УДК
622.778.2 :
622.341.1 :
532.545

Р.В. Калюжная

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА ОЖИЖЕННОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ СУСПЕНЗИИ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ

Рассмотрено влияние внешнего магнитного поля низкой напряженности на свойства ферромагнитной суспензии, сформированной из частиц различной крупности магнетита. В процессе экспериментальной работы определено содержание твердой фазы в суспензии путем измерения высоты ожиженного слоя при фиксированных скоростях восходящего потока и изменяющейся величине напряженности магнитного поля от 0 до 4,8 кА/м. Представлены графические результаты зависимости объемной концентрации частиц магнетита в ожиженной суспензии от скорости восходящего потока при наложении магнитного поля. Дано качественное описание поведения ожижаемой суспензии, состоящей из частиц магнетита Оленегорского месторождения крупностью: -100+71 мкм, -125+100 мкм и -160+125 мкм. Установлены критические скорости ожижения ферромагнитного материала и определены диапазоны существования ожиженной суспензии в стабильном состоянии для исследуемых классов крупности магнетита. Полученные данные предложено использовать для оптимизации технологических параметров процесса магнитно-гравитационной сепарации.

Ключевые слова: ферромагнитная суспензия, ожижженый слой, магнитное поле, восходящий поток, частицы магнетита, объемная концентрация, магнитно-гравитационная сепарация.

Магнитно-гравитационное разделение осуществляется при воздействии на минеральную суспензию, содержащую сильномагнитные тонкоизмельченные частицы, однородным магнитным полем низкой напряженности и центробежно-восходящим водным потоком, что приводит к формированию ожиженного ферромагнитного слоя. Образовавшийся слой в свою очередь является высокоэффективной разделительной

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 392–402.
© 2016. Р.В. Калюжная.

средой, которая имеет широкий диапазон регулируемых параметров в зависимости от соотношения магнитных и гидродинамических сил [1].

Разделительный объем магнитно-гравитационного сепаратора по своей сути представляет магнитно-стабилизированный кипящий слой, отличающийся от классического кипящего слоя более четким разделением твердой и жидкой фаз, более низким перепадом давления и широким диапазоном регулирования гидродинамических свойств [2]. Кипящий слой с наложенным внешним магнитным полем имеет более высокое качество ожижения.

В русскоязычной литературе понятие о магнитно-стабилизированном ожиженном слое ферромагнитных частиц впервые освещено в работе М.В. Филиппова [3], в которой была дана качественная фазовая диаграмма для изменения характера слоя ферромагнетика в магнитном поле, представленная на рис. 1.

Исследование свойств магнитно-стабилизированной суспензии необходимо для осуществления перехода к оптимизации технологических параметров магнитно-гравитационной сепарации, при которой процесс разделения минералов происходит в среде, аналогичной классическому кипящему слою.

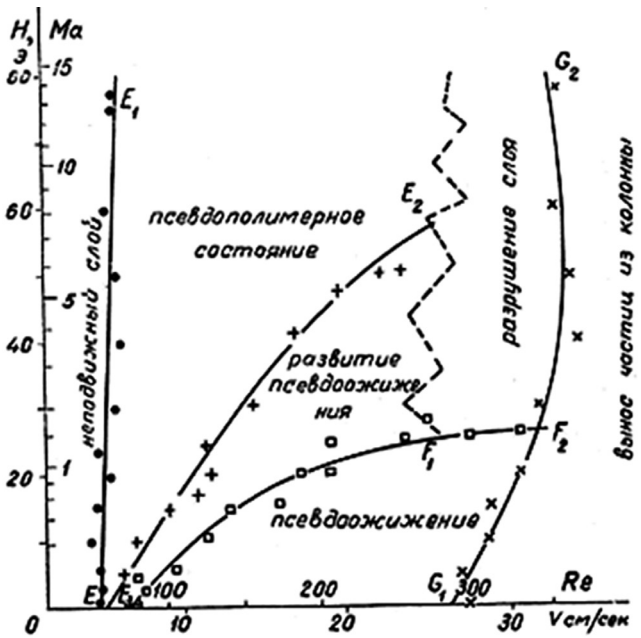


Рис. 1. Фазовая диаграмма для взвешенного слоя ферромагнитных частиц

Исследования в области гидродинамики магнитно-стабилизированных суспензий проводились зарубежными авторами, в частности А. Урсу и др. [4]. В рамках его экспериментальной работы в качестве материала были использованы стальные шарики марок WS70 и WS170, процесс осуществлялся в поперечном магнитном поле, генерируемом отклоняющимися катушками. Полученные результаты подтвердили основополагающее влияние напряженности магнитного поля на стабильность ожижения слоя из магнитных частиц. Феноменология эффекта рассмотренного влияния была подтверждена в работе [5] в условиях микрогравитации.

В настоящей работе в качестве исследуемого материала были взяты узкие классы крупности магнетита Оленегорского месторождения: -100+71 мкм, -125+100 мкм и -160+125 мкм.

Эксперименты проведены на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 2. В колонку из оргстекла помещали навеску магнетита 0,2 кг. Подачу воды с определенной скоростью осуществляли через нижний патрубок. Вода сливалась из колонки через сливной желоб, возвращаясь в расходную емкость. Схему подачи воды осуществляли по замкнутому контуру с целью сохранения температуры воды постоянной. Магнитное поле генерировалось электромагнитной системой, выполненной в виде соленоидных катушек.

Различные модификации представленного лабораторного стенда ранее были использованы в работах зарубежных исследователей [5, 6, 7, 8, 9].

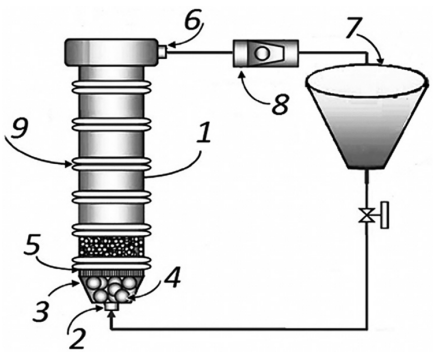


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: 1 – колонка из оргстекла; 2 – нижний патрубок; 3 – полость конической формы; 4 – пластиковые шарики; 5 – сетка с ячеей 42 мкм; 6 – сливной желоб; 7 – расходная емкость; 8 – водяной насос; 9 – электромагнитная система

В процессе экспериментальной работы определяли содержание твердой фазы в суспензии. Производили измерения высоты ожиженного слоя при фиксированных скоростях восходящего потока, затем при тех же скоростях с увеличением напряженности магнитного поля от 0 до 4,8 кА/м с шагом 0,8 кА/м.

Объемная концентрация частиц магнетита в ожиженном слое:

$$C_V = \frac{V_T}{V_C},$$

где $V_Т$ – объем твердой фазы, м^3; $V_С$ – объем суспензии (ожиженного слоя), м^3.

Формула для определения насыпной плотности исследуемого материала [10]:

$$\rho_H = \frac{G_1 - G}{V},$$

где G_1 и G – вес стакана с материалом и без него, кг; V – внутренний объем стакана, м^3.

Эксперименты, проведенные в отсутствии магнитного поля ($H = 0$) показали поведение ферромагнитной суспензии, соответствующее классическому ожиженному слою. Визуальными наблюдениями было установлено четыре области состояния в зависимости от скорости потока: неподвижное, малоподвижное, взвешенное и область выноса частиц из слоя, что хорошо согласуется с теорией кипящих слоев.

Полученные результаты (рис. 3) показали, что для материала каждой крупности имеется определенная область скорости восходящего потока, при которой слой находится в состоянии ожижения, ограниченная начальной и критической (вынос частиц

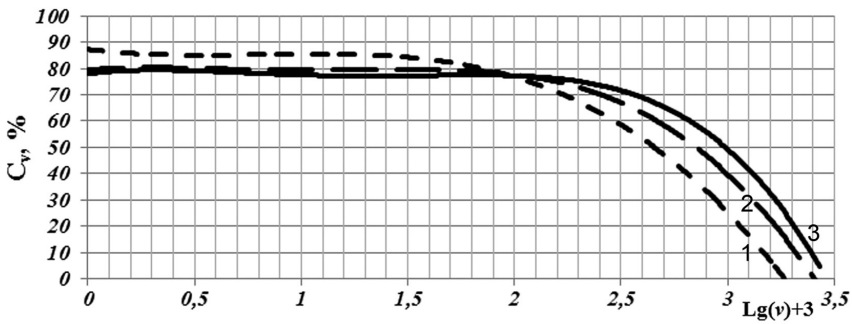


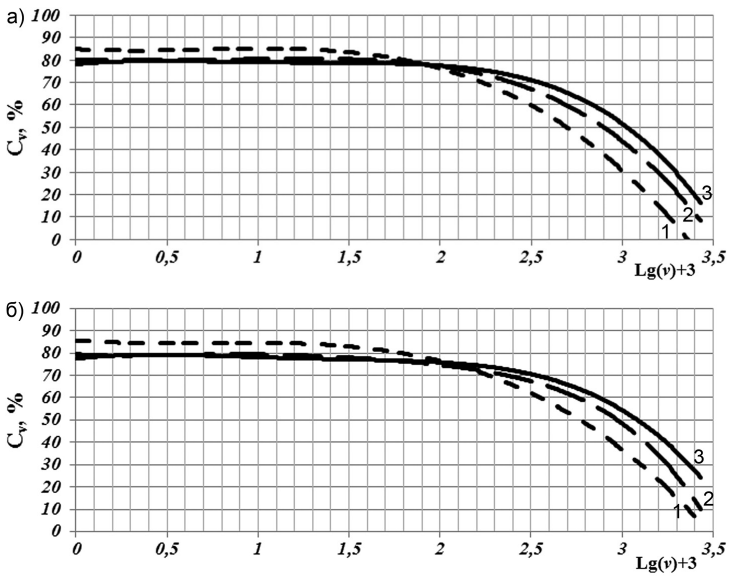
Рис. 3. Зависимость объемной концентрации частиц магнетита в ожиженной ферромагнитной суспензии от скорости восходящего потока при H = 0; крупность материала: 1 – -100+71 мкм, 2 – -125+100 мкм, 3 – -160+125 мкм

из слоя) скоростями ожижения. Для всех графиков, представленных в работе, для удобства отображения масштабирования скорости восходящего потока, выбрана логарифмическая ось.

Для материала крупностью -100+71 мкм начальной скоростью ожижения является скорость восходящего потока, начиная с $0{,}11 \cdot 10^{-2}$ м/с. Частицы переходят в малоподвижное состояние с относительно небольшим увеличением высоты слоя. Критическая скорость размывания слоя и выноса частиц – более $1{,}18 \cdot 10^{-2}$ м/с, при этом объемная концентрация твердого в слое уменьшается до 24%. Для материала крупностью -125+100 мкм диапазон существования ожиженного слоя – $(0{,}13 \div 1{,}57) \cdot 10^{-2}$ м/с. Объемная концентрация частиц магнетита перед выносом составляет 17%. Для крупности -160+125 мкм диапазон скоростей восходящего потока – $(0{,}2 \div 1{,}9) \cdot 10^{-2}$ м/с. Концентрация твердого падает до 22% и слой разрушается.

Таким образом, диапазон ожижения ограничен начальной и критической скоростями восходящего потока. Сдвиг диапазона существования слоя для более крупных классов обусловлен увеличением силы гидродинамического давления восходящего потока, необходимой для уравновешивания гравитационной силы материала.

На рис. 4 показаны графики зависимости объемной концентрации частиц магнетита трех классов крупности в ожиженной



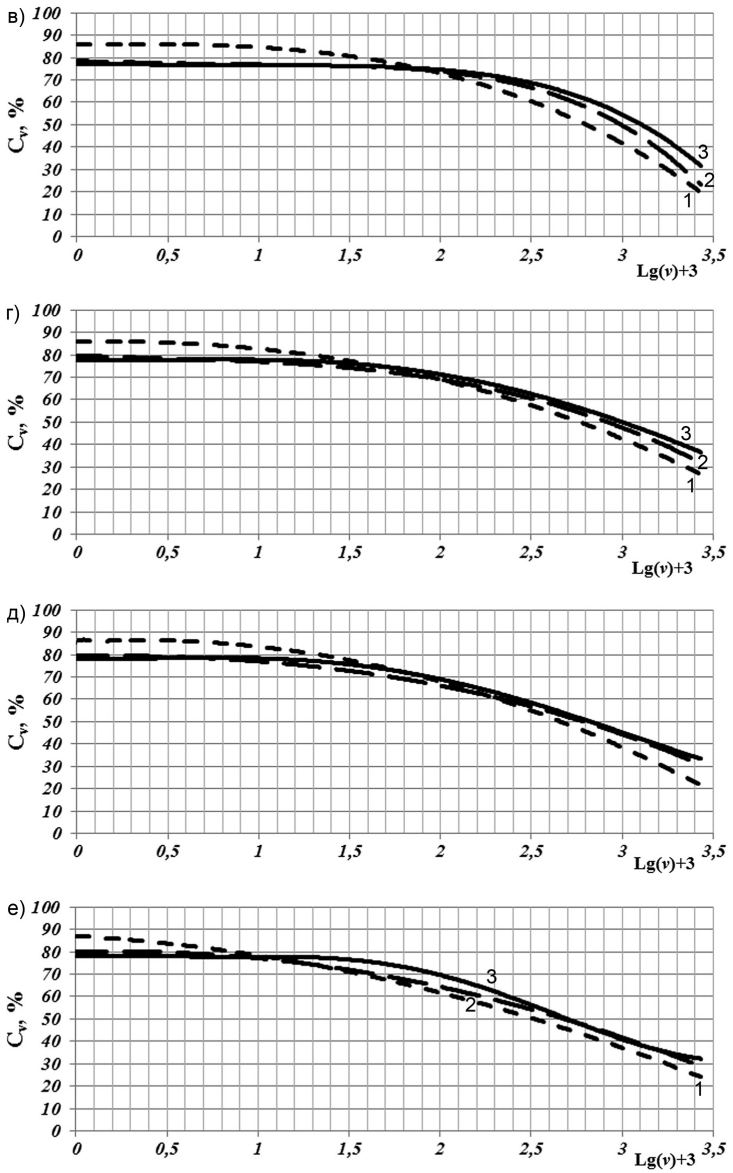


Рис. 4. Зависимость объемной концентрации частиц магнетита в ожиженной суспензии от скорости восходящего потока при наложении магнитного поля различной напряженности: а) 0,8 кА/м; б) 1,6 кА/м; в) 2,4 кА/м; г) 3,2 кА/м; д) 4 кА/м; е) 4,8 кА/м; крупность материала: 1 – -100+71 мкм, 2 – -125+100 мкм, 3 – -160+125 мкм

ферромагнитной суспензии от скорости восходящего потока при наложении магнитного поля с различным значением напряженности.

Анализируя полученные данные, необходимо отметить, что значения диапазонов, определенных выше, сдвигаются в сторону увеличения скорости восходящего потока по мере увеличения напряженности магнитного поля, так как за счет структурирования ферромагнитной суспензии происходит утяжеление частиц с образованием агрегатов.

В диапазоне скоростей, которые были применены в работе, критические скорости существования ожиженного слоя дополнены критическим значением напряженности магнитного поля, при котором происходит «заморозка» слоя. Если принципиально рассмотреть процесс магнитно-гравитационного разделения, то при малоподвижном слое ферромагнитных частиц удаление из жестких агрегатов механически захваченных сростков весьма затруднительно, что приведет к снижению эффективности обогащения. Физические свойства частиц сростковой фракции, имеющихся во всех классах крупности обладают плавно изменяющимся спектром значений. Сростки занимают промежуточное положение между рудной и нерудной фракциями по плотности и магнитным свойствам, поэтому их поведение в зоне действия разделяющих сил отличается незначительно от поведения частиц полезного минерала [11].

Диапазоны существования ожиженной магнитно-стабилизированной ферромагнитной суспензии

Напряженность магнитного поля, кА/м	**-100+71**		**-125+100**		**-160+125**	
	Диапазон существования стабильного ожиженного слоя					
	Скорость, 10^{-2} м/с	**Концентрация,%**	**Скорость, 10^{-2} м/с**	**Концентрация, %**	**Скорость, 10^{-2} м/с**	**Концентрация,%**
0	0,2–0,6	77–41	0,25–1,1	75–39	0,4–1,4	70–32
0,8	0,21–0,79	76–40	0,19–1,145	73–39	0,5–1,57	67,2–35
1,6	0,21–0,9	67–39	0,193–1,18	72,8–40,5	0,56–1,6	64–40
2,4	0,23–0,8	62,5–43	0,26–1,26	70,8–42,6	0,56–1,7	61–43
3,2	0,23–0,6	60–47,5	0,26–1,26	59,5–42,2	0,6–1,75	54–42
4	0,25–0,6	55–46	0,3–1,26	55,76–39	0,9–1,89	45–37,27
4,8	0,25–0,63	49,5–45	0,33–1,35	52,4–36,65	0,95–1,89	42–34,5

Для процесса магнитно-гравитационной сепарации наибольший интерес представляет стабильное состояние ожижения ферромагнитной суспензии (таблица).

Для определения скорости фильтрации внутри магнитно-стабилизированного ожиженного слоя была выведена следующая формула:

$$\nu_{\varphi} = \frac{\nu \cdot d^2 \cdot \pi \cdot h}{4 \cdot (V_C - V_T)},$$

где ν – скорость восходящего потока, м/с; d – внутренний диаметр колонки, м; h – высота ожиженного слоя, м; V_C – объем суспензии, м^3; V_T – объем твердой фазы, м^3.

По расчетным данным при наложении магнитного поля среднее значение скорости внутри ожиженного слоя возрастает в 2–2,5 раза от скорости восходящего потока.

В процессе отделения железосодеращих минералов от сростков, ожиженный слой магнитно-стабилизированной суспензии является своего рода объемным ситом, в котором за счет увеличения скорости в поровых каналах происходит вынос сростков, двигающихся по этим каналам, и разрушение агрегатов образованных магнитным полем, которые в процессе образования захватывают сростки.

Для агрегата наибольшей силой является сила тяжести, которая на несколько порядков больше остальных сил, поэтому его движение будет направлено вниз. Таким образом, образованные подвижные агрегаты отделятся в результате действия гравитационных сил, а немагнитные минералы и сростки будут удалены восходящим потоком [12].

Результаты исследования показали, что для материала каждого из рассмотренных классов крупности существуют области значений напряженности магнитного поля и скоростей восходящего потока, при которых ожиженный слой из ферромагнитных частиц находится в стабильном состоянии. Изменение содержания твердого в пределах этого диапазона позволит регулировать сепарационные характеристики. Следовательно, это даст возможность получить заданное содержание твердого в суспензии при больших скоростях потока, что приведет к более эффективному разрушению агрегатов и тем самым позволит высвобождать сростки из поровых каналов, что невозможно осуществить без магнитного поля, так как сростки обладают близкими физическими свойствами с частицами магнетита. При напряженности поля, превышающей установленные допустимые значения, разрушение агрегатов прекратится, что вы-

зовет замораживание слоя. Регулирование значений напряженности магнитного поля позволит управлять процессом разделения и определить оптимальные параметры для селективного отделения сростковой фракции. Это даст возможность интенсифицировать процесс магнитно-гравитационной сепарации и управлять вероятностью выноса сростков с прогнозируемым содержанием магнетита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скороходов В.Ф.*, *Хохуля М.С.*, *Опалев А.С.*, *Сытник М.В.*, *Бирюков В.В.* Патент РФ № 2012151974/03, 04.12.2012. Способ получения коллективного концентрата из железистых кварцитов. 2014. Бюл. № 32.

2. *Гельперин Н.И.*, *Айнштейн В.Г.*, *Кваша В.Б.* Основы техники псевдоожижения. – М.: Химия, 1967. – 664 с.

3. *Филиппов М.В.* Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля // Прикладная магнитогидродинамика. Т. 12. – Рига, 1961. – С. 215–236.

4. *Ursu A.V.*, *Nistor I.D.*, Gros F., *Arus V.A.*, *Isopencu G.O.*, *Mares A.M.* Hydrodynamic aspects of fluidized bed stabilized in magnetic field // U.P.B. Sci. Bull., Series B, vol. 72, no 3, 2010, pp. 85–98.

5. *Jovanovic Goran N., Sornchamni Thana, Atwater James E., Akse James R., Wheeler Jr. Richard R.* Magnetically assisted liquid-solid fluidization in normal and microgravity conditions: experiment and theory // Powder Technology, 2004, vol. 148, pp. 80–91.

6. *Al-Qodah Z., Al-Busoul M., Khraewish A.* Hydrothermal Behavior of G-S Magnetically Stabilized Beds Consisting of Magnetic and Non-Magnetic Admixtures // ICCE 2007 – 4th International Conference on Chemical Engineering, Berlin, Germany, 24–26 August 2007.

7. *Harel O., Zimmels Y., Resnick W.* Particle separation in a magnetically stabilized fluidized bed // Powder Technology,1991, vol. 64, pp. 159–164.

8. *Siegell J.H.* Liquid-Fluidized Magnetically Stabilized Beds // Powder Technology, 1987, vol 52, pp 139–148.

9. *Deen N.G., Van Sint Annaland M., Van der Hoef M.A., Kuipers J.A.M.* Review of discrete particle modeling of fluidized beds // Chemical Engineering Science, 2007, vol. 62, no 1–2, pp. 28–44.

10. *Шубин И.Н.*, *Свиридов М.М.*, *Таров В.П.* Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: Учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 76 с.

11. *Усачев П.А.*, *Опалев А.С.* Магнитно-гравитационное обогащение руд – Апатиты: КНЦ РАН, 1993. – 92 с.

12. *Зеленова И.М.* Флокуляция магнетита с целью повышения качества железорудных концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 14. – С. 386–396. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Калюжная Раиса Вячеславовна – аспирант,
e-mail: krv@goi.kolasc.net.ru,
Горный институт Кольского научного центра РАН.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 392–402.

UDC
622.778.2 :
622.341.1 :
532.545

R.V. Kalyuzhnaya

THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON THE PROPERTIES OF FLUIDIZATION OF FERROMAGNETIC SUSPENSION IN THE PROCESS OF MAGNETIC-GRAVITY SEPARATION

The article investigates the influence of an external magnetic field of low intensity on the ferromagnetic properties of the slurry formed by particles of different size magnetite. During the experimental work determined the content of solids in suspension by measuring the height of the fluidized bed at fixed speeds of upflow and by changing the value of the magnetic field from 0 to 4.8 kA / m. There were presented the cross-plots of the volume density of the magnetite particles in the fluidized slurry from the speed upflow at a magnetic field. A qualitative description of the behavior of fluidized bed consisting of particles of magnetite of Olenegorsk deposit of grade -100+71 μm, -125+100 μm and -160+125 μm was suggested. These were established the critical speeds of fluidization of ferromagnetic material and identified the ranges of existence fluidized of slurry in a stable condition for investigated grades of magnetite. The received data was suggested use to optimize process variables of magnetically gravity separation.

Key words: ferromagnetic suspension, fluidized bed, a magnetic field, upflow, magnetite particles, the volume density, magnetic-gravity separation.

AUTHOR

Kalyuzhnaya R.V., Graduate Student, e-mail: krv@goi.kolasc.net.ru,
Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

REFERENCES

1. Skorokhodov V. F., Khokhulya M. S., Opalev A. S., Sytnik M. V., Biryukov V. V. *Patent RU 2012151974/03*, 04.12.2012.

2. Gel'perin N. I., Aynshteyn V. G., Kvasha V. B. *Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya* (Fundamentals of fluidization technique), Moscow, Khimiya, 1967, 664 p.

3. Filippov M. V. *Prikladnaya magnitogidrodinamika*. T. 12 (Applied magnetohydrodynamics, vol. 12), Riga, 1961, pp. 215–236.

4. Ursu A. V., Nistor I. D., Gros F., Arus V. A., Isopencu G. O., Mares A. M. Hydrodynamic aspects of fluidized bed stabilized in magnetic field. *U.P.B. Sci. Bull.*, Series B, vol. 72, no 3, 2010, pp. 85–98.

5. Jovanovic Goran N., Sornchamni Thana, Atwater James E., Akse James R., Wheeler Jr. Richard R. Magnetically assisted liquid-solid fluidization in normal and microgravity conditions: experiment and theory. *Powder Technology*, 2004, vol. 148, pp. 80–91.

6. Al-Qodah Z., Al-Busoul M., Khraewish A. Hydrothermal Behavior of G-S Magnetically Stabilized Beds Consisting of Magnetic and Non-Magnetic Admixtures. *ICCE 2007 4th International Conference on Chemical Engineering*, Berlin, Germany, 24–26 August 2007.

7. Harel O., Zimmels Y., Resnick W. Particle separation in a magnetically stabilized fluidized bed. *Powder Technology*,1991, vol. 64, pp. 159–164.

8. Siegell J. H. Liquid-Fluidized Magnetically Stabilized Beds. *Powder Technology*, 1987, vol. 52, pp. 139–148.

9. Deen N. G., Van Sint Annaland M., Van der Hoef M. A., Kuipers J. A. M. Review of discrete particle modeling of fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 2007, vol. 62, no 1–2, pp. 28–44.

10. Shubin I. N., Sviridov M. M., Tarov V. P. *Tekhnologicheskie mashiny i oborudovanie. Sypuchie materialy i ikh svoystva*: Uchebnoe posobie (Technological machinery and equipment. Bulk materials and their properties. Educational aid), Tambov, Izd-vo TGTU, 2005, 76 p.

11. Usachev P. A., Opalev A. S. *Magnitno-gravitatsionnoe obogashchenie rud* (Magnetic-gravity processing of ores), Apatity, KNTs RAN, 1993, 92 p.

12. Zelenova I. M. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 14, pp. 386–396.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ, СЕНСИБИЛИЗИРОВАННЫХ ГАЗОВЫМИ ПОРАМИ, ЛИНЕЙНЫМ ЭМУЛЬСИОННЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ДЕТОНАТОРОМ

Горинов Сергей Александрович[1] – кандидат технических наук, e-mail: akaz2006@yandex.ru,
Маслов Илья Юрьевич[1] – кандидат технических наук, e-mail: ilmaslov@mail.ru,
Брагин Павел Александрович[1] – главный специалист по БВР, e-mail: pavelbragin83@mail.ru,
[1] ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша».

Осуществлена оценка условий возбуждения устойчивой детонации в эмульсионных взрывчатых веществах (ЭВВ), сенсибилизированных газовыми порами, под действием линейного промежуточного детонатора, не содержащего в своем составе индивидуальных бризантных ВВ, с учетом структуры и химического состава ЭВВ, а также кинетики детонационного процесса. Показано, что при скользящем ударе продуктов детонации, образующихся при взрыве линейного эмульсионного ПД, по окружающему ПД инициируемому ЭВВ, в последнем может быть возбуждена только малоустойчивая недосжатая детонация. Для возбуждения устойчивой детонации необходимо использовать: эффект усиления давления в отраженных волнах (от стенок скважин или от специально введенных твердых объектов); возрастание давления в области взаимодействия с ударными волнами, вызванными другими ПД (использованием сближенных многозарядных систем возбуждения); системы инициирования на основе кумуляции энергии ПД. Полученные результаты представляются полезными при проектировании и применении линейных ПД.

Ключевые слова: промежуточный детонатор, эмульсионные ВВ, устойчивая детонация.

INITIATION OF EMULSION EXPLOSIVES SENSITIZED WITH GAS PORES OF THE LINEAR EMULSION PRIMER

Gorinov S.A.[1], Candidate of Technical Sciences, e-mail: Akaz2006@yandex.ru, Russia,
Maslov I.Y.[1], Candidate of Technical Sciences, e-mail: ilmaslov@mail.ru,
Bragin P.A.[1], Chief Specialist Drilling and Blasting, e-mail: pavelbragin83@mail.ru,
[1] LLC «Global mining Explosiv – Russia», Russia,

The work carried out assessment of the conditions of a stable detonation excitation in emulsion explosives (EE), sensitized gas pores, under the effect of the linear emulsion primer, taking into account the structure and chemical composition of the emulsion explosives, as well as the kinetics of the detonation process. It is shown that when glancing blow detonation products resulting from the explosion of a linear emulsion primer, for the initiate primer surrounding emulsion explosives, the latter can be excited only low stability under-compressed detonation. To excite a stable detonation must be used: pressure amplification effect in the reflected waves (from the walls of wells or from specially introduced solid objects); an increase in pressure in the area of primers interaction with the shock waves caused by other primers (use of multiply contiguous field systems); initiation system based on the primer power accumulation. The results are useful in the design and application of linear primer.

Key words: primer, emulsion explosive, stable detonation.