

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.762.002

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-4-10

Ю.М. Вернигоров, В.А. Лебедев, К.К. Лелетко,
А.А. Кочубей, Г.В. Дёмин**ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ДИСПЕРСНЫХ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ**

Предложен индукционный метод исследования параметров дисперсных ферромагнетиков. Разработан принцип действия и основные элементы конструкции экспериментальной установки, которая позволяет исследовать влияние на характеристики магнитовибрирующего слоя параметров электромагнитных полей. Показано, что экспери-

ментальная оценка кинематических характеристик частиц порошка в магнитовибрирующем слое возможна индукционным методом.

Ключевые слова: порошковые материалы, ферромагнетик, индукция, магнитовибрирующий слой, электромагнитное поле, ферромагнитные частицы.

Yu.M. Vernigorov, V.A. Lebedev, K.K. Leletko,
A.A. Kochubey, G.V. Dyomin**INDUCTION METHOD FOR PARAMETER INVESTIGATIONS
OF DISPERSION FERROMAGNETICS**

The purpose of investigations consists in the definition of the dependence of induction electromotive force (EF) upon magnetic and inertial properties of ferromagnetic particles of magneto-vibrating layer, and also upon induction gradient, frequency of a variable component and induction of a direct component of an electromagnetic field.

There is offered an induction method for investigations of dispersion ferromagnetic parameters. A principle of operation and basic elements of the design of an experimental plant which allows investigating the impact of the parameters of electromagnetic fields of different topology upon magnetic-vibrating layer characteristics is developed.

Two electromagnets with the common inter-pole area are a basic element of the experimental plant realizing the formation of the magneto-vibrating layer of high-dispersion powders. Electromagnet poles were located in such a way that force lines of constant and alternating magnetic fields were mutually perpendicu-

lar. A cluster, in the course of its motion relative to coils of an induction sensor, guides an EF in it, a value of which depends upon a magnetic moment of the cluster, speed, amplitude and frequency of its motion. There are obtained analytical expressions for the EF guided in an induction sensor moving by a magnetic dipole.

It is shown that a basic contribution to the induction EF is carried out by a magnetic dipole at oscillatory-translation; at changing parameters of an electromagnetic field changes a motion character of powder material particles.

It is proved that the experimental estimate of kinematic characteristics of powder particles in a magnetic-oscillating layer is possible through an induction method.

Key words: powder materials, ferromagnetic, induction, magneto-vibrating layer, electromagnetic field, ferromagnetic particles.

Введение.

Ферромагнитные материалы широко применяются в самых различных областях современной техники. В каждом конкретном случае к ним предъявляются свои особые требования. Это касается и определенного комплекса магнитных свойств и их немагнитных характеристик - электропроводности, механической прочности и

т.д. Свойства магнитных материалов структурно-чувствительны и, следовательно, зависят от химического и фазового составов, размера кристаллитов, степени текстуры, пористости и др. При промышленном производстве магнитных материалов существенную роль играет также экономическая сторона вопроса - дефицит-

ность компонентов, сложность технологии получения. Постоянные магниты классифицируются по основному способу их получения: литые и порошковые [1]. Широкое распространение технологии изготовления спеченных постоянных магнитов определили требования миниатюризации современных магнитных элементов, а также возможность значительной вариации их физических свойств [2,3]. При разработке магнитотвердых порошковых материалов обычно стремятся увеличить остаточную индукцию. Это возможно для материала с сильной магнитной анизотропией, для монокристалла или для материала, в котором оси легкого намагничивания отдельных зерен ориентированы параллельно друг другу.

Высокая коэрцитивная сила порошкового материала может быть обусловлена в основном двумя причинами: во-первых, за счет создания однодоменных частиц, обладающих сильной магнитной анизотропией формы, и при значительной кристаллографической анизотропии, когда даже в случае сферических частиц для изменения ориентации вектора намагничивания отдельных зерен требуются поля большой напряженности; во-вторых, за-

Методика и результаты исследований

Анализ общих теоретических вопросов и различных прикладных аспектов магнитокипения дисперсной среды ферромагнитных материалов показывает необходимость разработки малоинерционных и достаточно чувствительных методов наблюдений. Развитие методов регистрации возможно по двум основным направлениям: регистрация характера движения одной или нескольких частиц системы, что реализуется только для крупнодисперсных систем при их высокой порозности. Такие измерения оказываются практически бесполезны при исследовании процессов межчастичного взаимодействия в магнитовибрирующей фазе, определяющих важные свойства кооперативного поведения системы, например, структурирование и фазовые переходы в магнитовибрирующем слое. Другое направление - измерение кооперативных суммарных эффектов, вели-

труднением процессов смещения доменных границ, конфигурация которых сложным образом зависит от трудно учитываемых факторов - структуры спеченного материала, наличия механических напряжений, посторонних включений и т.д. Возникающие препятствия движению доменных стенок приводят к увеличению их поверхности, изменяют свободную энергию граничного сдоя и, следовательно, меняют характер намагничивания. Таким образом, для получения высокой магнитной текстуры в порошковой изделии необходимо реализовать два основных процесса: разрушить по возможности до отдельных частиц естественные микроагрегаты, имеющих макровихревое упорядочение магнитных моментов частиц [4], и создать перед пресованием параллельную систему магнитных моментов отдельных частиц [5].

Целью исследований является определить зависимость индукционной ЭДС от магнитных и инерционных свойств ферромагнитных частиц магнитовибрирующего слоя, а также от градиента индукции, частоты переменной составляющей и индукции постоянной составляющей электромагнитного поля.

чина которых определяется поведением всего ансамбля частиц. Как наиболее перспективные, следует отметить, методы получившие наибольшее распространение, например, методы визуализации с помощью кинокамеры и оптического микроскопа; оптические методы, связанные с регистрацией поглощения и рассеяния световой энергии, а также магнитные методы регистрации, представляющие собой различные модификации индукционных методов измерений.

Магнитовибрирующий слой (МВС) представляет собой взвешенное состояние тонкодисперсного порошка магнито жесткого ферромагнетика в переменном магнитном поле [5,6]. При определенных значениях индукции магнитного поля в МВС образуется магнитная структура: сначала в виде локальных образований, состоящих из нескольких десятков и сотен частиц, а

далее в виде эквидистантных цепочек, расположенных вдоль силовых линий поля. Основные тенденции, характерные для современной техники измерений - это повышение точности и расширение частотного диапазона, а также диапазона измеряемых величин, как в сторону слабых, так и сильных полей [7]. Эти тенденции в полной мере относятся к индукционным преобразователям, обладающим рядом преимуществ в сравнении с другими методами исследований магнитовибрирующих слоев - высокая надежность, эксплуатационные и метрологические характеристики, простота технических решений и т.д.

Динамика поведения ферромагнитного порошка и характер взаимодействия между его частицами в магнитном поле могут быть оценены по изменению относительного сигнала ЭДС [8], наведенного в индуктивном датчике движущимися частицами исследуемого порошка

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0}$$

где ε и ε_0 - ЭДС в датчике с порошком и без порошка, соответственно.

В основе всех типов индукционных преобразователей лежит явление электромагнитной индукции, которое для единичного витка цепи описывается уравнением

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

При реализации измерений пассивным преобразователем необходимо определить реакцию витка на относительное перемещение магнитной частицы, обладающей свойствами магнитного диполя. С помощью данного метода изучали особенности разрушения кластеров дисперсной ферромагнитной системы и регистрировали параметры движения частиц и кластеров в магнитном поле [9].

Основным элементом индукционного преобразователя является многovitковая катушка с числом витков N . Катушка помещается в исследуемый магнитовибрирующий слой. Если все витки катушки пронизываются одинаковым потоком, то ее суммарная ЭДС определится соотношением:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Магнитный момент диполя вследствие столкновительных процессов между частицами магнитовибрирующего слоя ориентирован произвольно относительно плоскости измерительного витка.

Предполагая, что магнитный момент совершает поступательно-колебательное движение под действием ponderomotorных сил электромагнитного поля вдоль оси индуктивного датчика, оставаясь в любой момент времени параллельным этой оси (рис.1), для наведенной ЭДС можно записать [10]:

$$\varepsilon = \frac{3\mu_0 R^2 P_m^3 \left(\frac{dB_v}{dy}\right)^2 \omega^7 \left(1 + \left(\frac{K}{M\omega}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{2M^2 \left(R^2 \omega^4 \left(1 + \left(\frac{K}{M\omega}\right)^2\right) + \left(\frac{P_m dB_v}{M \cdot dy}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

где P_m - магнитный момент кластера, соответственно, M - масса кластера, K - коэффициент сопротивления движению кластера, $\frac{dB_v}{dy}$ - градиент индукции переменной составляющей магнитного поля, ω - частота магнитного поля, R - радиус витка датчика, μ_0 - магнитная постоянная.

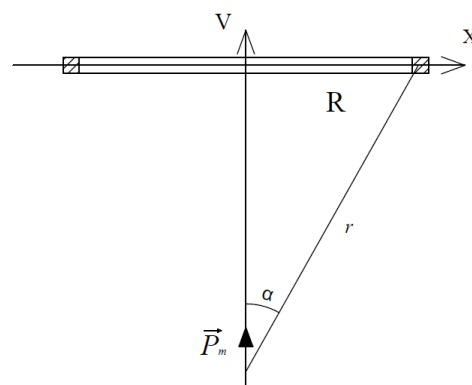


Рис. 1. Расположение вектора магнитного момента диполя относительно витка индуктивного датчика

По виду полученного выражения можно анализировать характер движения частиц, а также влияние параметров электромагнитного поля на поведение порошка. При этом основным источником информации является величина и характер

изменения индукционной ЭДС. На рис 2 приведены характерные расчетные кривые [5]. Расчетные кривые имеют немонотонный характер. Положение максимума определяется соотношением

параметров магнитного поля, магнитными и инерционными свойствами частиц. Зависимости наведенной ЭДС от частоты электромагнитного поля и массы кластера имеют аналогичный вид.

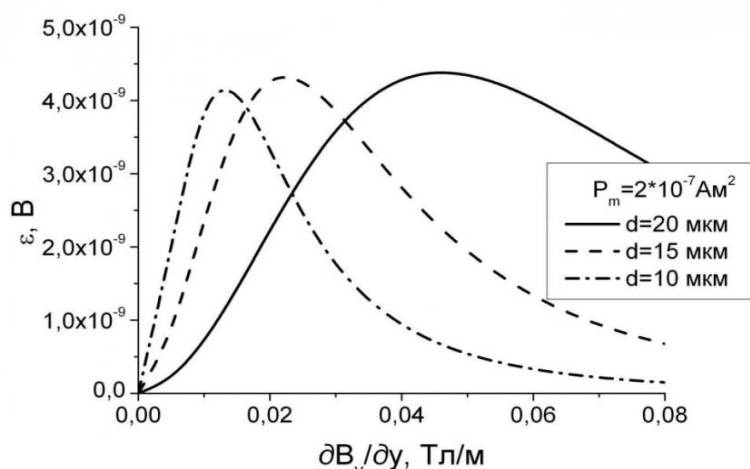


Рис. 2. Расчетные зависимости ЭДС индукции от градиента индукции магнитного поля для разных диаметров сферической модели кластера. ($P_m = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Ам}^2$)

Основным элементом экспериментальной установки, реализующей образование магнитовибрирующего слоя высокодисперсных порошков, являются два электромагнита с общим межполюсным пространством. Полюса электромагнитов располагались таким образом, что силовые линии постоянного и переменного магнитных полей были взаимно перпендикулярны. Кластер при своем движении относительно витков индуктивного датчика наводит в нем ЭДС, величина которой зависит от магнитного момента кластера, скорости, амплитуды и частоты его движения. Индуктивный датчик представлял собой ци-

линдрическую катушку, имеющую 200 витков провода ПЭТВ на картонном каркасе высотой 13 мм, внутренний диаметр которого равен внешнему диаметру стеклянной кюветы с исследуемым порошком. Диаметр кюветы 12мм, толщина стенок – 0,5мм, высота - 15мм. Индуктивный датчик и кювета помещались в общее межполюсное пространство электромагнитов. Питание электромагнита постоянного поля осуществлялось через выпрямитель ВСА-111А. Ток в цепи электромагнита контролировался многопредельным амперметром М1104.

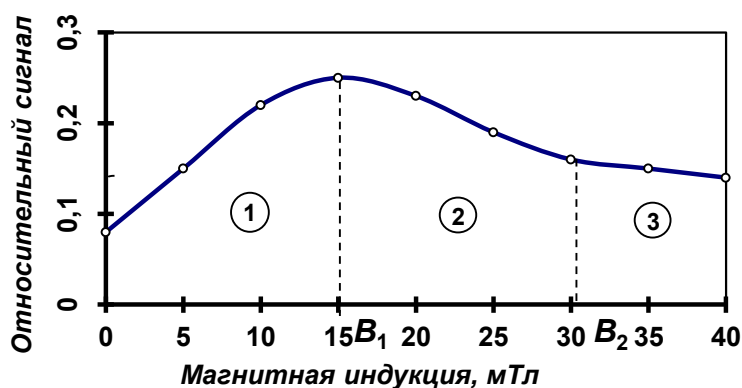


Рис. 3. Экспериментальная зависимость относительного сигнала $\Delta\epsilon/\epsilon$ порошка феррита бария от индукции постоянной составляющей магнитного поля

По характеру изменения относительного сигнала (ОС) экспериментальные кривые (рис. 3) можно разделить на три области: первая - ОС увеличивается с ростом индукции поля до некоторого B_1 ; вторая - соответствует резкому уменьшению ОС при увеличении индукции от B_1 до B_2 ; третья - ОС плавно уменьшается при $B > B_2$. В первой области кластеры и частицы порошка совершают интенсивное движение – магнитокипение. При этом разрушаются флоккулы, снижаются силы межчастичного взаимодействия, увеличивается магнитный момент оставшихся флокул и намагничиваются отдельные частицы, а также происходит ориентация магнитных моментов частиц и кластеров вдоль силовых линий поля. Эти процессы и обуславливают возрастание ОС на первом этапе. Если предварительно поместить порошок магнитоожесткого материала в сильное магнитное поле, то область возрастания ОС наблюдаться не будет. Очевидно, в этом случае поле той же мощности не может перевести порошок в псевдоожуженное состояние из-за возросшего магнитоостатического взаимодействия. Следует отметить, что высота развитого магнитоожуженного слоя по крайней мере на порядок больше высоты свободной насыпки. Во второй области при $B > B_1$ формируются цепочечные псевдополимерные комплексы, которые при увеличении индукции постоянного поля образуют магнитные струны (МС). Неоднородное переменное поле раскачивает МС. Однако амплитуда и скорость колебаний МС меньше, чем отдельных частиц, что приводит к резкому снижению ОС.

Заключение

1. Разработаны принцип действия и основные элементы конструкции экспериментальной установки, которая позволяет исследовать влияние на характеристики магнитовибрирующего слоя, параметров электромагнитных полей различной топологии. Показано, что экспериментальная оценка кинематических характеристик частиц порошка в магнитовибрирующем слое возможна индукционным методом.

В третьей области при $B > B_2$ МС закрепляются за счет роста магнитоостатического взаимодействия и из МС формируется слоистая структура, практически не реагирующая на электромагнитное возмущение.

Анализ полученных экспериментальных зависимостей для порошков феррита бария, позволяет заключить следующее: зависимость ОС от индукции магнитного поля имеет характер, тождественный теоретическим результатам. Аналогичные совпадения расчетных и экспериментальных результатов получены для всех исследованных порошков магнитоожестких материалов, (в частности, сплава КС-37, порошка $SmCo$ и пр.)

Интервал индукции постоянного поля, при котором наблюдается магнитокипящее состояние дисперсной системы при заданном значении градиента индукции переменного поля, принято называть шириной области магнитокипания. При увеличении индукции постоянного поля выше некоторого значения, характерного для каждого порошка и называемого полем наведенной или вторичной флокуляции, отдельные частицы образуют магнитные струны. Реализация магнитокипящего состояния в неоднородном переменном магнитном поле возможна лишь в слабых постоянных полях с индукцией, меньшей индукции, наведенной флокуляции. В то же время без постоянного поля кластеры магнитоожесткого порошка имеют настолько малый магнитный момент, что порошок не образует магнитовибрирующего слоя. Таким образом, для перевода дисперсной системы в магнитоожуженное состояние необходимо прикладывать слабое постоянное магнитное поле.

2. Выражения для ЭДС, наведенной в индуктивном датчике движущимся магнитным диполем, позволяет утверждать, что основной вклад в индукционную ЭДС вносит магнитный диполь при колебательном - поступательном движении.

3. Экспериментально показано, что при изменении параметров электромагнитного поля меняется характер движения

частиц порошкового материала. Выделены отдельные этапы этого процесса:

- при индукции, меньшей поля наведенной флокуляции, ферромагнитный порошок в переменном магнитном поле образует магнитовибрирующий слой, интенсивность движения частиц и кластеров ко-

торого зависит от параметров магнитного поля и свойств порошковой системы;

- при повышении магнитной индукции выше поля флокуляции из частиц и кластеров формируются магнитные струны, обладающие упругими свойствами. Роль квазиупругих сил играют силы магнитостатического взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии: Т. 1. Производство металлических порошков. - М.: Изд-во МИСиС, 2001. 367 с.
2. Либенсон Г. А. Основы порошковой металлургии. - М.: Металлургия, 1987. 208 с.
3. Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Лелетко К.К., Фролова Н.Н. Особенности технологического процесса устройств помола ферромагнитных материалов на базе магнитовибрирующего слоя // Материалы междунаро. научн. симпозиума технологов-машиностроителей. «Научное и виброволновые технолог. обработки деталей высокотехнологичных изделий». - Ростов-на-Дону, 26-28 сент. 2018. С. 15-21.
4. Вернигоров Ю.М., Егоров И.Н., Егорова С.И. Особенности флокуляции полидисперсных порошков магнитоупругих материалов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2006, № 2. С. 64-68.
5. Вернигоров Ю.М. Магнитовибрационная технология производства порошковых магнитов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08:05.16.06. Ростов н/Д, 1995. 33 с.
6. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. The application of a magnetovibrating layer to the milling of ferromagnetic materials // Euro PM2005 Powder Metallurgy Congress and Exhibition: Proceedings, Vol. 1, 2-5 October, Prague, Czech Republic, 2005. P. 451-455.
7. Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Плотников Д.М. Технико-экономические аспекты перспективности применения методов порошковой металлургии для переработки металлоотходов // Вестник РГТУ им. Соловьёва. №2 (45). 2018. С. 143-147.
8. Семенов Н.М., Яковлев Н.И. Цифровые феррозондовые магнитометры. Л.: Энергия. 1978. 168 с.
9. Вернигоров Ю.М., Егоров И.Н., Егорова С. И., Биткина Н.С. Диагностика дисперсных магнитных материалов // Вестник ДГТУ. 2002. Т. 2. № 3 (13). С. 287-297.
10. Биткина Н.С., Вернигоров Ю.М., Лемешко Г.Ф. Формирование магнитной структуры порошковых изделий в сильно неоднородном электромагнитном поле. // Технология получения и свойства порошковых и композиционных материалов. Пенза, 1987. С. 40-42.
1. Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitsky G.V. Powder Metallurgy Processes: Vol.1. Metal Powder Production. M.: MISIS Publishers, 2001. – pp. 367.
2. Libenson G.A. Fundamentals of Powder Metallurgy. M.: Metallurgy, 1987. 208 p.
3. Vernigorov Yu.M., Lebedev V.A., Leletko K.K., Frolova N.N. Peculiarities of engineering process of devices for ferromagnetic material grinding based on magneto-oscillating layer // Proceedings of the Inter. Scientif. Symposium of Technologist-Mechanicians. “Science Intensive and Vibration Wave Technologies for High-Tech. Parts Machining”. – Rostov-upon-Don, September 26-28, 2018. P. 15-21.
4. Vernigorov Yu.M., Yegorov I.N., Yegorova S.I. Flocculation peculiarities of poly -dispersion powders of magneto-hard materials // College Proceedings of the North-Caucasus Region, Engineering Sciences. 2006. No.2. P. 64-68.
5. Vernigorov Yu.M. Magneto-oscillating Technology of Powder Magnet Production: author’s abstract for Dr. Sc. Tech degree thesis: 05.02.08:05.16.06. Rostov-upon-Don, 1995. 33 p.
6. Vernigorov Yu.M., Egorov I.N., Egorova S.I. The application of a magnetovibrating layer to the milling of ferromagnetic materials // Euro PM2005 Powder Metallurgy Congress and Exhibition: Proceedings, Vol. 1, 2-5 October, Prague, Czech Republic, 2005. P. 451-455.
7. Vernigorov Yu.M., Lebedev V.A., Plotnikov D.M. Technical-economic aspects of outlooks in use of powder metallurgy methods for metal scrap processing // Bulletin of Soloviyov RGATU, No.2 (45) 2018/ P. 143-147.
8. Semyonov N.M., Yakovlev N.I. Digital Ferro-probe Magnetometers. L.: Energy, 1978. 168 p.
9. Vernigorov Yu.M., Yegorov I.N., Yegorova S.I., Bitkina N.S. Diagnostics of dispersion magnetic materials // Bulletin of DSTU. 2002. Vol. 2/ No. 3 (13). P. 287-297.
10. Bitkina N.S., Vernigorov Yu.M., Lemeshko G.F. Formation of magnetic structure of powder products in highly heterogeneous electro-magnetic field // Manufacturing Technology and Properties of Powder Materials and Composites. Penza, 1987. P. 40-42.

Ссылка для цитирования:

Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Лелетко К.К., Кочубей А.А., Дёмин Г.В. Индукционный метод исследования параметров дисперсных ферромагнетиков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 4-10. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-4-10.

Статья поступила в редакцию 19.01.20.

Рецензент: д.т.н., доцент Брянского государственного
технического университета

Демидов А.А.

Статья принята к публикации 26.03.20.

Сведения об авторах:

Вернигоров Юрий Михайлович, д.т.н., профессор кафедры «Физика» Донского государственного технического университета, тел. 8 928 229 15 08, e-mail: jvernigоров@donstu.ru.

Лебедев Валерий Александрович, к.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, тел. 89515395159, e-mail: va.lebidev@yandex.ru.

Лелетко Кирилл Константинович, аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донского

Vernigоров Yury Michailovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Physics", Don State Technical University, phone: 8 928 229 15 08, e-mail: jvernigоров@donstu.ru.

Lebedev Valery Alexandrovich, Can. Sc. Tech., Prof. of the Dep. "Engineering Technique", Don State Technical University, phone: 8 951 539 51 59, e-mail: va.lebidev@yandex.ru.

Leletko Kirill Konstantinovich, Post graduate student of the Dep. "Engineering Technique", Don State Tech-

нического государственного университета, тел. 8 951 539 51 59, e-mail: kirill-leletk@rambler.ru.

Кочубей Анатолий Анатольевич, к.т.н., зам. начальника технологического управления по САПР ПАО ТАНТК им. Г.М. Бериева», г. Таганрог, т.ел.8 904 346 14 55, e-mail: kochubey@beriev.com.

Дёмин Георгий Вячеславович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета, тел. 89287722782, e-mail: georgijdstu@yandex.ru.

nical University, phone: 8 951 539 51 59, e-mail: kirill-leletk@rambler.ru.

Kochubey Anatoly Anatolievich, Can. Sc. Tech, Deputy-Chief of technological Dep. for CAD of PC Beriev TANTK", Taganrog, phone: 8 904 346 14 55, e-mail: kochubey@beriev.com.

Dyomin Georgy Vyacheslavovich, Post graduate student of the Dep. "Engineering Technique", Don State Technical University, phone: 8 928 772 27 82, e-mail: georgijdstu@yandex.ru.