

УДК 621.744.47:681.5

А.М. СУББОТА, В.Ф. СИМОНОВ, И.Ю. ДЫБСКАЯ, А.В. ЗАБОЛОТНЫЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОРМ ИЗ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ**

Рассмотрены требования к современному технологическому процессу формоприготовления. Представлен сравнительный анализ основных способов изготовления форм для литья деталей. Выбран оптимальный способ уплотнения, который наиболее полно удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к технологическим процессам изготовления форм и стержней. Описан принцип действия установки по формоприготовлению, осуществляющий данный способ уплотнения. Приведены функциональная схема системы управления процессом уплотнения формовочной смеси, а также результаты машинного моделирования системы в среде MATLAB/SIMULINK. Определены задачи дальнейших исследований.

**релейный закон управления, формоприготовление, формовочная смесь, виброуплотнение и пресование, опока, электромагнит**

**Введение**

К технологическому процессу производства литья предъявляются достаточно высокие технические и экономические требования. По своим размерам и конфигурации готовые отливки должны соответствовать деталям с учетом их припусков на механическую обработку, а также государственным стандартом по качеству (плотности, качеству поверхности, структуре и т.п.). При этом технологический процесс должен обеспечивать максимальное сбережение материальных, энергетических и трудовых ресурсов. В общем, требования, предъявляемые к технологическим процессам изготовления форм и стержней, можно свести к следующему [1]:

- полное исключение ручного труда;
- максимальная степень механизации и автоматизации, повышение производительности за счет сокращения рабочего цикла путем уменьшения продолжительности уплотнения и отверждения смесей;
- создание максимально благоприятных экологических условий труда в литейных цехах.

Анализ способов уплотнения форм из песчано-глинистых смесей показывает, что для изготовления таких форм рекомендуется сочетать два способа уплотнения – встряхивание и пресование, виброуп-

лотнение и пресование, пескодувное уплотнение и пресование, а также рекомендуются способы уплотнения в воздушном (или газовом) потоке.

Машины и линии, осуществляющие формовку путем пресования под высоким давлением (0,7...1,4 МПа и более), обеспечивают наиболее интенсивный рост плотности форм, увеличение производительности и повышение размерной точности. Известны три варианта таких машин – это прессы песчано-глинистой смеси с гибкой диафрагмой, с жесткой колодой и с многоплунжерной головкой. Автоматические формовочные машины американских и немецких фирм, работающее на многих отечественных заводах, осуществляют уплотнение форм путем встряхивания и пресования.

Способ уплотнения форм пневмопотоком, основанный на эффекте динамического воздействия упругого потока воздуха на поверхность уплотняемого объема смеси, как и вышеприведенные способы, обладают рядом существенных недостатков. К таким недостаткам, прежде всего, относятся значительная шумность, необходимость постоянного контроля за уплотнениями трубопроводов и шлангов, работой компрессоров, редукторов, золотников и т.д. Кроме того, построенные на указанных принципах машины и системы не соответствуют

требованиям полной автоматизации процесса уплотнения и его контроля. В связи с этим возникает необходимость выработки новых подходов к вопросам автоматизации и контроля качества технологического процесса формоприготовления.

### 1. Устройство и принцип действия автоматизированной системы формоприготовления

Ранее описанное уплотнение путем встряхивания [2] не предусматривает введение в систему обратной связи. Так как формовочная смесь имеет разные свойства, то это приводит к неточному уплотнению. На рис. 1 приведена схема устройства изготовления форм из песчано-глинистых смесей на основе виброуплотнения и прессования [3], которая устраняет указанные недостатки.

Как видно из рис. 1, непосредственно само устройство представляет собой вибрирующий рабочий стол 1, снабженный пуансонами 2 и наковальнями 3. С целью снижения уровня шума пуансоны выполняются из амортизационных материалов (с жесткой резиной). Опора 4 с моделями будущих деталей (А и Б) жестко крепится на рабочем столе. Сверху, на поверхность смеси 5, находящейся в опоке, укладывается плита 6. Плита выполняет функцию колоды в процессе прессования смеси и фиксируется внутри опоки при помощи упругих замков 7. Процесс виброуплотнения смеси осуществляется за счет подачи переменного тока (синусоидальной или импульсной формы) на обмотку управления 9 электромагнита 8. С целью создания возвратно-поступательного движения, рабочий стол 1 относительно основания 10 закреплен на пружинах 11.

В основу системы автоматизации процесса уплотнения смеси и контроля его качества положен принцип измерения внутреннего давления формовочной смеси при её уплотнении. Например, возьмем элементарный объем  $V_0$  смеси, находящейся над поверхностью датчика плотности 26. Исходную плотность формовочной смеси обозначим  $\rho_0$ . Тогда

на единицу площади поверхности датчика  $S_{\dot{a}}$  будет действовать сила

$$F_0 = \frac{\rho_0 V_0}{S_{\dot{a}}}. \quad (1)$$

После уплотнения смеси до величины  $\rho'$ , сила, действующая на единицу поверхности датчика, станет равной

$$F' = \frac{\rho' V_0}{S_{\dot{a}}} = F_0 \frac{\rho'}{\rho_0} = k_{\dot{a}\dot{\rho}} \rho', \quad (2)$$

где  $k_{\dot{a}\dot{\rho}} = \frac{F_0}{\rho_0}$  – постоянная величина.

Таким образом, первоначально, из экспериментальных исследований формируют требования к величине конечного значения  $\rho'$ . Далее подается питающее напряжение на все элементы автоматики: усилители 15, 16, 23, 25, моментный датчик 17, потенциометрические преобразователи 21, 22, датчик плотности 26, электронный ключ-коммутатор 12, источник тока переменной частоты 14. После замыкания рубильника 13 от источника 14 через ключ-коммутатор 12 ток поступает на катушку 9 электромагнита. При прохождении импульса тока через катушку 9 рабочий стол 1 совместно с опокой 4 притягивается к магнитопроводу 8. При этом пуансон 2 ударяет по наковальне 3, в результате чего возникает встряхивание смеси, и затем её прессование за счет инерционных сил, прикладываемых к колоде 6. Пружины 11 возвращают рабочий стол в исходное состояние. Такой процесс будет повторяться до тех пор, пока сигналы с выходов усилителей 25 и 23 не станут равны. Сигнал с выхода усилителя 23 является задающим сигналом, он устанавливается перед началом работы устройства при помощи потенциометрического преобразователя 21 ( $R_{\dot{C}\dot{A}}$ ), соответствует требуемому значению  $\rho'$  и отображается при помощи стрелочного индикатора. Управление положением стрелки 19 индикатора осуществляется при помощи моментного датчика 17 через механическую передачу 18.

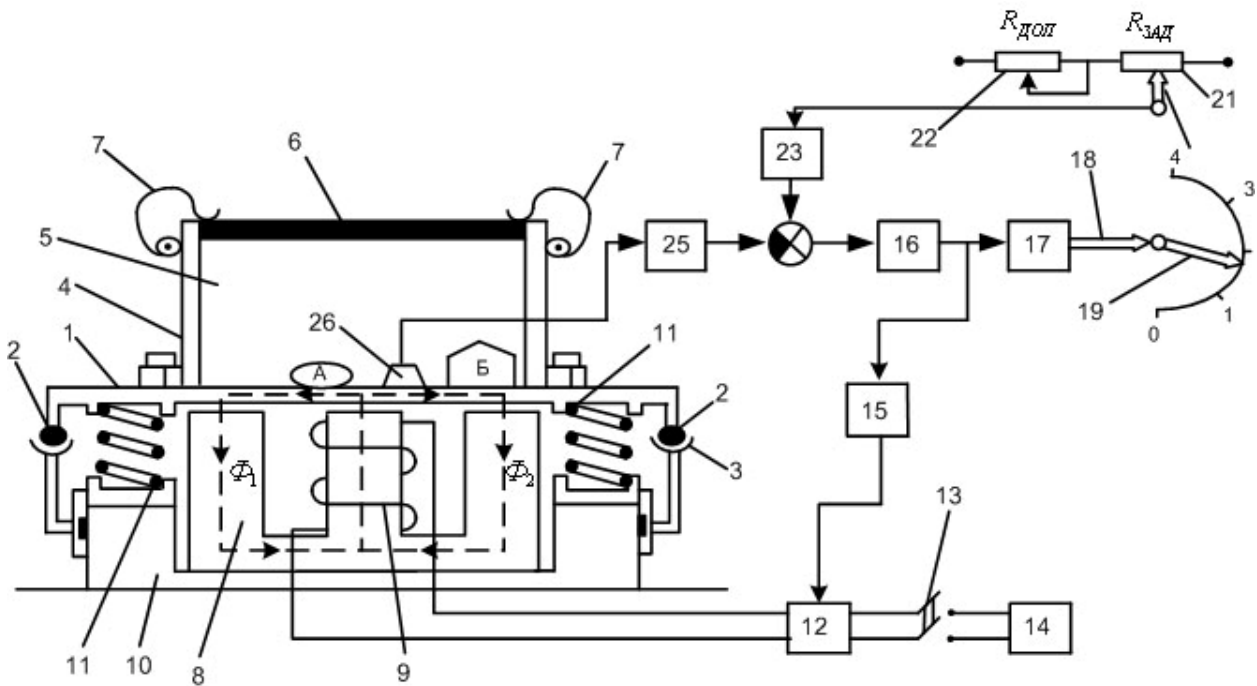


Рис.1. Автоматизированная система изготовления форм из песчано-глинистых смесей

## 2. Анализ статических и динамических характеристик системы формоприготовления

На рис. 2 представлена функциональная схема предлагаемой системы. Здесь введены следующие обозначения: ЗД – задатчик требуемой плотности; Р – регулятор; У – усилитель; ЭМ, РС – соответственно электромагнит и рабочий стол, представляющие собой исполнительный механизм (ИМ); ОУ – объект управления (формовочная смесь, находящаяся в опоке); Д – датчик обратной связи.

Для неустановившегося режима изменение силы  $\Delta F$  взаимодействия между электромагнитом и рабочим столом в линеаризованном виде может быть представлено как

$$\Delta F = 2k_i \frac{i_0^2}{\delta_0^2} (\tilde{i} - \tilde{\delta}), \quad (3)$$

где  $k_m$  – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей магнита;

$i_0, \delta_0$  – соответственно ток в катушке и зазор между электромагнитом и рабочим столом в рабочей точке;

$\tilde{i} = \frac{\Delta i}{i_0}, \tilde{\delta} = \frac{\Delta \delta}{\delta_0}$  – соответственно параметры, определяющие текущее состояние электромагнита и

рабочего стола в относительных единицах.

Уравнение движения рабочего стола под действием силы  $\Delta F$  описывается следующим выражением:

$$m_{i\delta} \ddot{\tilde{\delta}} + k_a \dot{\tilde{\delta}} + k_e \tilde{\delta} = \frac{1}{\delta_0} \Delta F \quad (4)$$

или

$$m_{i\delta} \ddot{\tilde{\delta}} + k_a \dot{\tilde{\delta}} + k_e \tilde{\delta} = 2k_i \frac{i_0^2}{\delta_0^3} (\tilde{i} - \tilde{\delta}),$$

где  $m_{i\delta}$  – приведенная масса рабочего стола;

$k_a, k_e$  – соответственно коэффициент демпфирования и коэффициент жесткости подвеса рабочего стола.

С целью получения передаточной функции ИМ уравнение (4) перепишем с точки зрения “вход - выход”:

$$\ddot{\tilde{\delta}} + 2\xi\omega_0 \dot{\tilde{\delta}} + (\omega_0^2 + \alpha^2) \tilde{\delta} = \alpha^2 \tilde{i}.$$

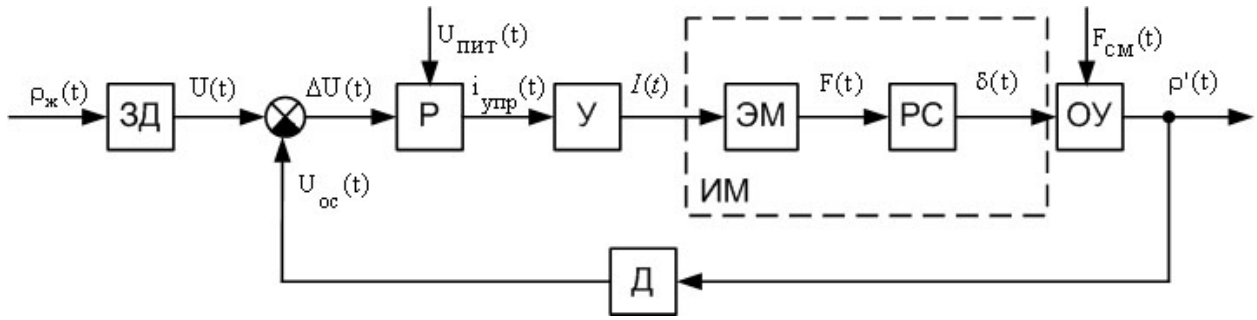


Рис.2. Функциональная схема автоматизированной системы формоприготовления

Откуда с учетом преобразования Лапласа имеем:

$$W_{\tilde{\delta}i}(s) = \frac{\tilde{\delta}(s)}{\tilde{i}(s)} = \frac{\alpha^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + (\omega_0^2 + \alpha^2)}, \quad (5)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{\tilde{a}}}{m_{i\delta}}}$  – частота собственных недемпфированных колебаний рабочего стола;

$$\xi = \frac{k_{\tilde{a}}}{2\sqrt{k_{\tilde{a}} m_{i\delta}}} \text{ – степень затухания.}$$

Формовочная смесь в опоке занимает объем

$$V_0 = S(y + \Delta y), \quad (6)$$

где  $S, y, \Delta y$  – соответственно площадь опоки, толщина смеси после уплотнения и величина усадки.

При этом плотности формовочной смеси до уплотнения  $\rho_0$  и после уплотнения  $\rho'$  определяются как

$$\rho_0 = \frac{m_{\tilde{m}}}{S(y + \Delta y)} \text{ и } \rho' = \frac{m_{\tilde{m}}}{S \cdot y}, \quad (7)$$

где  $m_{\tilde{m}}$  – масса формовочной смеси.

Поскольку масса формовочной смеси до уплотнения и после её уплотнения не изменяется, то можно записать

$$\rho_0 \cdot S \cdot (y + \Delta y) = \rho' \cdot S \cdot y$$

или

$$\rho_0 + \rho_0 \frac{\Delta y}{y} = \rho', \quad (8)$$

или

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho' - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0}.$$

Из (8) следует, что относительные изменения

толщины слоя формовочной смеси и её плотности равны, т.е.

$$\tilde{y} = \tilde{\rho}, \quad (9)$$

где  $\tilde{y} = \frac{\Delta y}{y}$ ;  $\tilde{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$ .

При колебаниях рабочего стола с амплитудой  $\delta_A$  и частотой  $\omega$  по гармоническому закону

$$\delta(t) = \delta_A \cos(\omega t)$$

возникает ускорение

$$\ddot{\delta}(t) = -\delta_A \omega^2 \cos(\omega t),$$

максимальное значение, которого достигает величины

$$\ddot{\delta}_{\max} = -\delta_A \omega^2. \quad (10)$$

Под действием вибрационного  $\ddot{\delta}$  и гравитационного  $g$  ускорений к формовочной смеси будет приложена инерционная сила

$$F_{\tilde{e}} = M \left( g - \ddot{\delta}_0 \omega^2 \cos(\omega t) \right), \quad (11)$$

где  $M = m_{\tilde{m}} + m_k$  ( $m_{\tilde{m}}$  – масса смеси,  $m_k$  – масса колоды).

При этом со стороны формовочной смеси возникает сила сопротивления

$$F_{\tilde{m}} = -k_{\tilde{a}\delta} \frac{1}{\rho_0} \left( \dot{\tilde{\rho}} \right)^3 z(t), \quad (12)$$

где  $z(t) = \begin{cases} 1, \dot{\tilde{\delta}}(t) > 0 \\ 0, \dot{\tilde{\delta}}(t) \leq 0 \end{cases}$ .

Таким образом, на основании выражений (11) и

(12), имеем

$$M \left( g - \delta_0 \omega^2 \cos(\omega t) \right) - k_{\dot{\rho}} \frac{1}{\rho_0} \left( \dot{\rho} \right)^3 z(t) = 0$$

Регулятор P реализует релейный закон управления

$$i_{\dot{\rho}}(t) = \begin{cases} i_{\delta}(t), \Delta U > 0; \\ 0, \Delta U = 0. \end{cases} \quad (13)$$

### 3. Анализ качественных характеристик системы формоприготовления

Исследуем систему формоприготовления, которая имеет следующие параметры.

Зазор между электромагнитом и столом в рабочей точке  $\delta_0 = 0.01 \text{ м}$ . Приведенная масса стола  $m_{\dot{\rho}} = 100 \text{ кг}$ , где масса колоды и смеси равная 70 кг. На обмотки исполнительного механизма подается управляющий ток с частотой  $f = 4 \text{ А}$ , скважностью импульсов 25%, амплитудой 20А.

Постоянная электромагнита, которая будет обеспечивать давление со стороны колоды на смесь  $k_i = 0,0005$  [4]. Начальная плотность смеси

$$\rho_0 = 1200 \text{ кг/м}^3 \text{ [5], а также } k_{\dot{\rho}} = 75 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Для того чтобы обеспечить резонанс между собственными колебаниями стола и управляющим сигналом, коэффициенты жесткости и демпфирования соответственно должны быть равными 63100 Н/м и 3014 Н/мс. С такими коэффициентами частота собственных колебаний системы и степень затухания будут равны

$$\omega_0 = 25,12 \text{ рад/с},$$

$$\xi = 0,6.$$

В соответствии со всеми этими параметрами передаточная функция исполнительного механизма будет иметь вид

$$W_{\dot{\rho}}(s) = \frac{\tilde{\delta}(s)}{\tilde{i}(s)} = \frac{40}{s^2 + 30s + 65}.$$

На рис. 3 показана схема моделирования данной системы в интегрированной среде MATLAB/SIMULINK. Данная схема отображает информационные преобразования объекта управления, который описывается нелинейным дифференциальным уравнением, представленным ранее, а также исполнительного механизма заданного в виде передаточной функции.

В системе реализована и модель управляющего устройства, обеспечивающего релейный закон управления, который формирует в зависимости от значения разности между требуемой плотностью формовочной смеси и ее текущим значениям либо 0,

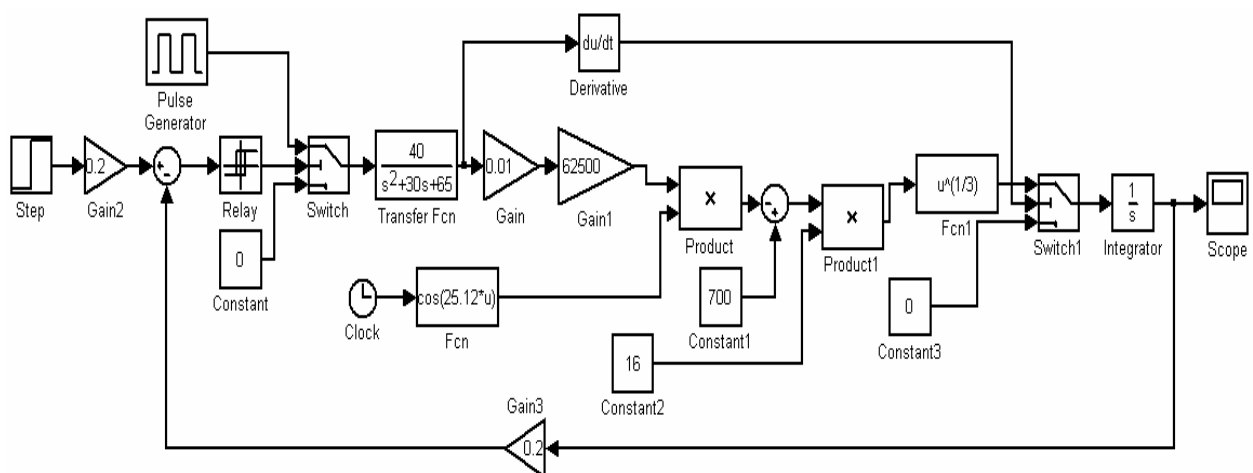


Рис. 3. Схема моделирования системы формоприготовления в MATLAB/SIMULINK

либо переменный прямоугольный сигнал с параметрами, описанными выше. Так как были получены математические модели для относительных единиц, то на вход модели подается желаемое значения отношения между приращением плотности и ее начальным значением.

В результате моделирования был получен график переходного процесса для уплотнения формовочной смеси от  $1200 \text{ кг/м}^3$  до  $1800 \text{ кг/м}^3$  (рис. 4).

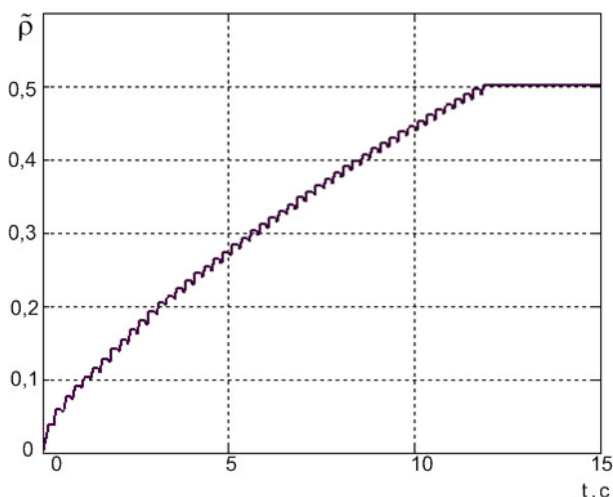


Рис. 4. Результаты моделирования системы уплотнения формовочной смеси

По полученным результатам можно сделать вывод, что требуемой плотности система достигает за 12 секунд непрерывной работы. На графике видны колебания плотности смеси. Это связано с тем, что в начальный момент времени плотность смеси за счет удара рабочего стола растет, а в следующий — уменьшается в результате встряхивания. Установившаяся ошибка и перерегулирование равны 0. Как видно, полученная система удовлетворяет требованиям, предъявляемым к процессу формоприготовления и к качеству форм для литья деталей.

### Заключение

Таким образом, задача проектирования устройства для изготовления форм для литья является весьма актуальной. Исследования данной системы показало, что для решения задачи уплотнения с минимальными энергетическими затратами надо на

вход системы подавать гармонический сигнал с амплитудой, которая будет обеспечивать требуемое давление на смесь со стороны колоды, и частотой, равной частоте собственных недемпфированных колебаний рабочего стола. Метод позволяет полностью автоматизировать технологический процесс изготовления форм из песчано-глинистых смесей и реализовать систему автоматического контроля уплотнения, что приведет к повышению качества изготавливаемых форм.

Дальнейшие исследования предусматривают решение поставленной задачи с последующим полунатурным моделированием исследуемой системы.

### Литература

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов и др. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, Аржанов А.Ф. и др.; Под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. — М.: Машиностроение, 1996. — 736 с.
2. Авдокушин В.П., Самарай В.П., Дорошенко С.П., Повар Д.И. Имитационное моделирование и анализ уплотнения песчано-глинистых форм встряхивания // Процесс литья. — 2006. — № 2. — С. 84-87.
3. Кулік А.С., Субота А.М., Симонов В.Ф., Костриця О.А. Пристрій для ущільнення формувальної суміші. Патент на корисну модель №18901. Опубл. 15.11.2006. Бюл. № 11. — 12 с.
4. Любчик М.А. Расчет и проектирования электромагнитов постоянного и переменного тока. / Под общ. ред. проф. Б.Ф. Вашуры. — М.: Государственное энергетическое издательство, 1959. — 224 с.
5. Болдин А.Н., Давыдов Н.И., Жуковский С.С. и др. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: Справочник. М.: Машиностроение, 2006. — 507 с.

Поступила в редакцию 27.02.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Рогачев, Национальный технический университет "ХПИ", Харьков.