УДК 675.03.031.81 : 577.15

Профессор Е.Д. Чертов, доцент М.А. Васечкин
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра технической механики. тел. (473) 255-47-20
E-mail: vmax77@mail.ru
профессор О.А. Носов, старший преподаватель Г.Р. Варданян
(Белгор. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова) кафедра «Технологические комплексы, машины и механизмы». тел. (472) 230-99-44
E-mail: lidart2@mail.ru

Professor E.D. Chertov, associate Professor M.A. Vasechkin
(Voronezh state university of engineering technology) Department of technical mechanics.
phone (473) 255-37-51
E-mail: vmax77@mail.ru
professor O.A. Nosov, senior teacher G.R. Vardanian
(Belgorod state technological university by V.G. Shukhov) Department of technological systems, equipment and machinery.
phone (472) 230-99-44
E-mail: lidart2@mail.ru

Бесконтактный метод формования элементов транспортных сооружений из органоминеральных композиционных материалов

Contactless method of formation of transporting constructions elements consisting of organic-mineral composite materials

Реферат. В статье представлен бесконтактный метод формования элементов транспортных сооружений из органоминеральных композиционных материалов. Приведены основные результаты математического моделирования гидрогазодинамических процессов, протекающих при отливке органоминерального композиционного материала на несущий воздушный буфер, реализующего оригинальные гипотезы, отраженные в выборе алгоритма преобразований и граничных условий. При разработке математической модели использовались классические уравнения механики, гидро- и газодинамики с учетом реологических свойств органоминерального композиционного материала. Полученные зависимости позволяют определить основные параметры процессов, протекающих в системе “материал – несущий воздушный буфер” при отливке органоминерального композиционного материала и выработать закон эффективного демпфирования, возникающих при этом колебаний. Применение данного способа позволяет исключить возможность возникновения контакта органоминерального композиционного материала с рабочими поверхностями оборудования, а также существенно снизить затраты на производство элементов транспортных сооружений, улучшить их качество и эксплуатационные характеристики пневматического оборудования.

Summary. There proposed contactless method of formation of transporting constructions elements consisting of organic-mineral composite materials in the article. The results of mathematical modeling of hydro-gas-dynamic processes occurring when casting of organic- mineral composite material onto the bearing air buffer realizing original hypotheses reflected in the choice of transformation algorithm and limiting conditions are presented. When developing the mathematical model there were used classical equations of mechanics, hydro- and gas-dynamics taking into account rheological properties of organic- mineral composite material. The obtained correlations allow to define general parameters of the processes occurring in the system ‘material - bearing air buffer’ when casting of organic- mineral composite material and to work out the law of damping the oscillations appearing during this process. The application of this method allows to eliminate the possibility of contact between the composite material and the working surface of the equipment and also to reduce the cost of production of transporting constructions’ elements, to improve their quality operational characteristics of pneumatic equipment.

Ключевые слова: транспортные сооружения, несущий воздушный буфер, органоминеральный композит, полусферическая пористая форма, бегущая волна, демпфирование.

Keywords: transporting constructions, bearing air buffer, organic- mineral composite, semi-spherical pore form, travelling wave, damping.

© Чертов Е.Д., Васечкин М.А.
Носов О.А., Варданян Г.Р., 2014

В последнее время наблюдается интенсивный рост объемов применения органоминеральных композиционных материалов в различных отраслях народного хозяйства страны, таких как машиностроение, приборостроение, авиа- и ракетостроение, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство и другое. Востребованность в таких материалах вызвана тем, что различные элементы существующих конструкций подвергаются внешним воздействиям, которые можно разделить на несколько групп: механические, физико-химические, температурные и комплексные воздействия, представляющие собой сочетание указанных видов. Под влиянием данных факторов в деталях машин, транспортных сооружениях, строительных конструкциях и др. возникают повреждения, которые значительно снижают срок эксплуатации и экономическую эффективность.

Органоминеральные композиционные материалы – многокомпонентные материалы, состоящие из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями. В качестве компонентов могут использоваться самые разнообразные материалы – бумага, керамика, стекла, пищевые отходы, углерод и др. Наполнитель определяет механические свойства материала (прочность, жесткость, износостойкость и другие свойства), а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям. Варьируя состав и соотношение материалов матрицы и наполнителя, получают широкий спектр новых материалов с требуемым набором свойств [1].

Существуют следующие основные виды органоминеральных композиционных материалов:

- композиционные материалы, содержащие любые твердые частицы или волокна;
- смеси композиционных материалов;
- композиционные материалы, содержащие жидкости в виде включений или пластификаторов;
- композиционные материалы, содержащие газообразные наполнители.

Одним из наиболее простых и сравнительно недорогих процессов получения органоминеральных композиционных материалов является литьё в формы. Этим методом могут быть получены листы, трубы, стержни и другие изделия требуемой формы. [2]

Применяемые в качестве матрицы материалы должны обладать высокой адгезионной способностью, которая является одним из факторов, определяющих прочность органоминерального композиционного материала. Следует отметить, что адгезия в процессе отливки заготовок элементов конструкций играет негативную роль, то есть материал прочно связывается с рабочими поверхностями оборудования. Для устранения прилипания к поверхностям оборудования и повышения рентабельности производства применяют твердые антиадгезионные покрытия или жидкие смазки. Следует отметить, что первые дорогостоящи и недостаточно долговечны, а вторые существенно изменяют поверхностные свойства изделий, что затрудняет последующую обработку, например, процессы окрашивания или нанесения люминесцентных покрытий.

Создание воздушного буферного слоя между контактирующими поверхностями оборудования и изделия на сегодняшний день является единственным способом устранения контакта. Воздушный буферный слой образуется за счет истечения сжатого воздуха через перфорацию рабочей поверхности оборудования, полностью разделяя ее с опорной поверхностью изделия. При этом можно не только исключить адгезию, но и обеспечить оптимальный режим обработки, не нарушая поверхностных свойств изделия (в частности охлаждение полученного изделия) [3, 4].

Следует отметить, что формование литьем на воздушный буфер, сопровождаемый первоначальной загрузкой и дальнейшими сложными гидрогазодинамическими и колебательными процессами, в настоящее время практически не изучен [5].

Рассмотрим процесс отливки органоминерального композиционного материала на несущий воздушный буфер, образованный за счет истечения сжатого воздуха сквозь пористую форму. Траекторию движения точки О1 фронтальной поверхности струи массы в потоке воздуха можно условно разбить на три этапа (рисунок 1).

На первом этапе точка O_1 удалена от рабочей поверхности формы на расстояние S, большее h_1, где h_1 – расстояние до верхней торцевой поверхности формы.

На втором этапе точка О1 проходит расстояние от плоскости верхней торцевой поверхности формы до точки, соответствующей началу пленочного течения воздуха, т.е. в интервале от h1 до h0.

На третьем этапе расстояние между формой и фронтальной поверхностью струи меняется в пределах от величины, соответствующей появлению пленочного течения воздуха, до расстояния соответствующего минимальной толщине буферного слоя, на котором скорость движения точки O_1 равна нулю.

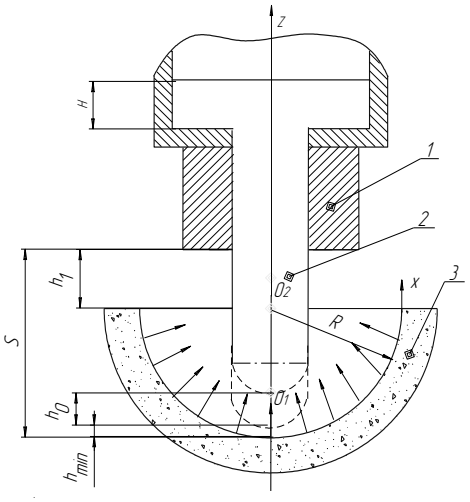

Рисунок 1. Формование органоминерального композиционного материала на несущем воздушном буфере: 1 – насадка отливочного механизма; 2 – струя материала; 3 – пористая форма.

Движение струи на первом этапе происходит в турбулентном потоке воздуха, истекающем сквозь пористую поверхность полусферической формы. Движение центра (точка O_2) струи (рисунок 1) можно описать с помощью уравнения поступательного движения объекта переменной массы вида:

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = F_1 + F_2 - F_3 - mg, \qquad (1)$$

где m – масса объекта, кг; F_1 – сила сопротивления встречного потока воздуха, Н; F_2 – сила трения, действующая на струю органоминерального композиционного материала в канале дозирующего устройства, Н; F_3 – сила, действующая на композиционный материал со стороны поршня, Н.

Масса объекта, находящегося на воздушном буфере:

$$m = Q(t)\rho t, \qquad (2)$$

где Q(t) – объемный расход массы, $м^3/с$; ρ - плотность органоминерального композиционного материала, кг/м3; t – текущее значение времени, с.

Сила сопротивления встречного потока воздуха:

$$F_1 = \frac{1}{2}\rho_c \pi R_c^2 U_{OT}^2 c, \qquad (3)$$

где ρ_c – плотность газа, $кг/м^3$; R_c – радиус поперечного сечения струи, м; U_{OT} – относительная скорость набегания потока воздуха; c – коэффициент гидродинамического сопротивления.

Сила трения, действующая на струю в канале дозирующего устройства:

$$F_2 = 8\mu_0 Q(t)\left(\frac{L_1}{R_1^2} + \frac{L_2}{R_2^2}\right) + \zeta\frac{\rho Q^2(t)}{\pi R_1^2}, \qquad (4)$$

где L_1 – длина столбика материала в цилиндре отливочного механизма, м; L_2 – длина насадки дозирующего устройства, м; R_1 – радиус поршня отливочного механизма, м; R_2 – радиус поршня дозирующего устройства, м; ζ – коэффициент местного сопротивления.

Сила, действующая на органоминеральный композиционный материал со стороны поршня:

$$F_3 = \frac{\pi d_1^2}{4}\left(32V\frac{\mu_0 L_2}{d^2} + P_a\right), \qquad (5)$$

где d_l – диаметр внутреннего канала насадки, м; V – объем струи, м3; μ0 – вязкость органоминерального композиционного материала, $Н\cdot с/м^2$; d – внутренний диаметр цилиндра отливочного механизма, м; P_a – атмосферное давление, Па.

Совместное решение выражений (1) – (5) с учетом начальных условий позволяет определить скорость $\dot{z}_1$ движения точки O_2 на первом этапе.

Рассмотрим движение точки O_2 центра массы струи на втором этапе. Уравнение движения в этом случае аналогично уравнению (1).

При движении на втором этапе можно считать, что часть струй воздуха, истекающих сквозь пористую форму, не оказывают влияния на характер движения. Поэтому необходимо учесть перераспределение расхода воздуха между питающими отверстиями формы.

Объемный расход воздуха, истекающего через отверстия формы, “перекрываемые” струей органоминерального композиционного материала:

$$Q_1 = \lambda\pi R_p^2(2\sin\gamma - \sin(2\gamma))\left(U_0 + \frac{dz}{dt}\right), \qquad (6)$$

где λ – коэффициент проницаемости материала формы; R_p – радиус формы ,м; γ – деформация полуфабриката, м:

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{R_c}{R_p - z - R_c}\right).$$

Объемный расход воздуха, истекающего через “открытые” отверстия формы:

$$Q_0 = \lambda\pi R_p^2 U_0(2 - 2\sin\gamma + \sin(2\gamma)). \qquad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) можно получить выражение для определения относительной скорости движения потока воздуха:

$$\frac{Q - \lambda\pi R_p^2 U_0(2 - 2\sin\gamma + \sin(2\gamma))}{\lambda\pi R_p^2(2\sin\gamma - \sin(2\gamma))} = U_0 + \frac{dz}{dt}, \qquad (8)$$

После ряда преобразований уравнения (1) с учетом (8) получим выражение, решив которое с учетом начальных условий (при $t = t_1$; $z = h_1$ и $\dot{z} = \dot{z}_1$) можно найти скорость движения точки O_2 на втором этапе.

При достижении высоты h_0 между опорной поверхностью струи композиционного материала и рабочей поверхностью формы устанавливается пленочное течение воздуха, при этом скорость движения точки O_1 фронтальной поверхности струи органоминерального композиционного материала гораздо меньше скорости движения воздуха в воздушном буфере [5].

Уравнение движения точки O_2 центра масс струи на третьем этапе при граничных условиях $t = t_2$; $z = h_0$:

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = \int_A pdA + F_2 - mg - F_3 , \qquad (9)$$

где p - полное абсолютное давление в газовом буферном слое, Па; A – площадь опорной поверхности объекта, м^2.

Выражение, описывающее поле давления среды в воздушном буфере имеет следующий вид:

$$p_0 - p_x = \left(\frac{x_k^2}{2} - x_0\right)B + \left(\frac{x_k^3}{3} - x_k^2 x_0 + x_k x_0^2\right)\frac{C}{2} +$$

$$+12\mu\lambda U_0 R_p x_k \left(\frac{x_0 \cos\frac{x_0}{R_p}\cos\left(\arcsin\left(\frac{R_p}{R_c}\sin\left(\frac{x_0}{R_p}\right)\right)\right)}{\left(R_p - z - R_c\right)\cos\left(\arcsin\left(\frac{R_p}{R_c}\sin\left(\frac{x_0}{R_p}\right)\right)\right) - R_c} \right).$$

Совместное решение уравнений (1) – (9) позволит определить расход воздуха, необходимый для полной остановки струи полуфабриката на заданной высоте.

После остановки струи органоминерального композиционного материала следует этап заполнения формы. При этом можно наблюдать колебания двух видов (рисунок 2):

- «поршневые» колебания, то есть колебания всей загруженной на данный момент массы;
- колебания типа «бегущая волна», возникающие на опорной поверхности пластической массы из-за постепенного заполнения формы и как следствие взаимное смещение соседних слоев материала.

Для описания колебательных процессов, протекающих на этапе заполнения ячейки, необходимо решить систему уравнений, включающую уравнение (9) и уравнение движения точки O_3, принадлежащей центру фронтальной поверхности элементарного объёма органоминерального композиционного материала (рисунок 2):

$$dm\frac{d^2z_0}{dt^2} = F_{сопр.} - F_т + \int_{\Delta A} pd\Delta A , \qquad (10)$$

где dm – масса элементарного объема органоминерального композиционного материала, кг; z_0 – перемещение точки O_3 фрагмента органоминерального композиционного материала, м; $F_{сопр}$ – сила внутреннего трения, Н; $F_т$ – сила тяжести, действующая на элементарный объём фрагмента массы, Н.

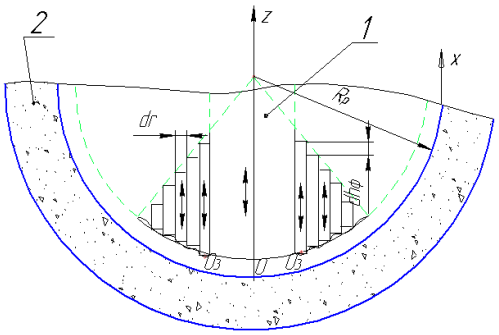

Рисунок 2. Колебания органоминерального композиционного материала при отливке на воздушный буфер: 1 – масса органоминерального композиционного материала; 2 – пористая форма.

Выражение, описывающее поле давления среды в воздушном буфере, имеет следующий вид:

$$p_0 - p = \frac{24\mu\lambda x R_p\left(U_0 + \dot{z}\right)}{z^3} . \qquad (11)$$

Проинтегрировав уравнение (11) по x в пределах от 0 до x, получим выражение для определения величины суммарного воздействия на материал:

$$\int_A pdA = \frac{24\mu\lambda\pi x^2 R_p^2\left(U_0 + \dot{z}\right)}{z^3} . \qquad (12)$$

Подставив данное выражение в (10) и решив полученное уравнение с учётом граничных условий, определим перемещение точки O_1.

Длительность существования “бегущей волны” определяется реологическими свойствами материала и величиной расхода газа через сечение формы.

Для решения уравнения (10) найдём силу внутреннего трения и силу тяжести, действующую на элементарный объём фрагмента полуфабриката:

$$F_{сопр} = 2\tau\pi\left(rh_ф + \left(r + dr\right)\left(h_Ф - dh\right)\right), \qquad (13)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; $h_ф$– высота элементарного объёма фрагмента массы, м; dr – толщина элементарного объёма фрагмента органоминерального композиционного материала, м; $dh_ф$ – разность высот элементарных объёмов фрагментов, м;

$$F_т = \pi\left(2rdr - dr^2\right)\rho gh . \qquad (14)$$

Процесс течения органоминерального композиционного материала удобно описывает степенной закон:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n(t)}, \qquad (15)$$

где τ_0 –напряжение сдвига в приведенном состоянии, Па; n(t) – индекс течения; $\dot{\gamma}_0$ – скорость сдвига в приведенном состоянии, c^{-1}; n(t) – индекс течения; $\dot{\gamma}$ - скорость сдвига, c^{-1}:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\dot{z}}{dr}. \qquad (16)$$

Суммарное воздействие, оказываемое на нижнюю поверхность элементарного объёма органоминерального композиционного материала со стороны воздушного буфера:

$$\int_{\Delta A} pd\Delta A = \frac{6\mu\pi R_p dr^2 x^2 (U_0 + \dot{z})}{(z + z_0)^3} + \frac{24\mu\pi R_p^2 dr (U_0 + \dot{z})}{(z + z_0)^3} \left(\frac{x^2}{2} - 2\cos\left(\frac{x}{R_p} \right) - x\sin\left(\frac{x}{R_p} \right) + 2 \right) \qquad (17)$$

После ряда преобразований уравнение (10) примет вид:

$$dm\frac{d^2 z_0}{dt^2} = \frac{6\mu\pi R_p dr^2 x^2 (U_0 + \dot{z})}{(z + z_0)^3} + \frac{2\pi r K_k}{dr^{n(t)}} |\dot{z}_0|^{n(t)} \left(rh_\Phi + (r + dr)(h_\Phi - dh_\Phi) \right) + \\ + \frac{24\mu\pi R_p^2 dr (U_0 + \dot{z})}{(z + z_0)^3} \left(\frac{x^2}{2} - 2\cos\left(\frac{x}{R_p^2} \right) - \sin\left(\frac{x}{R_p^2} \right) + 2 \right), \qquad (18)$$

где K_k - коэффициент консистенции.

Полагая, что перемещение z_0 – пренебрежимо малая величина, разложим функцию $(z + z_0)^{-3}$ в степенной ряд и, учитывая лишь члены до второго порядка малости включительно, после упрощения получим:

$$\frac{d^2 z_0}{dt^2} - \frac{24\mu\pi\lambda R_p^3 dr}{z^3 dm} \left(1 - \frac{3U_0 z_0}{z} \right) \left(\begin{array}{c} \frac{x^2}{2} - 2\cos\left(\frac{x}{R_p} \right) - \\ x\sin\left(\frac{x}{R_p} \right) + 2 \end{array} \right) \frac{dz_0}{dt} + \frac{6\mu\pi\lambda R_p^2 dr^2 x^2 U_0}{z^3 dm} \frac{dz_0}{dt} + \frac{6\mu\pi\lambda dr^2 x^2 U_0 z_0}{z^4 dm} = \qquad (20)$$

$$= \frac{24\mu\pi\lambda R_p^3 dr U_0}{z^3 dm} \left(\frac{x^2}{2} - 2\cos\left(\frac{x}{R_p} \right) - x\sin\left(\frac{x}{R_p} \right) + 2 \right) - \frac{6\mu\pi\lambda dr^2 x^2 U_0}{z^3 dm} + \frac{2\pi K_k}{dm dr^{n(t)}} \left| \frac{dz_0}{dt} \right|^{n(t)} \left(2rh_\Phi - rdh_\Phi + drh_\Phi - drdh_\Phi \right) + g$$

Для решения данного уравнения необходимо определить реологические характеристики органоминерального композиционного материала, а именно коэффициент консистенции K и индекс течения n.

Как отмечалось выше, после заполнения формы материалом в системе происходят поршневые колебания и колебания типа “бегущая волна”. Закон движения центра масс описывается уравнением:

$$m\frac{d^2 z}{dt^2} = \int_A pdA - mg. \qquad (21)$$

Суммарное воздействие со стороны воздушного буфера, на объект:

$$\int_{\Delta A} pdA = \frac{6\mu\lambda\pi^3 R_p^4 (U_0 + \dot{z})}{z^3}. \qquad (22)$$

Выражение для определения отклонения от положения равновесия в воздушном буфере можно записать следующим образом:

$$z = h_0 + \zeta;\ \dot{z} = \dot{\zeta};\ \ddot{z} = \ddot{\zeta}. \qquad (23)$$

Дифференциальное уравнение колебаний объекта на воздушном буфере:

$$m\ddot{\zeta} + \frac{6\mu\lambda\pi^3 R_p^4 (U_0 + \dot{\zeta})}{(h_0 + \zeta)} + mg = 0. \qquad (24)$$

Полагая, что возмущение ζ – пренебрежимо малая величина, разложим функцию $(h_0 + \zeta)^{-3}$ в степенной ряд и, учитывая лишь члены до второго порядка малости включительно, после упрощения получим:

$$m\ddot{\zeta} + \frac{6\mu\lambda\pi^3 R_p^4}{h_0^3}\dot{\zeta} + \frac{18\mu\lambda\pi^4 R_p^4 U_0}{h_0^3} + mg = 0. \qquad (25)$$

Выражение для определения толщины несущего воздушного буфера при стационарных условиях ($\zeta = 0,\ \dot{\zeta} = 0,\ \ddot{\zeta} = 0$) имеет вид:

$$h_0 = \sqrt[3]{\frac{\mu\lambda\pi^3 R_p^4 U_0}{mg}}. \qquad (26)$$

Перепишем (25) с учетом (26), получим:

$$m\zeta + \frac{6\mu\lambda\pi^3 R_p^4 U_0}{h_0^3}\zeta + \frac{18\mu\lambda\pi^4 R_p^4 U_0}{h_0^4}\zeta = 0.$$

Решение данного уравнения при граничных условиях $t = 0$, $\zeta = h_0 - h_{min}$, $\dot{\zeta} = 0$ имеет вид:

$$\zeta = (h_0 - h_{min}) e^{-\frac{m}{n}t} \sin\left[\sqrt{\frac{cm - n^2}{m^2}}\, t + \operatorname{arctg}\frac{\sqrt{cm - n^2}}{n}\right] \times \times \sqrt{1 + \frac{n^2}{cm - n^2}} \quad (27)$$

Коэффициент демпфирования:

$$n = \frac{6\mu\lambda\pi^3 R_p^4}{h_0^3}. \quad (28)$$

Коэффициент жесткости:

$$c = \frac{18\mu\lambda\pi^3 R_p^4 U_0}{h_0^4}. \quad (29)$$

Используя полученные зависимости, можно определить основные параметры процессов, протекающих в системе "материал – несущий воздушный буфер" при отливке органоминерального композиционного материала и выработать закон эффективного демпфирования возникающих при этом колебаний.

Представленное выше математическое описание процессов, протекающих при бесконтактной отливке органоминеральных композиционных материалов, позволили выработать, путем некоторых упрощений, зависимости инженерного расчета соответствующего оборудования. Высокая эффективность последнего подтверждена экспериментально. Изготовленные полупромышленные и промышленные установки прошли полный цикл испытаний в условиях предприятий г. Воронежа.

ЛИТЕРАТУРА

1 Севостьянов В.С. и др. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов. Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. 263 с.

2 Севостьянов В.С. и др. Энергосберегающие технологические комплексы и агрегаты для утилизации техногенных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2007. №1. С. 85-90.

3 Чертов Е.Д. и др. Обдувка воздухом – фактор снижения потерь в производстве // Хлебопечение России. 2002. № 4. С. 28 - 29

4 Васечкин М.А., Носов О.А., Витко Ю.С. Влияние пневмообдува на реологические свойства мучного теста // Хранение и переработка сельхозсырья. 2010. № 6. С. 52 - 53.

5 Чертов Е.Д. и др. Математическая модель процесса загрузки сферического тела в пневмоячейку // Известия вузов. Пищевая технология. 2002. № 2-3. С. 51-53.

REFERENCES

1 Sevostianov V.S. et al. Tekhnicheskie osnovy pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh materialov [Technical fundamentals of processing and utilization of technogenic materials]. Belgorod, BGTU, 2011. 263 p. (In Russ.).

2 Sevostianov V.S. et al. Energy-saving technological complexes and machines for utilization of technogenic materials. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova.* [Newsletter of BSTU by V.G. Shukhov], 2007, no.1, pp. 85-90. (In Russ.).

3 Chertov E.D. et al. Air blowing – the factor of reducing wastage in production. *Khlebopechenie Rossii.* [Baking in Russia], 2002, no. 4, pp. 28-29. (In Russ.).

4 Vasechkin M.A., Nosov O.A., Vitko Iu.S. Influence of pneumo blowing on rheological properties of flour dough. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ia*. [Storage and processing of agricultural raw material], 2010, no. 6, pp. 52-53. (In Russ.).

5 Chertov E.D. et al. Mathematical model of the process of download of spherical body into a pneumocell. *Izvestiia vuzov. Pishchevaia tekhnologiia.* [News of high schools. Food technology], 2002, no. 2-3, pp. 51-53. (In Russ.).