

УДК 536.46

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ГАЗОВЗВЕСЕЙ УГЛЕРОДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Орловская С.Г., канд. физ.-мат. наук, Зуй О.Н., Лисянская М.В.

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина

Проведено фізико-математичне моделювання високотемпературного тепломасообміну та кінетики хімічних перетворень двофракційних газозавесів вуглецевих частинок. Визначені характеристики спалахування та горіння частинок газозавеси в повітрі при різних температурах оточуючого газу. Доказано, що при зменшенні температури газу період індукції мілкої фракції може перевищувати період індукції крупної фракції, а температура горіння стає нижчою. Знайдені критичні параметри спалахування і затухання двофракційних газозавесів.

Проведено физико-математическое моделирование высокотемпературного тепломассообмена и кинетики химических превращений двухфракционной газозвеси углеродных частиц. Определены характеристики воспламенения и горения частиц газозвеси в воздухе при различных температурах окружающего газа. Доказано, что при уменьшении температуры газа период индукции мелкой фракции может превышать период индукции крупной фракции, а температура горения становится ниже. Найден критические параметры воспламенения и потухания двухфракционной газозвеси.

Physical and mathematical modeling of high-temperature heat and mass transfer and kinetics of chemical transformations of a two-fraction gas suspension of carbon particles is carried out. The characteristics of ignition and combustion of gas-suspension particles in air at different gas temperatures are determined. With a decrease in the gas temperature, the induction period of the fine fraction exceeds the induction period of the coarse fraction, and the burning temperature is lower. Critical parameters of ignition and extinction of a two-fraction gas suspension are found.

Библиогр. 6, табл. 1, рис. 3.

**Ключевые слова:** тепломассообмен, воспламенение, горение, газозвесь, углерод.

$C$  – удельная теплоемкость частицы;  
 $c_g$  – удельная теплоемкость газа;  
 $C_i^g$  – численная концентрация  $i$ -той фракции газозвеси;  
 $C_i^{Ni}$  – массовая концентрация;  
 $d_i^m$  – диаметр частицы  $i$ -той фракции;  
 $F_i^g$  – удельная поверхность газозвеси;  
 $k_1, k_2$  – константы скоростей химических реакций (I) и (II);  
 $k_v$  – эффективная константа внутреннего реагирования;  
 $M_c, M_{O_2}$  – молярные массы углерода и кислорода, соответственно;  
 $n_{O_2, S}$  – относительная массовая концентрация кислорода на поверхности частицы;  
 $n_{O_2, \infty}$  – относительная массовая концентрация кислорода в газе, окружающего взвесь;  
 $g_1, g_2$  – тепловые эффекты реакций (I) и (II);  
 $S_i$  – площадь поверхности частицы  $i$ -той фракции;

$T_{g, \infty}$  – температура газовой среды, окружающей газозвесь;  
 $T_i$  – температура частицы;  
 $t$  – время;  
 $U_{sf}$  – скорость стефановского течения;  
 $\alpha_g, \beta_g$  – коэффициенты тепло- и массообмена газозвеси с окружающей средой,  
 $\rho, \rho_g$  – плотность частицы и газа;  
 $Nu$  – критерий Нуссельта;  
 $I$  – воспламенение (индукция);  
 $I^*$  – начало химического разогрева;  
 $E$  – потухание;  
 $b$  – начальное значение;  
 $bur$  – горение;  
 $ch$  – химический.

Актуальность исследования высокотемпературных режимов тепломассообмена и химических превращений диспергированного углеродного топлива обусловлена необходимостью разработок эффективных методов его использования в различных технологических процессах. В металлургическом производстве, топливной энергетике углеродное топливо используется в виде газозвеси. Топливо, используемое в энергетических устройствах, имеет полидисперсный состав [1], так как при его дроблении образуются частицы разного размера. Исследованию особенностей воспламенения и горения монодисперсных взвесей в литературе уделено много внимания (например, [2-4]), полидисперсные взвеси

изучены в меньшей степени. Целью данной работы является изучение закономерностей воспламенения, горения и потухания двухфракционных газозвесей углеродных частиц, как частного случая полидисперсного топлива, при различных температурах газа.

Проведем физико-математическое моделирование нестационарного тепломассообмена при горении газозвеси углеродных частиц с учетом внутреннего реагирования и стефановского потока [4,5]. Уравнение теплового и массового балансов для углеродных частиц  $i$ -той фракции, на поверхности которых протекают параллельные химические реакции:  $C + O_2 = CO_2$  (I),  $2C + O_2 = 2CO$  (II) [6] имеют вид:

$$\frac{c\rho d_i}{6} \frac{\partial T_i}{\partial t} = q_{chi} - q_{\alpha i} - q_{wi}, \quad T_i(t=0) = T_{bi}, \quad (1)$$

$$-\frac{1}{2} \rho_i \frac{\partial(d_i)}{\partial t} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_{1i} + 2k_{2i}) n_{O_2,si} \rho_g, \quad d_i(t=0) = d_{bi}, \quad (2)$$

$$-\frac{1}{6} d_i \frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} = \frac{M_C}{M_{O_2}} (k_{1i} + 2k_{2i}) n_{O_2,si} \frac{k_{vi}}{k_{1i} + k_{2i}} \rho_g, \quad \rho_i(t=0) = \rho_{bi}. \quad (3)$$

Суммарную плотность химического тепловыделения на поверхности и в порах частиц ( $g_{chi}$ ) найдем как:

$$q_{chi} = (k_{1i} q_1 + k_{2i} q_2) \left( 1 + \frac{k_{vi}}{k_{1i} + k_{2i}} \right) \rho_g n_{O_2,si} \quad (4)$$

Плотность теплового потока на поверхности частицы ( $g_{\alpha i}$ ) с учетом стефановского течения найдем из выражения [4]:

$$q_{\alpha i} = \alpha_i \left[ (T_i - T_g) + \frac{u_{sf_i}}{2\beta_i} (T_i + T_g) \right], \quad \alpha_i = \frac{Nu\lambda_n}{d_i}. \quad (5)$$

Плотность теплового потока излучением ( $g_{wi}$ ) от частицы к стенкам реакционной установки найдем согласно закона Стефана-Больцмана:

$$q_{wi} = \varepsilon \sigma (T_i^4 - T_w^4) \quad (6)$$

При горении газовой смеси изменяются со временем температура газа и концентрация кислорода. Уравнения теплового и массового балансов для газа имеют вид:

$$c_g \rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \sum_{i=1}^n S_i C_{Ni} q_{\alpha i} + \alpha_g F_g (T_g - T_{g\infty}), \quad T_g(t=0) = T_{g\infty}, \quad (7)$$

$$-\frac{\partial n_{O_2,g}}{\partial t} = \sum_{i=1}^n C_{Ni} S_i n_{O_2,si} (k_{1i} + k_{2i} + k_{vi}) - F_g \beta_g (n_{O_2,\infty} - n_{O_2,g}), \quad n_{O_2,g}(t=0) = n_{O_2,\infty}, \quad (8)$$

Важным параметром газовой смеси является массовая концентрация  $C_m$ , которая зависит от диаметра, плотности частиц и их численной концентрации  $C_N$ :

$$C_m = \sum_{i=1}^n C_{mi}, \quad C_{mi} = \frac{1}{6} \pi \cdot d_i^3 \cdot \rho_i \cdot C_{Ni}$$

На основе решения уравнений (1) - (8) изучим высокотемпературный теплообмен двухфракционной ( $i=2$ ) газовой смеси углеродных частиц при одинаковых массовых концентрациях каждой из фракций с диаметрами частиц – 60 мкм (мелкая фракция) и 120 мкм (крупная фракция). Для начальной массовой концентрации газовой смеси  $Cmb = 0,0244$  кг/м<sup>3</sup>, массовая концентрация каждой из фракций составила  $Cmb_1 = Cmb_2 = 0,0122$  кг/м<sup>3</sup>; численная концентрация мелкой фракции –  $C_{N1} = 7,5 \cdot 10^7$ , крупной –  $C_{N2} = 9,3 \cdot 10^6$ . Газовую смесь с указанной массовой концентрацией характеризует коэффициент избытка кислорода близким к

единице [4].

На рис. 1 представлены временные зависимости температур и диаметра частиц каждой из фракций, температура газа, временные производные температур частиц, концентрация кислорода в газе при воспламенении, горении и потухании двухфракционной газовой смеси при температуре газа 1500К. Экстремумы на временных зависимостях производной  $dT/dt$  (рис. 1, в) определяют моменты воспламенения (максимум) и потухания (минимум в отрицательной области значений) частиц и, соответственно, период индукции  $t_i$  и время горения  $t_{bur}$  [4]. Анализ температурных и кинетических кривых

показывает, что сначала происходит воспламенение и выгорание мелкой фракции. Частицы крупной фракции воспламеняются незадолго до момента потухания мелких частиц. В период выгорания мелкой фракции кон-

центрация кислорода существенно уменьшается, поэтому воспламенение и последующее горение крупной фракции происходит при низких ее значениях (рис. 1, г).

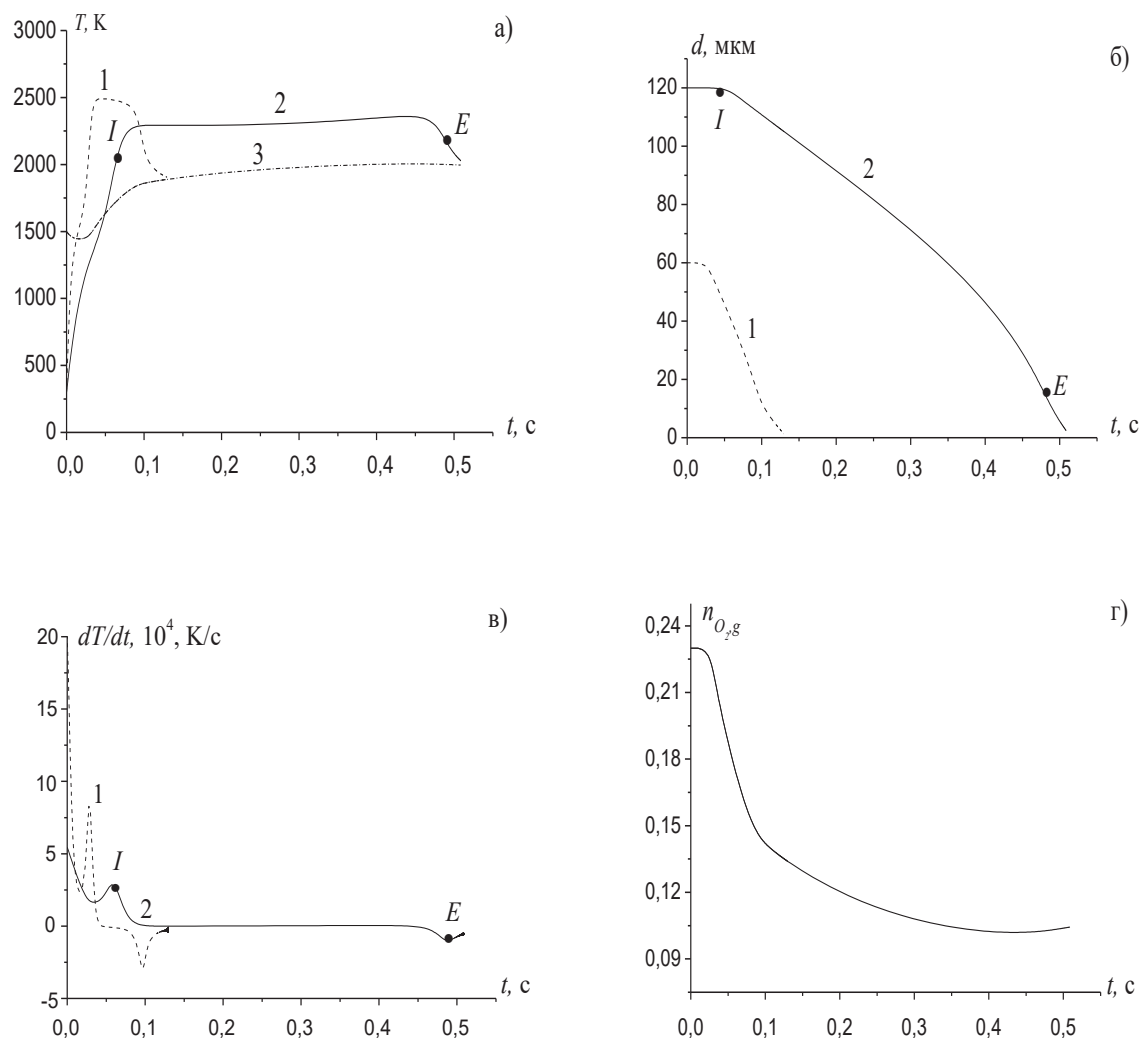


Рис. 1. Зависимости  $T$ ,  $d$ ,  $dT/dt$ ,  $n_{O_2,g}$  от времени для двухфракционной газозвеси при  $T_{g\infty} = T_w = 1500$  К. 1 –  $d_{b1} = 60$  мкм, 2 –  $d_{b2} = 120$  мкм, 3 – температура газа  $T_g$ .

При понижении температуры газа, теплотепри молекулярно-конвективным путем для мелких частиц растут сильнее, чем для крупных (формула (5)). Это приводит к увеличению периода индукции мелкой фракции газозвеси. Для таких температур газа воспламенение крупной фракции происходит раньше, чем мелкой (рис. 2). Период индукции частицы (время, за которое она воспламеняется)  $t_I$  состоит из двух частей (рис. 2, б): времени инертного прогрева частицы до температуры газа (до  $t. I^*$ ) и времени химического разогрева, обусловленного активизацией химических процессов (от  $t. I^*$  до  $t. I$ ). Таким образом, период индукции равен  $t_I = T_{I^*} + t_{ch}$ . Для высокой температуры газа время химического разогрева несколько меньше времени инертного прогрева для частиц обеих фракций

(табл. 1,  $T_{g\infty} = 1500$  К). При понижении температуры газа до  $T_{g\infty} = 1300$  К время химического разогрева мелких частиц увеличилось практически в 27 раз (табл. 1). По сравнению со временем инертного разогрева ( $t_{I^*}$ ) время химического разогрева ( $t_{ch}$ ) возросло более, чем в 7 раз. Для частиц крупной фракции (120 мкм), в случае низкой температуры газа, длительность химической стадии несколько меньше длительности инертного прогрева частицы, как и при  $T_{g\infty} = 1500$  К. Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что при понижении  $T_{g\infty}$  температура крупных частиц в момент активизации химических реакций ( $T_{I^*}$ ) и в момент воспламенения ( $T_I$ ) практически не изменилась, а для частиц мелкой фракции существенно понизилась.

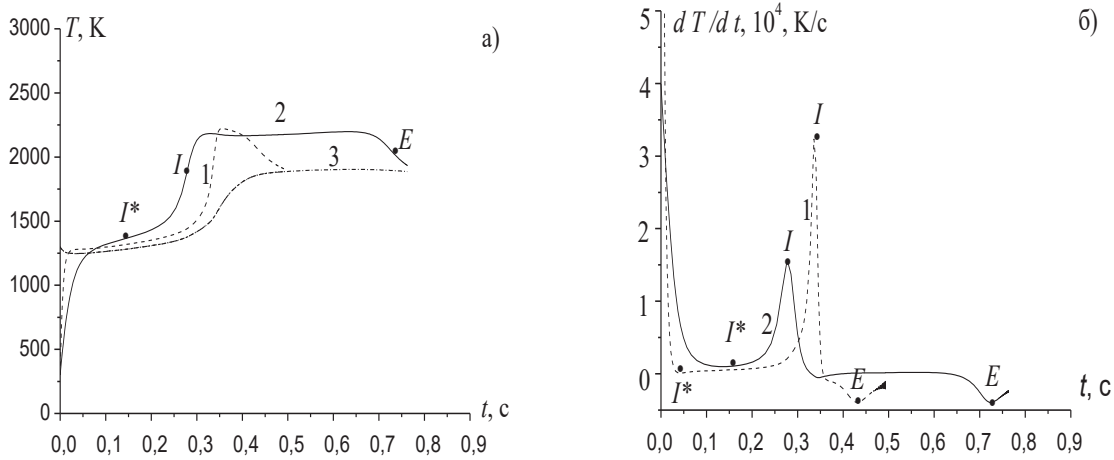


Рис. 2. Временные зависимости  $T$ ,  $T_g$ ,  $dT/dt$ , для двухфракционной газозвеси при  $T_{g\infty} = T_w = 1300\text{K}$ .  
 $1 - d_{b1} = 60 \text{ мкм}$ ,  $2 - d_{b2} = 120 \text{ мкм}$ ,  $3 - \text{температура газа } T_g \text{ в объеме газозвеси}$ .

Таблица 1. Характеристики воспламенения двухфракционной газозвеси углеродных частиц при различных температурах

$T_{g\infty}$ , K	1500		1300	
$d_b$ , мкм	60	120	60	120
$T_{f*}$ , K	1513,1	1347,8	1280,6	1348
$T_f$ , K	2022,1	1840,2	1936,4	1863,2
$t_{f*}$ , мс	15,6	34,1	42,8	127,4
$t_{ch}$ , мс	12,2	23,2	335,9	99,7

Изложенные рассуждения объясняют поведение периода индукции газозвеси в широком интервале температур газа (рис. 3,а). Для  $T_{g\infty} > 1400\text{K}$  период индукции

определяется временем воспламенения мелких частиц, ниже этого значения – временем воспламенения частиц крупной фракции.

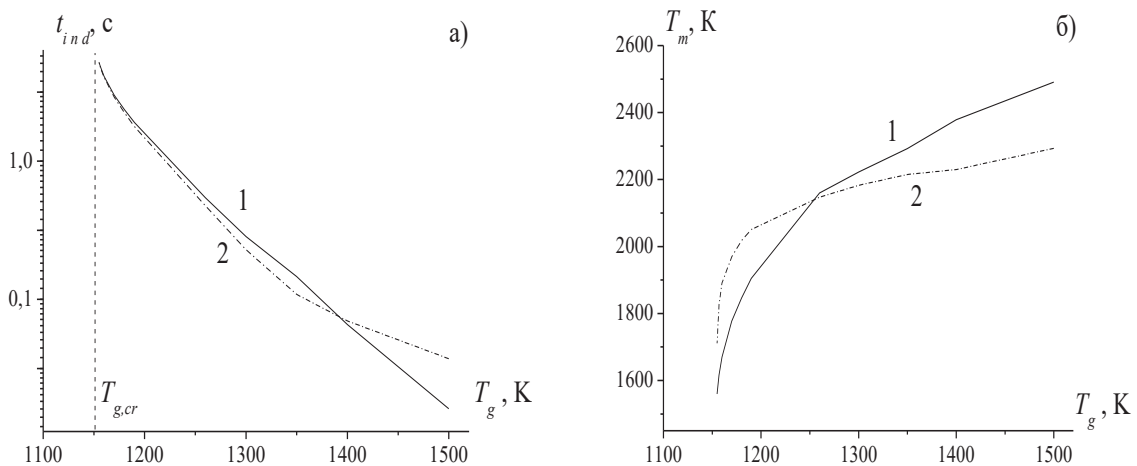


Рис. 3. Зависимости периода индукции и максимальной температуры горения частиц газозвеси от температуры газа:  $1 - d_{b1} = 60 \text{ мкм}$ ;  $2 - d_{b2} = 120 \text{ мкм}$ .

При некоторой критической температуре газа  $T_{g,cr}$  (рис.3,а) газовзвесь не воспламеняется (период индукции бесконечно большой). Критическая температура воспламенения двухфракционной газовзвеси оказалась равной 1160К, что значительно ниже температуры воспламенения одиночных частиц того же диаметра. Причем, критические температуры газа для одиночных крупных и мелких частиц существенно разнятся ( $T_{g,cr1} = 1367\text{К}$ ,  $T_{g,cr2} = 1280\text{К}$ ), а в условиях двухфракционной газовзвеси практически совпадают. Температура горения частиц мелкой фракции в области низких температур газа меньше, чем крупных (рис. 3,б) по причине большего теплоотвода и нехватки окислителя на стадии горения, вследствие выгорания последнего при взаимодействии с крупными частицами. Потухание частиц газовзвеси (точка  $E$ , рис. 1, 2) происходит в вырожденном режиме[4], так как на завершающей стадии горения разность температур частиц и газа мала. После потухания происходит медленное доокисление частиц в кинетическом режиме.

### Выводы

В результате физико-математического моделирования высокотемпературного теплообмена двухфракционной газовзвеси частиц изучены характеристики воспламенения и горения при различных температурах газа. Установлено, что при высоких температурах газа период индукции мелкой фракции меньше, чем крупной, а при низких температурах наоборот - больше, что вызвано увеличением молекулярно-кон-

вективных теплопотерь в окружающую газовую среду для мелкой фракции. Найден интервал температур, в котором температура горения мелких частиц меньше, чем крупных. Доказано, что температуры воспламенения мелких и крупных частиц в условиях двухфракционной газовзвеси практически совпадают, а для одиночных частиц тех же диаметров существенно разнятся.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергия, 1973. - 263с.
2. Лисицын В.И., Руманов Э.Н., Хайкин Б.И. О периоде индукции при воспламенении совокупности частиц//Физика горения и взрыва. - 1971. - Т.7, № 1, С.3-9.
3. Золотко А.Н., Яковлева Т.А. Потухание дисперсных гетерогенных систем //Физика горения и взрыва.-1996.- Т.32, № 6. - С.12-19.
4. Орловська С.Г. Вплив колективного ефекту на характеристики високотемпературного тепломасообміну сукупностей поруватих вуглецевих частинок//Фізика і хімія твердого тіла. - Т. 12, № 2. - С.490-499.
5. Калинин В.В., Орловская С.Г., Калинин А.И., Дубинский А.В. Теплообмен углеродной частицы с воздухом при учете стефановского течения и теплопотерь излучением // Теплофизика высоких температур.- 1996.- Т.34, № 1.- С. 83 – 91.
6. Орловська С.Г. Дослідження закономірностей горіння газозависів вуглецевих частинок //Фізика і хімія твердого тіла. - 2015, Т.16, № 1. - С.210-216.

**IGNITION AND COMBUSTION OF GAS  
SUSPENSION OF CARBON PARTICLES AT  
DIFFERENT TEMPERATURES**

**Orlovskaya S.G., Zuj O.N., Liseanskaia M.V.**

Odessa National I.I. Mechnikov's University, Dvoryanskaya st., 2, Odessa, 65082, Ukraine

**Key words:** heat and mass exchange, ignition, combustion, gas suspension, carbon.

Physical and mathematical modeling of high-temperature heat and mass transfer and kinetics of chemical transformations of a two-fraction gas suspension of carbon particles is carried out. The characteristics of ignition and combustion of gas-suspension particles in air at different gas temperatures are determined. With a decrease in the gas temperature, the induction period of the fine fraction exceeds the induction period of the coarse fraction, and the burning temperature is lower. Critical parameters of ignition and extinction of a two-fraction gas suspension are found.

References 6, tables 1, figures 3.

1. *Pomerantsev V.V.* Fundamentals of the practical theory of combustion. L.: Energia, 1973. – 263p.

2. *Lisitsyn V.I., Rumanov E.N., Khaikin B.I.* On the period of induction upon ignition of the aggregate of particles // *Physics of Combustion and Flames.* – 1971. – V.7, No. 1, C.3-9.

3. *Zolotko A.N., Yakovleva T.A.* The attenuation of dispersed heterogeneous systems // *Physics of Combustion and Flames.*–1996.– V.32, No 6. – P.12-19.

4. *Orlovskaya S.G.* Influence collective effect on the heat transfer characteristics of high populations of porous carbon particles // *Physics and Chemistry of Solid State.* – V. 12, No 2. – P.490-499.

5. *Kalinchak V.V., Orlovskaya S.G., Kalinchak A.I., Dubinskiy A.V.* Heat and mass exchange of a carbon particle with air, taking into account the Stefan flow and heat losses by radiation // *Thermophysics of high temperatures.*1996. – V.34, No 1.– P. 83 – 91.

6. *Orlovskaya S.G.* Investigation of the regularities of combustion of gas suspensions of carbon particles // *Physics and Chemistry of Solid State.* – 2015, V.16, No 1. – P.210-216.

*Получено 17.10.2017*

*Received 17.10.2017*