,0 *см* при выпуске через отверстия различных диаметров (2; 3; 3,5; 4 *см*). Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что при выпуске руды до одинаковой высоты вес извлеченного материала будет бóльшим в случае большого диаметра выпускного отверстия (вследствие увеличения поперечных размеров фигур выпуска).

В горнорудной практике при разработке полезных ископаемых размер выпускного отверстия выбирается не только с учетом кусковатости руды, но также исходя из устойчивости выработок горизонта вторичного

дробления, и поэтому диаметр выпускного отверстия обычно превышает размер среднего куска.

Таблица 3

Слои	Высота выпускаемого слоя, *см*	Количество извлеченного материала при опыте							
		без воронки		с картонной воронкой		с воронкой из алебастра		с воронкой из шероховатой рудной поверхности	
		г	%	*г*	%	*г*	%	*г*	%
3	15	566	100	976	172	814	143	—	—
4	20	1176	100	1626	138	1620	138	1063	91
5	25	1981	100	2889	146	2512	127	1898	96
6	30	3399	100	4296	126	4074	139	3341	99
7	35	5163	100	5926	115	6119	118	4961	96
8	40	7791	100	8464	109	8458	109	7067	91
9	45	10740	100	11698	109	11162	104	9953	93
10	50	14184	100	15019	106	14369	101	13136	93
11	55	17428	100	17890	103	17797	102	15727	90

Примечания: 1. Размеры воронок в опытах остаются постоянными: $\alpha = 60°$, $d = 2$ *см*, $h_в = 6$ *см*.

2. Данные опыта без воронки приняты за 100%.

Таблица 4

Высота слоя руды, *см*	Вес извлекаемой апатитовой руды (крупность 1,5—3,0 *мм*) при диаметре выпускного отверстия, *см*							
	2,0		3,0		3,5		4,0	
	г	%	*г*	%	*г*	%	*г*	%
20	996	100	1138	114	—	—	1522	152
25	1623	100	2045	126	2122	130	2614	161
30	2767	100	3257	117	3781	137	3301	141
35	4270	100	5060	118	5418	127	5793	136
40	6140	100	6858	112	7320	119	7426	121
45	8795	100	9121	104	9644	111	10988	125
50	11734	100	—	—	12243	104	13266	113

О влиянии величины диаметра верхнего основания воронки наглядно свидетельствуют результаты опытов по выпуску апатитовой руды крупностью 0,5—1,5 *мм*. Для исследований были взяты воронки, имевшие одинаковый диаметр выпускного отверстия. Диаметр верхнего основания выбирался или одинаковым для воронок, имевших различный угол откоса, или различным в случае воронок одного и того же угла откоса.

Данные опытов показали, что при выборе диаметра верхнего основания воронки большую роль играет угол откоса воронки. Например, при выпуске рудного слоя одинаковой высоты через воронки с углами откоса 45 и 60°, имевшие одинаковый диаметр верхнего основания (14 *см*), в первом случае извлекается 6381 *г* (как и в случае выпуска без воронки), а во втором — 7706 *г* (на 20% больше, чем при воронке с углом откоса 45°). Аналогичные опыты с воронками с углами 60 и 70° при одинаковом диаметре верхнего основания (9 *см*) показали, что 60-градусная воронка дает извлечение на 15% больше (6450 *г*), чем воронка с углом откоса 70° (5587 *г*).

На рис. 5 в виде кривых представлено сравнение извлечения руды через различные воронки с результатами извлечения через круглое отверстие, принятыми за 100%.

Опыты с выпускными воронками, оказывающими влияние на выпуск, при одном и том же угле откоса и различных диаметрах верхнего основания позволили сделать следующий вывод: количество извлекаемого материала возрастает до тех пор, пока не прекратится влияние стенок воронки на фигуру выпуска.

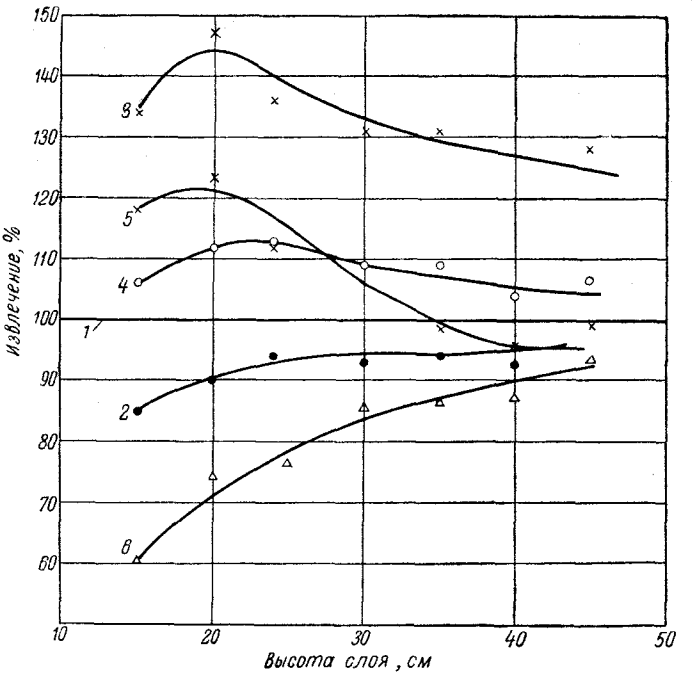


Рис. 5. Кривые извлечения руды (крупностью 0,5—1,5 *мм*).

1 — воронки нет, диаметр нижнего основания $d = 2$ *см*; *2* — воронка, угол откоса $\alpha = 45°$; $d = 2$ *см*, диаметр верхнего основания $D = 14$ *см*, высота воронки $h_в = 6$ *см*; *3* — воронка, $\alpha = 60°$, $d = 2$ *см*, $D = 14$ *см*, $h_в = 10$ *см*; *4* — воронка, $\alpha = 60°$, $d = 2$ *см*, $D = 19$ *см*, $h_в = 6$ *см*; *5* — воронка, $\alpha = 70°$, $d = 2$ *см*, $D = 9$ *см*, $h_в = 9$ *см*; *6* — воронка, $\alpha = 70°$, $d = 2$ *см*, $D = 6$ *см*, $h_в = 6$ *см*

Влияние стенок выпускной воронки на изменение фигуры выпуска показано на рис. 6; пунктиром обозначены фигуры, образовавшиеся при выпуске через воронку с высотой вдвое меньшей.

Выбор площади (или диаметра) верхнего основания воронки, как показали опыты, необходимо связывать с ее высотой. Большая высота воронки, а следовательно, и значительная площадь верхнего основания, даже при оптимальном угле откоса воронки, приводит к увеличению расстояний между выпускными отверстиями и может явиться причиной повышения потерь руды в гребнях между воронками. Поэтому высоту выпускной воронки нельзя выбирать произвольно. При выборе необходимо учитывать физические свойства выпускаемой руды и высоту выпускаемого рудного слоя. Если угол откоса воронки взят оптимальным на основании изучения физических свойств руды и соответственно выбран диаметр выпускного отверстия, то, основываясь также на соображениях

прочности целиков, должно определяться расстояние между горизонтами выпуска и подсечки.

Соображения прочности целиков над горизонтом выпуска руды могут несколько изменить принятое предварительно расстояние между выпускными отверстиями.

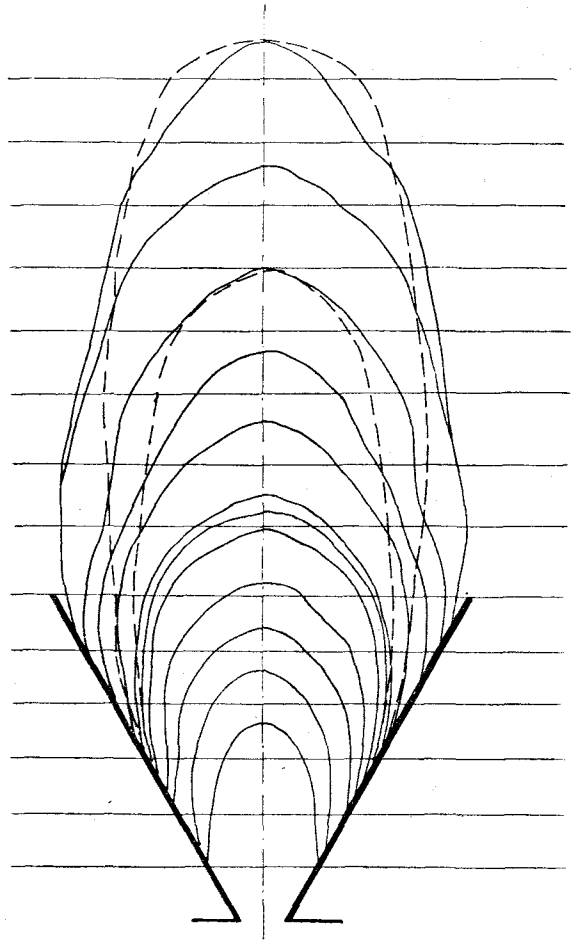


Рис. 6. Влияние высоты воронки с оптимальным углом откоса на изменение фигуры выпуска

7. Влияние выпускной воронки на разубоживание руды

Процесс выпуска руды после массового обрушения можно разделить на две части: 1) выпуск чистой руды, 2) выпуск разубоженной руды.

Выпуск чистой руды продолжается от начала выпуска до тех пор, пока вершина фигуры выпуска не коснется контакта руды с пустыми породами. Как только вершина фигуры выпуска достигла пустых пород, к выпускному отверстию одновременно с рудой будут стремиться пустые породы — начинается процесс разубоживания. По мере выпуска отношение объема пустых пород, поступающих в выпускную воронку, к объему извлекаемой рудной массы будет увеличиваться — разубоживание растет, снижается содержание полезного компонента.

Величину среднего разубоживания R можно определить тремя способами.

1. Сопоставлением весового количества пустых пород и рудной массы:

$$R_в = \frac{Q_п}{Q_{рм}} \cdot 100\%, \qquad (4)$$

где $Q_п$ — вес пустых пород, $т$;
$Q_{рм}$ — вес извлеченной рудной массы с начала выпуска, $т$.

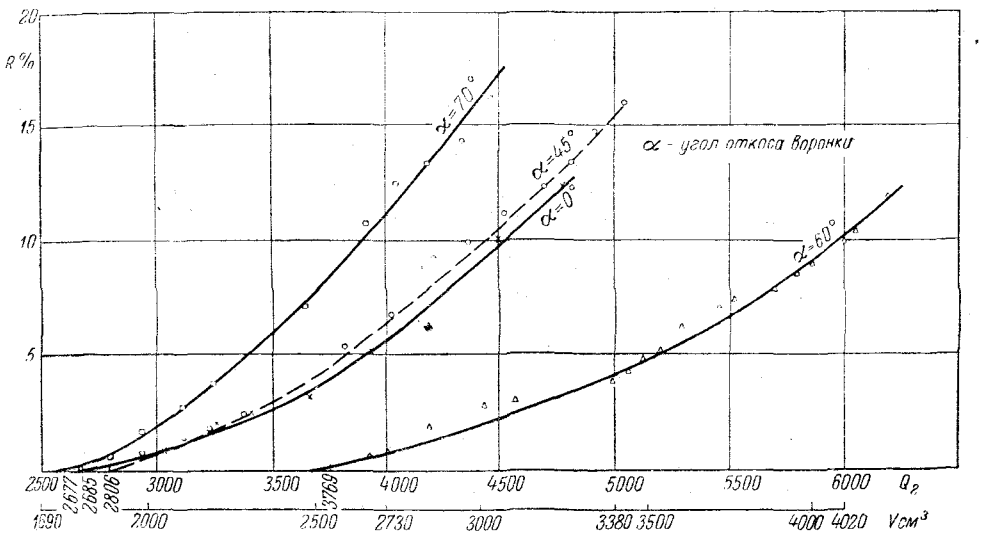


Рис. 7. Кривые разубоживания (опыты с песком)

2. Отношением объема пустых пород к объему выпущенной рудной массы:

$$R_0 = \frac{V_п}{V_{рм}} \cdot 100\%, \qquad (5)$$

где $V_п$ — объем пустых пород, $т$;
$V_{рм}$ — объем рудной массы с начала выпуска, $т$.

3. Опробованием рудного массива, пустых пород и рудной массы:

$$R = \frac{p - q}{p - r} \cdot 100\%, \qquad (6)$$

где p — содержание металла в рудном массиве, % или $г/т$;
q — содержание металла в добытой рудной массе, % или $г/т$;
r — содержание металла в пустых породах, засоряющих руду при выпуске, % или $г/т$.

Наиболее удобным и дешевым методом определения среднего разубоживания в лабораторных условиях оказался метод сопоставления веса извлекаемых пустых пород и рудной массы. Для удобства описания назовем его «весовым» разубоживанием.

Методика исследования среднего разубоживания заключалась в том, что весь сыпучий материал по высоте условно разделялся на «руду» и «породу». По мере выпуска вес «руды» и «породы» определялся количе-

ством «рудных» и «породных» марок или посредством тщательного отбора «рудных» и «породных» частиц в отдельных дозах выпуска.

На рис. 7 показано среднее разубоживание, подсчитанное по формуле (4), в опытах с кварцевым песком. Из графика следует, что разубоживание наступает раньше и интенсивнее растет при выпуске через воронку с углом откоса 70°. Выпуск из круглого отверстия ($\alpha = 0°$) и воронки с углом откоса 45° дает почти одинаковые результаты разубоживания.

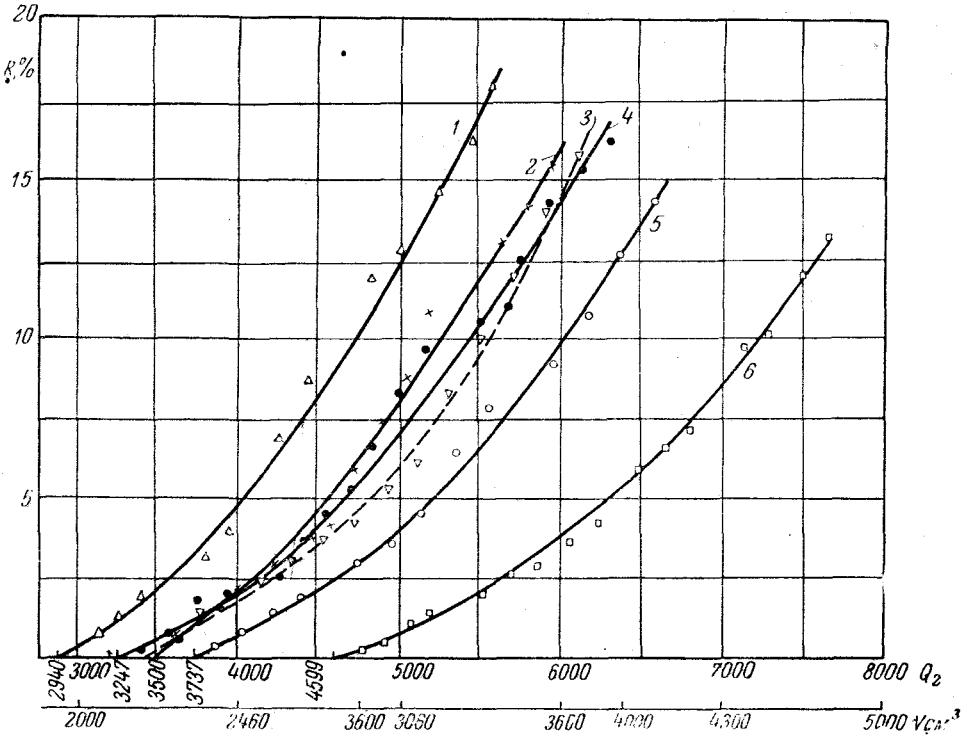


Рис. 8. Кривые разубоживания (в опытах с апатитовой рудой крупностью 0,5—1,5 *мм*):

1 — угол откоса $\alpha = 70°$, диаметр нижнего основания $d = 2$ *см*, диаметр верхнего основания $D = 6$ *см*, высота воронки $h_в = 6$ *см*; *2* — $\alpha = 70°$, $d = 2$ *см*, $D = 9$ *см*, $h_в = 9$ *см*; *3* — $\alpha = 0°$, $d = 2$ *см*; *4* — $\alpha = 45°$, $d = 2$ *см*, $D = 14$ *см*, $h_в = 6$ *см*; *5* — $\alpha = 60°$, $d = 2$ *см*, $D = 9$ *см*, $h_в = 6$ *см*; *6* — $\alpha = 60°$, $d = 2$ *см*, $D = 14$ *см*, $h_в = 10{,}4$ *см*

Наилучшие показатели получаются при выпуске через воронку с углом откоса 60°. В этом случае разубоживание наступает позже и возрастает медленнее.

Подобные результаты подтверждаются опытами с апатитовой рудой. Кривые разубоживания, представленные на рис. 8, показывают влияние выпускных воронок, имеющих различные размеры (высота выпускаемого слоя 50 *см*), на начало и рост разубоживания.

8. Роль выпускной воронки при выпуске из ряда смежных отверстий

В горнорудной практике выпуск руды производится последовательно или одновременно из нескольких смежных воронок. Выпускные воронки в данном случае оказывают влияние друг на друга и при правильном ведении выпуска определяют результаты извлечения, потерь и разубожи-

вания руды. Угол выпускной воронки и расстояние от горизонта выпуска до горизонта подсечки определяют расстоянием между отдельными выпускными отверстиями.

Роль выпускной воронки при выпуске руды из ряда смежных отверстий можно определить следующими опытами. Апатитовая руда с крупностью частиц 3—5 *мм* выпускалась равномерно-последовательно из пяти смежных отверстий диаметром 3 *см* без воронок или с воронками

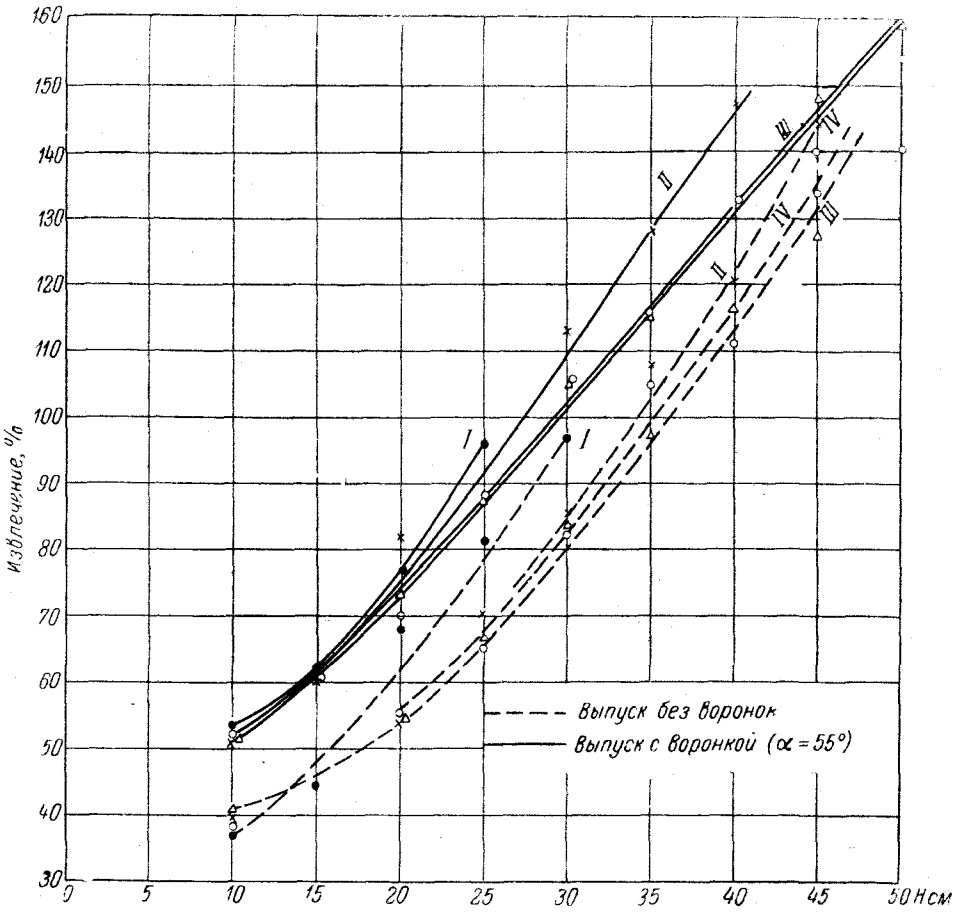


Рис. 9. График извлечения рудной массы при выпуске с воронкой и без воронки из ряда смежных отверстий (крупность руды 3—5 *мм*):

I, II, III, IV — номера выпускных отверстий

(высота воронок 5,5 *см*, угол откоса 55°). Расстояние между выпускными отверстиями 10 *см*; высота рудного слоя 55 *см*.

В процессе выпуска контакт руды с пустыми породами сохранялся горизонтальным до определенной «критической» высоты. Затем он принимал волнообразную форму, что указывало на начало обособленного выпуска из каждого отдельного отверстия. Неподвижные гребни руды, остающейся между выпускными отверстиями, составляли потери. Чем выше от плоскости выпускного отверстия контакт пустых пород с рудой принимал волнообразный характер, тем больше были гребни.

Выпуск руды через воронки с углом откоса 55° по сравнению с выпуском без воронок приводит к повышению извлечения рудной массы.

На графике рис. 9 приведены результаты извлечения рудной массы в зависимости от высоты рудного слоя при выпуске через ряд смежных отверстий с воронками и без них (отверстия *I, II, III, IV*). Извлечение рудной массы увеличивается с высотой рудного слоя (кривые *II* и *III* для одних и тех же условий опыта). Если условно принять контакт руды

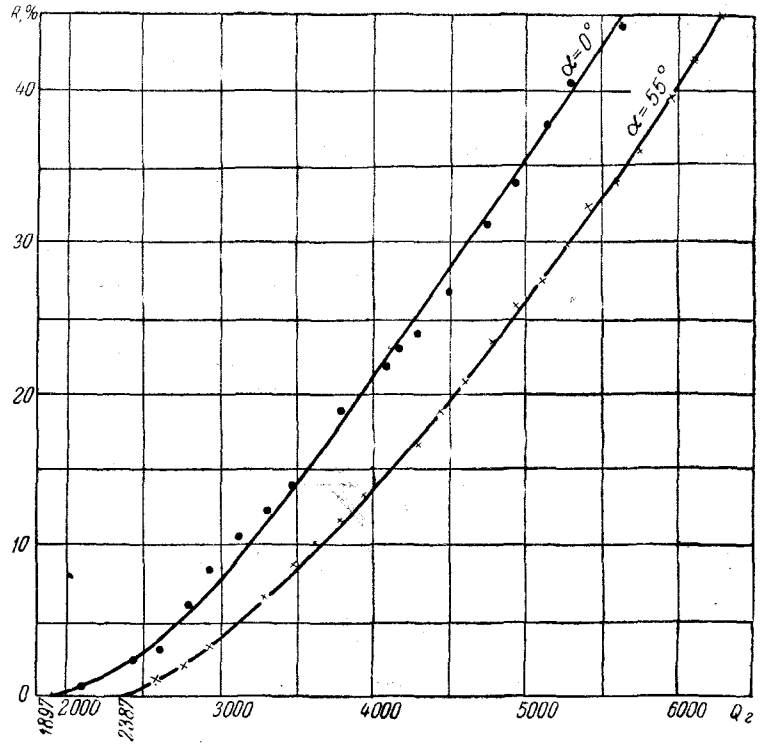


Рис. 10. Среднее разубоживание при выпуске из смежных отверстий (крупность руды 3—5 *мм*)

с пустыми породами на высоте 30 *см* от плоскости отверстий, то извлечение чистой руды при выпуске через выпускные воронки, по сравнению с выпуском без воронок, увеличивается в среднем приблизительно на 30%

Повышение извлечения рудной массы в опытах с выпускными воронками происходит за счет расширения сферы влияния выпускной воронки и, следовательно, увеличения влияния отверстий друг на друга. На это указывает следующий факт. Если без воронок контакт руды с пустыми породами начинает принимать волнообразный характер на высоте 30 *см* от плоскости отверстий, то с воронками эта высота понижается почти до 20 *см*, т. е. приблизительно на одну треть.

Выполненные опыты по выпуску руды из смежных отверстий подтверждают правильность ранее сделанных выводов для одиночной выпускной воронки.

Характер разубоживания при выпуске из смежных отверстий определялся путем наблюдения за выпуском из одного и того же отверстия для всей серии опытов. Такая постановка обеспечивала полную сравнимость данных различных экспериментов. Как показывают кривые (рис. 10), разубоживание при выпуске через смежные воронки начи-

нается позже и растет медленнее. При одинаковом количестве извлеченной рудной массы среднее разубоживание в случае выпуска через плоское круглое отверстие выше на 4—10%, причем эта разность по мере выпуска увеличивается.

Выводы

1. При выпуске через воронки одинаковой высоты, но с различными углами откоса фигура выпуска будет максимальной для воронки с оптимальным углом откоса.

2. Поперечные размеры фигур выпуска зависят не только от физико-механических свойств вытекающих сыпучих материалов (или руды), но и от характера поверхности воронки.

3. Наибольшее извлечение чистой руды, более позднее наступление и медленное нарастание разубоживания характерны для выпуска через воронки, имеющие оптимальный угол откоса.

4. Высота выпускной воронки (при оптимальном угле ее откоса и постоянной высоте рудного слоя) не может быть как угодно большой, так как это приводит к увеличению расстояния между выпускными отверстиями, обособленному выпуску и повышению потерь руды в гребнях.

5. Выводы, сделанные по опытам выпуска руды из одиночного отверстия, подтверждаются опытами выпуска из ряда смежных отверстий.

6. Оптимальный угол откоса воронки должен быть исходным моментом при определении расстояний между выпускными отверстиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малахов Г. М. Системы разработки с отбойкой минными скважинами. Металлургиздат, 1947.

2. Малахов Г. М. Выпуск руды из обрушенных блоков. Металлургиздат, 1952.

3. Минаев С. С. Лабораторное исследование выпуска руды. Горный журнал, 1940, № 10—11.

4. Прокофьев И. П. Давление сыпучего тела и расчет подпорных стенок. Стройиздат, 1947.

5. Протодьяконов М. М. Давление горных пород и рудничное крепление. ГОНТИ, 1931. ч. I, изд. 2-е.

6. Тартаковский Д. Л. Изучение движения отбитой руды при выпуске. Сборник научных трудов НИГРИ, 1941, № 1.

Поступило
2/VI 1954 г.