

Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья

06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0712029

Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г., Ларченко А. Г., Филатова С. Н.

УДК 691.17

Россия, ИрГУПС

livnet@list.ru

ifpi@mail.ru

larchenka@inbox.ru

filatova_sn@irgups.ru

Введение

Несмотря на давность и большое количество исследований в области экологически чистого производства, проблема утилизации и переработки промышленных отходов остается актуальной до сих пор. В связи с этим появление доступного высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) оборудования, позволяющего реализовывать неосуществимые ранее технологические процессы переработки является положительным фактором, требующим проведения научных исследований, направленных на решение важной задачи – переработки вторичного сырья.

Основная часть

Поглощенная обрабатываемым материалом энергия электромагнитной волны передается атомам вещества и расходуется на нагревание образца, поляризацию, инициирование химических реакций. Нагрев непроводниковых (диэлектрических и полупроводниковых) материалов обусловлен диэлектрическими потерями за счёт потерь, обусловленных сквозной электропроводностью и релаксационными (медленными) видами поляризации. Диэлектрические потери за счёт электропроводности возникают в результате выделения тепла Джоуля при прохождении через диэлектрик сквозного тока.

Причиной возникновения релаксационных диэлектрических потерь являются медленные виды поляризации. К ним относятся дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, миграционная, спонтанная поляризации. В присутствии электрического поля полярные молекулы ориентируются, а ионы смещаются в направлении сил поля. При

этом энергия электрического поля превращается в кинетическую энергию частицы. В результате увеличивается амплитуда и частота колебаний поляризующихся частиц, избыточная кинетическая энергия передаётся окружающим атомам среды, что эквивалентно нагреву материала. Если диэлектрик поместить в переменное электрическое поле, то при каждом изменении поля внутри материала будет генерироваться некоторое количество тепла. Чем чаще изменяется направление поля, т. е. чем выше его частота, тем больше тепла выделится в диэлектрике за единицу времени [1]. Для большинства сред наблюдается тенденция роста удельной мощности с увеличением частоты вплоть до субмиллиметрового диапазона. Однако отсюда не следует, что этого обстоятельства достаточно, чтобы выбрать частоту термообработки: С увеличением частоты генератора уменьшается глубина проникновения электромагнитной волны в нагреваемую среду, т.к. диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь являются функциями от частоты излучения и носят нелинейный характер [2]. Эта зависимость усложняется появлением скин-эффекта (поверхностного эффекта).

В технологических процессах, когда материалы (отходы) представляют гетерогенную смесь различных веществ, отличающихся по полярности, агрегатному состоянию и составу, теоретическое обоснование эффективности электромагнитных воздействий носит приблизительный характер и требует экспериментальной проверки. Глубина проникновения электромагнитного поля в вещество уменьшается с увеличением частоты, а выделяемая тепловая энергия повышается [2]. Исходя из этого рабочая частота для электротермических установок должна быть выбрана из компромиссных соображений. В диапазоне частот 20-30 МГц, применяемом для высокочастотного нагрева диэлектрических материалов, глубина проникновения исчисляется десятками метров и обычно превышает линейные размеры материала, что дает положительный эффект равномерности нагрева по всему объему материала (рис. 1.).

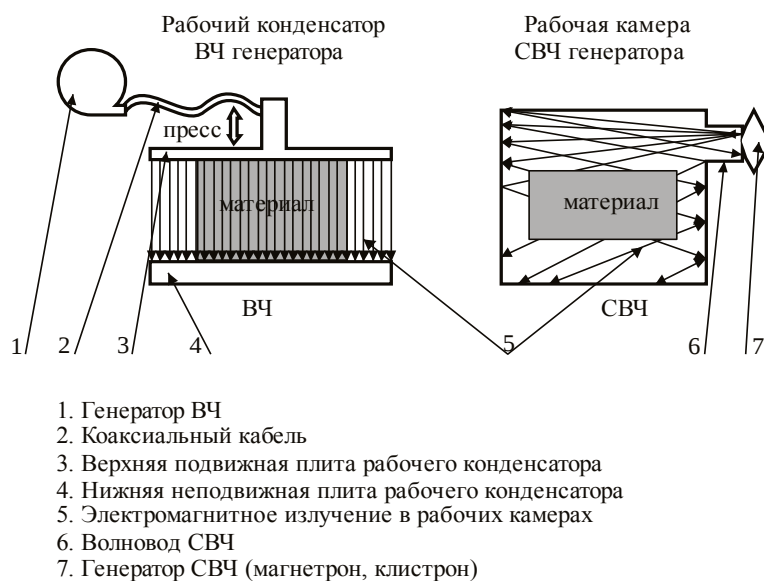


Рис. 1. Схемы воздействия излучения на образцы ВЧ и СВЧ электротермических установок

Как видно из рисунка ВЧ излучение представляет из себя практически однородное поле, расположенное между обкладками рабочего конденсатора, проникающее на достаточно большую глубину материала, при этом не теряя своей структуры. Разогрев является равномерным по всему объему материала.

Многokrатно отражаясь от стен камеры СВЧ излучение распространяется хаотично по объему камеры. При этом часть излучения возвращается в генератор, что отрицательно сказывается на работоспособности и долговечности оборудования. Разогрев является неравномерным, глубина проникновения в материал значительно уступает ВЧ излучению [3].

В результате исследований были получены расчетные и экспериментальные данные по нагреву отходов переработки масло-бензостойкого пластика марки ОМБ-60, ГОСТ 5960-98, являющегося основным электроизолирующим материалом в электросиловых цепях ОАО РЖД.

Обработка производилась на установке типа УЗП-2500, имеющей следующие характеристики: питание 380В., 3Ф; номинальная мощность 2,5 КВт; рабочая частота 27,12 МГц; нажим пресса – электромагнитный от 0 до 400 кг; размеры верхнего электрода 230х365 мм; номинальный анодный ток 0,9 А; номинальное анодное напряжение 4,2 КВ; и СВЧ печи фирмы DEIVOO модели KOR 868G: питание 220В., 1Ф; потребляемая мощность 1350 Вт., номинальная мощность 900 Вт; размеры камеры 330х320х210мм.

При проведении эксперимента были взяты образцы отходов кабельного пластика толщиной 2,4 мм. различного размера от 48,5х48,5мм. (2352мм²) до 110х110мм - (12100мм²).

Мощность воздействия ВЧ и СВЧ была приведена к одному показателю. Время воздействия изменялось в пределах от 30 до 60 сек. Полученные данные представлены в табл.1.

Таблица 1. Нагрев ВЧ и СВЧ ЭМВ пластика марки ОМБ-60

ПВХ пластика марки ОМБ-60	Время сек.	Мощность ватт	Температура нагрева (начальная 20⁰С)
ВЧ нагрев, частота 27,12 МГц	30	900	34
	45	900	48
	60	900	62
СВЧ нагрев, частота 2450 МГц	30	900	20
	45	900	20
	60	900	21

Из данных табл. 1 видно, что при нагреве в ВЧ-поле происходит более значительное увеличение температуры материала и практически не наблюдается разогрева материала в СВЧ поле. Использование ВЧ нагрева с одновременной подпрессовкой позволяет соединять нестандартные куски пластика в более крупные электроизоляционные изделия.

Другим интересным направлением использования ВЧ и СВЧ является нагрев для целей сушки. Качество получаемого материала существенно улучшается за счет того, что нагрев высушенных мест автоматически прекращается. Объясняется это тем, что тангенс угла диэлектрических потерь таких материалов, как, например, дерево, прямо пропорционален влажности. Поэтому с уменьшением влажности в процессе сушки потери ВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность. При СВЧ сушке древесины основной движущей силой влаги является избыточное давление, которое образуется при испарении этой же влаги. Расход жидкости через капилляр древесины при описании течения жидкости уравнением Пуазейля равен:

$$\Theta = \frac{\pi \cdot r^4 \Delta p}{8\mu \cdot l}, \quad (1)$$

где r – радиус капилляра, Δp – разность давления на концах капилляра, μ – вязкость жидкости, l – длина капилляра.

Исследованиями установлено, что в пределах скоростей 0–8 см/с фильтрационный поток имеет ламинарный режим. При скоростях более 8 см/с режим ламинарного движения переходит в турбулентный режим, и сопротивление капилляра резко повышается. Поэтому дальнейшее повышение избыточного давления не приводит к увеличению расхода жидкости через капилляр. Размеры капилляров в древесине колеблются от 10^{-5} до 10^{-8} см. Согласно формуле 1, при условии, что расход жидкости останется постоянным, при уменьшении размера капилляра в 2 раза давление должно вырасти в 16 раз [4].

Лесопереработка в России, как правило, не носит глубокий характер. Увеличение количества отходов опережает их переработку. Кроме того, санитарная и технологическая очистка леса также увеличивает количество древесных остатков. Древесные отходы под действием атмосферных осадков приобретают повышенную влажность, что затрудняет их переработку.

Использование стандартной установки УЗП-2500 для приготовления топливных брикетов и облицовочных материалов из опилок не позволило получить образцы удовлетворительного качества. Сравнительно низкое давление, развиваемое электромагнитным прессом, и конденсация влаги на более холодной поверхности массивных металлических электродов затрудняли процесс сушки и брикетирования. С целью устранения этих недостатков были изготовлены электроды меньшей площади, массы и имеющие технологические отверстия для удаления пара (рис. 2).

Для проведения экспериментов с сыпучими материалами авторами были изготовлены приспособления крепления разовых боковых стенок, которые выполнены из электроизоляционного картона марки ЭВТ, ГОСТ 2824—86. Крепление стенок осуществляется раздвижными хомутами различного диаметра (рис. 2-а).

В верхнем электроде (рис. 2-б), предусмотрено большое количество отверстий для интенсивного удаления продуктов сушки.

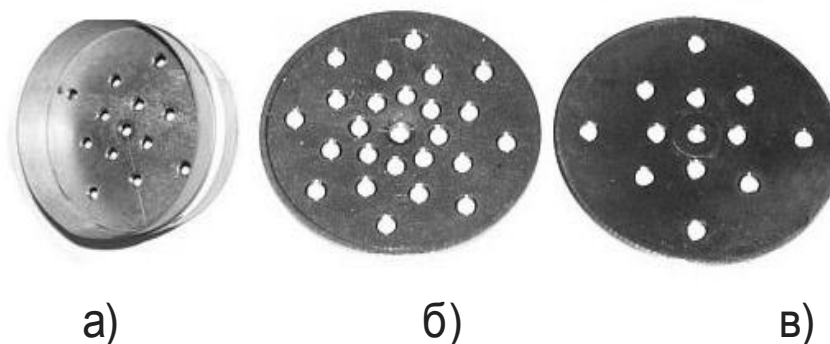


Рис. 2. Перфорированные специальные электроды

Отверстия в нижнем электроде (рис. 2-в) предполагают удаление влаги за счет электротермического и механического воздействия. Поэтому процессу сушки предшествует процесс прессования. По экспериментальным данным (в зависимости от влажности материала) за счет холодного прессования такого типа электродами удаляется до 10% влаги.

В результате выполненных конструктивных изменений установки сушка в ВЧ поле, с одновременной опрессовкой древесно-опилочной массы, позволила получить топливные брикеты толщиной 20мм без добавления каких-либо связующих веществ (рис. 3).

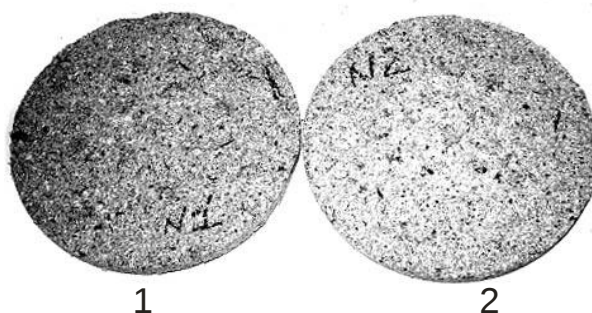


Рис. 3. Топливные брикеты из древесно-опилочной массы

Режимы обработки изменялись по диапазонам воздействия:

- по мощности от 0,22А до 0,35А анодного тока;
- по усилиям пресса от 200 и 400 кг.

Более эффективной оказалась сушка при режиме работы тока 0,35А и давлении 200кг., что подтверждается теоретическими выкладками Пуазейля, представленными зависимостью 1.

В результате использования перфорированных электродов удаление влаги осуществляется комбинированным термомеханическим способом, что значительно повышает интенсивность процесса сушки.

В то же время процесс изготовления брикетов требует совершенствования формы электродов и повышения производительности.

Полученный материал не может быть использован в качестве облицовочного так как обладает низкой влагостойкостью и недостаточной прочностью. Поэтому были проведены

испытания полиэтиленовой крошки в качестве модифицирующей добавки к древесным опилкам. В результате были получены образцы (рис. 4), которые были рекомендованы для дальнейших испытаний в качестве облицовочного строительного материала для внутренних помещений.

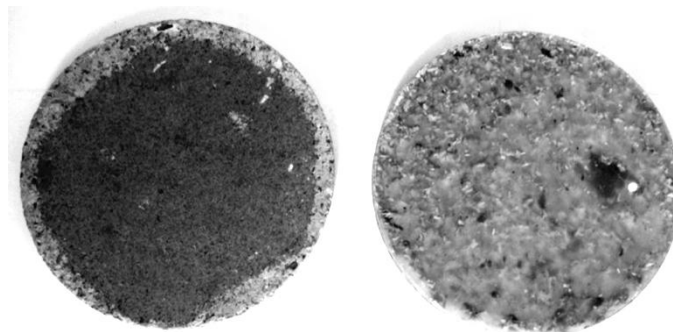


Рис. 4. Модифицированные топливные брикеты с добавлением полиэтиленовой крошки

Для удешевления материала полиэтиленовая крошка изготавливалась из отходов полиэтилена уже, проходившего неоднократную вторичную переработку, подвергавшегося существенным деструктивным изменениям в процессе эксплуатации или загрязненного нетоксичными соединениями, мешающими переработке традиционными методами. Утилизация отходов полиэтилена методом сжигания в тех случаях, когда другие методы переработки не возможны, представляет определенные трудности. Полиэтилен плавится, стекает вниз печи, спекается с негорючими компонентами, что препятствует доступу кислорода, способствует уменьшению коэффициента полноты горения и увеличению выхода токсичных продуктов горения.

Древесный каркас из опилок удерживает расплавленный полиэтилен, что способствует практически полному сгоранию брикета. Модифицированный полиэтиленом материал имеет на 5-10% более высокую теплоту сгорания, дает ровное не коптящее пламя, хорошие прочностные характеристики, поэтому может применяться и для изготовления топливных брикетов. Толщина полученных образцов 25 мм.

Дополнительно необходимо отметить эффект прекращения нагрева при высыхании древесных опилок, что хорошо согласуется с выводами, приведенными в работе [5]: «в установках по сушке древесины при изменении влажности от естественной (60-80%) до эксплуатационной (6-12%) сопротивление увеличивается на несколько порядков, диэлектрическая проницаемость за счет удаления воды уменьшается в 20 и более раз, что приводит к соответствующему снижению поглощаемой в нагреваемой древесине мощности». Данный эффект саморегуляции процесса при проведении дополнительных исследований удельной мощности разогрева материала исключительно интересен с точки зрения организации промышленного процесса брикетирования и создания автоматизированных систем управления электротермией.

Исследования сушки и обезвоживания образцов высотой более 50 мм проводили на примере гидролизного лигнина. Гидролизный лигнин имеет высокую влажность и до настоящего времени не нашел применения. Исходный материал был неоднороден, размеры отдельных частиц достигали 20-30мм, что приводило к их механическому разрушению или электрическому пробое образцов толщиной до 30 мм. Увеличение толщины позволило устранить эти недостатки и получить образцы удовлетворительного качества (рис. 5).



Рис. 5. Образец гидролизного лигнина

При изучении температурного поля образца было установлено, что температура внутри на 20-30°C выше, чем на поверхности. Это объясняется интенсивным поверхностным испарением влаги. Наличие градиента температур способствует массопереносу легкокипящих и водорастворимых соединений на поверхность образца и тем самым способствует его упрочнению.

Полученный на основе гидролизного лигнина материал обладает более высокими теплоизоляционными свойствами, чем древесина, опилкобетон, керамзитобетон и др., что делает его перспективным для дальнейших исследований.

Интересно сравнить предлагаемый способ брикетирования при использовании электротермии с другими распространенными способами. Сегодня самыми распространенными из них являются три технологии [6]:

1. RUF технология, основанная на прессовке брикетов под высоким давлением. Особенностью такого метода является невысокая стоимость оборудования, простота в управлении, что дает возможность устройства небольшого предприятия в относительно простой местности, особо не затрачиваясь ни на оборудование для оснащения предприятия, ни на обучение персонала и повышение его квалификации. К минусам данного способа изготовления топливных брикетов можно отнести то, что брикеты малоустойчивы к влажности, что требует более плотной и качественной их упаковки. Брикет, изготовлен-

ные таким способом имеют проблемы с прочностью, плохо переносят длительное хранения при дальних перевозках.

2. Nestro технология, в основе которой лежит ударный способ изготовления топливных брикетов. Топливный брикет производится с помощью ударных прессов. Так же как и в первом случае, себестоимость изготовления данного вида топливных брикетов особо невелика, поскольку происходит экономия на затратах на производство. Но и качество такого брикета соответственно не намного выше. Брикет так же не терпит влаги, теряет форму при соприкосновении с ней, к тому же силовые нагрузки для таких брикетов вообще являются недопустимыми, что отрицательно сказывается при транспортировке.

3. Pini&Kay технология, реализующая шнековое прессование с поверхностной термообработкой. Такой способ является альтернативой первым двум, поскольку является наиболее выгодным по сравнению с ними и дает продукцию намного более высокого качества. К недостаткам шнекового способа прессования следует отметить высокие эксплуатационные издержки и низкое операционное время загрузки оборудования. Причин этому несколько: значительный износ шнека и, как следствие, необходимость остановок для его замены; необходимость ручного контроля нескольких параметров - зазора между фильерой и шнеком, температуры нагрева фильеры, влажности; невозможность автоматизации. Для выполнения перечисленных работ необходим квалифицированный персонал, вследствие чего высоко влияние человеческого фактора.

Предлагаемый в статье способ брикетирования имеет преимущества перед всеми вышеописанными технологиями, основанные на реализации разогрева одновременно всего массива материала «изнутри» и самопрекращении процесса нагрева при его высыхании. Данные достоинства процесса во-первых, обеспечивают широкие возможности по модифицированию материала брикетов с целью повышения его калорийности и приданию специфических свойств, в т.ч. и прочностных; во-вторых, разогрев «изнутри», как было сказано ранее, способствует массопереносу легкокипящих и водорастворимых соединений на поверхность образца и тем самым способствует его упрочнению даже без применения высокого давления, в-третьих, предрасположенность процесса ВЧ-нагрева к автоматизации, позволяет обеспечить высокий коэффициент загрузки оборудования и, следовательно, снижение себестоимости продукции.

Заключение

В результате проделанной работы на примере отходов древесины, полиэтилена и масло-бензостойкого пластика показана перспективность использования ВЧ энергии для их переработки.

Список литературы

1. Анненков Ю.М. Основы электротехнологий: практикум / Ю.М. Анненков, М.М. Михайлов, В.В. Шарафутдинова, В.И. Меркулов. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 104 с.

2. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дис. ... докт. техн. наук. Саратов, СГТУ, 2009. 356 с.
3. Изюмова Т.И., Свиридов В.Т. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии. М.: Энергия, 1975. 115 с.
4. Гареев В.Ф. Сушка древесины электромагнитными волнами // ЛесПромИнформ. 2004. № 9. Режим доступа: <http://www.lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/1898> (дата обращения 01.05.2014).
- 5.** Рыболовлев В.П. Установка для нагрева в поле токов высокой частоты древесины и других диэлектриков (варианты): пат. 2210874 РФ. 2001.
6. Изготовление топливных брикетов // Prom.Place.ru: сайт. Режим доступа: http://promplace.ru/article_single.php?arc=200 (дата обращения 01.05.2014).
7. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.

High-frequency electro-thermal processing of secondary non-metallic raw materials

06, June 2014

DOI: 10.7463/0614.0712029

A. V. Livshits, N.G. Filippenko, A.N. Larchenko, S.N. Filatova

Irkutsk State University of Railway Transport, 664074, Irkutsk, Russian Federation

livnet@list.ruifpi@mail.rularchenkoa@inbox.rufilatova_sn@irgups.ru

Despite a large number of studies in industrial waste processing, this field is still a challenge. In this regard, new processing capabilities emerging from the use of high frequency (RF) and microwave (MW) heat equipment are a positive factor to be researched.

In HF and MW processing the heating process is determined by absorption of electromagnetic wave power through the processed material. This electromagnetic wave power is transmitted by the substance atoms and spent for heating a sample, polarization, and initiation of chemical reactions. The non-conductor (dielectric and semiconductor) material heat is explained by the existing effect of dielectric losses due to losses caused by the through electrical conductivity and slow processes of polarization. The dielectric losses due to electrical conductivity result from the Joule heat released when through-current flows through the dielectric.

The differences in frequency radiation of HF and microwave equipment define their different technological capabilities. HF-radiation represents almost homogeneous field between the plates of a running capacitor. With multiple reflection from the chamber walls MW-radiation is randomly distributed within the chamber. Thus, radiation partly returns to the generator, thereby affecting the equipment performance capability and life time. Microwave heating is uneven. The depth of penetration into the material is much less to HF-processing. HF heating features are high penetration of radiation and uniform heating of the material. Together with pre-pressing it can afford an opportunity to join the non-standard pieces of plastic to have the larger insulating items.

The fact of the selective effect on the material is positive when processing the waste. Since the tangent of angle of dielectric losses of materials such as wood is directly proportional to humidity, the heating automatically stops as wood dries. This fact was used to produce for the

fuel briquettes, which were modified by waste of polyethylene. Using the authors' snap enables producing the sawdust briquettes with enhanced heat of combustion.

Using the waste of pulp and paper industry was successful in creating the arrays of hydrolytic lignin for their use as a fuel or an insulation material. The presence of temperature gradient contributed to the mass-transfer of low boiling and water-soluble compounds to the sample surface, and, thus, to its hardening. The thermal insulation properties of produced material are higher than those of wood, claydite-concrete, etc. thereby making it advanced for further research.

The article draws a conclusion from the theoretical and experimental studies that the use of HF power for waste processing has unconditional prospects.

Publications with keywords: [recycling of industrial waste](#), [secondary raw materials](#), [high-frequency equipment](#), [plastic](#), [drying materials](#)
Publications with words: [recycling of industrial waste](#), [secondary raw materials](#), [high-frequency equipment](#), [plastic](#), [drying materials](#)

References

1. Annenkov Iu.M., Mikhailov M.M., Sharafutdinova V.V., Merkulov V.I. *Osnovy elektrotekhnologii* [Fundamentals of electrotechnology]. Tomsk, TPU Publ., 2005. 104 p. (in Russian).
2. Kalganova S.G. *Elektrotekhnologiya neteplovoi modifikatsii polimernykh materialov v SVCh elektromagnitnom pole. Dokt. diss.* [Electrotechnology of nonthermal modification of polymer materials in the microwave electromagnetic field. Dr. dis.]. Saratov, SSTU, 2009. 356 p. (in Russian).
3. Iziumova T.I., Sviridov V.T. *Volnovody, koaksial'nye i poloskovye linii* [Waveguides, coaxial and strip lines]. Moscow, Energiia Publ., 1975. 115 p. (in Russian).
4. Gareev V.F. [Wood drying by electromagnetic waves]. *LesPromInform*, 2004, no. 9. Available at: <http://www.lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/1898> , accessed 01.05.2014. (in Russian).
5. Rybolovlev V.P. *Ustanovka dlia nagreva v pole tokov vysokoi chastoty drevesiny i drugikh dielektrikov (varianty)* [Installation for heating in the field of high frequency currents of wood and other dielectrics (options)]. Patent RF, no. 2210874, 2001. (in Russian).
6. Izgotovlenie toplivnykh briketov [Manufacture of fuel briquettes]. Prom.Place.ru: websait. Available at: http://promplace.ru/article_single.php?arc=200 , accessed 01.05.2014. (in Russian).
7. Matveev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and magnetism]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1983. 463 p. (in Russian).