

УДК 662.815.4

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ ИЗ ТОРФА

А.С. Заворин, А.В. Казаков, Р.Б. Табакаев

Томский политехнический университет  
E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

*Приводятся результаты экспериментальных исследований топливных брикетов из торфа, предназначенных для сжигания в слоевых топочных устройствах. Приведены теплотехнические и прочностные характеристики, элементный состав полученных брикетов.*

### **Ключевые слова:**

*Энергоресурсы, торф, топливные брикеты, теплотехнические характеристики, элементный состав, пиролиз, полукокс, пиролизный конденсат, материальный баланс.*

### **Key words:**

*Energy resources, peat, fuel briquettes, thermotechnical characteristics, elemental composition, pyrolysis, semicoke, pyrolysis condensate, material balance.*

### **Введение**

В соответствии с программой «Энергетическая стратегия России на период до 2020 г.» плановый объем ввода новых генерирующих мощностей составляет почти 41 ГВт [1], что, соответственно, влечет за собой рост потребности в сырьевых ресурсах. В свою очередь, прироста потребления природного газа тепловыми электростанциями по сравнению с современным уровнем не ожидается, а даже, наоборот, существует намерение ОАО «Газпром» снизить в ближайшие годы объем поставок газа для электроэнергетики РФ [2]. Напряженная ситуация с добычей угля (взрывы и последующие долгосрочные восстановительные работы на ряде шахт, перегруженность железнодорожных путей, приводящая к срыву сроков поставки угля), негативное общественное мнение по ядерной энергетике (аварии на Чернобыльской АЭС, «Фукусима-1»), огромные затраты и экологические последствия строительства ГЭС создают сложности не только в выполнении программы развития, но и актуализируют вопрос энергетической безопасности России.

Сложившаяся ситуация подводит к необходимости широкого использования местных, прежде всего возобновляемых, энергоресурсов, таких как торф, запасы которого в нашей стране составляют более 28,7 млрд т [3]. Располагаясь на поверхности земли, тем самым сводя до минимума затраты на добычу и транспортировку, торф, однако, практически не востребован в энергетике. Данный факт прежде всего обусловлен его низкими теплотехническими характеристиками (высокой влажностью, низкой теплотой сгорания), трудностями при транспортировке (торф слеживается, слипается, смерзается, затрудняя разгрузку).

Выполненные ранее работы по переработке торфа [4–6] не нашли применения в промышленности, вероятно, потому, что в способах переработки использовалось дорогое и энергозатратное прессовое оборудование, завышающее себестоимость продукции.

Задача разработки технологии, которая смогла бы задействовать торф на топливно-энергетическом рынке, является актуальной.

### **Основные положения технологии**

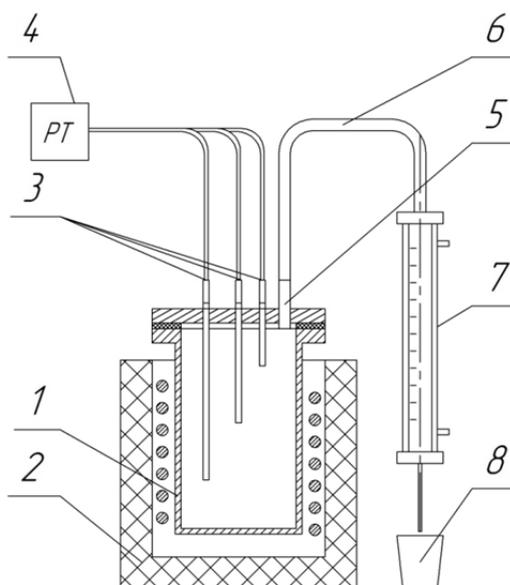
Технологический процесс, основанный на термической деструкции твердого топлива, состоит из трех этапов. На первом этапе торф подвергается пиролизу при температуре до 400 °С, что позволяет использовать для оборудования углеродистые стали обыкновенного качества. В результате термообработки происходит разложение торфа на полукокс, пиролизный конденсат и полукоксый газ, который, являясь побочным продуктом технологии, может использоваться непосредственно как топливо для осуществления процесса пиролиза, тем самым снижая затраты на собственные нужды. На втором этапе полукокс измельчается, смешивается с пиролизным конденсатом, образуя формовочную смесь. Из полученной смеси полукокса и пиролизного конденсата формируется брикетный сырец. Заключительным этапом является сушка брикетного сырья при температуре 105...110 °С с последующим отверждением при температуре 20 °С.

### **Экспериментальная установка для термообработки**

Для осуществления термической обработки торфа разработана экспериментальная установка (рис. 1). Через загрузочное отверстие реактора – 1 производится загрузка торфа. Нагрев реактора осуществляется по периметру при помощи электронагревателя – 2, температура в слое торфа фиксируется при помощи системы термомпар – 3 и регистрирующего устройства – 4. Получаемые летучие продукты пиролиза (пары пирогенетической влаги и смолы, полукоксый газ) отводятся через газоотводящий патрубок – 5 по термостойкому шлангу – 6 в холодильник – 7, где полукоксый газ охлаждается, пары пирогенетической влаги и смолы конденсируются, образуя пиролизный конденсат, который собирается в емкости для сбос-



а



б

**Рис. 1.** Вид в сборе (а) установки для пиролиза низкосортного сырья и ее принципиальная схема (б): 1) реактор, 2) электронагреватель, 3) система термопар, 4) регистратор температуры, 5) патрубок для отвода летучих продуктов пиролиза, 6) термостойкий шланг, 7) холодильник, 8) емкость для сбора конденсата

ра конденсата – 8. Полукоксовый газ после прохождения холодильника направляется на анализ.

Полукокк извлекается из реактора после проведения эксперимента и остывания реактора.

**Исходное сырье**

Исследуемые образцы представляют торф Суховского и Аркадьевского месторождений Томской области, добытый с глубины 0,5...1 м. Теплотехнические характеристики и элементный состав этих торфов приведены в табл. 1 и 2. Месторождения полностью сложены одним типом залежи – низинным, относятся к группе среднеразложившихся торфов (степень разложения суховского торфа – 27 %, аркадьевского – 30 % [7]). Величина естественной влажности (38...60 %) объясняется тем, что месторождения были осушены под промышленное использование.

Торф Суховского месторождения коричневого цвета, уплотненный, характеризуется высоким выходом летучих, высокой влажностью, умеренной зольностью, что в совокупности приводит к низкой теплоте сгорания. Торф Аркадьевского месторождения черного цвета, рыхлый, имеет высокий выход летучих, умеренную влажность и зольность, как следствие, умеренную теплоту сгорания.

Анализируя эти характеристики, закономерно прийти к выводу, что исследуемые разновидности торфа Томской области, несмотря на предварительную осушку месторождений, в естественном состоянии не являются перспективным топливом для использования в энергетике, а могут рассматриваться как технологическое сырьё (производство препаратов для животноводства, защита растений, повышение плодородия почв и др. [3]).

**Таблица 1.** Теплотехнические характеристики образцов торфа Суховского и Аркадьевского месторождений

| Теплотехнические характеристики          | Торф      |              |
|--|-----------|--------------|
|  | Суховской | Аркадьевский |
| Влажность на рабочую массу $W_{i,r}$ , % | 59,6      | 38,2         |
| Зольность на сухую массу $A^d$ , %       | 39,5      | 31,5         |
| Зольность на рабочую массу $A'_r$ , %    | 15,9      | 19,5         |
| Выход летучих веществ $V^{daf}$ , %      | 69,3      | 71,0         |
| Теплота сгорания $Q'_i$ , МДж/кг         | 1,7       | 5,5          |

**Таблица 2.** Элементный состав торфа Суховского и Аркадьевского месторождений

| Торф         | Элементный состав на горючую массу, % |           |           |           |           |
|--------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|              | $C^{daf}$                             | $H^{daf}$ | $N^{daf}$ | $S^{daf}$ | $O^{daf}$ |
| Суховской    | 41,85                                 | 4,03      | 2,13      | 0,15      | 51,84     |
| Аркадьевский | 45,81                                 | 4,52      | 2,91      | 0,15      | 46,61     |

**Результаты термообработки торфа**

Термическая обработка исследуемых торфов происходила при одинаковой мощности нагревателя и температуре 400 °С. Массовый выход полученных продуктов пиролиза и их теплотворная способность приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

**Таблица 3.** Материальный баланс термической переработки торфов

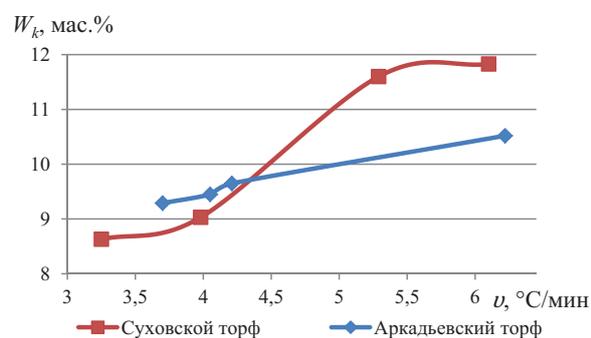
| Торф         | Выход продуктов пиролиза на сухую массу, % |                  |                      |
|--------------|--|------------------|----------------------|
|              | Полукокк                                   | Полукоксовый газ | Пиролизный конденсат |
| Суховской    | 70,37                                      | 17,80            | 11,83                |
| Аркадьевский | 70,63                                      | 18,85            | 10,52                |

Образующийся полукокк представляет собой хрупкий и сухой пористый материал с повышенным содержанием углерода и теплотой сгорания порядка 10 МДж/кг. Пиролизный конденсат – вязкая масса, темно-коричневого цвета, с хорошими клейкими свойствами и высокой теплотой сгорания 27...28 МДж/кг. Полукоксовый газ содержит в своем составе такие горючие компоненты как  $H_2$ ,  $CO$ ,  $C_nH_m$ , в результате чего его теплота сгорания достигает 8...11 МДж/м<sup>3</sup>.

**Таблица 4.** Теплотехнические характеристики продуктов пиролиза торфа

| Теплотехнические характеристики    | Суховской торф |                      | Аркадьевский торф |                      |
|------------------------------------|----------------|----------------------|-------------------|----------------------|
|                                    | Полу-кокк      | Пиролизный конденсат | Полу-кокк         | Пиролизный конденсат |
| Зольность на сухую массу $A^d$ , % | 50,0           | 0,0                  | 42,0              | 0,0                  |
| Выход летучих веществ $V^{st}$ , % | 35,4           | 100,0                | 23,3              | 100,0                |
| Теплота сгорания $Q_i$ , МДж/кг    | 9,8            | 27,1                 | 10,0              | 28,0                 |

Поиск оптимальных параметров термической обработки с целью увеличить выход наиболее ценного продукта для технологического использования – пиролизного конденсата – проведен путем экспериментов при различной скорости нагрева (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость массового выхода пиролизного конденсата  $W_k$  от скорости нагрева торфа  $v$  (сухая масса)

Существенного увеличения в выходе пиролизного конденсата удается достичь только для торфа Суховского месторождения. Изменение в выходе пиролизного конденсата для торфа Аркадьевского месторождения попадает в интервал допустимой погрешности.

#### Результаты формирования брикетного сырца

Полукокк, полученный при термообработке торфа, измельчался до размеров частиц не более 1 мм, после чего смешивался с пиролизным конденсатом в соотношении 1:1 (по массе), которое является оптимальным для формовки. Последовательное увеличение концентрации полукокка до 60 % приводит к тому, что формовочная смесь становится слишком сухой, связующего вещества не хватает и брикетный сырец не формируется без

приложения усилий пресса. Увеличение содержания пиролизного конденсата до 60 %, наоборот, делает смесь слишком вязкой, не позволяя придать брикетному сырцу устойчивую форму.

Теплотехнические характеристики полученных брикетов приведены в табл. 5.

**Таблица 5.** Теплотехнические характеристики брикетов из продуктов термической обработки торфов Суховского и Аркадьевского месторождений [8]

| Теплотехнические характеристики      | Брикет    |              |
|--------------------------------------|-----------|--------------|
|                                      | суховской | аркадьевский |
| Влажность на рабочую массу $W_i$ , % | 0,0       | 0,0          |
| Зольность на сухую массу $A^d$ , %   | 32,2      | 48,0         |
| Выход летучих веществ $V^{st}$ , %   | 82,6      | 89,6         |
| Теплота сгорания $Q_i$ , МДж/кг      | 17,7      | 14,0         |

Полученные брикеты за счет содержания в своем составе пиролизного конденсата обладают влагостойкостью. Испытания на влагостойкость проводились по ГОСТ 21290-75, согласно которому брикеты взвешивались, помещались в сосуд с водой, где выдерживались в течение суток, после чего брикеты вынимались, выдерживались на воздухе (две минуты) для стекания воды и взвешивались. Изменения массы не происходило, что свидетельствует о высокой влагостойкости брикетов.

На пригодность использования в качестве связующего вещества были исследованы также декстрины – один из наиболее дешевых связующих, используемых в промышленности, и бумага, пропитанная пиролизным конденсатом.

Декстрин является продуктом термической переработки картофельного или кукурузного крахмала, имеет, в зависимости от сорта, белую, палевою или желтую окраску, при растворении в воде образует клейстер. Формовочную смесь получали путем смешивания пиролизного конденсата с декстрином, подогревая её до температуры 50...70 °C. Исследовались формовочные смеси с 5, 10, 15, 20, 30%-м содержанием декстрина (по массе).

Использование 5%-го раствора в качестве связующего позволило задействовать полностью весь полукокк, как в случае с суховским торфом, так и с аркадьевским. Формовочная смесь получилась однородной, клейкой. Она легко поддается формовке, сохраняет принятую форму. Соответствующие результаты показало применение и 10%-го раствора.

Более концентрированные растворы декстрина не смогли связать весь полукокк в формовочную смесь. Смесь получалась сухой, неоднородной, состоящей из слоев, что негативно сказывалось на формировании брикетного сырца, заставляя затрачивать дополнительные усилия для придания формы.

Бумага пропитывалась пиролизным конденсатом и добавлялась при формовке брикетов из полукокка и пиролизного конденсата. Были сформированы брикеты из полукокка торфа Суховского

месторождения и формовочной смеси с 10%-м содержанием декстрина, а также брикет с добавлением пропитанной бумаги (табл. 6).

**Таблица 6.** Теплотехнические характеристики брикетов из торфяного полукокса, полученные с добавлением наполнителей к пиролизному конденсату [8]

| Теплотехнические характеристики      | Брикет суховской |           |
|--------------------------------------|------------------|-----------|
|                                      | с декстрином     | с бумагой |
| Влажность на рабочую массу $W_r$ , % | 0,0              | 0,0       |
| Зольность на сухую массу $A_d$ , %   | 38,4             | 27,3      |
| Выход летучих веществ $V^{lat}$ , %  | 51,3             | 93,1      |
| Теплота сгорания $Q_r$ , МДж/кг      | 8,47             | 21,64     |

Добавление пропитанной бумаги при формовке брикета позволило увеличить теплоту сгорания брикета из продуктов пиролиза торфа Суховского месторождения с 17,7 до 21,64 МДж/кг, при этом брикет не утратил свойства влагостойкости. Брикет с содержанием декстрина имеет меньшую теплоту сгорания, к тому же не обладает влагостойкостью.

#### Испытания брикетов на прочность

Испытания на механическую прочность топливных брикетов производились по ГОСТ 21289-75 «Брикеты угольные. Методы определения механической прочности». Сущность данного метода заключается в сжатии брикета с помощью пресса для определения максимальной нагрузки, которую сможет выдержать брикет. Вторым испытанием является сбрасывание брикетов на металлическую плиту с высоты 1,5 м, после чего сброшенные брикеты собирались, просеивались на сите и взвешивались. Далее составляется отношение массы брикета после сбрасывания к начальной.

Результаты испытаний показали, что механической прочностью при сбрасывании обладают все брикеты, устойчивость к разрушению при падении составила 100 % для всех образцов исследуемых брикетов. Максимальная нагрузка на сжатие суховского брикета составила 0,400 МПа, аркадьевского – 0,110 МПа, суховского с декстрином – 0,006 МПа, суховского с бумагой – 0,430 МПа [9].

Согласно ГОСТ 9963-84 «Брикеты торфяные для коммунально-бытовых нужд. Технические требования» к брикетам предъявлены требования по механической прочности при сбрасывании – не менее 95 %. Полученные выше результаты определения прочностных характеристик показали, что все полученные брикеты обладают требуемой меха-

нической прочностью. Брикеты из продуктов пиролиза суховского торфа обладают большим сопротивлением на сжатие, чем брикеты из торфа аркадьевского. Также при сравнении максимальной нагрузки брикетов можно заметить, что добавление пропитанной бумаги способствовало увеличению механической прочности. Брикет суховской с декстрином показал наихудший результат. При этом внешняя поверхность брикета после сушки в сушильном шкафу при температуре 105 °С покрылась мелкими трещинками, что, вероятно, свидетельствует о необходимости понижения температуры и скорости сушки.

Влияние температуры сушки на прочность брикета было исследовано на полукоксе торфа Суховского месторождения и формовочной смеси с 10%-м содержанием декстрина. Максимальная нагрузка на сжатие брикета с декстрином, высушенного при температуре 105 °С, составила 0,006 МПа, при 50 °С – 0,265 МПа, при 20 °С – 0,460 МПа.

Полученные результаты показывают, что наибольшей механической прочностью на сжатие по сравнению со всеми описанными брикетами обладают брикеты с декстрином, высушенные при комнатной температуре (20 °С).

#### Выводы

1. Предложена и апробирована на примере торфов Томской области технология переработки торфа в топливные брикеты, предназначенные для использования в топливосжигающих устройствах слоевого типа.
2. Экспериментально исследована возможность использования наполняющих добавок к связующему в виде дешевых утилизируемых материалов.
3. Теплота сгорания полученных брикетов составляет 8,47...21,64 МДж/кг, что в 2,5...12,7 раз превосходит теплоту сгорания исходных топлив.
4. Наиболее перспективной технологией является получение брикета с добавлением пропитанной бумаги. Он обладает высокими прочностными характеристиками и самой высокой теплотой сгорания, небольшой зольностью и высоким выходом летучих. К тому же наличие влагостойкости существенно сокращает затраты на хранение и подготовку топлива для котельных.

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года». Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации № 1234-р от 28 августа 2003 года // Официальный сайт Министерства промышленности и торговли РФ. [2004–2010]. Дата обновления: 06.10.2005. URL: <http://www.minprom.gov.ru/docs/strateg/1> (дата обращения: 24.10.2011).
2. Стратегия в области электроэнергетики // Официальный сайт ОАО «Газпром». [2003–2011]. Дата обновления: 24.10.2011. URL: <http://www.gazprom.ru/strategy/energetics/> (дата обращения: 24.10.2011).
3. Томская область. Общая информация о регионе // Официальный интернет портал Администрации Томской области [1998–2011]. Дата обновления: 24.10.2011. URL: [http://tomsk.gov.ru/gu/tomsk\\_region/](http://tomsk.gov.ru/gu/tomsk_region/) (дата обращения: 24.10.2011).
4. Смольянинов С.И., Маслов С.Г. Термобрикети́рование торфа. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 108 с.
5. Булышко М.Г. Иванов В.Н. Сарматов М.И. Брикетирование торфа. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 303 с.
6. Способ изготовления брикетного топлива: пат. 2375414 Рос. Федерация. № 2008135644/04; заявл. 02.09.08; опубл. 10.12.09.
7. Инишева Л.И. Торфяные ресурсы Томской области и их использование. – Новосибирск: Б.и., 1995. – 88 с.
8. Бардашова Н.В., Беккер Е.Г. Исследование топливных характеристик брикетного образца // Современные техника и технологии: Сб. трудов XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х т. – Т. 3. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 189–190.
9. 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.

Поступила 20.02.2012 г.

УДК 662.76

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ

Г.В. Кузнецов, Р.Н. Кулеш, М. Полсонгкрам

Томский политехнический университет  
E-mail: marisha@tpu.ru

*Проведены экспериментальные исследования закономерностей термического разложения шести разновидностей древесной биомассы в диапазоне изменения температур до 600 °С при различных скоростях нагрева материалов. Установлено, что выход твёрдых (углистое вещество), жидких (биотопливо) и газообразных (биогаз) продуктов почти не зависит от темпа нагрева. Полученные результаты являются основой для разработки мероприятий по повышению энергоэффективности технологических процессов термической конверсии биомассы. Установлена общность зависимостей глубины термических превращений от температуры и темпа нагрева, существенно отличающихся по своей структуре, условиям роста и исходным характеристикам разновидностей древесной биомассы.*

### Ключевые слова:

*Медленный пиролиз, древесная биомасса, термическое разложение, темп нагрева, углистое вещество, биотопливо, биогаз.*

### Key words:

*Slow pyrolysis, woody biomass, thermal decomposition, rate of heating carbonaceous material, biofuel, biogas.*

### Введение

Известно [1], что использование древесной биомассы является, возможно, самым перспективным направлением развития биоэнергетики, которая, в свою очередь, небезосновательно считается многими экспертами [2, 3] самым реальным возобновляемым источником электрической и тепловой энергии для многих территорий. Кроме того древесная биомасса является хорошим сырьем для получения жидкого биотоплива, биогаза и углистого вещества, диапазон возможных областей применения которого очень высок [1]. Но, несмотря на повышенное (по сравнению с другими энергоресурсами) внимание исследователей и инженеров на многих континентах [2–5], до настоящего времени нет примеров широкомасштабного применения древесной биомассы как непосредственно в энергетике, так и в производстве вторичных энергоносителей (биотопливо, биогаз).

Скорее всего, такое состояние работ по прямому или косвенному использованию древесины в энергетике обусловлено объективными причинами, основной из которых является отсутствие достаточной для промышленной реализации научно-технической проработки процессов термической конверсии такой биомассы. Так, например, не выполнены до настоящего времени оценки энергоэффективности технологий медленного пиролиза древесной биомассы в наиболее типичных диапазонах изменения температур. Установлены по группе типичных разновидностей этого сырья основные закономерности процессов термического разложения [6, 7], но не изучено влияние темпа нагрева биомассы на состояние конечных продуктов термической конверсии.

Известно [2], что скорость нагрева – один из параметров, определяющих выход продуктов во время процесса пиролиза. При низкой скорости