

Металлургия и материаловедение

УДК 05.02.00

DOI: 10.30987/article_5b28d194984662.66308216

Ю.М. Вернигоров, К.К. Лелетко

**МАГНИТОВИБРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОЗИРОВАНИЯ ПОРОШКОВ
МАГНИТОЖЕСТКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Показано, что магнитовибрирующий слой обеспечивает взвешенное состояние частиц твердой фазы, размер которых составляет от долей микрона и выше. Также показано, что внутреннее трение в магнитовибрирующем слое зависит от параметров электромагнитного поля, которые при некоторых оптимальных соотношениях индукции постоянного

и градиента индукции переменного магнитных полей определяются физико-технологическими особенностями порошкового материала.

Ключевые слова: магнитный порошок, магнитовибрирующий слой, текучесть, магнитоже- сткий ферромагнетик.

Yu.M. Vernigоров, K.K. Leletko

**MAGNETOVIBRATED TECHNOLOGY OF MAGNETIC-HARD
MATERIAL POWDER DOSAGE**

Packed density, fluctuation, compressibility and other physical technological properties of powders depend considerably upon interaction forces between particles. The efficient decrease of inner friction and, hence, fluctuation increase in powders of high-coercive materials was observed in high-gradient electro-magnetic fields in which it is also possible to carry out a rather efficient management of the outflow process of these powders. The dependence investigation of values characterizing a group behavior of particles upon physical and mode factors it seems to be essential in connection with the computation and optimization of the parameters of fields ensuring a specified technological process.

The development of technological processes in powder metallurgy of ferromagnetic materials on the basis of a magnetovibrated layer is reduced not to the updating or improvement of operating methods and ways, but to the creation of new ones.

Введение

При действии на порошок магнитных материалов переменным магнитным полем с определенными параметрами образуется магнитовибрирующий слой [1; 2]. При этом возможно кажущееся изменение коэффициента сухого трения. Этот эффект является аналогом виброреологического эффекта [3; 4]. Движение частиц в состоянии развитого магнитовибрирующего слоя сложно зависит от свойств ферромагнитного материала, топологии поля и определяется совместным действием большого числа разнородных физических факторов,

In this paper it is shown that a magnetovibrated layer ensures a suspension state of particles of a solid phase the dimension of which makes some fractions of micron and larger. At that it is essential that a destruction of aggregations formed earlier takes place. No one of the well-known methods of vibration impact upon disperse ferro-magnetic material allows ensuring a spatial stability of particles of the dimension specified interval.

It is shown that the inner friction in a magnetovibrated layer depends upon electromagnetic field parameters and at some optimum correlations of constant induction and an induction gradient of the magnetic fields variable an apparent change of friction from dry into viscous occurs. The optimum parameters of an electromagnetic field are defined by physical technological peculiarities of powder material.

Key words: magnetic powder, magnetovibrated layer, fluctuation, magnetic-hard ferro-magnetic.

что затрудняет выбор параметров поля, обеспечивающих установление оптимальных в прикладном отношении режимов. В реальном магнитовибрирующем слое имеется случайный возмущающий фактор, обусловленный дипольными взаимодействиями частиц и кластеров. Возможно также скачкообразное изменение начальных условий, вызванное столкновениями с другими частицами и со стенками камеры. Эти случайные воздействия должны усиливать тенденцию системы к хаотизации. Проблема описания движения частиц при

одновременном воздействии детерминированных и случайных факторов нуждается в дальнейшем исследовании [5]. Однако по-

Теоретическая часть

Рассмотрим два кластера, отличающиеся размерами и удерживаемые друг относительно друга силой магнитостатического взаимодействия \vec{F}_m . Предположим для определенности, что расположение кластеров таково, что сила тяжести \vec{G} параллельна поверхности их касания. Со стороны неоднородного переменного поля на кластер действует гармоническая сила $\vec{F}_v = \vec{F}_0 \sin \omega t$, $F_0 = P_m \frac{\partial B}{\partial y} \cos \varphi$, где φ - угол между \vec{G} и магнитным моментом \vec{P}_m малого кластера, $\frac{\partial B}{\partial y}$ - изменение индукции магнитного поля вдоль оси, параллельной вектору \vec{G} . Условимся, что силы \vec{F}_v и \vec{G} коллинеарны.

Агрегат большего размера обладает большей инертностью и при малых амплитудах \vec{F}_0 или достаточно больших частотах переменного магнитного поля ω слабо откликается на действие сил поля. Малый агрегат начнет перемещаться относительно большого, если выполняется условие

$$\vec{G} = f_1 \vec{F}_m - \vec{F}_0,$$

где f_1 - коэффициент трения покоя.

Эффективный коэффициент трения для взаимодействующей пары кластеров при заданной ориентации сил равен

$$f = \frac{G}{F_m} = f_1 \left(1 - \frac{F_0}{f_1 F_m} \right).$$

Учитывая направление градиента индукции переменного поля и выражение для силы магнитостатического взаимодействия в рамках диполь-дипольного приближения, можно записать:

$$f = f_1 \left[1 - \frac{4\pi r R (r+R)^2}{\mu_0 f_1 P_m} \frac{\partial B}{\partial y} \cos \varphi \right],$$

где r и R - эквивалентные размеры малого и большого кластеров (в сферическом приближении); μ_0 - магнитная постоянная.

Последнее соотношение имеет смысл

явление стохастичности представляет собой неотъемлемое свойство даже предельно разряженных систем.

до тех пор, пока эффективный коэффициент трения остается положительным. При определенном значении градиента индукции поля происходит кажущееся изменение характера трения. При этом принято считать, что эффективные коэффициенты сухого трения обращаются в нуль [6; 7]:

$$\frac{\partial B}{\partial y} \geq \frac{\mu_0 f_1 P_m}{4\pi r R (r+R)^2 \cos \varphi}.$$

Моделируя порошок как совокупность монодисперсных сферических агрегатов радиуса r одинаковой плотности, оценивали зависимость относительного размера агрегатов r/r_0 (r_0 - размер агрегатов в режиме электромагнитного воздействия, соответствующего их максимальному разрушению) в магнитовибрирующем слое от градиента индукции переменного магнитного поля (рис. 1).

Микроагрегаты порошков феррита бария различного помола разрушаются до минимального размера в полях с градиентом от 0,26 до 0,34 Т/м при индукции переменного поля 4,1...5,5 мТ и индукции постоянного поля 18...25 мТ. Оценка, проведенная для порошков феррита бария и стронция с удельной поверхностью в интервале 0,7...1 м²/г, дает значение градиента индукции 2...60 мТ/м [8; 9]. При расчете предполагали, что размеры большого и малого агрегатов отличаются на порядок. Расчетные параметры поля удовлетворительно совпадают с экспериментальными результатами.

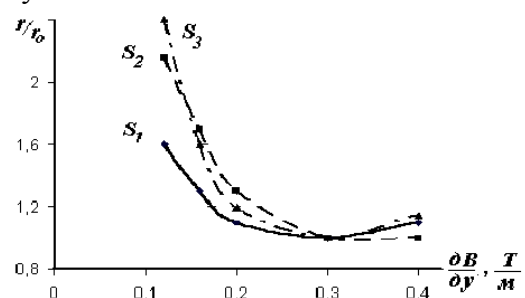


Рис. 1. Зависимость относительного размера кластеров порошка $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ от градиента индукции магнитного поля ($S_1=0,67$ м²/г, $S_2=0,70$ м²/г и $S_3=0,79$ м²/г)

Практическая часть

Проверка справедливости принятых допущений в модели бинарного взаимодействия разновеликих агрегатов проводилась с помощью стандартной воронки, изготовленной в соответствии с ГОСТ 20899-75 (рис. 2).

Зависимость относительной массы порошка $\Delta m/m$, просыпавшейся через отверстие стандартной воронки за 30 с, от

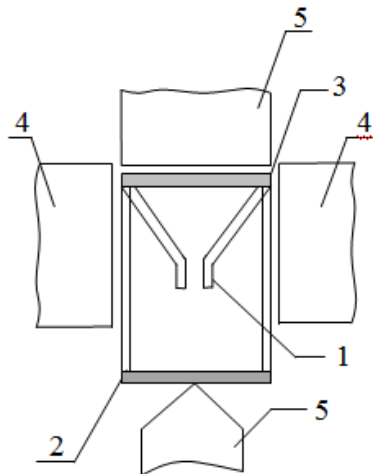


Рис. 2. Схема элемента экспериментальной установки для исследования текучести: 1 - измерительная воронка; 2 - приемник; 3 - крышка; 4 - полюсные наконечники электромагнита постоянного тока; 5 - полюсные наконечники электромагнита переменного тока

градиента индукции переменного поля приведена на рис. 3. Испытания проводили на пяти пробах и за результат принимали среднее арифметическое значение массы порошка, вытекающего из воронки при заданных параметрах. Влияние амплитуды и градиента индукции переменного поля на скорость истечения порошка определяли на промышленной частоте.

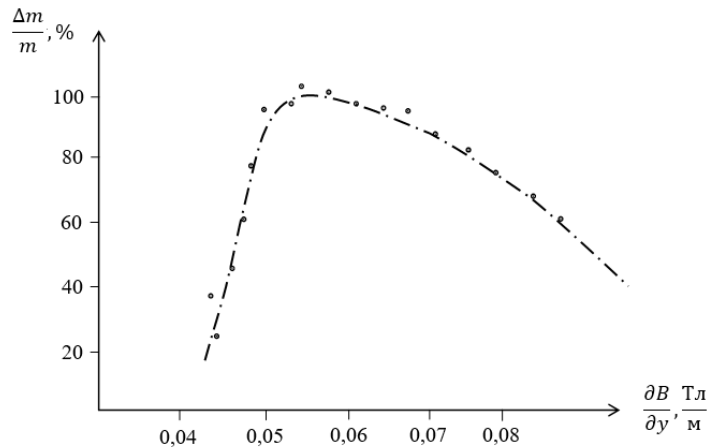


Рис. 3. Влияние градиента индукции переменного поля на массу просыпавшегося порошка SmCo_5 при $B_C = 13,3\text{мТл}$

Экспериментальные зависимости скорости истечения порошка SmCo_5 из

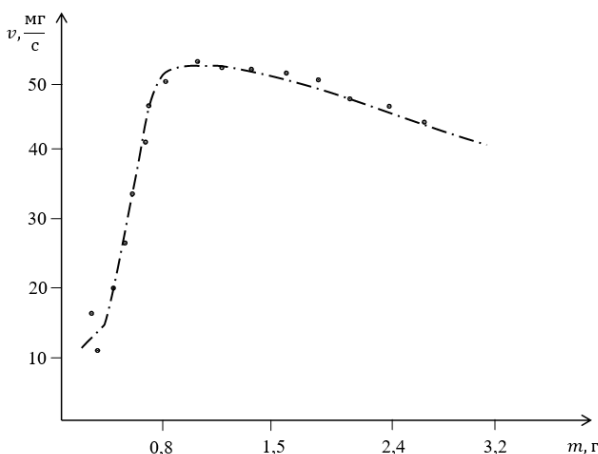


Рис. 4. Зависимость скорости истечения порошка SmCo_5 от массы навески при

$$B_V = 2,7\text{мТл}; B_C = 13,3\text{мТл}; \frac{\partial B}{\partial y} = 3,65 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Тл}}{\text{м}}$$

стандартной воронки от параметров поля и массы навески приведены на рис. 4, 5.

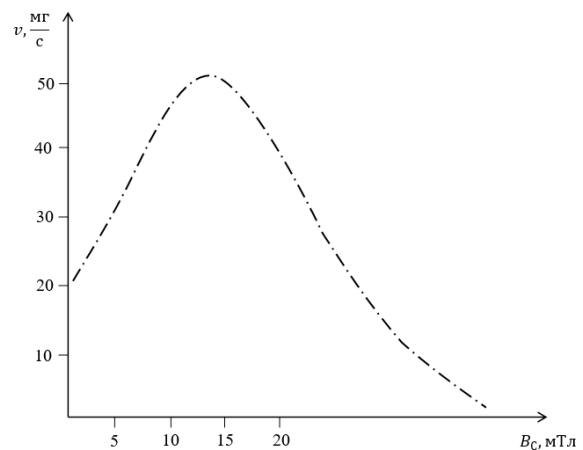


Рис. 5. Влияние индукции постоянного поля на скорость истечения порошка SmCo_5

$$(B_V = 2,23\text{мТл}; \frac{\partial B}{\partial y} = 57 \frac{\text{мТл}}{\text{м}})$$

Зависимость скорости истечения от массы навески (рис. 4) можно объяснить следующим образом. Во-первых, при увеличении массы насыпки уменьшается доля свободного от порошка объема в измерительной воронке. Следовательно, уменьшается длина свободного пробега кластера и запас его механической энергии, что способствует усилению процессов струк-

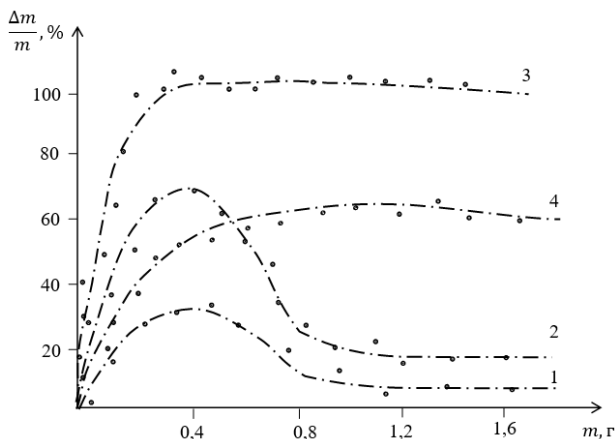


Рис. 6. Зависимость относительной массы просыпавшегося порошка феррита бария от массы навески $\frac{\partial B}{\partial y}$: 1 — 0,03; 2 — 0,06; 3 — 0,09; 4 — 0,12 $\frac{\text{Тл}}{\text{м}}$

На рис. 7 приведены значения относительной массы просыпавшихся через стандартное отверстие порошков различных материалов. Наименьшей текучестью обладает гранулированный феррит стронция. Однако и для этого порошка при $\frac{dB}{dy} = 90 \text{ мТл/м}$ вся масса навески 800 мг вытекает за 30 с. Наибольшей текучестью при $B_c = 55 \text{ мТл}$ обладает феррит стронция с удельной поверхностью $0,92 \text{ м}^2/\text{г}$, который за 30 с вытекает практически весь уже при $\frac{dB}{dy} = 0,05 \text{ Тл/м}$. Для сравнения проведены аналогичные измерения и для шламовых отходов ШХ-15.

Порошок шлама ШХ-15 обладает неустойчивой текучестью без внешнего электромагнитного поля. Характер зависимости текучести от параметров электромагнитного поля такой же, как и для ферритовых порошков. Однако преимущество когезионных сил [10] обуславливает более пологий характер спадающего участка зависимости скорости истечения

турирования порошка. Во-вторых, магнитовибрирующий слой будет устойчивым, если удельная энергия диссипации станет равной удельной энергии, подводимой от переменного поля. Отсюда следует наличие оптимальных масс насыпок при заданных условиях, а также возможность срыва магнетикоипения при больших массах (рис. 6).

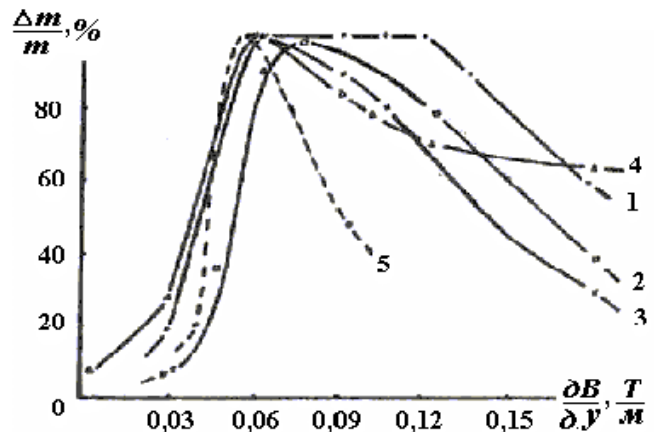


Рис. 7. Изменение массы просыпавшихся через калибровочное отверстие порошков различных материалов (время истечения - 30 с): 1 - FS-28 ($B_c=55 \text{ мТ}$); 2 - FS-18 ($B_c=55 \text{ мТ}$); 3 - FB-1 ($B_c=55 \text{ мТ}$); 4 - ШХ-15 ($B_c=55 \text{ мТ}$); 5 - SmCo_5 ($B_c=13,3 \text{ мТ}$)

от градиента индукции переменного поля, стремление к нулю кривой слабее. Сопоставление экспериментальных результатов позволяет утверждать, что градиент индукции переменного поля, соответствующий максимальной скорости истечения, для каждого ферромагнитного материала и различного гранулометрического состава следует подбирать индивидуально. Однако практически для всех исследованных материалов градиент индукции переменного поля, соответствующий максимальной скорости истечения порошка, меняется в достаточно узкой области $50 \dots 90 \text{ мТл/м}$.

Далее оценивали влияние на скорость истечения порошка размера отверстия, через которое вытекает порошок. При диаметре отверстия $d = 2 \text{ мм}$ естественная текучесть порошка феррита бария со средним размером частиц 1 мкм не наблюдается. При $d = 5 \text{ мм}$ - истечение неустойчивое. В поле с индукцией $B = 50 \text{ мТл}$ и градиентом индукции $\frac{dB}{dy} = 0,2 \text{ Тл/м}$

скорость истечения через отверстие диаметром 2 мм составляет 0,8 мг/с, а через отверстие 5 мм - 16,7 мг/с.

Возникновение устойчивой текучести тонкодисперсных порошков из магнитовибрирующего слоя позволяет разработать принцип работы и конструкцию электромагнитного дозатора, обеспечивающего

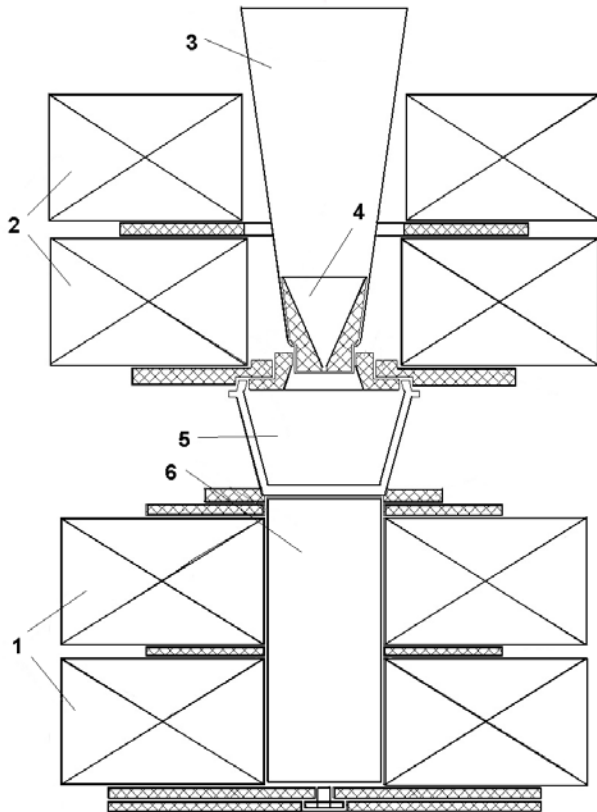


Рис. 8. Схема лабораторного макета магнитовибрационного дозатора

равномерное заполнение пресс-формы, эффективность которого особенно высока при прессовании изделий малой массы или сложной формы [11]. Принцип работы дозатора очевиден из рис. 8.

На рис. 8 не показаны узел ориентации пресс-формы, система отсечки порош-

Заключение

Магнитовибрирующий слой обеспечивает взвешенное состояние частиц твердой фазы, размер которых составляет от долей микрона и выше. При этом существенно, что происходит разрушение ранее образованных агрегатов. Ни один из известных способов вибрационного действия

ка, источники питания. Блок дезагрегации порошка представляет собой бункер (3) с коническими или вертикальными стенками и выходным отверстием, размер и форма которого (4) позволяют произвести наиболее равномерное заполнение камеры (5). Катушки постоянного (1) и переменного (2) токов обеспечивают в зоне выходного

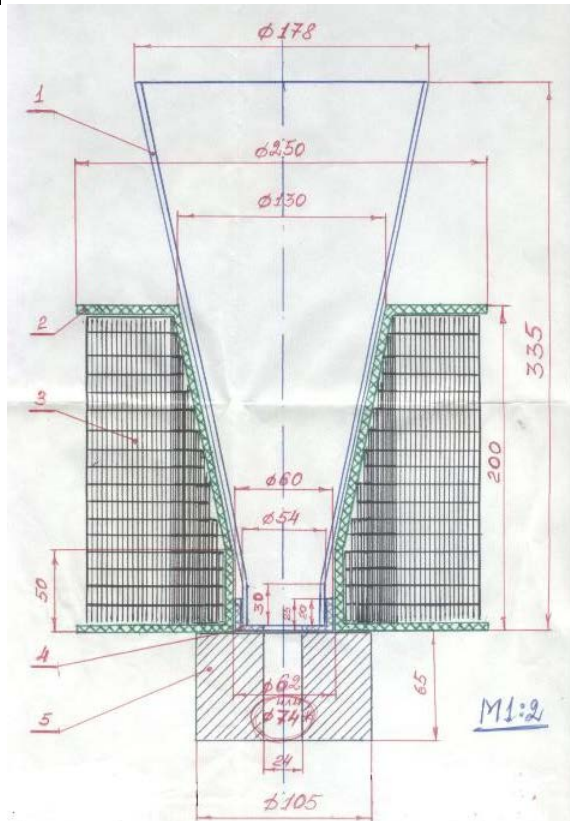


Рис. 9. Схема опытного промышленного образца магнитовибрационного дозатора: 1 - бункер-накопитель; 2 - каркас катушки переменного тока; 3 - обмотка катушки; 4 - насадка бункера; 5 - матрица пресс-формы П 30х20х8 (Ø74 - диаметр для кварцевой трубки)

отверстия воронки стабильное истечение порошка.

На рис. 9 представлена схема опытного промышленного образца магнитовибрационного дозатора.

на дисперсный ферромагнитный материал не позволяет обеспечить пространственную устойчивость частиц указанного интервала размеров.

Показано, что внутреннее трение в магнитовибрирующем слое зависит от параметров электромагнитного поля и при

некоторых оптимальных соотношениях индукции постоянного и градиента индукции переменного магнитных полей происходит кажущееся изменение трения из сухого в вязкое. Оптимальные параметры электромагнитного поля определяются физико-технологическими особенностями порошкового материала.

Очевидно, что исследование закономерностей магнитовибрационных процессов создает предпосылки для их применения в аппаратах различного назначения

(восстановление и окисление диспергированной твердой фазы, внесение легирующих примесей на частицы и очистка их поверхностей, гетерогенные каталитические процессы и др.).

Разработка технологических процессов в порошковой металлургии ферромагнитных материалов на базе магнитовибрирующего слоя сводится не к модернизации или совершенствованию действующих методов и способов, а к созданию новых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бувич, Ю.А. К теории развитого магнетожидкого слоя / Ю.А. Бувич, С.В. Сюткин, В.В. Тетюхин // *Магнитная гидродинамика*. - 1984. - № 4. - С. 3-11.
2. Бувич, Ю.А. О движении частиц при магнетожидкости в переменном поле / Ю.А. Бувич, М.К. Болога, С.В. Сюткин, В.В. Тетюхин // *Магнитная гидродинамика*. - 1985. - № 3. - С. 3-12.
3. Ганиев, Р.Ф. Динамика частиц при воздействии вибрации / Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский. - Киев: Наук. думка, 1975. - 168 с.
4. Членов, В.А. Виброкипящий слой / В.А. Членов, Н.В. Михайлов. - М.: Наука, 1972. - 146 с.
5. Вернигоров, Ю.М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов: дис. ... д-ра техн. наук / Ю.М. Вернигоров. - Ростов н/Д, 1995.
6. Бувич, Е.А. Реологические свойства однородных мелкодисперсных суспензий. Стационарные течения / Е.А. Бувич, И.Н. Щелчкова // *ИФЖ*. - 1977. - Т. 33. - № 5. - С. 872-879.
7. Бабичев, И.А. Основы вибрационной технологии / И.А. Бабичев, А.П. Бабичев. - Ростов н/Д: Изд-во ДГТУ, 2008. - 694 с.
8. Вернигоров, Ю.М. Механизм образования текучести дисперсных ферромагнетиков в однородном переменном магнитном поле / Ю.М. Вернигоров, К.К. Лелетко // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сб. материалов XXXII междунар. науч.-практ. конф.* - Новосибирск, 2017. - С. 58-65.
9. Биткина, Н.С. Структурообразование и свойства постоянных магнитов из гексаферритов бария, полученных методом резонансного формирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.С. Биткина. - Новочеркасск, 1987. - 16 с.
10. Geldard, D. Fluidization of cohesive powders / D. Geldard, N. Harnby, A.C. Wong // *Powders Tehhno.* - 1984. - V. 37. - P. 25-27.
11. Morimoto, Y. Mechanical behaviors of powders during compaction in mold with variable cross sections / Y. Morimoto, T. Hayashi, T. Takei // *Yit. Y. Powder Met. and Powder Technol.* - 1982. - Vol. 18. - № 2. - P. 1052-1056.
1. Buevich, Yu.A. On theory of developed magnetofluidized layer / Yu.A. Buevich, S.V. Syutkin, V.V. Tetyukhin // *Magnetic Hydrodynamics*. - 1984. - No.4. - pp. 3-11.
2. Buevich, Yu.A. On particles motion at magnetofluidization in alternating field / Yu.A. Buevich, M.K. Bologa, S.V. Syutkin, V.V. Tetyukhin // *Magnetic Hydrodynamics*. - 1985. No.3. - pp. 3-12.
3. Ganiev, R.F. Particle dynamics at vibration impact / R.F. Ganiev, L.E. Ukrainsky. - Kiev: *Scientific Thought*, 1975. - pp. 168.
4. Chlenov, V.A. *Vibroboiling Layer* / V.A. Chlenov, N.V. Mikhailov. - M.: Science, 1972. - pp. 146.
5. Vernigorov, Yu.M. *Magnetovibrated Technology of Manufacturing Powder Magnets*: D. Eng. degree thesis / Yu.M. Vernigorov. - Rostov-upon-Don. 1995.
6. Buevich, G.A. *Flow Properties of Homogeneous Fine-dispersed Slurries. Stationary Flows* / E.A. Buevich, I.N. Shchelchкова // *EPJ*. - 1977. - Vol.33. - Non.5. - pp. 872-879.
7. Babichev, I.A. *Vibration Technology Fundamentals* / I.A. Babichev, A.P. Babichev. - Rostov-upon-Don: Publishing House of DSTU, 2008. - pp. 694.
8. Vernigorov, Yu.M. Mechanism of fluctuation formation in dispersed ferro-magnetic in homogeneous alternating field / Yu.M. Vernigorov, K.K. Leletko // *Fundamental and Applied Investigations: Problems and Results: Transactions of the XXXII-d Inter. Scientific Practical Conf.* - Novosibirsk, 2017. - pp. 58-65.
9. Bitkina, N.S. *Structure Formation and Properties of Constant Magnets Made of Barium Hexaferrites Manufactured by Method of Resonance*

- Formation: author's abstract thesis for Can. Eng. Degree / N.S. Bitkina. - Novocherkassk, 1987. – pp. 16.*
10. Geldard, D. Fluidiration of cohesive powders / D. Geldard, N. Harnby, A.C. Wong // *Powders Tehhnol.* - 1984. - V. 37. - P. 25-27.
11. Morimoto, Y. Mechanical behaviors of powders during compaction in mold with variable cross sections / Y. Morimoto, T. Hayashi, T. Takei // *Yit. Y. Powder Met. and Powder Technol.* - 1982. - Vol. 18. - № 2. - P. 1052-1056.

Статья поступила в редколлегию 23.03.18.

*Рецензент: д.т.н., профессор Донского государственного технического университета
Тамаркин М.А.*

Сведения об авторах:

Вернигоров Юрий Михайлович, д.т.н., профессор кафедры физики Донского государственного технического университета, e-mail: jvernigorov@dstu.edu.ru.

Vernigorov Yury Mikhailovich, D. Eng., Prof. of the Dep. "Physics", Don State Technical Univedrsity, e-mail: jvernigorov@dstu.edu.ru.

Лелетко Кирилл Константинович, аспирант Донского государственного технического университета, e-mail: kirill-leletk@rambler.ru.

Leletko Kirill Konstantinovich, Post graduate student, Don State Technical University, e-mail: kirill-leletk@rambler.ru.