

**В.Ф. Скороходов, В.В. Бирюков, Р.М. Никитин, В.П. Якушкин**  
**МОДИФИКАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**  
**МИНЕРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ**  
**В РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ\***

Модификация физических свойств минеральных частиц при проведении разделительных процессов является способом повышения их эффективности. Агрегирование и коагуляция тонкодисперсных частиц приводит к снижению коэффициента их гидродинамического сопротивления и, тем самым, повышает степень их контрастности в процессах гравитационного и магнитного обогащения. В программном комплексе ANSYS Fluent с использованием уравнений популяционного баланса для описания процессов коагуляции разработана CFD (Computational Fluid Dynamics) модель радиального сгустителя. Вычислительные эксперименты на виртуальном лабораторном стенде выявили зависимость скорости коагуляции суспензии от ее вязкости и возможность снижения расхода реагентов при ее сгущении, показали, что агрегирование частиц позволяет увеличить скорость их осаждения до 2 см/с. **Ключевые слова:** модификация физических свойств частиц при проведении разделительных процессов, коагуляция и агрегирование, модель популяционного баланса, осаждение частиц в радиальном сгустителе, вычислительная гидродинамика, вычислительный эксперимент.

**У**худшение качества минерального сырья приводит к необходимости вовлечения в переработку тонковкрапленных руд сложного вещественного состава. Использование тонкого измельчения минералов таких руд сопровождается снижением контрастности свойств минеральных частиц в операциях разделения и ошламования.

Технологии любых разделительных операций основываются на физических и физико-химических свойствах минералов и реализуются в определенных диапазонах крупности минеральных частиц. При выходе частиц за их пределы эффективность разделения резко падает. Также причиной снижения эффективности основных и вспомогательных операций обогащения является потеря контрастности свойств минеральных частиц при их измельчении в класс –70 мкм. Все это приводит к росту за-

трат на переработку минерального сырья, повышению себестоимости конечных продуктов обогащения и, в итоге, к снижению конкурентоспособности обогатительных предприятий.

В основе принципов работы разделительных аппаратов лежат закономерности свободного и стесненного движения минеральных частиц под действием массовых или поверхностных сил. Очевидно, что с уменьшением размеров частиц интенсивность тех или иных силовых воздействий, ответственных за результат обогащения, изменяется, что может приводить к потерям полезного компонента, находящегося в мелкодисперсном состоянии. Модификация физических и физико-химических свойств тонких частиц, например, – обжиг и шламовая «оттирка» тонких частиц, позволяет в некоторой степени решать эту проблему. Наряду с этим, известны и широко применяются

\* Работа выполнена в рамках Соглашения с Российским научным фондом № 14-17-00761.

операции, повышающие контрастность минеральных частиц, такие как – коагуляция, агломерация и флокуляция. Все это операции, результатом которых является образование агрегатов – более крупных вторичных частиц, состоящих из скопления мелких (первичных).

Первичные частицы в таких скоплениях соединяются силами межчастичного взаимодействия различной физической природы. Это могут быть силы межмолекулярного взаимодействия для тонких коллоидных частиц, силы электростатического или магнитного взаимодействия. Процессы образования агрегатов сопровождаются их прогрессирующим укрупнением (увеличением размера и массы) при уменьшении их числа.

Рассматривая многообразие эффектов агрегирования частиц, можно утверждать, что модификация физических свойств минеральных частиц в процессах разделения является важнейшим методом интенсификации их протекания.

Так при очистке воды от тонкодисперсных загрязнений простое гравитационное отстаивание неэффективно, так как величина скорости осаждения частиц сравнима с величиной скорости броуновского движения и единственным способом ускорить процесс является их коагуляция. Флокула, образуемая в процессе коагуляции, способна двигаться относительно среды как единое целое, не смешиваясь с ней и ее в гидродинамическом отношении можно считать сплошным телом с определенной плотностью и крупностью [1].

Используя формулу Стокса

$$v = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)g}{9\eta}, \quad (1)$$

где  $\eta$  – вязкость среды;  $r$  – радиус частицы;  $\rho$  – плотность дисперсной фазы;  $\rho_0$  – плотность дисперсной среды;  $g$  – ускорение свободного падения, мож-

но определить скорость  $v$  движения флокулы в среде под действием силы тяжести.

Размеры флокул многократно превышают размеры первичных частиц, но при этом разность их плотностей уменьшается. Поскольку скорость осаждения квадратично зависит от радиуса осаждаемого объекта, скорость осаждаемых флокул значительно превышает скорость осаждения первичных частиц.

В технологических процессах очистки сточных вод широко используется процесс фильтрования – пропускание воды через слой зернистого или пористого материала. При фильтровании воды твердые частицы задерживаются на поверхности или в толще фильтра. Эффект осветления при фильтровании объясняется не только удалением грубодисперсных примесей, но и прилипанием тонких взвешенных частиц к зернам фильтрующего слоя и ранее прилипшим частицам под действием молекулярных сил притяжения, то есть имеет физико-химическую природу и является разновидностью коагуляционного процесса. Использование предварительной коагуляции примесей с использованием химических реагентов приводит к образованию крупных агрегатов частиц – флокул и значительно повышает эффективность процесса фильтрования. Также коагуляция примесей позволяет использовать в технологиях очистки воды операцию флотации, невозможную для субмикронных частиц.

В основе процессов магнитной сепарации лежат межчастичные дипольные магнитные взаимодействия, обусловленные влиянием внешнего магнитного поля, действие которого приводит к формированию в технологической суспензии агрегатов (флокул) ферромагнитных частиц. Полученные флокулы, в отличие от тонкодисперсных дезориентированных ферромагнитных

частиц, движутся в направлении градиента напряженности магнитного поля.

Действие магнитного поля высокой напряженности в барабанных магнитных сепараторах образует плотные шарообразные флоккулы, захватывающие все магнитные частицы, что значительно повышает извлечение. Кроме того, использование магнитных полей высокой напряженности в магнитных сгустителях позволяет повысить скорость осаждения ферромагнитных частиц в несколько раз за счет снижения коэффициента гидродинамического сопротивления флоккул.

Применение магнитных полей малой напряженности дает возможность избирательно агрегировать частицы с заранее заданными значениями магнитной восприимчивости, что благоприятно влияет на селективность разделения [2].

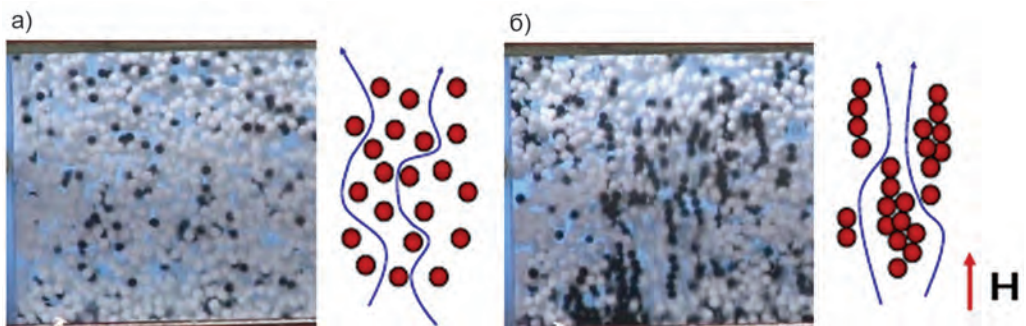
Процесс агрегирования ферромагнитных частиц под действием вертикально ориентированного магнитного поля и восходящего закрученного водного потока называется магнитно-гравитационной сепарацией. На рис. 1 показано формирование агрегатов ферромагнитных частиц в оживленном слое.

Эффективность разделительных процессов резко снижается при использовании стесненного движения частиц. Условие сегрегации частиц при оживлении сходно с критерием равнопадае-

мости. Действие магнитно поля малой напряженности на оживленный слой частиц формирует вертикально ориентированные магнитные агрегаты с управляемым составом, формой и плотностью. Коэффициент гидродинамического сопротивления ферромагнитного агрегата при его осаждении также зависит от напряженности внешнего поля, что позволяет резко увеличить скорость фильтрации жидкости сквозь слой для повышения селективности процесса разделения. Дополнительные возможности управления процессом разделения дает использование закрученного водного потока, оказывающее на вертикальные магнитные агрегаты сдвиговое действие, способствующее выносу из слоя неструктурированных частиц.

Также эффект магнитного агрегирования тонких слабомагнитных частиц под действием высокоградиентных магнитных полей широко используется при очистке сточных вод и водоподготовки.

В основе теории агрегирования частиц лежит фундаментальное уравнение Смолуховского (2), позволяющее описать образование агрегатов мелких частиц [3]. При этом образующиеся колонии флоккул частиц различных размеров носят название популяций частиц, а сама модель флокулообразования называется моделью популяционного баланса [4].



**Рис. 1. Фильтрация жидкости через модельный оживленный слой частиц: а) без магнитного поля; б) в магнитном поле малой напряженности**

$$\frac{dn_m}{dt} = 4\pi \left( \sum_{i=1}^{m-1} s_{i(m-i)} n_i n_{m-i} - n_m \sum_{i=1}^{\infty} s_{im} n_i \right). \quad (2)$$

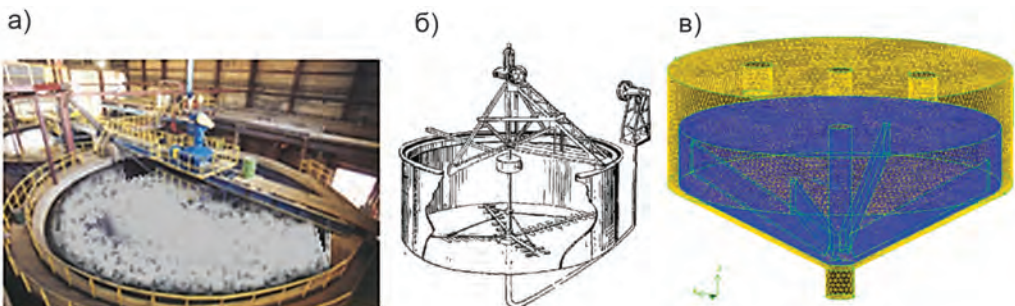
Скорость  $(dn_m)dt$  изменения концентрации  $n_m$  флоккул  $i$ -й фракции является суммой приращения их концентрации при парных столкновениях флоккул  $m$ -го и  $(m-i)$ -го типов и убыли концентрации флоккул  $m$ -го типа за счет их столкновения с флоккулами любого другого типа. Вероятности агрегирования и разделения при парных столкновениях  $s_{i(m-i)}$  и  $s_{im}$  соответственно зависят от действия сил различной физической природы между этими частицами.

Система уравнений популяционно-го баланса частиц должна решаться совместно с трехмерными уравнениями движения сплошной среды под действием внешних массовых сил. Это приводит к значительной сложности расчета, и к необходимости использовать критериальные или статистические методы решения. Примером использования таких методов может являться исследование технологического процесса сгущения концентратов, проводимое в ГоИ КНЦ РАН.

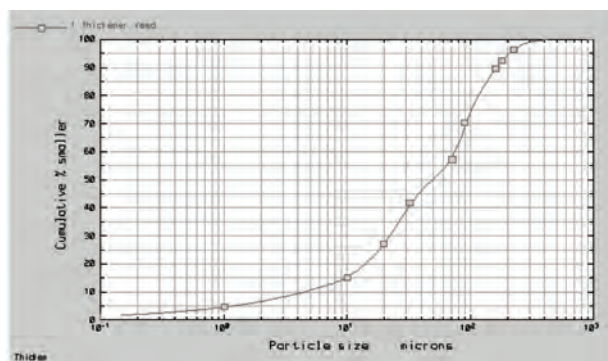
Для исследования кинетики процессов сгущения концентратов на базе программного комплекса ANSYS Fluent был создан виртуальный лабораторный

стенд. Основной задачей при его создании явилась необходимость исследования влияния различных факторов на процессы в многофазной многокомпонентной среде, состоящей из частиц широкого диапазона крупности: от долей одного микрона до сотен микрон [5]. В основу стенда положена трехмерная геометрия радиального сгустителя с центральным приводом типа СЦ диаметром 6 м (рис. 2). Конструкция сгустителя имеет неподвижные и движущиеся элементы. Гребковый механизм сгустителя, предназначенный для перемещения осажденных дисперсных частиц к разгрузочному отверстию и состоящий из центральной оси и четырех радиальных граблин, моделировался с использованием технологии «Sliding Mesh». Эта технология позволяет осуществлять взаимодействие любых вращательно и поступательно движущихся составных частей конструкции с многофазной жидкой средой и наоборот. В нашем случае, при вращении лопастей гребкового механизма сгустителя с регулируемой скоростью, усилие передается на среду, состоящую из диспергирующей и нескольких дисперсных фаз суспензии. На рис. 3 различным цветом показаны неподвижные и вращающиеся части расчетной сетки.

Расчетная сетка трехмерной геометрии виртуального стенда, максимально приближенной к прототипу, разработанная в CAD программе Gambit



**Рис. 2. Радиальный сгуститель типа СЦ а) внешний вид, б) эскиз конструкции, в) расчетная сетка модели, выполненная с использованием технологии «Sliding Mesh»**



**Рис. 3. Распределение частиц по крупности в исходном питании сгустителя**

программного комплекса ANSYS Fluent имеет 449 000 тетраэдральных элемента. Подача исходной суспензии и выпуск в модели осуществляется через верхние и нижние патрубки цилиндроконического корпуса. Предусмотрена возможность управления расходами подачи и выпуска суспензии. Слив жидкости происходит через верхний срез модели аппарата.

На виртуальном стенде была поставлена серия вычислительных экспериментов по исследованию процессов коагуляции и последующего осаждения частиц модельной суспензии, фракционный состав которой определен на основе данных гранулометрического анализа рядового флотационного апатитового концентрата, выпускаемого ОАО «Апатит», с содержанием  $P_2O_5$  39,0–39,4%. (рис. 3).

Доля тонких частиц крупностью менее 71 микрона превышает 57%. Модель исходного питания виртуального

стенда включает классы крупности частиц  $10^{-6} - 10^{-5}$ ;  $10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5}$ ;  $2 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5}$ ;  $4 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-5}$  м с малыми скоростями осаждения. Примерные скорости осаждения подобных частиц в воде приведены в таблице.

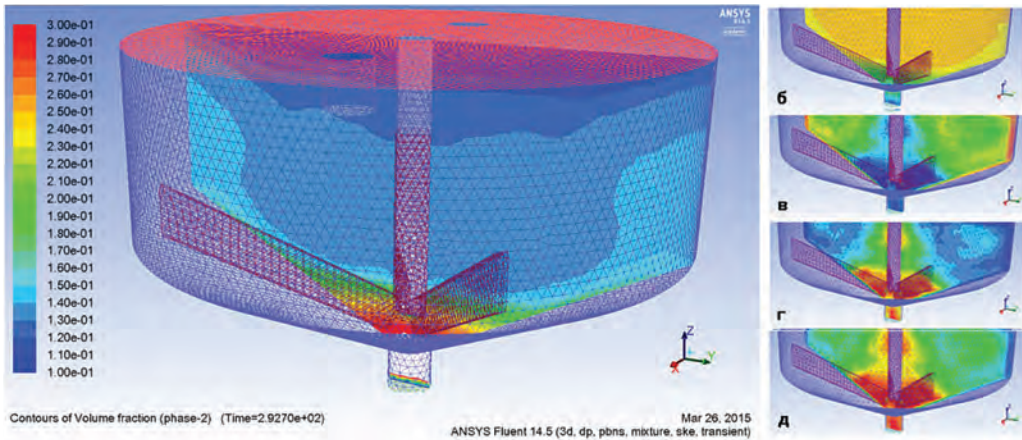
Расход исходного питания модели сгустителя задавался исходя из удельной производительности по твердому – 0,13 т/м<sup>2</sup>час и составил для сгустителя диаметром 6 м 3,674 т/час (1 кг/с).

Система уравнений CFD (Computational Fluid Dynamics) модели сгустителя включает в себя многофазное описание многофазной среды (Эйлер – Эйлер),  $k - \epsilon$  уравнение турбулентности, модель межфазных взаимодействий Вена и Ю [6], модель популяционного баланса (BP) комплекса ANSYS – Fluent [7].

Согласно модели Вена и Ю, параметр обмена импульсом при движении фаз многофазной среды рассчитывается по формуле

**Параметры осаждения минеральных частиц в воде**

Диаметр частиц, мкм	Скорость осаждения в воде при 10 °С, мм/с	Время осаждения на глубину 1 м
1000	100	10 с
100	8	2 мин
10	1,154	2 часа
1	0,00154	7 сут.
0,1	0,0000154	2 года



**Рис. 4. Распределение концентраций объемных фракций: а) твердой фазы на вертикальном срезе модели сгустителя; б), в), г), д) флоккул с размерами соответственно  $7,1 \cdot 10^{-5}$ ;  $1,128 \cdot 10^{-4}$ ;  $3,2 \cdot 10^{-4}$ ;  $5,12 \cdot 10^{-4}$  м**

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_f \alpha_s \rho_f |u_f - u_s|}{d_s} \alpha_f^{-2,65},$$

где

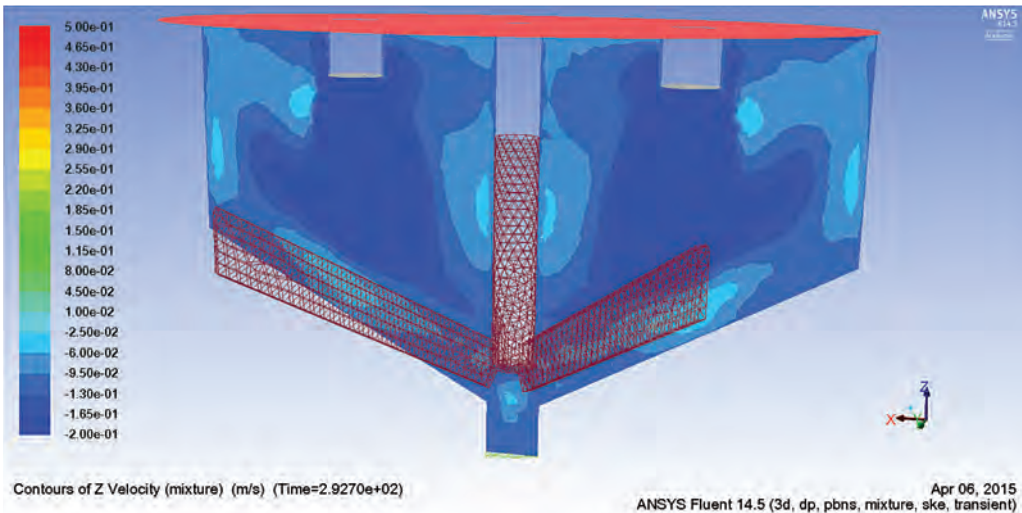
$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_p} \left[ 1 + 0,15 (\alpha_f Re_p)^{0,687} \right]$$

коэффициент сопротивления при обтекании частиц;

$$Re_p = \frac{d_s \rho_f |u_f - u_s|}{\mu_f}$$

коэффициент Рейнольдса для твердых частиц.

На виртуальном стенде проведено несколько серий вычислительных экспериментов с целью определения влияния на технологический процесс сгущения:



**Рис. 5. Распределение вертикальных скоростей движения тонких фракций суспензии**

- концентраций реагента;
- параметров исходного питания;
- гидродинамических параметров работы;

- внешних физических факторов.

В результате вычислительных экспериментов в различных режимах работы (непрерывном и периодическом) получены распределения концентраций объемных фракций частиц (рис. 4) и скоростей их движения (рис. 5) в объеме сгустителя. В ходе вычислительных экспериментов установлено, что изменение коэффициента гидродинамического сопротивления в результате флокулообразования приводит к существенному увеличению скорости осаждения, которая достигает  $2 \cdot 10^{-2}$  м/с.

Анализ результатов работы виртуального стенда позволил выявить до-

пустимые гидродинамические и технологические режимы работы сгустителя. Вращающиеся граблины ротора не только облегчают перемещение седиментированной суспензии к разгрузочному отверстию сгустителя, но и формируют необходимый турбулентный режим работы, обеспечивающий перемешивание и необходимое для формирования флоккул количество столкновений частиц.

Варьирование скорости вращения позволило определить зависимости необходимой для нормальной работы аппарата концентрации коагулянта от расхода исходного питания и скорости вращения граблин. Также выявлена зависимость скорости коагуляции суспензии от ее вязкости и возможность снижения расхода реагентов путем изменения вязкости сгущаемой суспензии.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Feke D.L. Kinetic of flow-induced coagulation with weak Brownian diffusion: Dissertation for D.Ph. – Princeton University, 1981. – 149 p.

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

3. Эйнштейн А., Смолуховский М. Брауновское движение, пер. с нем. – М.-Л., 1936.

4. Abberger T. Population Balance Modelling of Granulation / Handbook of Powder Technology. – 2007, vol. 11, pp. 1109–1186.

5. Andersson B., Andersson R., Hakansson L., Mortensson M., Sudiyo R., Wachem B. Computational fluid dynamics for chemical engineers. 6th Edition. Chalmers University of Technology 2010.

6. Wen C.Y., Yu Y.H. Mechanics of fluidization. Chemical Engineering Progress Symposium Series 1966 62:100–111.

7. Ramkrishna D. Population Balances, Academic Press, London, 2000. **ИЛАС**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Скорородов Владимир Федорович<sup>1</sup> – доктор технических наук, зав. лабораторией, e-mail: skorohodov@goi.kolasc.net.ru

Бирюков Валерий Валентинович<sup>1</sup> – научный сотрудник, e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru,

Никитин Роман Михайлович<sup>1</sup> – научный сотрудник, e-mail: remnik@yandex.ru,

Якушкин Валерий Петрович – доцент, e-mail: robotron-04@mail.ru,

Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ),

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН.

---

UDC 622.7

## MODIFICATION OF MINERAL PARTICLE'S PHYSICAL PROPERTIES IN SEPARATION PROCESSES

Skorokhodov V.F.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, e-mail: skorohodov@goi.kolasc.net.ru,

Biryukov V.V.<sup>1</sup>, Researcher, e-mail: birukov@goi.kolasc.net.ru,

Nikitin R.M.<sup>1</sup>, Researcher, e-mail: remnik@yandex.ru,

Yakushkin V.P., Assistant Professor, e-mail: robotron-04@mail.ru,

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI),

<sup>1</sup> Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.

Modification of mineral particle's physical properties in separation processes is a way to increase their efficiency. Aggregation and coagulation of fine-disperse particles result in decreasing their hydrodynamic resistance coefficient, and increase thus extent of their contrast in gravity and magnetic concentration processes. The CFD model of radial thickener has been designed with using population balance equations in ANSYS software for describing coagulation processes. Computational experiments in a virtual laboratory bench have revealed dependence of suspension coagulation velocity on its viscosity and possibility to decrease reagents consumption through changing viscosity of suspension thickened. The experiments gave also shown that particles aggregation allows increasing their precipitation velocity up to 2 cm/sec.

*Key words:* modification of particles' physical properties in separation processes, coagulation and aggregation, population balance model, particles precipitation in radial thickener, computational hydrodynamics, computational experiment.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation, Agreement No. 14-17-00761.

## REFERENCES

1. Feke D.L. *Kinetic of flow-induced coagulation with weak Brownian diffusion*: Dissertation for D.Ph. Princeton University, 1981, 149 p.
2. Usachev P.A., Opalev A.S. *Magnitno-gravitatsionnoe obogashchenie rud* (Магнитно-гравитационное обогащение руд), Аpatity, KNTs RAN, 1993, 92 p.
3. Eynshhteyn A., Smolukhovskiy M. *Braunovskoe dvizhenie, per. s nem.* (Брауновское движение, пер. с нем.), Moscow-Leningrad, 1936.
4. Abberger T. Population Balance Modelling of Granulation. *Handbook of Powder Technology*. 2007, vol. 11, pp. 1109–1186.
5. Andersson B., Andersson R., Hakansson L., Mortensson M., Sudiyo R., Wachem B. *Computational fluid dynamics for chemical engineers*. 6th Edition. Chalmers University of Technology 2010.
6. Wen C.Y., Yu Y.H. *Mechanics of fluidization*. Chemical Engineering Progress Symposium Series 1966 62:100–111.
7. Ramkrishna D. *Population Balances*, Academic Press, London, 2000.



---

## ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

### ОБОСНОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПРИ ТОРПЕДИРОВАНИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Горинов Сергей Александрович – кандидат технических наук, e-mail: akaz2006@yandex.ru,  
Маслов Илья Юрьевич – кандидат технических наук, e-mail: ilmaslov@mail.ru,  
ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша».

Показано, что применение термостойких взрывчатых веществ (ВВ) с пониженными детонационными показателями, позволяет получать устройства для одновременного перфорирования обсадных труб и торпедирования скважин. Представлена методика определения детонационных параметров ВВ для использования их в устройстве для одновременного перфорирования обсадных труб и торпедирования скважин.

*Ключевые слова:* торпедирование скважин, детонационные параметры ВВ.

### JUSTIFICATION OF DETONATION CHARACTERISTICS OF EXPLOSIVES IN OIL AND GAS WELL SHOOTING

Gorinov S.A.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, e-mail: akaz2006@yandex.ru,  
Maslov I.Yu.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, e-mail: ilmaslov@mail.ru,  
Global Mining Explosive-Russia LLC.

*In this study, it was shown that the use of heat resistant explosives with degraded detonation characteristics allows obtaining setups for simultaneous casing pipes perforation and well shooting. A method is provided for determination of detonation parameters of explosives for their use in the setup for simultaneous casing pipes perforation and well shooting.*

*Key words:* well shooting, detonation characteristics of explosives.