

Metals. – 1979. – Vol. 31. – P. 11–15. **4.** Nordal, P. E. Photothermal radiometry [Text] / P. E. Nordal, S. O. Kanstad // Physica Scripta. – 1979. – Vol. 20. – P. 659–662. **5.** Thomas, R. L. Thermal NDE Techniques – from Photoacoustics to Thermosonics [Text] / R. L. Thomas // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 21, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, Melville, NY. – 2002. – Vol. 615 – P. 3–13. **6.** Мацевитый, Ю. М. Обратные задачи теплопроводности Т.1. Методология. [Текст] / Ю. М. Мацевитый. – Киев: Наукова думка, 2002.— 408 с. **7.** Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. [Текст] // РД 153 – 34.0-20.363-99. – Утв. 8ин.энерго России 12.12.1999. – М.: Мин.энерго, 1999. – 58 С. **8.** Гобрей, Р. М. Диагностирование электроустановок 0,4-750кВ средствами инфракрасной техники. [Текст] / Р. М. Гобрей, В.Ф. Чернов, Е. И. Удод. – Киев.: «КВЦ», 2007. – 374 с. **9.** Прохоренко, Е. М. Тепловизионный контроль электрооборудования электрических станций для выявления аварийных режимов работы [Текст] / Е. М. Прохоренко, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, А. И. Морозов, О. В. Кулаков. // Науковий вісник Укр НДІПБ. – 2012. – № 2 (26). – С. 191–198. **10.** Прохоренко, Е. М. Способ численной обработки контрастных термоизображений для идентификации дефектов [Текст] / Е. М. Прохоренко, Б. Б. Бандурян, Н. И. Базалеев, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, В. С. Рихвицкий, В. Н. Робук, М. А. Сагадачный. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 1, № 10 (49). – С. 15–20.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Vavilov, V. P. (2009). IR and thermal control. M.: Spectrum, 544. **2.** Klepikov, V. F., Bazaleev, M. I., Lytvynenko, V. V., Prokhorenko, E. M. (2013). Development and application of radiation technologies modification and processing of solids condensed matter. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 2, № 5 (62). P. 4-9. **3.** Henneke, E. G., Reifsnider, K. L., W. W. Stinchcomb W. W. (1979). Thermography. An NDI method for damage detection. Journal of Metals. Vol. 31. 11–15. **4.** Nordal, P. E. S. O. Kanstad, S. O., (1979). Photothermal radiometry Physica Scripta. Vol. 20. 659–662. **5.** Thomas, R. L. (2002). Thermal NDE Techniques – from Photoacoustics to Thermosonics. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 21, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, Melville, NY. Vol. 615. P. 3–13. **6.** Matsevity, J. M., (2002). Inverse heat conduction problems V.1. Methodology. Kiev: Naukova Dumka, 408 **7.** Spec, K. (1999). Main provisions of the infrared technique and the diagnosis of VL. [Text] // RD 153 - 34.0-20.363-99. Approved. 8in.energo Russia M.: Min.energo, 58. **8.** Gobrya, R. M., Chernov, V. F., Udod, E. I., (2007). Diagnosis 0.4 750kV electrical means infrared technology. Kiev. "KVITS", 374. **9.** Prokhorenko, E. M., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V., Morozov, A. I., Kulakov, O. V., (2012). Thermal control of electrical power plants to identify emergency operation. Ukr Naukova visnyk NDIPB. № 2 (26). 191-198. **10.** Prokhorenko, E. M., Klepikov, V. F., Bazaleev, M. I., Lytvynenko, V. V., Rihvitsky, B. C., Robuk, V. N., MA Sagadachny, V. N., (2011). Method numerical processing contrast thermal images to identify defects. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 1, № 10 (49). 15-20.

*Поступила (received) 22.05.2014*

## **УДК 66.099.2**

**М. С. СКИДАНЕНКО**, ассистент, СумГУ, Сумы;  
**В. И. СКЛАБИНСКИЙ**, д-р техн. наук, проф., СумГУ, Сумы;  
**Н. П. КОНОНЕНКО**, с. н. с., СумГУ, Сумы

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЯ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИЛЛЕРА**

В статье рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса нестационарного истечения струи жидкости из отверстия, что является базовым для расчета виброгранулятора. Определена закономерность регулируемого распада струй жидкости на капли и проведены исследования, которые подтверждают возможность создания грануляторов розплава, для получения продукта в узком фракционном диапазоне.

**Ключевые слова:** вынужденные возмущения, виброгранулятор, распад струи, экспериментальные исследования, грануляционная башня.

© М. С. СКИДАНЕНКО, В. И. СКЛАБИНСКИЙ, Н. П. КОНОНЕНКО, 2014

**Введение.** Для получения товарных форм азотных минеральных удобрений из расплавов в химической промышленности используются вращающиеся вибрационные грануляторы (приллеры) [1]. В большинстве случаев вращающийся виброгранулятор работает следующим образом [2]. Под действием напора расплав вытекает из отверстий перфорированного днища в виде струй, которые распадаются на капли. Спонтанный распад струй на капли обусловлен статической неустойчивостью жидкого цилиндра под воздействием силы поверхностного натяжения и случайных возмущений, налагаемых на поверхность струи, с образованием основных капель и меньших по размеру капель - спутников [3].

При наложении регулярных возмущений на струи жидкости происходит ее распад на капли одинакового размера без образования капель - спутников, если длина  $\lambda$  образованных волн будет больше  $\pi d$  ( $d$  - диаметр струи) [4]. При таких условиях происходит рост во времени амплитуды волн, возникающих на поверхности струи жидкости. Из сказанного выше видно, что задаваясь частотой колебаний  $f$  можно влиять на изменения  $P = f(\tau)$  и регулировать средний диаметр и диапазон монодисперстности получаемых капель расплава при вынужденном распаде струи.

**Целью работы.** Целью работы является исследование процесса нестационарного истечения струи жидкости из отверстия в тонкостенной оболочке при наложении внешних возмущений и их влияния на изменения радиальной и осевой составляющей скорости, и соответственно на формирование гидродинамических условий в струе, которые приводят к ее распаду на капли.

**Методика эксперимента.** Исследование гидродинамических параметров

процесса истечения жидкости из вертикально расположенного цилиндрического резервуара проводились на одиночном отверстии в тонкой стенке. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В качестве жидкости использовалась вода и модельная жидкость, которая имела плотность, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения близкие к аналогичным показателям расплава азотного удобрения. Жидкость из емкости насосом подается в вибрационный гранулятор, где равномерно распределяется в перфорированном днище и заполняет его объем. Расход жидкости контролируется

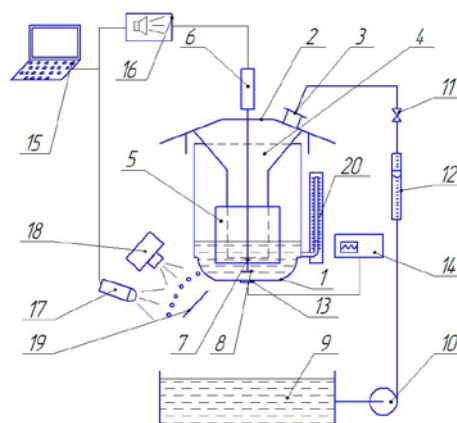


Рис. 1 – Экспериментальный стенд вибрационного гранулятора: 1 - переменная перфорированное днище (корзина); 2 - корпус; 3 - патрубок; 4 - коллектор; 5 - фильтрующий элемент; 6 - электромагнитный вибратор; 7 - шток; 8 - резонатор (диск); 9 - буферная емкость; 10 - насос; 11 - вентиль; 12 - ротаметр; 13 - датчик колебаний; 14 - осциллограф; 15 -

ротаметром и регулируется компьютер; 16 - усилитель низкой частоты; вентилем. Уровень заполнения 17 - стробоскоп; 18 - фотокамера; 19 - экран со шкалой; 20 - уровнемер

корзины контролируется уровнемером.

Под действием напора жидкость вытекает из отверстия днища. Программой с компьютера генерируется сигнал, который подается на электромагнитный вибратор и через шток приводит в колебательное движение диск-излучатель. Частота с которой колеблется перфорированное днище корзины фиксируются с помощью датчика колебаний. Для визуального наблюдения за распадом струй на капли, используется стробоскоп. Возле струи, вытекающей из перфорированного днища гранулятора, размещен экран со сменными шкалами, который позволяет определять длину не распавшейся части струи, диаметр капель образованных после распада струи и расстояние между ними. Фотокамера расположена над струей и экраном со шкалой позволяет фиксировать режимы распада струи на капли.

**Методика численного исследования.** Для численного исследования задачи, по определению механизма распространения колебаний в объеме жидкости и изменения значения давления в струе, вытекающей из отверстия перфорированного днища, была использованная известная система уравнений, для описания нестационарного истечения вязкой жидкости из отверстия [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \\ \frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right], \\ \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

**Обсуждение результатов.** Для уменьшения количества факторов от которых зависит гидродинамический процесс, дополним систему уравнений (3), кинематическими уравнениями определения скорости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial \tau} &= v_r, \\ \frac{\partial z}{\partial \tau} &= v_z \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив уравнения (4) в систему уравнений (3), уменьшив при этом количество переменных и исключив производную по времени, получим:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) = 0, \\ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot v_r) \right) \right], \\ v_z \frac{\partial v_z}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right]. \end{cases} \quad (5)$$

Для решения этой системы уравнений (5) были применены методы решения дифференциальных уравнений в частных производных и систем таких уравнений. Используя метод разделения переменных суммой [6], в результате получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0, \\ v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{2 \frac{\partial v_r}{\partial r} + r \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2}}{r} - \frac{v_r + r \frac{\partial v_r}{\partial r}}{r^2} \right], \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right]. \end{cases} \quad (6)$$

Решение системы (6) имеет вид:

$$\begin{cases} p = -\frac{1}{2} \rho C_3^2 r^2 - \frac{1}{2} \frac{\rho C_2^2}{r^2} + C_9 - 2\rho C_3 (C_3 z^2 - C_4 z - C_5 z) + C_8, \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_5 + C_6 K + C_7 Y - 2C_3 z + C_4. \end{cases} \quad (7)$$

где,  $C_2, C_3 \dots C_9$  - константы уравнений;  $K, Y$  - функции Бесселя первого и второго порядка соответственно.

Система уравнений (7) неудобна для применения с точки зрения неопределенности влияния изменения давления во времени на величины радиальной и осевой составляющих скорости и наличием в уравнении для определения осевой составляющей скорости функций Бесселя. С точки зрения анализа гидродинамических параметров струи расплава, при ее истечении из отверстий перфорированной оболочки виброгранулятора, определенный интерес представляет решение системы уравнений (3) для случая нестационарного истечения, то есть с учетом изменений, происходящих во времени, и определяется наличием переменной.

Используя для решения системы уравнений (5) метод разделения переменных суммой [5], получим следующее решение:

$$\begin{cases} P = C_{12} + \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + C_{11} + F(\tau), \\ v_r = \frac{C_2}{r} + C_3 r, \\ v_z = C_6 + C_7 \ln(r) + C_8 r^2 - 2C_3 z + C_5 + C_9 \tau + C_{10}. \end{cases} \quad (8)$$

В первом уравнении для определения закона изменения давления вдоль струи входит функция  $F(\tau)$ , которая зависит от времени. Ее вид можно определить из граничных условий, считая, что начало координат совмещено с центром отверстия, из которого происходит истечение расплава. Тогда при  $z=0$ :

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + P_1(\tau). \quad (9)$$

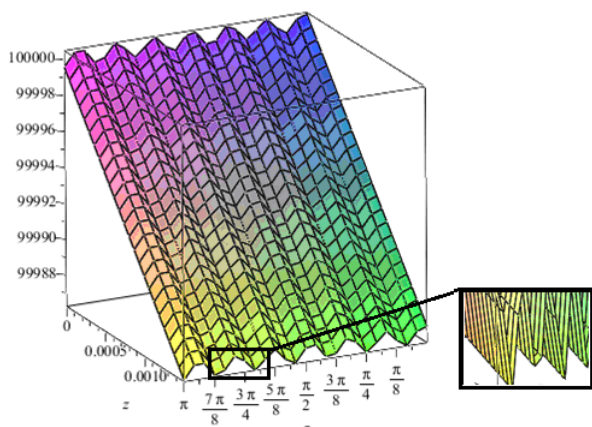
Предположив, что в отверстии, из которого вытекает жидкость, давление изменяется в соответствии зависимости:

$$P_1 = a \sin(b\tau + c) + d. \quad (10)$$

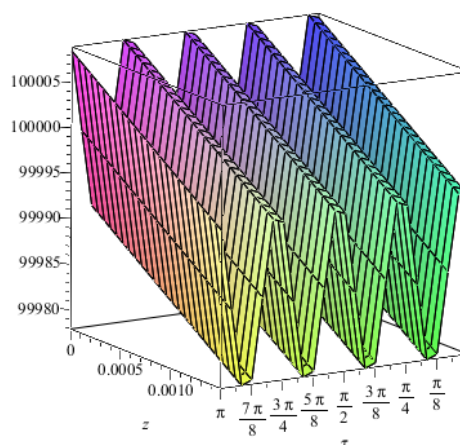
Тогда подставив уравнение (10) в (9) получим:

$$P = \rho(-C_9 + 4\nu C_8)z + a \sin(b\tau + c) + d. \quad (11)$$

В ходе проведения опытов переменными параметрами были напор модельной жидкости перед отверстием и его диаметр, состав модельной жидкости и угол к горизонту, под которым она вытекает из цилиндрического резервуара. Параметрами, которые определялись, были длина сплошной части струи жидкости, диаметр образовавшихся капель и расстояние между ними. При параметрах сигнала начиная с 380 Гц (амплитуда  $\delta=100\text{мкм}$ ) наблюдается синусообразные возмущения на поверхности струи с зонами расширения и сужения. Участок сужения продолговатый, при увеличении амплитуды на поверхности струи образуются спутники. Продолговатый участок при распаде струи образует длинную перетяжку 3,361мм. За счет поверхностных сил образуется капля радиусом 0,977мм и сателлит радиусом 0,302 мм. Средний радиус капли без образования сателлита 1,092мм (рис.2).



а



б



в



Г

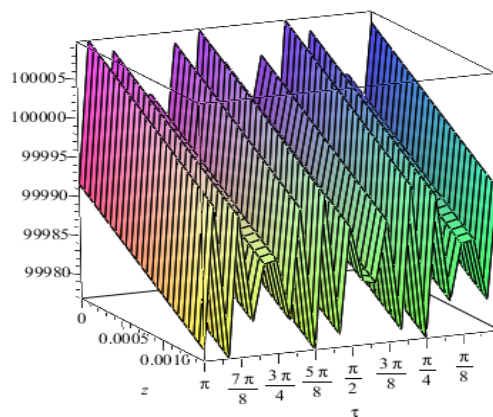
Рис. 2 – Изменение давления вдоль струи со временем: а) при частоте сигнала 380Гц и амплитуде колебаний  $\delta=50\text{мкм}$ ; б) при частоте сигнала 380Гц и амплитуде колебаний  $\delta=100\text{мкм}$ ; в) результаты эксперимента при частоте сигнала 380Гц и амплитуде колебаний  $\delta=50\text{мкм}$ ; г) результаты эксперимента при частоте сигнала 380Гц и амплитуде колебаний  $\delta=100\text{мкм}$

При регулярном распаде струи жидкости, могут быть получены равномерные капли как без спутников, так и с ними. Существенным фактором оказались частота и амплитуда колебаний. При амплитуде колебаний 0,05-0,025 мм в объеме жидкости на струи образуются едва заметные начальные перетяжки, которые затем сужались почти при полном сохранении симметрии. При этом в местах перетяжек образуются спутники. Размер спутников увеличивался

с уменьшением частоты начальных возмущений (рис. 3). При увеличении амплитуды конфигурация начальных перетяжек меняется. Они приобретают асимметричную форму относительно плоскости, перпендикулярной оси струи. Капли в момент распада струи имеют грушевидную форму, обращенную острым концом к отверстию утечки. После распада струи, заостренный конец грушевидной капли втягивается в нее за счет силы поверхностного натяжения жидкости.

Отсутствие спутников при грушевидной форме разрыва струи жидкости на капли можно объяснить близостью места

образования спутника от основной капли. Наличие посторонних колебаний в следствие работы другого оборудования, способствует образованию спутников (рис. 5). При наблюдении были отмечены различные варианты движения



а



б

Рис. 3 – Изменение давления вдоль струи со временем при постоянной частоте сигнала и переменной амплитуде колебаний: а – теоретический расчет; б – результаты экспериментальных данных



спутников и их зависимость от параметров сигнала. Полученные выше теоретические изыскания, подтверждаются результатами проведенных исследований. Установленные закономерности регулируемого распада струй жидкости на капли были апробированы при разработке вращающихся вибрационных грануляторов расплава карбамида и аммиачной селитры. Получение показателей гранулометрического состава продукта проводились на агрегате производства карбамида рис. 4.

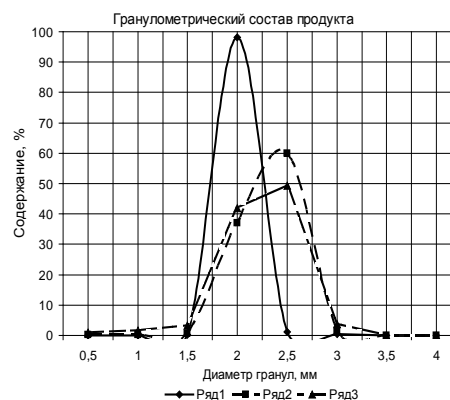


Рис. 4 – Фракционный состав гранул аммиачной селитры

В ходе проведения испытаний вращающийся вибрационный гранулятор обеспечил получение продукции следующего гранулометрического состава: фракция гранул менее 1,0 мм - 0,0-0,2%, фракция гранул 2,0-4,0 мм более 99%, при этом доля гранул фракции 2, 0-2,5 мм – более 98,5%, размер гранул основной фракции - 2,1-2,5 мм. Кроме этого, при изменении частоты вибрации гранулятор обеспечил получение продукции с размером основной фракции гранул 2,5-3,0 мм более 60%.

**Выводы.** Установленная закономерность регулируемого распада струй жидкости на капли и проведенные исследования подтверждают возможность создания грануляторов расплава азотных удобрений, которые позволят получать гранулы в узком фракционном диапазоне, при максимальном количестве частиц, размер которых может охладиться в этой башне; обеспечить возможность регулировать размер капель в зависимости от температуры подаваемого в башню хладагента. В результате этого, тепловая нагрузка на башню будет близкой к оптимальной, что позволяет уменьшить налипание частиц на рабочих поверхностях башни, и, как результат, сократить расходы энергоносителей на переработку некондиционного продукта и снизить выбросы пыли азотных удобрений в атмосферу, а также улучшить экологическую ситуацию в районе производства.

**Список литературы:** 1. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение [Текст] / А. К. Чернышев, Б. В. Левин, А. В. Туголуков, и др.; под ред. Чернышева А. К., Туголукова А. В. – М., 2009. – 544с. 2. Обертовий гранулятор розплавів [Текст]: Патент на корисну модель №68829 Україна МПК В01 J2/02. / Склабінський В. І., Артюхов А. Є., Скиданенко М. С., Покотило В. М., Іваній А. В., ; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – №u201112007; заявл. 12.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №7. – 4 с. 3. Кочетков, В. Н. Гранулирование минеральных удобрений [Текст] / В. Н. Кочетков // М.: «Химия». – 1975. – 224 с. 4. Холин, Б. Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости [Текст] / Б. Г. Холин // М., "Машиностроение". – 1977. - 182 с. 5. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика, [Текст] / В. Г. Левич – 2 изд., М., 1959. – с. 705. 6. Shingareva, I., Solving nonlinear partial differential equations with Maple and Mathematica [Текст] / I. Shingareva, C. Lizarraga-Celaya. – Springer Wien New York, – 2011. – 359 p.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Chernyshov, A. K., Levin, B. V., Tuholukov, A. V. (2009). Ammonium nitrate: Properties, production, use. Moscow, 544. **2.** Rotary fusion granulator:useful model patent №68829 Ukraine МПК B01 J2/02. V. I. Sklabinskiy, A. E. Artukhow, M. S. Skidanenko, M. V. Pokotilo, A. V. Ivanih, patent applicant and holder is Sumy State University.-№u201112007; applic. 12.10.2011; published. 10.04.2012, Bulletin. №7. – 4 p. **3.** Kochetkov,, V. N. (1975) Granulation of fertilizers. Moscow, USSR Chemistry. **4.** Kholin, B. G. (1977). Rotary and vibrating granulators melts and liquid sprays. Moscow, USSR. Mechanical engineering, 224. **5.** Levich, V. G. (1959) Physico-chemical hydrodynamics. Moscow, USSR. 699. **6.** Shingareva, I., Lizarraga-Celaya, C. (2011). Solving nonlinear partial differential equations with Maple and Mathemati. Springer Wien New York, 350.

*Поступила (received) 12.05.2014*