

## ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ОБЛАГОРОЖЕННОГО ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

кандидат технических наук, доцент **М.Г. Ермоченков**<sup>1</sup>  
кандидат технических наук, доцент **А.В. Хроменко**<sup>1</sup>

1 – ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»  
(национальный исследовательский университет),  
Мытищинский филиал, Мытищи, Российская Федерация

Торрефикация – это процесс низкотемпературного пиролиза древесины, используемый для улучшения свойств древесного топлива. Торрефицированное топливо имеет ряд преимуществ по сравнению с исходным. Термическая деструкция вызывает изменение массы и состава древесины с увеличением процентного содержания углерода, что приводит к увеличению теплоты сгорания  $Q$ . Термодеструкцию можно рассматривать как многостадийный процесс. Степень разложения материала зависит от температуры, времени теплового воздействия и кинетических параметров каждой стадии процесса. В статье приведены результаты экспериментальных исследований теплоты сгорания торрефицированной древесной биомассы и ее зависимости от степени термического разложения. Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Была проведена экспериментальная проверка работоспособности установки. Проверка показала, что погрешность определения теплоты сгорания составляет не более 2 %. Для проведения экспериментальных исследований зависимости теплоты сгорания от степени термической деструкции были подготовлены образцы древесины при ее неглубоком разложении. Термическая обработка образцов осуществлялась в среде инертного газа гелия. Получены значения теплоты сгорания образцов древесного топлива с различной степенью термодеструкции. Предложена модель зависимости теплоты сгорания от относительной массы древесного топлива  $\omega$ . Приведены кинетические параметры многостадийного процесса термодеструкции в гелиевой среде для древесины сосны и березы. Представлена математическая модель, позволяющая определять относительную массу древесины как функцию температуры и времени. Получена в явном виде зависимость теплоты сгорания от степени термического разложения древесины.

**Ключевые слова:** торрефикация, теплота сгорания, термическая деструкция, кинетические параметры.

## THE HEAT OF COMBUSTION OF REFINED WOOD FUEL

PhD (Engineering), Associate Professor **M. G. Ermachenkov**<sup>1</sup>  
PhD (Engineering), Associate Professor **A. V. Khromenko**<sup>1</sup>

1 – Mytischki Branch, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University» (National Research University), Mytischki, Russian Federation

### Absrtact

Torrefication is a process of low-temperature pyrolysis of wood, used to improve the properties of wood fuel. Torrefied fuel has several advantages compared to the original. Thermal degradation causes changes in mass and composition of wood with increase in carbon percentage, which leads to an increase of combustion value  $Q$ . Thermal destruction can be viewed as a multistage process. The degree of decomposition of the material depends on temperature, time of exposure to heat and kinetic parameters of each stage of the process. The article presents the results of experimental studies of combustion value of torrefied woody biomass and its dependence on the degree of thermal decomposition. For experimental studies experimental setup was designed and manufactured. Experimental checking of the installation was carried out. The test showed that accuracy of determining combustion value is not more than 2 %. For experimental studies of the dependence of combustion value on the degree of thermal degradation, samples of wood were prepared in its unsaturated decomposition. Heat treatment of samples was carried out in inert gas environment of

helium. Values of heat combustion of wood fuel with varying degrees of thermal destruction are obtained. Model of the dependence of calorific value from relative mass of wood fuel  $\omega$  is proposed. The mathematical model allowing to determine the relative mass of wood as a function of temperature and time is represented. Dependence of combustion value on degree of thermal decomposition of wood is obtained in explicit form.

**Keywords:** torrefication, combustion value, thermal degradation, kinetic parameters.

Рост промышленности и экономики неразрывно связан с доступностью энергоресурсов и развитием энергетики. В настоящее время наблюдается стабильный рост добычи углеводородных ресурсов – газа и нефти. Однако их запасы ограничены. Это приводит к постановке задачи более широкого использования возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Одним из решений является развитие биоэнергетики, предполагающее внедрение новых технологий, разработки и внедрения новых видов топлив, получаемых из биомассы. Свойства топлив, вырабатываемых из биомассы, зависят от свойств исходного сырья и технологии обработки.

В настоящее время в мире доля биоэнергетики составляет до 14 % от общего энергопотребления и продолжает увеличиваться. Существуют прогнозы, показывающие увеличение вклада биомассы до 23,8 % к 2040 г. Один из видов биомассы получают из древесины.

Древесина широко используется в качестве строительного, конструкционного и отделочного материала. Однако заготовка и переработка древесины связана со значительными ее потерями. Потери древесины на лесосеках достигают десятков процентов (пни, вершины, сучья, хвоя и др.), до 40 % отходов древесины при производстве пиломатериалов (опилки, обрезки, горбыль, обрезки кромок). Велико количество отходов при окорке, производстве фанеры, ДСтП, изделий из древесины и т.д.

В настоящее время стоит задача снижения выбросов парниковых газов в атмосферу. Одним из путей решения проблемы является замена ископаемых топлив биотопливом, производимым, в том числе, из древесной биомассы.

Существуют технологии сжигания древесных отходов в виде опилок, щепы, шлифовальной пыли и др. Однако на них накладывается ряд ограничений, связанных со свойствами топлива. От-

дельные виды отходов имеют высокую влажность, поэтому требуется их сушка. Небольшая насыпная плотность приводит к увеличению логистических затрат. Альтернативой использованию древесной биомассы непосредственно в качестве топлива является и производство брикетов и пеллет. Улучшенное древесное топливо имеет ряд преимуществ по сравнению с исходной древесиной: высокая насыпная плотность, теплота сгорания, возможность автоматизации процесса сжигания. Свойства различных видов древесного топлива приведены в табл. 1.

В настоящее время развиваются технологии производства торрефицированных пеллет. Этот вид топлива имеет ряд преимуществ по сравнению с обычными пеллетами:

- более высокое содержание углерода в единице количества топлива;
- более высокая теплота сгорания;
- возможность производства топлива с определенной теплотой сгорания;
- снижение выхода вредных веществ, в том числе, оксида азота, тяжелых металлов, оксида серы и т.п.;
- высокая гомогенность получаемого топлива;
- снижение равновесной влажности;
- повышение стойкости к биологическому поражению;
- увеличение насыпной плотности и, как следствие, снижение логистических затрат на единицу количества получаемой теплоты;
- отсутствие проблемы спекания топлива в топках котлов.

Свойства древесных топлив

Параметры топлива	Щепа		Кора		Пеллеты	Брикеты
	сухая	влажная	сухая	влажная		
Зольность, %	0,63	0,51	3,7	2,0	2,95	3,12
Влажность, %	10,8	26,17	15,11	55,8	7,9	9,91
Выход летучих, %	81		79		83	87
Высшая теплота сгорания, МДж/кг	17,6		19,3		19,9	19,8
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	16,4	13,1	15,3	6,8	18,1	17,9

Торрефикация – вид термического модифицирования древесины. Это процесс низкотемпературного пиролиза древесных материалов, используемых для производства топливных пеллет. Тепловая обработка проводится для улучшения свойств получаемого биотоплива. Термическая деструкция приводит к изменению элементного состава материала. Величина изменений зависит от режимов термообработки – температуры и времени воздействия [1, 2, 5, 8, 9, 10, 11, 12].

В табл. 2 приведены данные по свойствам древесины ивы до модифицирования и после модифицирования при разных температурах и разной длительности нагрева [3].

Древесина является природным полимерным материалом сложного состава. В него входят целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин и др. Эти компоненты разлагаются в разных диапазонах температур, что обуславливает многостадийный характер термической деструкции древесного материала [1, 4, 6, 7]. Стадии процесса термической деструкции можно рассматривать как параллельные, независимые реакции. Скорость протекания отдельной стадии описывается уравнением

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = \omega \cdot A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (1)$$

Скорость протекания многостадийного процесса описывается уравнением [1, 4, 7]

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial \tau} = \sum_{j=1}^m \omega_j^{n_j} A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $j$  – номер стадии;  $m$  – число стадий;  $A_j$  – предэкспоненциальный множитель  $j$ -й стадии, [с<sup>-1</sup>];  $E_j$  – энергия активации  $j$ -й стадии, [Дж/моль];  $n_j$  – порядок реакции  $j$ -й стадии;  $R$  – газовая постоянная, [Дж/(моль·К)];  $T$  – температура, [К];  $\omega_j$  – безразмерная масса стадии.

Из уравнений (1) и (2) следует, что скорость протекания отдельных стадий, а следовательно, и степень термической деструкции зависит от температуры материала, времени воздействия и кинетических параметров ( $A$ ,  $E$ ,  $\omega$ ). Кинетика термодеструкции может быть исследована с помощью термогравиметрического анализа.

Для обработки результатов термогравиметрических экспериментов прологарифмируем уравнение (1):

$$\ln \frac{\partial \omega_j}{\partial \tau} = \ln A_j + \ln \omega_j - \frac{E_j}{R \cdot T} \quad (3)$$

или

$$\ln \frac{\partial \omega_j}{\partial \tau} \frac{1}{\omega_j} = \ln A_j - \frac{E_j}{R \cdot T}. \quad (4)$$

Обозначим

$$\ln \frac{\partial \omega_j}{\partial \tau} \frac{1}{\omega_j} = y_j, \quad (5)$$

$$\ln A_j = B_j, \quad (6)$$

Изменение элементного состава и теплоты сгорания древесины ивы при торрефикации

Элементный состав и теплофизические характеристики	Исходная древесина	Древесина после торрефикации при температуре T=250 °C в течение 30 минут	Древесина после торрефикации при температуре T=300 °C в течение 10 минут
Углерод С, %	47,2	53,1	55,8
Водород Н, %	6,1	5,9	5,6
Кислород О, %	45,1	40,9	36,2
Азот N, %	0,3	0,4	0,5
Зола А, %	1,3	1,5	1,9
Теплота сгорания, Q, мДж/кг	17,6	19,4	21
Относительная масса	1	0,872	0,668

$$\frac{E_j}{R} = C_j \cdot T^{-1} = x \tag{7}$$

$$T^{-1} = x \tag{8}$$

Подставляя выражения (5)-(8) в уравнение (4), получаем

$$y_j = B_j - C_j \cdot x \tag{9}$$

Метод обработки термогравиметрических кривых, выделения отдельных стадий и расчета кинетических параметров изложен в [4, 7].

В табл. 3 представлены кинетические параметры деструкции древесины сосны и березы [1, 6].

Относительная масса образца может быть определена из соотношения [4, 6, 7]

$$\omega(T, \tau) = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} \cdot \exp \left[ -A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp \left( -\frac{E_{\gamma}}{R \cdot T} \right) d\tau \right] \tag{10}$$

Экспериментальные исследования теплоты сгорания древесины проводились на специально разработанной установке, схема которой приведена на рис. 1. Она состоит из медного цилиндра 1. Для уменьшения скорости конвективного потока и интенсификации теплообмена с продуктами сгорания в цилиндре в его верхней части расположена дросселирующая и экранирующая набивка из медной проволоки 5. Образец топлива 3 поджигается вне установки, затем на выдвижной штанге поднимается внутрь цилиндра, где и происходит горение, при этом нагреваются стенки цилиндра и проволочная набивка. Для измерения температуры используется хромель-копелевая термопара 10 с выводом ин-

формации на периферийное записывающее устройство 11. Медный цилиндр помещен внутри алюминиевого 2, что обеспечивает минимизацию тепловых потерь через поверхность установки. Фторопластовые кольца 7 обеспечивают равномерность зазора между цилиндрами. Для интенсификации процесса горения и уменьшения потерь от неполноты сгорания в зону горения подается небольшое количество кислорода через патрубок 6 от баллона 8.

Полная масса установки составляет 233 г. Теплота, выделяющаяся при сжигании топлива, приводит к изменению температуры установки. Количество теплоты определяется из уравнения

$$Q_{\text{экс}} = mc\Delta T, \tag{11}$$

здесь m – масса экспериментальной установки, кг; c – теплоемкость материала установки, Дж/(кг·К); ΔT – изменение температуры установки.

С учетом того, что использовались образцы массой m<sub>0</sub> ≈ 30÷50 мг, нагрев камеры установки не превышал ΔT ≈ 10 К, а время эксперимента – Δτ ≈ 10...15 с, относительная погрешность за счет потери теплоты излучением и конвекцией с внешней поверхности установки не превышает 2 %. Потери теплоты с уходящими газами не более 1 % от общего количества теплоты Q. Расчеты погрешностей не приводятся, но при необходимости могут быть представлены авторами. В этом случае, пренебрегая потерями, можно допустить, что

$$Q = Q_{\text{экс}}$$

Для экспериментальной оценки погрешности установки на место образца устанавливался электриче-

ский нагреватель, и подводилось определенное количество теплоты. Исследования показали, что относительная погрешность эксперимента составляет  $\delta=2\%$ .

Была проведена термическая обработка образцов древесины сосны с их непредельным разложением. Для предотвращения горения нагрев проводился в гелии. Температура и время теплового воздействия выбирались исходя из кинетики термодеструкции, для обеспечения выхода летучих от 0 до 100 %. Результаты

экспериментальных исследований теплоты сгорания топлива после термообработки приведены в табл. 4.

На рис. 2 представлен график зависимости теплоты сгорания древесины сосны  $Q$  от степени термодеструкции (относительной массы  $\omega$ ). На графике сплошная линия соответствует расчету по уравнению (4), точки – средние экспериментальные значения. Исходя из экспериментальных данных, было получено следующее уравнение:

$$Q = 28.89 - 15.93\omega + 5,30\omega^2, \quad \left( \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \right). \quad (12)$$

Таблица 3

Кинетические параметры термического разложения древесины

Номер стадии	Начальная масса стадии, $\omega_0$	Энергия активации, $\frac{E}{R}, K$	Частотный фактор, $A, c^{-1}$	береза		
				Начальная масса стадии, $\omega_0$	Энергия активации, $\frac{E}{R}, K$	Частотный фактор, $A, c^{-1}$
1	0,164	21 274	$3,666 \cdot 10^{14}$	0,023	13 941	$2,987 \cdot 10^9$
2	0,246	26 006	$7,347 \cdot 10^{16}$	0,077	19 460	$7,567 \cdot 10^{12}$
3	0,216	17 997	$4,988 \cdot 10^{10}$	0,606	17 991	$3,319 \cdot 10^{10}$
4	0,179	5 823	10,448	0,134	8 535	571
5	0,195	10 049	500,765	0,160	11 793	$3,005 \cdot 10^3$

Таблица 4

Результаты исследования зависимости теплоты сгорания от степени термической деструкции

Степень термообработки топлива	Относительная масса летучих в древесине, $\omega$	Относительная влажность образца, %	Средняя теплота сгорания, МДж/кг
Исходная древесина	1	10	17,8
Выход первой стадии	0,991	6	18,1
Выход первой стадии	0,985	6	17,9
Выход второй стадии	0,902	5	19,1
Выход второй стадии	0,895	5	19,3
Выход третьей стадии	0,68	4	20,6
Выход 60% летучих	0,40	-	23,1
Древесный уголь	0,0	-	28,9

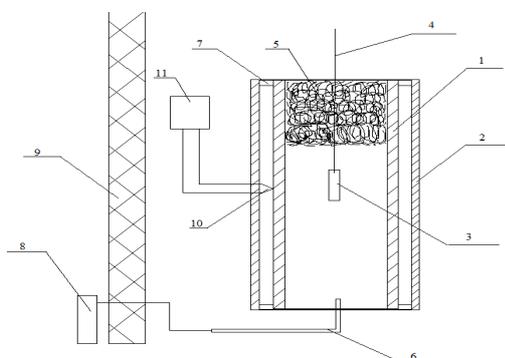


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты сгорания топлива

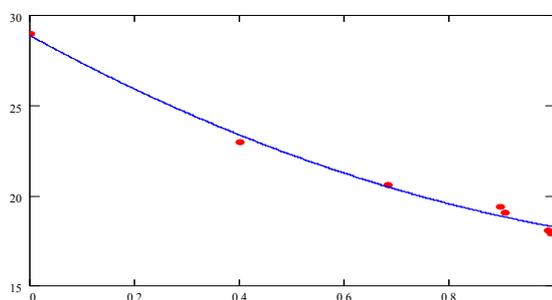


Рис. 2. Зависимость теплоты сгорания от относительной массы летучих в древесине ( $Q$ , МДж/кг по вертикали на графике)

Таким образом, можно сделать вывод, что полученное соотношение удовлетворительно описывает зависимость теплоты сгорания древесного топлива от степени торрефикации. Для прогнозирования значения  $Q$  топлива после термообработки необходимо знать поле температур.

Если известны температура, время нагрева и кинетические параметры термической деструкции, по уравнению (10) может быть рассчитано изменение относительной массы древесины и из соотношения (12) – ее теплота сгорания.

### Библиографический список

1. Ермоченков, М. Г. Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов / М.Г. Ермоченков // Лесотехнический журнал. – Воронеж: ВГЛТУ, 2016. № 4 (24). – С. 168-172
2. Сафин, Р.Р. Термомодифицирование древесины в среде топочных газов/ Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Е.Ю. Разумов, Н.А. Оладышкина // Вестник МГУЛ - Лесной вестник. – 2010. - № 4 (73). – С.115-119.
3. Передерий, С. Какие пеллеты лучше: черные или белые? / С. Передерий. – СПб.: ЛесПромИнформ, 2012. № 3 (85). - С. 158-164.
4. Жигунов, С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов: дис... канд. техн. наук 05.14.05. /С.В. Жигунов. – М.: МГУЛ, 1990. – 184 с. (6)
5. Кислицын, А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 312 с. (8)
6. Ермоченков, М. Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины / М.Г. Ермоченков // Вестник МГУЛ - Лесной вестник. - М.: МГУЛ, 2010. - № 4 (73). – С. 111–115.
7. Шведов, Б. А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: дисс. ... докт. техн. наук / Б.А. Шведов. – М.: МЛТИ, 1990. – 542 с. (2)
8. Peters, B; Bruch, C Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS, 2003. – Vol. 70. – Is. 2. – Pp. 233-250. Номер статьи: PII S0165-2370(02)00134-1
9. Slopiecka, Katarzyna; Bartocci, Pietro; Fantozzi, Francesco. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis / 3rd International Conference on Applied Energy (ICAIE) Perugia, ITALY, 2011. - APPLIED ENERGY, 2012. – Vol. 97. – Is. - Pp. 491-497.
10. Grieco, Enrico; Baldi, Giancarlo. Analysis and modelling of wood pyrolysis / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2011. – Vol. 66. - Is. 4. - Pp. 650-660.
11. Ranzi, Eliseo; Corbetta, Michele; Manenti, Flavio. Kinetic modeling of the thermal degradation and combustion of biomass / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2014. - Vol. 110. - Pp. 2-12.
12. Sarvaramini, A.; Assima, Gnouyaro P.; Larachi, F. and etc. Dry torrefaction of biomass - Torrefied products and torrefaction kinetics using the distributed activation energy model / CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL, 2013. – Vol. 229. – Pp. 498-507.

### References

1. Ermochenkova M. G. *Kinetika termicheskoy destruktivnoy drevesiny v srede inertnykh gazov* [Kinetics of thermal degradation of wood in inert gases]. Voronezh: Logging journal, 2016, no. 4 (24), pp. 168-172.
2. Safin R.R. *Termomodifitsirovanie drevesiny v srede topochnykh gazov* [ermomodifitsirovanie wood in flue gas environments]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, № 4 (73), 2010, pp. 115-119.
3. Perederiy S. *Kakie pellety luchshe: chernye ili belye?* [What better pellets: black or white?]. SPb.: Lesprominform, 2012, pp. 158-164.

4. Zhigunov S.V. *Teplomassoobmen i kinetika termodestruktsyi pri vysokotemperaturnom nagreve kompozitsionnykh materialov* [Heat and mass transfer and kinetics of thermal degradation at high temperature composite materials] diss. ... kand. tekhn. nauk [dis. ... Cand. tehn. sciences]. Moscow, 1990.
5. Kislitsin A.N. *Piroliz drevesiny: himizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of Wood: chemistry, kinetics, products, new processes]. Moscow: Lesnaya promishlennost [Forest Industry], 1990, 312 p.
6. Ermochenkov M. G. *Prognozirovaniye svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Predicting the properties of thermally modified wood]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoi Vestnik, 2010, № 4 (73), pp.111-115.
7. Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialah teplovooy zashity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh system*: [Energy and mass transfer in thermal protection materials reusable space-rocket systems]: diss. ... doct. Tekhn. Nauk [diss. ... Doctor. tehn. sciences]. Moscow, 1990.
8. Peters, B; Bruch, C Drying and pyrolysis of wood particles: experiments and simulation JOURNAL OF ANALYTICAL AND APPLIED PYROLYSIS, 2003. – Vol. 70. – Is. 2. – Pp. 233-250. Номер статьи: PII S0165-2370(02)00134-1
9. Slopiecka, Katarzyna; Bartocci, Pietro; Fantozzi, Francesco. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis / 3rd International Conference on Applied Energy (ICAE) Perugia, ITALY, 2011. - APPLIED ENERGY, 2012. – Vol. 97. – Is. - Pp. 491-497.
10. Grieco, Enrico; Baldi, Giancarlo. Analysis and modelling of wood pyrolysis / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2011. – Vol. 66. - Is. 4. - Pp. 650-660.
11. Ranzi, Eliseo; Corbetta, Michele; Manenti, Flavio. Kinetic modeling of the thermal degradation and combustion of biomass / CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 2014. - Vol. 110. - Pp. 2-12.
12. Sarvaramini, A.; Assima, Gnouyaro P.; Larachi, F. and etc. Dry torrefaction of biomass - Torrefied products and torrefaction kinetics using the distributed activation energy model / CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL, 2013. – Vol. 229. – Pp. 498-507.

### Сведения об авторах

*Ермоchenков Михаил Геннадьевич*, доцент кафедры теплофизики Э-6 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МФ), кандидат технических наук, г. Мытищи, Россия, e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

*Хроменко Андрей Владимирович*, доцент кафедры теплофизики Э-6 Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МФ), кандидат технических наук, г. Мытищи, Россия, e-mail: hromenko@mgul.ac.ru

### Information about authors

*Ermochenkov Mikhail Gennadyevich*, Associate Professor of the Department of Thermophysics E-6 Moscow State Technical University. N.E. Bauman (MF), Candidate of Technical Sciences, Mytishchi, Russia, e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

*Hromenko Andrey Vladimirovich*, Associate Professor of the Department of Thermophysics E-6 Moscow State Technical University. N.E. Bauman (MF), Candidate of Technical Sciences, Mytishchi, Russia, e-mail: hromenko@mgul.ac.ru