

УДК 621.311.502

А. Р. СЕМЕНЕЙ, аспирант

Э. Г. БРАТУТА, д-р техн. наук, профессор

О. В. КРУГЛЯКОВА, канд. техн. наук, доцент

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

## МОДЕЛЬ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ЕЕ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ ПИРОЛИЗНОГО ТИПА

*Излагается гипотеза трехкомпонентного энергетического потенциала древесины, обусловленного дискретным характером ее загрузки в теплогенератор пиролизного типа, когда все стадии термической деструкции этого вида топлива происходят одновременно.*

*Пропонується гіпотеза трьохкомпонентного енергетичного потенціалу деревини, який обумовлений дискретним характером її завантаження в теплогенератор піролізного типу, коли усі стадії термічної деструкції цього виду палива йдуть одночасно.*

### Введение

В ряде наших публикации [1, 2, 3] достаточно подробно и в различных аспектах описаны результаты стендовых и промышленных испытаний теплогенератора пиролизного типа (ТПТ), предназначенного для термической утилизации органических отходов в различных схемах теплотехнологической реализации.

В ходе наших исследований и при изучении соответствующих литературных источников обнаружено, что трактовка и количественная оценка такой базовой характеристики древесины как ее теплотворная способность представляется весьма неоднозначной, что, естественно, вносит неопределенность при оценке энергетической эффективности ТПТ.

Так, при одной и той же влажности древесины ее теплотворную способность  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  рекомендуют принимать от 8600 кДж/кг [4–6] до 20200 кДж/кг [7, 8].

Проблема выбора опорного значения  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  для древесины оказалась столь существенной, что в научной литературе стали появляться статьи типа [9] с названием «Многоликая теплота сгорания. Где истина?».

В соответствии с единственным на сегодня нормативным документом, регламентирующим все тепловые расчеты парогенераторов [10] величина  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ , независимо от породы дерева, при ее влажности  $W_{\text{p}} = 40\%$  принимается равным 10216 кДж/кг. С целью дополнительного уточнения  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  мы обратились к двум недавним источникам [11, 12], имеющим характер нормативных материалов. Найдено, что при  $W_{\text{p}} = 40\%$   $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 10220$  кДж/кг и по [13]  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 10218$  кДж/кг, что практически совпадает с данными [10].

Использование данных [10–12] позволило нам получить формулу вида

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 18702 - 212,15 W_{\text{p}}, \quad (1)$$

где 18702 кДж/кг – теплотворная способность абсолютно сухой древесины, которая по [11] и [12] равна 18690 и 18702 кДж/кг соответственно;

$W_{\text{p}}$  – относительная влажность древесины, %.

### Основная часть

ТПТ (рис. 1) представляет собой топочное устройство, в верхнюю, пиролизную камеру 1 которого, через загрузочный люк (на схеме не показан) дискретно загружаются отходы древесины, и на пиролизной плите 2 происходит термическое разложение сырья с образованием пиролизного газа, сгорающего в камере сгорания 3. Далее через боры 4 продукты сгорания с температурой 1100–1200 °С поступают в соответствующую схему

теплопотребления. В зависимости от сорта топлива и его влажности тепловая мощность ТПТ составляет от 0,8 до 1,5 МВт.

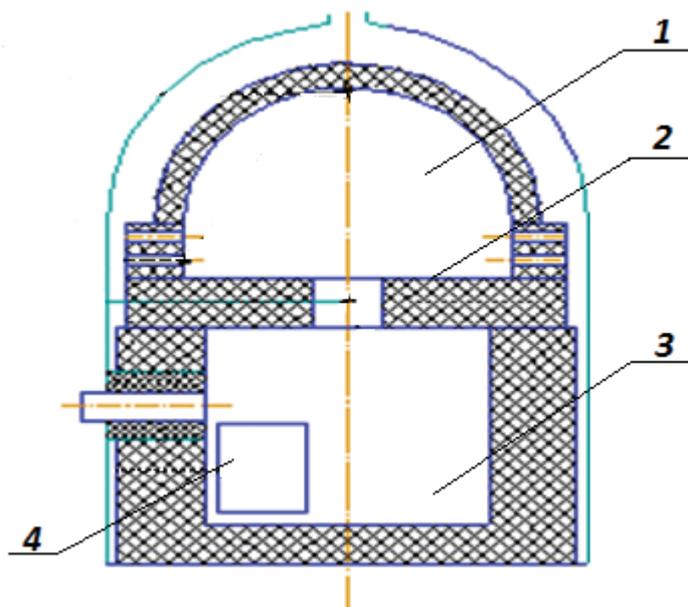


Рис. 1. Схема теплогенератора пиролизного типа

Уже первые опыты и соответствующие расчеты обнаружили неожиданный результат. Он состоял в том, что располагаемая теплота в ТПТ (как сумма теплотворной способности топлива, его физической теплоты и теплоты подаваемого наружного воздуха) оказалась в ряде случаев меньше количества теплоты, полезно используемой при нагреве воды в водогрейном теплообменнике, предназначенного в стендовом эксперименте для специального калориметрического тестирования ТПТ. Таким образом, полезный тепловой эффект от сжигания топлива превосходил его энергетический потенциал, соответствующий, фактически, справочному уровню теплотворной способности древесины, задаваемой по уравнению (1). Вывод об указанном выше несоответствии располагаемой и полезно используемой теплоты в ТПТ подкреплялся тем, что, как было установлено при оценке погрешностей в определении расхода топлива  $m_f$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и соответствующих температур продуктов сгорания, а также температуры наружного воздуха, причиной указанного несогласования (достигающего 17–25 %) могла быть только неточность в задании теплотворной способности  $Q_{н.}^P$ .

Следует заметить, что дополнительные более детальные измерения влажности древесины, использованной в эксперименте, обнаружили, что отличия от величины  $W_p$ , приняты в расчетах на уровне 36 %, составляли не более  $\pm 2$  %, что не могло объяснить указанное рассогласование.

Следует отметить, что при анализе балансовых соотношений для ТПТ, испытанных в различных схемах промышленного теплотехнологического назначения (горячее водоснабжение, сушка зерна и т. д.) также было установлено отмеченное рассогласование.

Ниже нами излагается некая гипотеза, которая в определенной мере позволяет не только объяснить обнаруженное в физическом эксперименте, но и согласовать соотношение между располагаемой и полезно использованной теплотами.

При сжигании одиночного фрагмента древесины в калориметрической бомбе фрагмент топлива полностью сгорает, проходя непрерывно все известные стадии: сушки, выхода летучих, горения непосредственно древесины и сжигания коксового остатка, или т. н. древесного угля. Интегральный тепловой эффект всей этой последовательности определялся как теплотворная способность топлива.

Принципиальным, с нашей точки зрения, отличием технологии сжигания древесины в ТПТ от горения одиночного фрагмента является дискретная подача топлива в камеру

пиролиза. Фактически каждый отдельный процесс выгорания порции загрузки и каждое мгновенное значение скорости горения – есть результат **одновременно** (а не последовательно) происходящих всех четырех стадий тепловой деструкции древесины в одном и том же пространстве. Очевидно при этом, что в общем процессе генерирования теплоты участвует и часть «свежего» топлива с максимальной влажностью и т. н. абсолютно сухая древесина, и часть – древесного угля, с соответствующей этим фракциям теплотворной способностью.

В этой крайне сложной теплофизической обстановке дискретного в пространстве и времени нестационарного термического взаимодействия фракций с изменяющейся по форме и размерам поверхностью окисления отдельных фрагментов топлива (принадлежащим к различным фракциям), представилась возможной следующая модель, в известной мере сформированная в результате изучения работы академика НАН Украины И. П. Карпа и его сотрудников [13]. В этом исследовании для отдельного древесного фрагмента сферической формы было проведено детальное численное исследование стадий разогрева, выделения влаги, выделения и сгорания легких компонентов и горения углеродного остатка. При этом определены температурные уровни отдельных стадий и, что для формирования нашей модели наиболее существенно, определена их продолжительность вплоть до полного сгорания фрагмента.

Сделаем допущение, что в камеру пиролиза ТПТ дискретно подается некое условное трехкомпонентное топливо, в каждом килограмме которого в некоторых пропорциях содержатся «свежая» древесина, абсолютно сухая древесина и древесный уголь с соответствующими для этих компонентов теплотворными способностями.

Кроме того, важную роль в этой модели имеет время выгорания каждой из указанных компонентов в этом условном топливе, о чем можно судить именно с помощью расчета [13].

Таким образом, теплотворную способность этого условного трехкомпонентного топлива представим как

$$(Q_H^P)_{\text{усл}}(\tau) = \sum_{i=1}^{i=3} (Q_H^P)_i \bar{\tau}_i, \quad (2)$$

где  $(Q_H^P)_i$  – теплотворная способность  $i$ -го компонента;

$\bar{\tau}_i = \Delta\tau_i/\tau$  – доля общего времени  $\tau$ , в течение которого происходит полное выгорание  $i$ -го компонента.

Естественно, что коль скоро принимается модель трехкомпонентного топлива, то в (2) помимо величины  $\Delta\tau_i/\tau$  должны были бы фигурировать некоторые массовые доли компонентов, отражающие их количественный вклад. Однако, учитывая переменность во времени таких долей и отсутствие необходимой информации о динамике этого процесса, мы вначале сочли возможным учесть лишь фактор  $\Delta\tau_i/\tau$ , который и был исследован в работе [13]. Из этой работы следует, что период разогрева и сушки фрагмента завершается примерно при  $\Delta\tau_i/\tau = 0,125$ , горение сухого остатка продолжается почти столько же и основную долю – около 0,75 общего времени занимает выгорание кокса. В соответствии с литературными источниками, которые уже упоминались, для первого периода принималось  $Q_H^P = 10200$  кДж/кг, для второго – 18000 кДж/кг и для горения древесного угля в соответствии с работой [5] принято  $Q_H^P = 31500$  кДж/кг.

С нашей точки зрения именно высокая теплотворная способность древесного угля и явилась главной причиной несогласованности величины располагаемой теплоты (найденной при обычной интерпретации теплотворной способности) с полезно использованной теплотой.

На рис. 2 и 3 показаны некоторые результаты наших экспериментов [2], иллюстрирующие динамику выгорания древесины в пиролизной камере ТПТ.

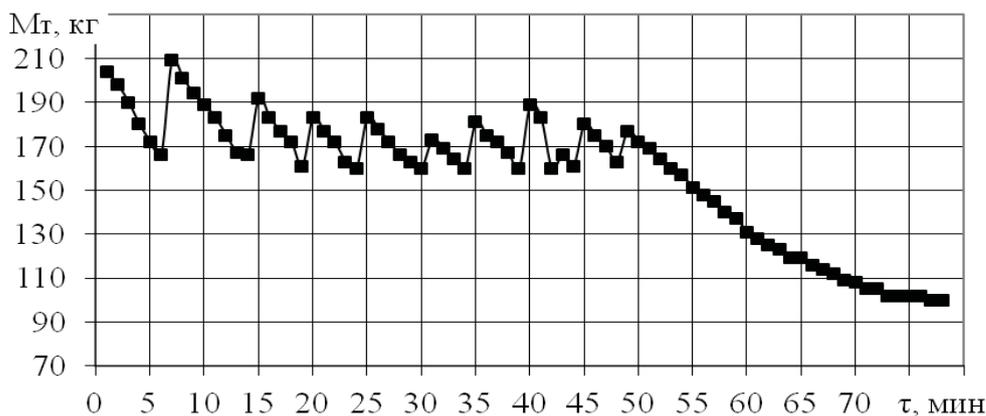


Рис. 2. Изменение массы топлива  $M_t$  на пиролизной плите на отдельных этапах дискретной загрузки вплоть до прекращения его подачи в ТПТ после 48 минуты работы

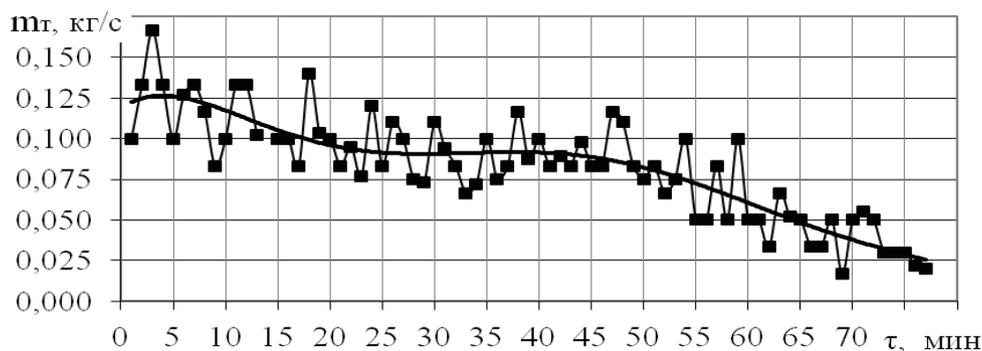


Рис. 3. Скорость выгорания топлива или его расход  $m_t(\tau)$ , найденный обработкой результатов, показанных на рис. 2

Из рис. 3 видно, что скорость выгорания  $m_t(\tau)$  уменьшается. Это связано с уменьшением во времени общей массы топлива  $M_t$ , показанной на рис. 2. По чисто формальным соображениям снижение  $m_t(\tau)$  должно было компенсировать резкое повышение располагаемой теплоты за счет высокой теплотворной способности древесного угля на заключительной стадии горения условного трехкомпонентного топлива.

В связи с этим в уравнение (2) нами был введен некий аналог массовой доли компонента и зависимость приобрела вид

$$(Q_n^p)_{\text{усл}}(\tau) = \sum_{i=1}^{i=3} (Q_n^p)_i \cdot \bar{m}_i \cdot \bar{\tau}_i \quad (3)$$

Здесь

$$\bar{m}_i = \frac{(\bar{m}_\tau)_i}{\sum_{i=1}^{i=3} (\bar{m}_\tau)_i} \quad (4)$$

где  $\bar{m}_\tau$  – средний расход топлива  $m_\tau$  на участке времени, пропорциональном  $\bar{\tau}_i$ .

Совершенно очевидно, что процесс термической деструкции древесины в ТПТ, когда используются фрагменты с размерами диагоналей поперечных сечений от 0,1 до 0,3 м при длине от 0,15 до 1,2 м, трудно ожидать, что величины  $\bar{\tau}_i$  будут соответствовать полученным в [13], где использовался сферический фрагмент древесины диаметром 3 мм.

Поэтому, используя модель (3) и, варьируя величинами  $\bar{\tau}_i$  (отдавая предпочтение продолжительности выгорания древесного угля), была получена зависимость  $Q_n^p(\tau)$ , показанная на рис. 4 (кривая 3).

Зависимость 2 на рис. 4 представляет ту (назовем ее условной) теплотворную способность, которая должна была бы обеспечить реальную теплопроизводительность ТПТ, установленную в результате калориметрического тестирования.

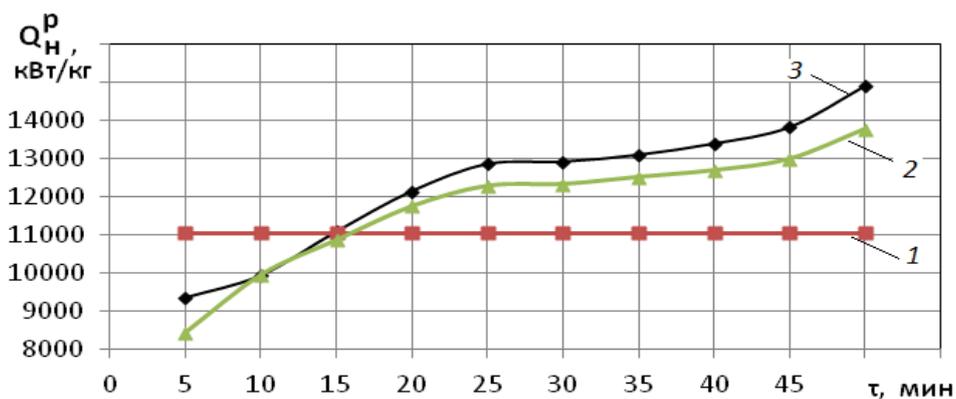


Рис. 4. Сравнение теплотворных способностей древесины: 1 – по формуле (1); 2 – результат calorиметрического тестирования ТПТ; 3 – по формуле (3)

Эта зависимость естественно не претендует на какую-либо универсальность и лишь отражает наше предположение о специфике процесса, в котором одновременно осуществляются все три основные стадии термической деструкции древесины.

Организация специальной экспериментальной проверки нашего предположения о «компонентном» характере теплового потенциала древесины при одновременном осуществлении всех стадий горения дискретно-порционно загруженного сырья представляется весьма проблематичной. И единственным подтверждением может быть выполненное нами calorиметрическое тестирование, как определение соответствия теплоты, переданной продуктами сгорания и теплоты, воспринятой нагреваемой водой.

Представленная модель (3) и соображения, определившие ее формирование, являются, естественно, дискуссионными. Однако, экспериментально обнаруженный эффект отмеченного в статье энергетического дисбаланса установлен достоверно.

### Выводы

1. При сжигании кусковых древесных отходах в теплоутилизаторах с дискретным характером загрузки, когда все стадии деструкции топлива происходят одновременно, в одном и том же топочном объеме, использование традиционных справочных данных о теплотворном характере древесины может привести к некорректной оценке эффективности и теплопроизводительности топочного агрегата.

2. Для теплоутилизаторов с дискретной загрузкой топки древесными фрагментами необходима выработка специальной методики оценки энергетического потенциала топлива для обеспечения достоверных результатов теплового баланса.

### Список литературы

1. Братута Э. Г. Перспективы использования топочных агрегатов пиролизного типа / Э. Г. Братута, А. Р. Семеней // Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит. – 2010. – № 4 (74). – С. 8–12.
2. Семеней А. Р. Физическая модель процессов в теплогенераторе пиролизного типа / А. Р. Семеней // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 14 (988). – С. 134–141.
3. Братута Э. Г. Диагностика водогрейного агрегата пиролизного типа / Э. Г. Братута, А. Р. Семеней // Праці Таврійського державного агротехнічного університету. – 2013. – Вип. 13. – Т.4 С. 3–10.
4. Головков С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперан, В. И. Найденов. – М.: «Лесная промышленность», 1987. – 224 с.
5. Кислицын А. И. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы / А. И. Кислицын, – М.: Лесная промышленность, 1990. – 312 с.
6. Кубиков В. Е. Оценка эффективности использования энергетического оборудования, работающего на древесных отходах / В. Е. Кубиков. – Лесная промышленность, 2002, № 2. С. 28–30.
7. Найденов В. И., Коперин И. Ф. Теплотехнические характеристики и средние калорийные эквиваленты древесных отходов / В. И. Найденов, И. Ф. Коперин, //

Деревообрабатывающая промышленность. – 1980. – № 12. – С. 14–17.

8. Букин В. Д., Мамонов В. Е., Солдатов А. В. Сжигание древесных отходов / В. Д. Букин, В. Е. Мамонов, А. В. Солдатов // Лесная промышленность. – 1999. – № 2. – С. 24–25.

9. Федотов Р. А. Многоликая теплота сгорания. Где истина? / Р. А. Федотов // Деловой лес. – 2006. – № 5. – С. 6–8.

10. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Под ред. Н. В. Кузнецова, В. В. Митора, И. Е. Дубовского. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

11. Lesintech. Лесные инновационные технологии – зависимость расчетной теплотворной способности древесины от влажности (нормативный метод). – С. Петербург, WWW.Lesintech.RU.

12. ЭСКО – Электронный журнал энергетической компании «Экологические системы», – 2008, апрель, № 4. Электронный адрес: [http://esco-ecosys.narod.ru/2008\\_4/art47.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2008_4/art47.htm)

13. Карп И. Н. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы/ И. Н. Карп, В. В. Колесник, В. Н. Орлик и др.// Энерготехнологии и ресурсосбережение – 2010, № 5. – С. 13 – 20.

## A MODEL OF THREE-COMPONENT ENERGY POTENTIAL OF WOOD FOR ITS THERMAL DESTRUCTION IN A PYROLYSIS HEAT GENERATOR

A. R. SEMENEY, Post graduate students

E. G. BRATUTA, Doctor of Technical Sciences, Professor

O.V. KRUGLIAKOVA, Candidate of Technical Sciences, Docent NTU «KhPI»

*The paper develops a hypothesis of three-component energy potential of wood stipulated by the discrete character of its charge into the pyrolysis heat generator, when all stages of thermal destruction of this type of fuel occur simultaneously.*

1. Bratuta E.G. Perspektivy ispolzovania topochnix agregatov piroliznogo tipa / E.G.Bratuta, A.R.Semenej // Energoberezhenie. Energetika.Energoaudit. – 2010. – №4(74). – S. 8–12.

2. Semenej A.R. Fizicheskaja model' processov v teplogeneratore piroliznogo tipa / A.R.Semenej // Energetichni ta teplotnichni procesi j ustatkuvannja. Visnik NTU «KPI». – 2013. – №14 (988). – S. 134–141.

3. Bratuta E.G. Diagnostika vodogrejnogo agregata piroliznogo tipa / E.G.Bratuta, A.R.Semenej // Praci Tavrijs'kogo derzhavnogo agrotehnichnogo universitetu. – 2013. – Vip. 13. – T.4. – S. 3–10.

4. Golovkov S.I. Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnyh othodov / S.I. Golovkov, I.F. Koperan, V.I. Najdenov. – М.: Lesnaja promyshlennost', 1987. – 224 s.

5. Kislicyn A.I. Piroliz drevesiny: himizm, kinetika, produkty, novye processy / A.I. Kislicyn, – М.: Lesnaja promyshlennost', 1990. – 312 s.

6. Kubikov V.E. Ocenka effektivnosti ispol'zovanija energeticheskogo oborudovanija, rabotajushhego na drevesnyh othodah / V.E. Kubikov // Lesnaja promyshlennost'. – 2002. – № 2. S. 28 – 30.

7. Najdenov V.I., Koperin I.F. Teplotnicheskie harakteristiki i srednie kalorijnye ekvivalenty drevesnyh othodov / V.I. Najdenov, I.F. Koperin // Derevoobrabatyvajushhaja promyshlennost'. – 1980. – № 12. – S. 14 – 17.

8. Bukin V.D., Mamonov V.E., Soldatov A.V. Szhiganie drevesnyh othodov / V.D. Bukin, V.E. Mamonov, A.V. Soldatov // Lesnaja promyshlennost'. – 1999. – № 2. – S. 24 – 25.

9. Fedotov R. A. Mnogolikaja teplota sgoranija. Gde istina? / R. A. Fedotov // Delovoj les. – 2006. – № 5. – S. 6 – 8.

10. Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov (normativnyj metod) / Pod red. N. V. Kuznecova, V.V. Mitora, I. E. Dubovskogo. – М.: Energija, 1973. – 296 s.

11. Zavisimost' raschetnoj teplotvornoj sposobnosti drevesiny ot vlazhnosti (normativnyj metod) // [http://www.lesintech.ru/downloads\\_svoystva.php](http://www.lesintech.ru/downloads_svoystva.php).

12. Borushko N.P. Perspektivy proizvodstva i ispol'zovanija drevesnyh pelletov v RB / N.P. Borushko, M.L.German, V.A.Cedik // [http://esco-ecosys.narod.ru/2008\\_4/art47.htm](http://esco-ecosys.narod.ru/2008_4/art47.htm).

13. Karp I. N. Matematicheskoe modelirovanie processa sgoranija drevesnoj chasticy/ I. N. Karp, V. V. Kolesnik, V. N. Orlik i dr.// Energotehnologii i resursoberezhenie – 2010. – № 5. – S. 13–20.

Поступила в редакцию 22.10 2013 г.