

УДК 662.815.4

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЁРДОГО КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА ИЗ НИЗКОСОРТНОГО СЫРЬЯ

Табакаев Роман Борисович¹,

TabakaevRB@tpu.ru

Казаков Александр Владимирович¹,

kazakov@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена тенденцией ориентации энергетики на возобновляемые источники энергии в связи с необходимостью рационального использования традиционных органических ресурсов. В статье рассмотрен один из наиболее востребованных в России возобновляемых энергетических ресурсов – низкосортное топливо (торф, древесина и сапрпель), а также бурый уголь. В качестве способа облагораживания этого ресурса выбрана теплотехнологическая переработка в твердое композитное топливо.

Цель работы: оценка тепловых энергозатрат производства твердого композитного топлива из низкосортного сырья на примере разработанной авторами теплотехнологии.

Методы исследования. Теплотехнические характеристики низкосортного топлива определены по стандартным методикам ГОСТ Р 52911–2013, ГОСТ 55661–2013, ГОСТ 55660–2013, теплота сгорания установлена при помощи бомбового калориметра АБК-1 согласно ГОСТ 147–2013. При оценке тепловых затрат использованы методы материальных и тепловых балансов. Достоверность полученных результатов оценена их сопоставлением с данными других исследований.

Результаты. Использование теплоты разложения органической массы топлива и тепла от сжигания побочных продуктов термической переработки позволяет полностью покрыть тепловые нужды производства твердого композитного топлива из торфа, бурого угля и древесных опилок. При переработке сапрпели требуется покрытие части тепловых затрат за счет внешних источников. Низкотемпературный пиролиз исследуемого низкосортного сырья может протекать в автотермическом режиме за счет тепла разложения органической массы при условии, что влажность сырья на входе в реактор не будет превышать следующих значений: для торфа – 35 %, для исследованного бурого угля – 54 %, для опилок – 37 %. Для этого необходимо организовать предварительную сушку исходного сырья. Низкое значение теплоты разложения органической массы озерного сапрпели не позволяет организовать автотермическое протекание его термической переработки.

Ключевые слова:

Низкосортное сырьё, твердое композитное топливо, тепловая технология, автотермическое протекание пиролиза, оценка тепловых затрат переработки

Введение

Постепенное исчерпание качественных энергетических ресурсов, таких как природный газ и каменный уголь, а также приоритет ориентации их использования в сторону химической промышленности и металлургии приводят к необходимости нового взгляда на будущее энергетики. К настоящему времени более чем в 73 странах мира приняты государственные программы, направленные на повышение доли возобновляемых ресурсов в топливно-энергетическом балансе [1–3].

В качестве модели эволюционирования энергетической отрасли Российской Федерации разработана программа «Стратегия развития энергетики России на период до 2035 года», утвержденная Правительством, согласно которой предусматривается постепенное снижение в энергетике доли природного газа и восполнение снижаемой при этом мощности за счет возобновляемых ресурсов низкосортного органического сырья (НС), такого как торф, биомасса, низкокачественные бурые угли, сапрпель и т. п. Вместе с тем отмечается, что особенно целесообразно использование в зонах децентрализованного энергоснабжения, энергетика которых базируется на автономных энерге-

тических установках, работающих на привозном топливе.

НС в естественном состоянии крайне редко используется в качестве энергетического топлива из-за высоких эксплуатационных затрат, возникающих при его сжигании традиционными методами [4, 5]. Причиной этих затрат являются высокие значения влажности и зольности НС, обуславливающие низкую величину теплоты сгорания в пересчете на рабочее состояние и, соответственно, высокий расход, а также необходимость предварительной сушки. Более того, высокая влажность приводит к проблемам слипаемости и смерзаемости сырья при перевозках в зимний период [6], требуя дополнительных издержек на обогрев транспортных вагонов. Низкая прочность и высокая крошимость НС являются причиной высокой величины провала при слоевом сжигании.

Уже несколько десятилетий ведутся исследования, направленные на поиск путей эффективного вовлечения НС в энергетическое использование, в результате чего появились направления переработки [7–12] в топливные брикеты, газификации, каталитическому сжиганию, получению биотоплива и др. Одним из перспективных и распростра-

ненных направлений является теплотехнологическая переработка НС в энергетические продукты для последующего изготовления на их основе твердого композитного топлива (ТКТ) – топливных брикетов и пеллет. Однако одним из главных аргументов противников данного направления является мнение [13], что теплотехнологическая переработка характеризуется крупномасштабным и расточительным потреблением топливно-энергетических ресурсов, сырья и мощным выбросом экологически вредных отходов.

Целью данной работы ставится оценка тепловых энергозатрат производства ТКТ из низкосортного сырья на примере разработанной авторами теплотехнологии.

Основные аспекты теплотехнологии

Теплотехнология [14, 15] включает предварительную термическую переработку НС в энергетически ценные продукты (углеродистый остаток и пиролизный конденсат) и последующее формование на их основе ТКТ (рис. 1). В качестве способа

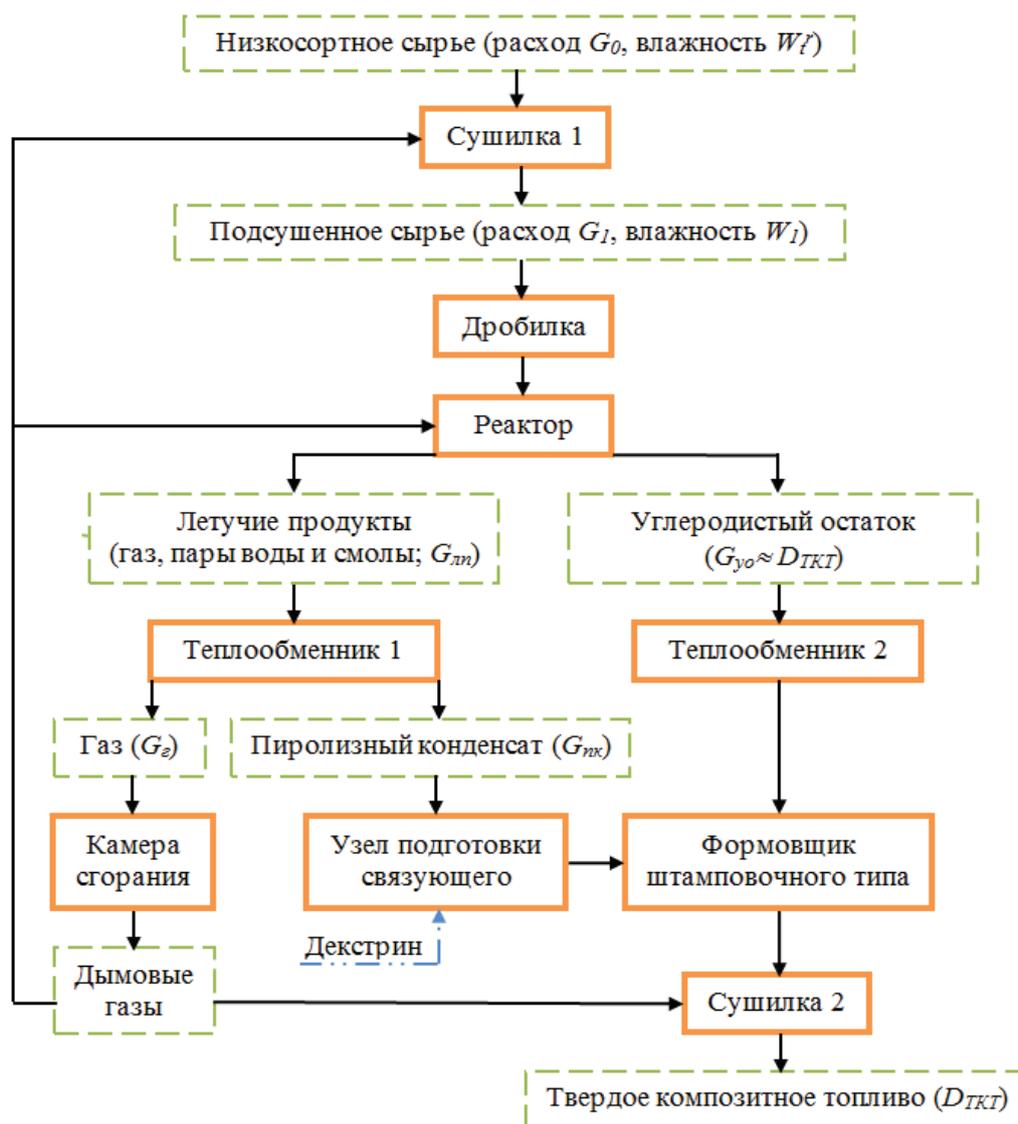


Рис. 1. Схема производства твердого композитного топлива: G_0 – расход НС, кг/с; W_0^i – влажность НС, %; G_1 – расход НС после подсушивания в сушилке 1, кг/с; W_1^i – влажность НС после подсушивания, %; $G_{лп}$ – расход летучих продуктов, выделяемых в процессе пиролиза, кг/с; G_{yo} – расход углеродистого остатка, получаемого при пиролизе, кг/с; $D_{ТКТ}$ – производительность ТКТ, кг/с; G_r – расход газа, кг/с; $G_{пк}$ – расход пиролизного конденсата, кг/с

Fig. 1. Scheme of solid composite fuel production: G_0 is the low-grade raw material consumption, kg/s; W_0^i is the low-grade raw material moisture, %; G_1 is the low-grade raw material consumption at the outlet of the dryer 1, kg/s; W_1^i is the low-grade raw material moisture at the outlet of the dryer 1, %; $G_{лп}$ is the consumption of volatile products released during pyrolysis, kg/s; G_{yo} is the consumption of carbon residue produced during the pyrolysis, kg/s; $D_{ТКТ}$ is the capacity of solid composite fuel, kg/s; G_r is the gas consumption, kg/s; $G_{пк}$ is the pyrolysis condensate consumption, kg/s

термической переработки НС выбран процесс пиролиза, температура которого не превышает 450 °С. Данная температура ведения процесса позволяет использовать доступные углеродистые стали обычного качества при изготовлении технологического оборудования, тем самым минимизируя затраты на материалы и проведение монтажа.

Побочный продукт термической переработки – газ – сжигается для покрытия тепловых издержек теплотехнологии.

Формование ТКТ осуществляют на основе связующего вещества, полученного растворением декстрина в пиролизном конденсате в соотношении 1:10 [16], и углеродистого остатка, измельченного до кусков менее 2 мм. Для этого углеродистый остаток смешивают со связующим в соотношении 2:3, формируют ТКТ и сушат полученный сырец: при изготовлении брикетов при температуре от 20 до 40 °С, пеллет – от 20 до 80 °С [17].

Результаты исследований и оценка тепловых затрат

Возможность получения ТКТ была исследована на нескольких видах НС Томской области: торф Кандинского месторождения, бурый уголь Таловского месторождения, опилки различных древесных пород, озерный сапрпель Карасевского месторождения.

В результате пиролиза перечисленного НС (температура процесса 450 °С, скорость нагрева сырья 10 °С/минуту) составлен материальный баланс (рис. 2) и определена теплота разложения органической массы (рис. 3).

По составляющим материального баланса пиролиза НС условно можно разделить на две груп-

пы: с преобладающим выходом углеродистого остатка – более 50 % (уголь и сапрпель) и с сопоставимым выходом углеродистого остатка и газа (торф и опилки). Первую группу целесообразно рассматривать для переработки в ТКТ, вторую группу – в качестве сырья как для изготовления ТКТ, так и для получения газа.

Низкотемпературный пиролиз высушенного НС сопровождается положительным тепловыделением 0,33–3,69 МДж/кг, что является характерной чертой для топлив, находящихся на ранних стадиях метаморфизма. При сжигании газа, побочного продукта теплотехнологии, с учетом КПД газовых топливосжигающих устройств малой мощности 92–95 % [18–20], возможно получение от 2,48 до 6,64 МДж тепловой энергии с каждого килограмма сухого перерабатываемого сырья. Таким образом, в процессе термической переработки 26–38 % от потенциально возможного тепловыделения НС может быть направлено на покрытие собственных тепловых нужд производства ТКТ.

Характеристики НС и получаемого из него ТКТ, согласно рассмотренной теплотехнологии, приведены в табл. 1. Ввиду специфики переработки получаемое ТКТ имеет более высокую зольность и меньший выход летучих веществ по сравнению с исходным НС, однако его значение ниже теплоты сгорания в 2,1–6,8 раз выше. При этом топливо обладает механической прочностью, согласно ГОСТ Р 54248–2010 достаточной для использования в системах жилищно-коммунального хозяйства: 100%-я устойчивость к разрушению при падении и сопротивление сжатию более 0,3 МПа (метод испытаний ГОСТ 21289–75).

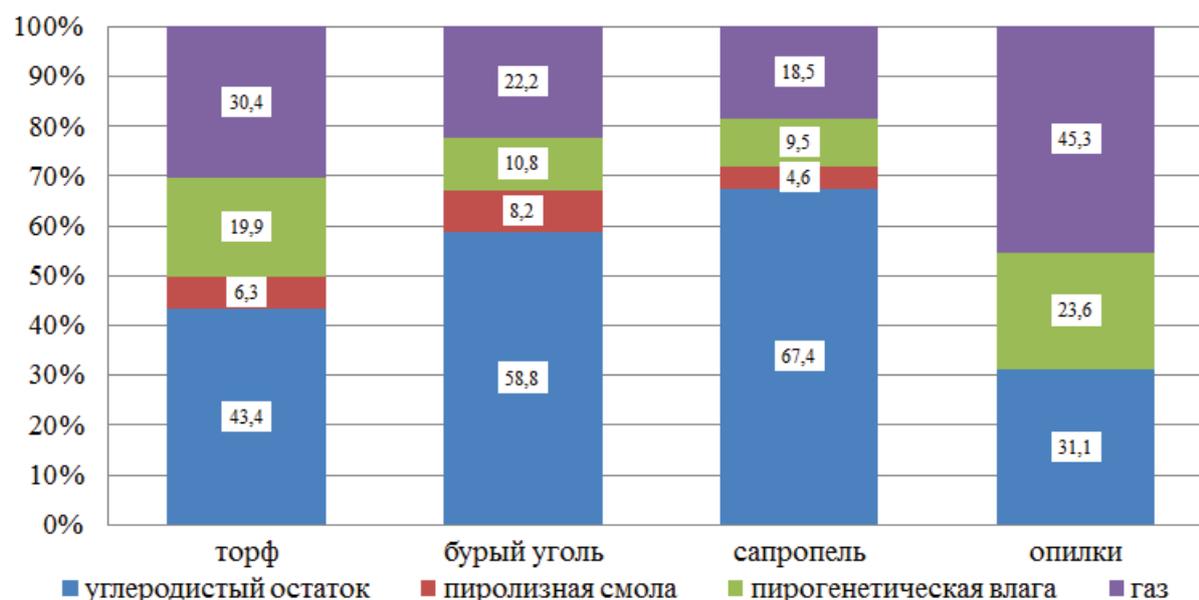


Рис. 2. Материальный баланс низкотемпературного пиролиза (относительно сухой массы исходного сырья)

Fig. 2. Material balance of low-temperature pyrolysis (relative to dry weight of raw material)

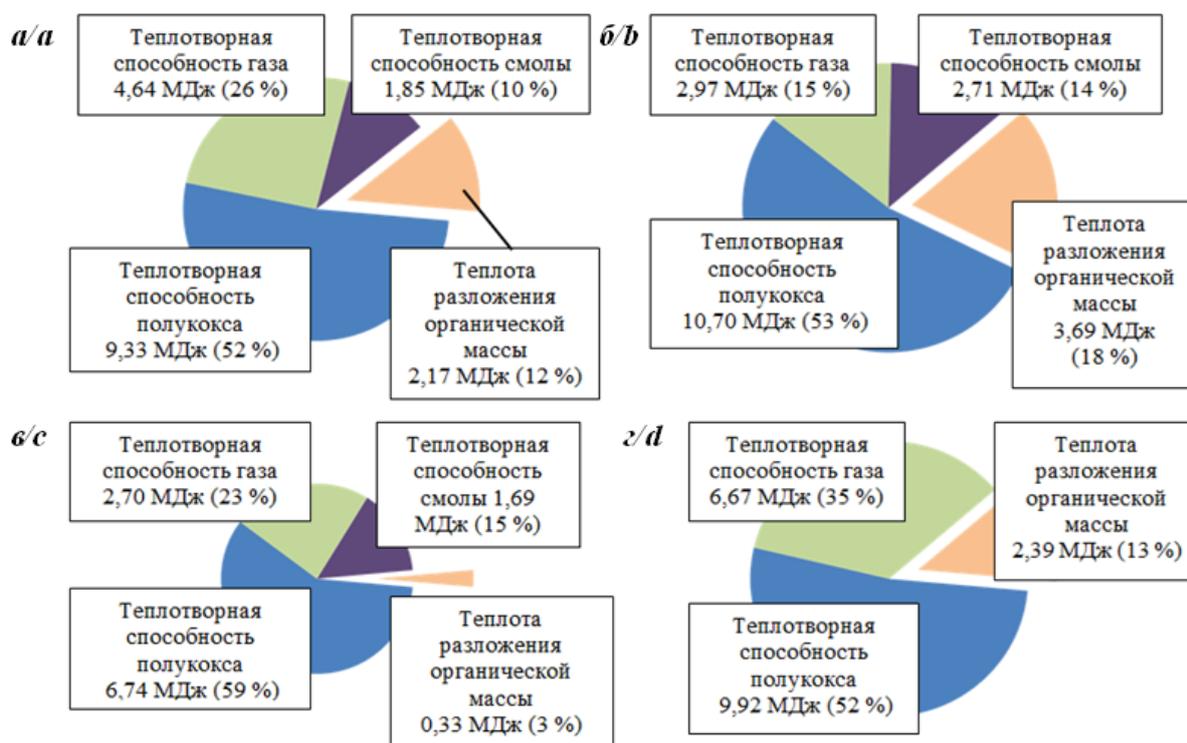


Рис. 3. Распределение потенциального тепловыделения между продуктами пиролиза высушенного низкосортного сырья: а) торф; б) бурый уголь; в) сапропель; г) опилки [15]

Fig. 3. Potential heat release distribution among products of pyrolysis of dried low-grade raw materials: a) peat, b) brown coal, c) sapropel, d) sawdust [15]

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья и ТКТ на его основе

Table 1. Thermotechnical characteristics of source raw material and solid composite fuel

Теплотехническая характеристика Thermotechnical characteristic	Торф Peat	Бурый уголь Brown coal	Сапропель Sapropel	Опилки Wood chips
Исходное сырье/твердое композитное топливо Initial raw material/solid composite fuel				
Рабочая влажность W_f , % Moisture W_f , %	72,8/0	51,0/0	67,0/0	45/0
Зольность на сухую массу A^d , % Ash on dry basis A^d , %	9,1/19,1	25,9/32,1	38,4/47,1	0,6/2,9
Выход летучих веществ V^{vol} , % Yield of volatile substances V^{vol} , %	71,6/19,4	63,2/10,6	84,8/16,5	91,8/13,1
Нижшая теплота сгорания Q_f , МДж/кг Net calorific value Q_f , MJ/kg	3,1/21,1	8,6/18,0	2,1/11,6	9,3/29,4

Оценка тепловых затрат производства ТКТ

При производстве ТКТ тепловая энергия необходима для осуществления сушки исходного сырья, его термической переработки и сушки сыр-

ца. Приблизительно оценить необходимые тепловые затраты возможно следующим образом.

Тепло на сушку НС:

$$Q_{c1} = (G_0 - G_1)r, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где r – теплота парообразования, кДж/кг.

Тепло на сушку сырца ТКТ (при соотношении углеродистого остатка и связующего вещества 2:3):

$$Q_{c2} = \frac{3}{2} G_{yo} r, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Тепло на термическую переработку НС можно разбить на несколько составляющих: испарение остаточной влаги ($Q_{ТП1}$), нагрев сырья до температуры начала термического разложения ($Q_{ТП2}$), осуществление пиролиза ($Q_{ТП3}$), потерю с физическим теплом летучих продуктов ($Q_{ТП4}$). При расчете необходимо учитывать выделение теплоты разложения органической массы НС ($Q_{разл}$) и тепловые потери в окружающую среду (Q_5). Соответственно, формула для определения тепла, необходимого для осуществления термической переработки, примет вид:

$$Q_{ТП} = Q_{ТП1} + Q_{ТП2} + Q_{ТП3} + Q_{ТП4} + Q_5 - Q_{разл}, \text{ кВт}, \quad (3)$$

где

$$Q_{ТП1} = G_1 W_1 r, \text{ кВт};$$

$$Q_{ТП2} = C_p^{HC} G_1 (1 - W_1) (t_{HTP} - 20), \text{ кВт};$$

$$C_p^{HC} - \text{теплоемкость НС, кДж/(кг} \cdot \text{}^\circ\text{C)};$$

Таблица 2. Оценка тепловых издержек и тепловыделения производства ТКТ (45 т/сутки)

Table 2. Assessment of heat costs and heat release of solid composite fuel production (45 tons per day)

Низкосортное сырье Low-grade raw material	W_1	Q_{c1}	Q_{c2}	$Q_{тп}$					$Q_{разл}$	Q_r	Сумма тепловых затрат и тепловыделения Sum of heat costs and heat release
				$Q_{тп1}$	$Q_{тп2}$	$Q_{тп3}$	$Q_{тп4}$	Q_5			
	%	кВт									
Торф/Peat	35	-301	-1760	-1444	-149	-207	-1080	-29	2604	5140	2774
Уголь/Brown coal	54	0		-2310	-322	-229	-385	-32	3247	2439	648
Сапропель/Sapropel	-	-1421		0	-257	-192	-332	-8	254	1910	-1806
Опилки/Wood chips	37	-341		-2188	-496	-396	-913	-40	3991	10467	9914

$t_{нтр}$ – температура начала термического разложения НС, °С;

$$Q_{тп3} = C_p^{yo} \left(\frac{G_1(1-W_1) + G_{yo}}{2} \right) (450 - t_{нтр}), \text{ кВт};$$

$$Q_{тп4} = C_p^{лп} [G_1(1-W_1) - G_{yo}] (450 - t_{нтр}), \text{ кВт};$$

Q_5 – потери в окружающую среду, кВт;

$$Q_{разл} = G_1(1-W_1)Q_{разл}^{НС}, \text{ кВт};$$

$Q_{разл}^{НС}$ – теплота разложения органической массы НС (определяется по рис. 3).

Если предположить, что тепла от разложения органической массы НС ($Q_{разл}$) будет достаточно для покрытия тепловых нужд ($Q_{тп1}$, $Q_{тп2}$, $Q_{тп3}$, $Q_{тп4}$ и Q_5), то (3) примет следующий вид:

$$Q_{разл} = Q_{тп1} + Q_{тп2} + Q_{тп3} + Q_{тп4} + Q_5, \text{ кВт}. \quad (4)$$

В этом случае решение задачи сводится к определению значения влажности НС после сушилки 1 (W_1). При поступлении НС в реактор со значением влажности W_1 меньшим, чем определенное расчетным путем, процесс пиролиза будет протекать автотермически.

Источником тепловой энергии, помимо теплоты разложения органической массы, для рассматриваемой теплотехнологии является тепло (Q_r), полученное при сжигании газа. Результаты теплового расчета малотоннажного производства ТКТ (45 т/сутки) показаны в табл. 2. При этом принято, что благодаря длительному хранению на воздухе после добычи исходное НС поступает в сушилку 1 со значением влажности 45 % [21].

Проведенный расчет показал, что при переработке торфа, бурого угля и опилок в ТКТ тепла, выделяющегося при разложении органической массы и сжигании газа, будет достаточно для покрытия тепловых нужд теплотехнологии. При этом протекание низкотемпературного пиролиза в автотермическом режиме возможно после сушки НС в сушилке 1 до следующих значений влажности

(W_1): торфа – 35 %, опилок – 37 %, бурого угля – 54 % (необходимость в сушилке 1 отсутствует).

Для получения ТКТ из сапропеля необходимо покрытие около 1700 кВт тепловых затрат за счет внешних ресурсов.

Полученные результаты по порядку величины влажности торфа (W_1), при которой процесс пиролиза протекает автотермически, сопоставимы с [22]. Выводы о возможности автотермического протекания процесса переработки и достаточности тепловыделения продуктов для покрытия собственных тепловых затрат подтверждаются результатами в работах [23, 24].

Выводы

1. Использование теплоты от разложения органической массы топлива и теплоты от сжигания побочных продуктов термической переработки позволяет полностью покрыть тепловые нужды производства твердого композитного топлива из торфа, бурого угля и древесных опилок. Производство топлива из сапропеля требует покрытия части тепловых затрат за счет внешних источников.
2. Низкотемпературный пиролиз исследуемого низкосортного сырья может протекать в автотермическом режиме за счет тепла от разложения органической массы при условии, что влажность сырья на входе в реактор не будет превышать следующих значений: для торфа – 35 %, для исследованного бурого угля – 54 %, для опилок – 37 %. Для этого необходимо организовать предварительную сушку исходного сырья. Низкое значение теплоты разложения органической массы озерного сапропеля не позволяет организовать автотермическое протекание его термической переработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50124 (мол_нр).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popel' O.S., Reutov B.F., Antropov A.P. Prospective lines of using renewable energy sources in centralized and independent power systems // *Thermal engineering*. – 2010. – V. 57. – P. 909–918.
2. Fortov V.E., Popel' O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia // *Thermal engineering*. – 2014. – V. 61. – P. 389–398.
3. Competitiveness assessment of the biomass power generation industry in China: A five forces model study / Z.-Y. Zhao, J. Zuo, P.-H. Wu, H. Yan, G. Zillante // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 89. – P. 144–153.
4. Беляев А.А. Сжигание высокозольного топлива и возможности его использования на ТЭС // *Химия твердого топлива*. – 2005. – № 1. – С. 44–53.
5. Боднар Л.А., Ткаченко С.И., Дахновская О.В. Проблемы сжигания низкосортного топлива в котлах малой мощности // *Научные труды Винницкого национального технического университета*. – 2012. – № 4. – С. 1–7.
6. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures / A.D. Uchitel', M.V. Kormer, V.P. Lyalyuk, I.A. Lyakhova, E.O. Shmel'tser, Y.I. Vititnev // *Coke and Chemistry*. – 2013. – V. 56. – P. 167–172.
7. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor // *Coke and chemistry*. – 2013. – V. 56. – P. 466–469.
8. Каталитическое сжигание битуминозного песка и сланцев с различным содержанием керогена / А.Д. Симонов, Н.А. Языков, Ю.В. Дубинин, А.С. Афлятунов, В.А. Яковлев, В.Н. Пармон // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2013. – № 4–2. – С. 52–60.
9. Rokni M. Biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell and Stirling engine // *Energy*. – 2014. – V. 77. – P. 6–18.
10. Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – V. 48. – P. 9852–9858.
11. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal-water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 152. – P. 22–33.
12. Sánchez F., San Miguel G. Improved fuel properties of whole table olive stones via pyrolytic processing // *Biomass and Bioenergy*. – 2016. – V. 92. – P. 1–11.
13. Клименко А.В., Зорин В.М. Теплоэнергетика и теплотехника: общие вопросы. – М.: МЭИ, 1999. – 528 с.
14. Теплотехнология переработки низкосортного топлива в высококалорийные топливные брикеты / Р.Б. Табакаев, А.В. Казаков, А.С. Загорин, И.Г. Черемисин // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2014. – № 6. – С. 29–33.
15. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Загорин А.С. Термическое обогащение низкосортного твердого топлива // *Химия твердого топлива*. – 2015. – № 5. – С. 3–9.
16. Казаков А.В., Табакаев Р.Б., Плахова Т.М. Влияние связующих веществ на прочностные свойства топливных брикетов из торфа // *Теплофизические основы энергетических технологий: сб. научных трудов II Всероссийской научно-практ. конф.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 222–225.
17. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Загорин А.С. Твёрдое композитное топливо из низкосортного сырья (технологический аспект) // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – № 4. – С. 56–64.
18. Васильев А.В., Антропов Г.В., Сизоненко А.А. Сравнительный анализ паровых и водогрейных котлов для промышленных и отопительных котельных // *Промышленная энергетика*. – 2003. – № 9. – С. 18–23.
19. Верес А.А., Носова Т.В., Малов А.В. Перспективы применения блочных котельных с использованием в качестве источника теплоснабжения водогрейных жаротрубных котлов «Турботерм-Гарант» // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2010. – № 4. – С. 27–28.
20. Experimental analysis of fouling rates in two small-scale domestic boilers / Patiño D., Crespo B., Porteiro J. Míguez J.L. // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 100. – P. 849–860.
21. Колотушкин В.И. Справочная книжка торфяника. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
22. Кулеш Р.Н., Субботин А.Н. Экспериментальное исследование параметров зажигания торфа в условиях его промышленного складирования // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 15–20.
23. Wang L.-Q., Chen Z.-S. Gas generation by co-gasification of biomass and coal in an autothermal fluidized bed gasifier // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – V. 59. – P. 278–282.
24. Складнев Е.В., Балабанова М.Ю., Игнатьева Н.Н. Комплексная переработка целлюлозосодержащих отходов птицефабрик и сахарного производства // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2015. – № 3. – С. 136–140.

Поступила 27.06.2016 г.

Информация об авторах

Табакаев Р.Б., кандидат технических наук, инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Казаков А.В., кандидат технических наук, доцент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 662.815.4

ASSESSMENT OF THERMAL ENERGY USE IN TECHNIQUE OF PRODUCING SOLID COMPOSITE FUELS FROM LOW-GRADE RAW MATERIALS

Roman B. Tabakaev¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Alexander V. Kazakov¹,
kazakov@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is conditioned by the tendency of power engineering focus on renewable energy sources owing to the need to use efficiently the traditional organic resources. The paper considers low-grade fuel (peat, sawdust and sapropel) and brown coal as one of the most requested renewable energy resources in Russia. The heat-technology processing into solid composite fuel is selected as the method to enrich this resource.

The main aim of the research is to assess energy use for producing solid composite fuel from low-grade raw material by the example of heat-technology developed by the authors.

The methods used in the research. Thermotechnical characteristics of low-grade fuels were determined by the standard methods GOST R 52911–2013, 55661–2013 and 55660–2013. Calorific value was studied using a bomb calorimeter ABK-1 according to GOST 147–2013. The methods of material and heat balances were used in assessing thermal costs. The reliability of the results was confirmed by comparing them with the results of other investigations.

Results. Using heat of fuel organic mass decomposition and heat of combustion of thermal-processing by-products allowed covering completely heating needs for producing solid composite fuel from peat, brown coal and sawdust. When treating sapropel a part of heat input should be covered by external sources. Low-temperature pyrolysis of low-grade raw material may take place autothermally owing to heat of organic mass decomposition. In this case it is necessary that the moisture of raw materials at the reactor input was lower than the following values: for peat – 35 %, for the investigated brown coal – 54 %, for sawdust – 37 %. Low value of heat of lake sapropel organic decomposition does not allow organizing autothermal heat-processing

Key words:

Low-grade raw materials, solid composite fuel, heat-technology, autothermal pyrolysis, assessment of thermal processing costs.

The research was financially supported by the RFBR in scientific project no. 16–38–50124 (мол_нр).

REFERENCES

- Popel' O.S., Reutov B.F., Antropov A.P. Prospective lines of using renewable energy sources in centralized and independent power systems. *Thermal engineering*, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 909–918.
- Fortov V.E., Popel' O.S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 389–398.
- Zhao Z.-Y., Zuo J., Wu P.-H., Yan, H., Zillante G. Competitive-ness assessment of the biomass power generation industry in China: a five forces model study. *Renewable Energy*, 2016, vol. 89, pp. 144–153.
- Belyaev A.A. Combustion of high-ash fuel and the possibility of its utilization in heat-and-power plants. *Solid Fuel Chemistry*, 2005, vol. 39, no. 1, pp. 39–47. In Rus.
- Bodnar L., Tkachenko S., Dakhnovska O. Problems of low-grade fuel burning in low capacity boilers. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2012, no. 4, pp. 1–7. In Rus.
- Uchitel' A.D., Kormer M.V., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Shmel'tser E.O., Vititnev Y.I. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures. *Coke and Chemistry*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 167–172.
- Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor. *Coke and chemistry*, 2013, vol. 56, no. 12, pp. 466–469.
- Simonov A.D., Yazykov N.A., Dubinin Y.V., Aflyatunov A.S., Yakovlev V.A., Parmon V.N. Catalytic combustion of tar sand and slates with different kerogen content. *International scientific journal for alternative energy and ecology*, 2013, vol. 124, no. 4–2, pp. 52–60. In Rus.
- Rokni M. Biomass gasification integrated with a solid oxide fuel cell and Stirling engine. *Energy*, 2014, vol. 77, pp. 6–18.
- Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 16, pp. 9852–9858.
- Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal-water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 152, pp. 22–33.
- Sánchez F., San Miguel G. Improved fuel properties of whole table olive stones via pyrolytic processing. *Biomass and Bioenergy*, 2016, vol. 92, pp. 1–11.
- Klimenko A.V., Zorin V.M. *Teplotekhnika i teplotekhnika: obshchie voprosy* [Thermal Engineering and Heat Engineering: general issues]. Moscow, Publishing of Moscow Power Engineering Institute, 1999. 528 p.
- Tabakaev R.B., Zavorin A.S., Kazakov A.V., Cheremisin I.G. Thermotechnologi processing of low-grade fuel in high-calorie fuel briquettes. *Energy Saving and Water Treatment*, 2014, vol. 92, no. 6, pp. 29–33. In Rus.
- Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Thermal pretreatment of low-grade solid fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 5, pp. 267–273. In Rus.
- Kazakov A.V., Tabakaev R.B., Plakhova T.M. Vliyanie svyazuyushchikh veshchestv na prochnostnye svoystva toplivnykh briкетов iz torfa [Effect of binder on strength properties of peat fuel

- briquettes]. *Trudy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy* [Proc. 2nd All-Russian scientific-practical conference. Thermal energy technology basics]. Tomsk, 2011. pp. 222–225.
17. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Solid composite fuel from low-grade raw (technological aspect). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 56–64. In Rus.
 18. Vasiliev A.V., Antropov G.V., Sizonenko A.A. Sravnitelny analiz parovykh i vodogreynykh kotlov dlya promyshlennykh i otopitelnykh kotelnykh [Comparative analysis of steam and hot water boilers for industrial and heating boiler houses]. *Industrial power*, 2003, no. 9, pp. 18–23.
 19. Veres A.A., Nosova T.V., Malov A.V. Prospects of block boiler using as a source of heating hot water boilers fire-tube «Turboterm garantor». *Energy Saving and Water Treatment*, 2010, no. 4, pp. 27–28. In Rus.
 20. Patiño D., Crespo B., Porteiro J., Míguez J.L. Experimental analysis of fouling rates in two small-scale domestic boilers. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 849–860.
 21. Kolotushkin V.I. *Spravochnaya knizhka torfyanika* [Reference book of peat bog]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 208 p.
 22. Kulesh R.N., Subbotin A.N. Experimental investigation of peat ignition parameters in terms of its industrial storage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 4, pp. 15–20. In Rus.
 23. Wang L.-Q., Chen Z.-S. Gas generation by co-gasification of biomass and coal in an autothermal fluidized bed gasifier. *Applied Thermal Engineering*, 2013, vol. 59, pp. 278–282.
 24. Sklyadnev E.V., Balabanova M.Yu., Ignatyeva N.N. Complex processing of cellulose waste from poultry and sugar production. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2015, vol. 65, no. 3, pp. 136–140. In Rus.

Received: 27 June 2016.

Information about the authors

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander V. Kazakov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.