

УДК 662.815.4

НИЗКОСОРТНОЕ ТОПЛИВО ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Табакаев Роман Борисович,

инженер каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Хаустов Сергей Александрович,

ассистент каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: khaustovSA@tpu.ru

Черкашина Галина Анатольевна,

инженер каф. парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета, Россия, 634050,
г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: cherkashina@tpu.ru

Казаков Александр Владимирович,

канд. техн. наук, доцент каф. парогенераторостроения и парогенераторных
установок Энергетического института Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: kazakov@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью замещения привозных энергоресурсов в топливно-энергетических балансах регионов местными низкосортными топливами.

Цель работы: определение теплотехнических свойств местных топлив Томской области и оценка целесообразности их энергетического использования.

Методы исследования. Теплотехнические характеристики низкосортного топлива определены по стандартным методикам ГОСТ Р 52911–2008, 11022–95 и 6382–2001. Значения теплоты сгорания и элементный состав установлены при помощи бомбового калориметра АБК-1 и анализатора Vario micro cube. Состав минеральной части золы исследован согласно ГОСТ 10538–87. Для оценки эффективности сжигания синтез-газа, полученного низкотемпературной каталитической конверсией сырья, использовалось математическое моделирование. При этом для математического описания протекания реакций горения в трехмерных спутных потоках синтез-газа и воздуха была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Для численного моделирования протекания химических реакций в условиях турбулентного потока применена апробированная EBU-модель Сполдинга. Пульсационные (турбулентные) характеристики потока рассчитывались с использованием широко распространенной двухпараметрической « k - ε » модели. Расчет теплообмена излучением производился методом сферических гармоник в первом приближении.

Результаты. Рассмотренные виды низкосортного топлива Томской области в сыром виде из-за высокой величины влажности и зольности малоприспособлены для энергетического использования и не способны на данный момент заместить привозной уголь в топливно-энергетическом балансе региона. Перспективным направлением переработки топлив является низкотемпературная каталитическая конверсия, позволяющая получать из исходного твердого сырья синтез-газ, обогащенный водородом. Полученный синтез-газ может эффективно использоваться в энергетике для получения тепла и электроэнергии без дорогостоящей модернизации газового оборудования.

Ключевые слова:

Теплоэнергетика, низкосортное топливо, топливно-энергетический баланс, теплотехнические характеристики, минеральные составляющие, энергетическое использование, теплотехнологическая переработка.

Введение

Современное состояние энергетики, представленное в «Энергетической стратегии России до 2030 года» [1], показывает, что доля привозных энергоресурсов в региональных топливно-энергетических балансах составляет около 45 %. При этом затраты на транспортировку этих ресурсов за-

кладываются в себестоимость продукции, увеличивая конечную цену топлива для энергетических объектов в несколько раз [2–5], что в результате отражается на величине тарифов тепло- и электро-снабжения.

В связи с этим в [1] особое внимание уделяется использованию местных ресурсов низкосортного

топлива (торфа, биомассы, городских бытовых отходов). Для этого предусмотрена модернизация существующих и ввод новых тепловых электростанций и котельных, работающих на таком виде топлива. Реализация указанных мер должна привести к снижению доли привозного топлива в 1,3–1,5 раза.

Эффективное энергетическое использование местных низкосортных топлив требует подробного изучения их теплотехнических характеристик и минеральной составляющей. Эти данные необходимы для выбора способа сжигания и проектирования энергетического оборудования, реализующего выбранный способ.

Целью работы ставится определение теплотехнических свойств местных топлив Томской области и оценка целесообразности их энергетического использования.

Исследуемое сырье

Томская область богата запасами торфа (29,34 млрд т), бурого угля (75,7 млрд т) и древесины (2,7 млрд м³) [6, 7]. Авторами исследованы следующие месторождения низкосортного топлива: торфяные – Суховское, Аркадьевское и Кандинское (рис. 1), бурого угля – Таловское, а также рассмотрены отходы различных древесных пород лесоперерабатывающего комбината «Партнер-Томск».

Месторождения Суховское и Аркадьевское расположены вблизи крупных по меркам Томской области населенных пунктов: Суховское – в 12 км на северо-восток от села Бакчар, Аркадьевское – в 4 км к северо-западу от села Кожевниково. Эти месторождения образованы низинной залежью торфа в зоне осоково-гипновых болот. В период 1986–1995 гг. на месторождениях велась промышленная разработка, для чего рядом с ними были построены высокомеханизированные торфодобывающие предприятия, прекратившие свое существование в конце 90-х гг. [8]. Кандинское месторождение, находящееся в 19 км от города Томска, также сформировано низинной залежью торфа. В настоящее время на месторождении ведется добыча глины и песчано-гравийной смеси, находящейся под слоем торфа. Торф складывается без практического применения.

Таловское месторождение бурого угля находится в 24–50 км на юго-восток от города Томска. Месторождение оценивают как относительно крупное с прогнозными ресурсами угля марки Б1 около 3,6 млрд т (ежегодно добыча может составить 10–15 млн т) [2].

Учитывая особенности естественного восполнения ресурсов низкосортного топлива, географического расположения залежей (удалены от железнодорожного сообщения и крупных транспортных магистралей) и добычи, разработка рассматриваемых месторождений рациональна лишь для нужд объектов малой энергетики, расположенных в относительной близости. Соответственно оценка це-

лесообразности их энергетического использования может осуществляться применительно к объектам малой энергетики, характеризующимся по большей части наличием топливосжигающего оборудования слоевого типа или жаротрубных газовых котлов.

По стандартным методикам ГОСТ Р 52911–2008, 11022–95 и 6382–2001 определены теплотехнические характеристики рассматриваемого сырья (табл. 1). Значения теплоты сгорания и элементный состав установлены при помощи бомбового калориметра АБК-1 и анализатора Vario micro cube.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики низкосортных топлив

Table 1. Thermotechnical characteristics of low-grade fuels

Теплотехническая характеристика Thermotechnical characteristic	Торф/Peat			Таловский уголь Talovsky coal	Древесная щепа Wood chip
	Суховской Sukhovskoy	Аркадьевский Arkadyevsky	Кандинский Kandinsky		
Влажность W'_t , % Humidity W'_t , %	59,6	38,2	72,8	51,0	45,0
Зольность на рабочую массу A' , % Ash content per operating weight A' , %	16,0	19,5	2,5	12,7	0,3
Зольность на сухую массу A^d , % Ash content per dry weight A^d , %	39,5	31,5	9,1	25,9	0,6
Выход летучих веществ V^{daf} , % Volatile yield V^{daf} , %	69,3	71,0	71,6	63,2	91,8
Низшая теплота сгорания Q'_i , МДж/кг Low heating value Q'_i , MJ/kg	4,2	7,3	3,1	8,6	9,3
Элементный состав на горючую массу, % Elemental composition per combustible mass, %					
C^{daf}	59,95	51,03	57,52	68,38	50,87
H^{daf}	5,98	6,01	5,61	6,28	6,23
N^{daf}	2,69	4,62	2,17	0,62	0,20
S^{daf}	0,09	0,15	0,15	0,44	следы/ traces
O^{daf}	31,29	38,19	34,55	24,28	42,70

Низкосортные топлива характеризуются высоким значением влажности – от 38 до 73 %. Столь высокое значение позволяет предположить, что сжигание рассматриваемых топлив будет сопровождаться большими затратами, связанными с необходимостью испарения влаги. Стоит отметить, что наличие такого количества влаги существенно ограничивает возможность добычи и транспортировки топлив в зимний период, а в теплое время года способствует его слеживанию и слипанию.

По значению зольности исследуемые пробы можно разбить на 2 группы: высокозольные (суховской и аркадьевский торф, таловский уголь) и

малозольные (кандинский торф и щепа) топлива. Химический состав золы, определенный согласно ГОСТ 10538–87, приведен в табл. 2.

Таблица 2. Состав золы

Table 2. Ash composition

Наименование пробы Sample name	Состав золы на бессульфатную массу, % Ash structure per non-sulfate mass, %					
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ + +TiO ₂	Fe ₂ O ₃	прочее other
Аркадьевский торф Arkadyevsky peat	33,29	26,14	1,35	5,96	10,86	22,40
Суховской торф Sukhovskoy peat	2,45	36,20	0,24	6,73	11,85	42,53
Кандинский торф Kandinsky peat	17,18	38,21	3,17	8,82	5,14	27,48
Таловский уголь Talovsky coal	46,90	12,00	1,20	26,50	12,20	1,20
Древесная щепа Wood chip	53,35	16,39	0,90	8,27	2,66	18,43

Содержание оксидов кальция (CaO) более 13 % в совокупности с высокой долей оксида кремния (SiO₂) в таких высокозольных топливах, как аркадьевский и кандинский торф, указывает на склонность к образованию плотных золовых отложений на поверхностях нагрева в процессе сжигания. Состав минеральной части таловского угля также позволяет прогнозировать повышенную шлаковую способность. Древесная щепа, несмотря на высокое содержание CaO и SiO₂, не рассматривается как шлакующее топливо из-за низкого значения зольности.

Высокое содержание оксидов алюминия и титана в таловском угле свидетельствует о потенциально высоком абразивном износе образующейся при сжигании золы. Учитывая это и склонность угля к шлакованию, при конструировании топливосжигающего оборудования возникает непростая задача по выбору скорости дымовых газов в конвективных поверхностях нагрева.

Довольно внушительный выход летучих веществ (63,2–91,9 %) говорит о высокой реакционной способности топлив и низкой температуре воспламенения, а также указывает на отсутствие термической стойкости органической части. Это является предпосылками к термической переработке сырья в газообразное топливо.

Установленные значения содержания углерода ($C^{daf}=50,87\text{--}68,38\%$) и водорода ($H^{daf}=5,25\text{--}6,28\%$) в топливе обуславливают достаточно высокую теплотворность его горючей массы ($Q^{daf}=18,6\text{--}27,1\text{ МДж/кг}$). Однако высокие значения влажности и зольности сырья приводят к низкому значению теплоты сгорания при пересчете на рабочее состояние, не превышающему 9,3 МДж/кг.

Незначительное содержание серы ($S^{daf}=0,02\text{--}0,44\%$) показывает, что вредное воздействие на окружающую среду выбросами окси-

дов серы при сжигании будет минимальным и не потребует дополнительных затрат на их снижение.

Высокое содержание кислорода ($O^{daf}=24,28\text{--}42,70\%$) характеризует топливо как находящееся на ранних стадиях метаморфизма и указывает на возможность протекания экзотермических реакций при термической переработке в кондиционные топлива. Это утверждение подтверждается экспериментальными данными, полученными при низкотемпературном пиролизе топлива: условная теплота разложения органической массы составила от 1,24 до 3,69 МДж на 1 кг высушенного исходного топлива [9].

Обобщая результаты, можно заключить, что все исследованные топлива в сыром виде из-за высоких эксплуатационных затрат малоприспособлены для сжигания в качестве самостоятельного энергетического топлива. Эти затраты обусловлены высокими значениями влажности и зольности сырья, приводящими к низкой величине теплоты сгорания в пересчете на рабочее состояние и необходимости предварительной сушки. Более того, высокая влажность приводит к проблемам слипаемости и смерзаемости сырья при перевозках в зимний период, требуя дополнительных временных и денежных издержек на обогрев транспортных емкостей. Хрупкость и крошимость сырья являются причиной высокой величины провала при слоевом сжигании.

Теплотехнологическая переработка сырья в кондиционные энергетические продукты

Перечисленные недостатки могут быть устранены посредством теплотехнологической переработки сырья в кондиционные энергетические продукты, такие как твердое композитное [9–14], жидкое [15–18] или газообразное топливо [19–23]. Учитывая преимущества энергетического использования газообразного топлива (возможность автоматизации процесса горения, экологичность, отсутствие абразивного износа поверхностей нагрева и высокая интенсификация теплообмена благодаря более высоким допустимым значениям скоростей потока дымовых газов), авторами рассмотрена переработка низкосортного топлива в газообразное.

В качестве варианта такой переработки принят «Способ получения горючего газа, обогащенного водородом» (патент РФ № 2462503), в котором исходное органическое сырье подвергают низкотемпературной каталитической конверсии (рис. 1), получая при этом водородсодержащее газообразное топливо, называемое синтез-газом. За счёт отсутствия воздушного дутья с введением в зону реагирования перегретого пара и оксидов железа достигается повышенная концентрация водорода при низкой забалластированности газов (табл. 3). Низкие температуры основных процессов (300–500 °C) позволяют менее требовательно подходить к выбору материалов для изготовления энергоустановки.

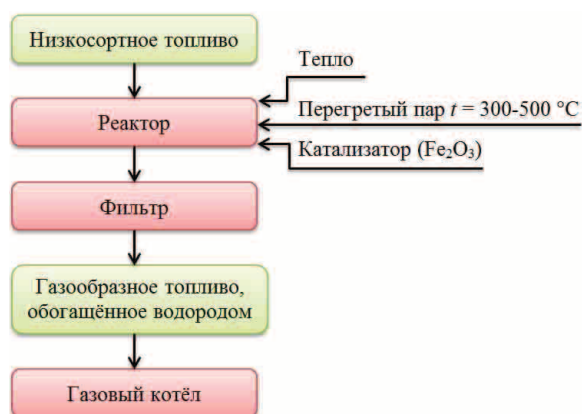


Рис. 1. Схема теплотехнологической переработки низкосортного топлива

Fig. 1. Heat technological processing of low-grade fuel

Таблица 3. Состав синтез-газа, полученного конверсией сухового торфа при различных температурах [24]

Table 3. Structure of syngas obtained by sukhovskoy peat conversion at different temperatures [24]

Температура конверсии, °C Conversion temperature, °C	Компоненты синтез-газа, % Syngas components, %			
	H ₂	CH ₄	CO	Негорючая часть Mineral matter
300	47,5	13,0	9,0	30,5
350	46,0	20,0	5,0	29,0
400	46,5	25,0	6,5	22,0
450	47,5	27,0	7,5	18,0
500	47,5	27,0	9,0	16,5

Исследование сжигания синтез-газа

Несмотря на то, что в настоящее время синтез-газ имеет высокий потенциал использования в энергетике и промышленности, до сих пор не существует серийно выпускаемого оборудования для его использования. Поэтому при проектировании энергоустановок для сжигания синтез-газа нередко возникают вопросы о применимости существующих единиц газового оборудования, разработанных и широко апробированных для сжигания природного газа. Так, например, актуальной задачей является анализ физико-химических процессов в камерах сгорания при работе на синтез-газе, полученном низкотемпературной каталитической конверсией торфа. В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрана типовая цилиндрическая камера горения, укомплектованная современной горелкой Weishaupt WKGL70 исполнения 3LN мощностью 12 МВт [25] (рис. 2).

Меньшая по сравнению с природным газом теплота сгорания синтез-газа (табл. 4) при постоянной мощности горелочного устройства приводит к более высокому расходу топлива через форсунки – 1, тогда как количество воздуха, необходимое для стехиометрического сжигания по причине его забаластированности, значительно ниже (табл. 3), в связи с чем снижается расход через каналы пер-

вичного – 2 и вторичного дутья – 3. Для оценки влияния перечисленных особенностей исследуемого топлива на интенсивность протекания процессов смесеобразования, температуру и габариты факела эффективным инструментом является математическое моделирование.

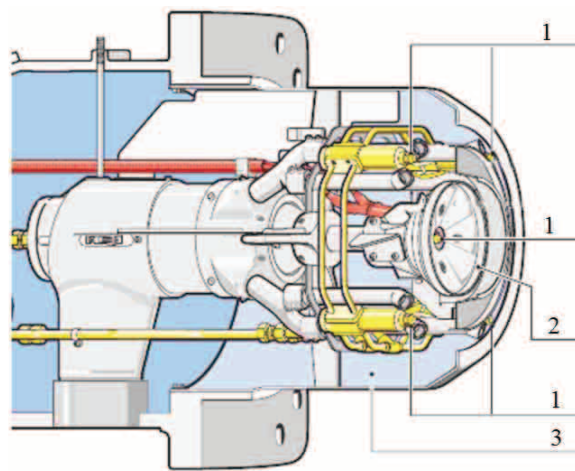


Рис. 2. Конструктивная схема исследуемой горелки [25]: 1 – форсунки подачи синтез-газа; 2 – каналы подачи первичного воздуха; 3 – канал подачи вторичного воздуха

Fig. 2. Structural scheme of the burner [25]: 1 are the nozzles of supplying syngas; 2 are the channels of supplying primary air; 3 is the channel of supplying secondary air

Таблица 4. Сравнительный анализ теплофизических характеристик природного (газопровод Саратов–Москва) и синтез-газов, рассчитанных по [26]

Table 4. Comparative analysis of thermal characteristics of natural (Saratov–Moscow gas pipe line) and syngas, calculated by [26]

Вид топлива Fuel type	Теплота сгорания, МДж/м³ Combustion heat, MJ/m³	Объем воздуха для стехиометрического горения, м³/м³ Air volume for stoichiometric combustion, m³/m³	Объем продуктов сгорания на 1 м³ газа, м³/м³ Combustion products volume per 1 m³ of gas, m³/m³
Природный газ Natural gas	37,01	9,78	11,29
Синтез-газ syngas	16,00	3,92	4,83

Для математического описания протекания реакций горения в трехмерных спутных потоках синтез-газа и воздуха была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Рассматриваемое течение считалось установившимся, в связи с чем использовались математические модели с уравнениями неразрывности, сохранения массы и энергии, записанные в стационарной постановке. Расчет горения синтез-газа основывался на решении химических уравнений для необратимых реакций между горючими компонентами и кислородом: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$; $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$. Для численного моделирования

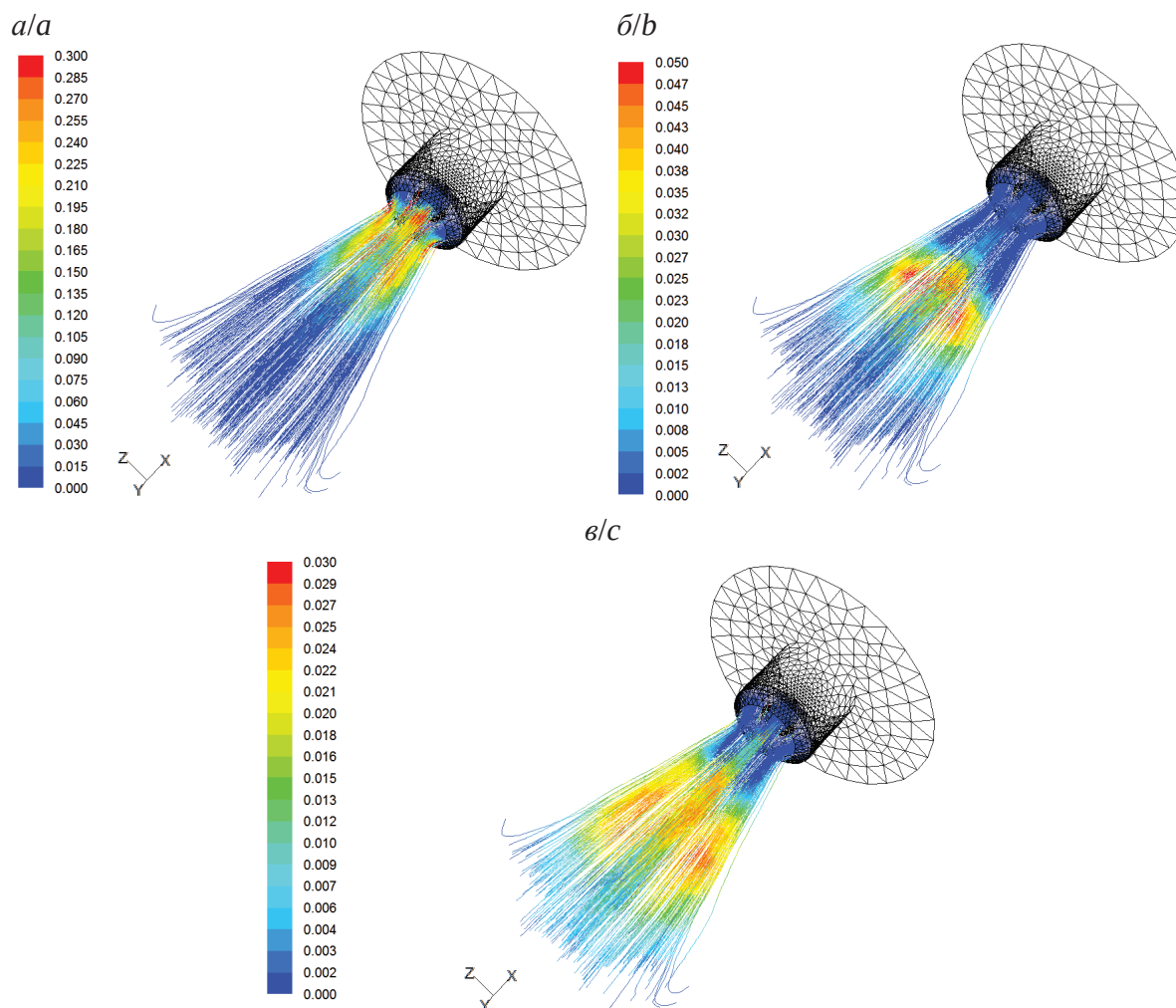


Рис. 3. Линии тока на выходе из горелки (цветовая индексация по скоростям трех одновременно протекающих в газовой смеси реакций): а) цветовая индексация по скорости реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{кмоль}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$); б) цветовая индексация по скорости реакции $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{кмоль}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$); в) цветовая индексация по скорости реакции $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ ($\text{кмоль}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$)

Fig. 3. Current lines at the output of the burner (color rate indexing of three simultaneous reactions in gas mixture): а) color reaction rate indexing $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{kmole}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$); б) color reaction rate indexing $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ($\text{kmole}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$); в) color reaction rate indexing $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ ($\text{kmole}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)

протекания этих химических реакций в условиях турбулентного потока применялась апробированная ЕВU-модель, предложенная Сполдингом в [27]. Полученные результаты численного эксперимента представлялись в виде усредненных во времени линий тока с цветовой индексацией по тепловыделению, температуре и элементному составу газовой смеси. Пульсационные (турбулентные) характеристики потока рассчитывались с использованием широко распространенной двухпараметрической « k - ε » модели. Расчет теплообмена излучением производился методом сферических гармоник в первом приближении.

По результатам численного эксперимента длина факела при сжигании синтез-газа не превышает экспериментальных и расчетных значений, полученных при сжигании природного газа [28]. Выгорание водорода (рис. 3, а) протекает в короткой области в

непосредственной близости от устья горелки, что объясняется низкой энергией активации для реакции его окисления. Так как объемное содержание водорода в синтез-газе составляет около 50 %, то наблюдается более интенсивный рост температуры на выходе из горелки, нежели при сжигании природного газа, где содержание водорода на порядок ниже. Высокие значения температуры газовой смеси (рис. 4) инициируют воспламенение метана (рис. 3, б) и монооксида углерода (рис. 3, в) в непосредственной близости от горелки, но значения скорости протекания реакций их окисления в объеме камеры сгорания ввиду забалластированности горелочной струи в целом ниже аналогичных значений при сжигании природного газа. Следствием описанных факторов является равномерное тепловыделение по всей длине факела, что благоприятно сказывается на надежности работы камеры сгорания.

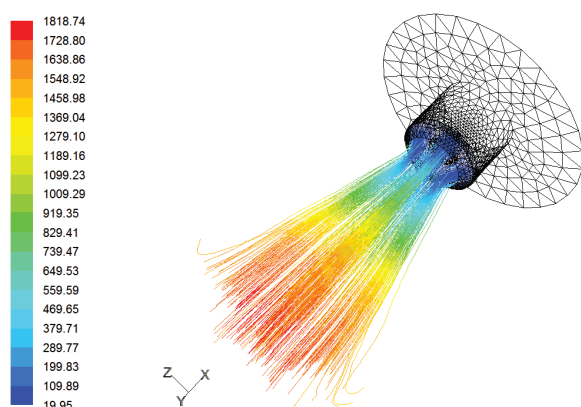


Рис. 4. Линии тока на выходе из горелки с цветовой индексацией по температуре газовой смеси (°C)

Fig. 4. Current lines at the output of the burner with color indexing by the gas mixture temperature (°C)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р. – 144 с.
2. Емешев В.Г., Паровинчак М.С. Без привозной энергетики // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 17. – С. 63–65.
3. Мяки А.Э. Истинные причины проблем отопления в северных регионах // Топливо-энергетический комплекс. – 2003. – № 2. – С. 95–98.
4. New alternative energy from solid waste plastics / M. Sarker, A.S.M.D. Mohammed, M.M. Rashid, N. Schiralli, A. Zaman, A. Kabir, S. Rahman, K. Islam, M. Molla // ICDRET: Proc. of 1st Intern. Conf. on the Developments in Renewable Energy Technology. – Bangladesh: Dhaka, 2009. – P. 100–103 (Article number 5454177).
5. Lorincz J., Bule I. Renewable energy sources for power supply of base station sites // International Journal of Business Data Communications and Networking. – 2013. – V. 9. – Iss. 3. – P. 53–74.
6. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Изд-во СОРАСХН, 1995. – 88 с.
7. Приложение к Постановлению Государственной Думы Томской области от 28.02.2008 № 1008 «Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года». URL: <http://lawsrf.ru/region/documents/1547168/> (дата обращения: 07.09.2015).
8. Бернатонис В.К., Бернатонис П.В. Концепция освоения ресурсов торфа в современных экономических условиях (на примере Томской области) // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 161–163.
9. Табакаев Р.Б. Теплотехнология получения твёрдого композитного топлива из низкосортного органического сырья: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2015. – 144 с.
10. Biomass recycling heat technology and energy products / R.B. Tabakaev, P.S. Gergelishiu, A.V. Kazakov, A.S. Zavorin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 66. – P. 1–4 (012052).
11. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Твёрдое композитное топливо из низкосортного сырья (технологический аспект) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 56–64.
12. Barbara J.W., Tesfayohanes W.Y., Lupita D.M. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste // Environmental

Выводы

- 1) Рассмотренные виды низкосортного топлива Томской области в сыром виде из-за высокой величины влажности и зольности малоприспособлены для энергетического использования и не способны на данный момент заместить привозной уголь в топливно-энергетическом балансе региона. Перспективным направлением переработки топлив является низкотемпературная каталитическая конверсия, позволяющая получать из исходного твердого сырья синтез-газ, обогащенный водородом.
- 2) Полученный синтез-газ может эффективно использоваться в энергетике для получения тепла и электроэнергии без дорогостоящей модернизации газового оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзаданий НИР № 2069 (тема № 2.1322.2014).

- Science and Technology. – 2014. – V. 48. – Iss. 16. – P. 9852–9858.
13. Карманов В.В., Михайлик В.Д., Костюнин Н.Л. Получение топливных гранул, пеллетов, брикетов из отходов растительного сырья // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – Т. 43. – № 4. – С. 128–132.
14. Топливные брикеты на основе бурого угля с использованием нефтяных шламов в качестве связующего / В.И., Идрисов А.М. Сыроежко, С.В. Дронов, В.М. Страхов, М.О. Гончаров // Кокс и химия. – 2013. – № 12. – С. 34–39.
15. Aysu T. Catalytic pyrolysis of Alcea pallida stems in a fixed-bed reactor for production of liquid bio-fuels // Bioresource Technology. – 2015. – V. 191. – P. 253–262.
16. High energy density bio-oil via slow pyrolysis of Jatropha curcas shells / P. Das, M. Dinda, N. Gosai, S. Maiti // Energy and Fuels. – 2015. – V. 29. – Iss. 7. – P. 4311–4320.
17. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor // Coke and chemistry. – 2013. – V. 56. – Iss. 12. – P. 466–469.
18. Получение и исследование жидких биотоплив из биомассы дерева методом пиролиза / К.В. Куликов, В.В. Литвинов, В.Н. Пиялкин, С.А. Забелкин, В.Н. Башкиров // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 13. – С. 197–200.
19. Low-temperature conversion of low-grade organic raw. P. 1. Technical aspects / A.V. Kazakov, R.B. Tabakaev, P.Y. Novoseltsev, A.V. Astafev // MATEC Web of Conferences. – 2014. – V. 19. – P. 1–4 (article number 01014).
20. Анализ зависимости выхода и состава газообразных продуктов пиролиза различных видов органического сырья / В.Г. Систер, А.С. Холманский, В.Г. Чирков, Е.Ю. Сорокина, Е.М. Иванникова // Химическая технология. – 2011. – № 4. – С. 222–226.
21. Тимофеева С.С., Мингалеева Г.Р. Перспективы использования торфа в региональной энергетике // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 4. – С. 46–55.
22. Experimental and modeling study of pinewood char gasification with CO₂ / I. Sircar, A. Sane, W., Wang J.P. Gore // Fuel. – 2014. – V. 119. – P. 38–46.
23. Кузнецов Г.В., Кулеш Р.Н., Полсонгграм М. Повышение эффективности термической конверсии древесной биомассы // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 22–25.

24. Казаков А.В. Термическая конверсия низкосортных топлив применительно к газогенерирующим установкам: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2002. – 159 с.
25. Weishaupt WKGL70 dual fuel burner Version 3LN <http://www.il.weishaupt.de/local/documentBase/en/2046-GB-12-04.pdf> (дата обращения: 05.09.2015).
26. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
27. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames // Proc. Combust. Inst. – 1971. – V. 13. – P. 649–657.
28. Хаустов С.А., Заворин А.С. Дальнейшая факел в жаровых трубах котлов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 10. – С. 16–20.

Поступила 07.09.2015 г.

UDC 662.815.4

LOW-GRADE FUELS OF TOMSK REGION: PROSPECTS FOR ENERGY USE

Roman B. Tabakaev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: TabakaevRB@tpu.ru

Sergey A. Khaustov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: khaustovSA@tpu.ru

Galina. A. Cherkashina,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: cherkashina@tpu.ru

Alexander V. Kazakov,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: kazakov@tpu.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the need to substitute the imported energy resources by local low-grade fuels in the regional fuel-energy balances.

The main aim of the study is to determine thermal properties of local fuels in Tomsk region and evaluate their energy use viability.

The methods used in the study. Thermotechnical characteristics of low-grade fuels were determined by standard methods GOST R 52911–2008, 11022–95 and 6382–2001. Calorific value and elemental composition were studied using a bomb calorimeter ABK-1 and Vario micro cube analyzer. The composition of the mineral ash was investigated in accordance with GOST 10538–87. To study the combustion efficiency of syngas produced by low temperature catalytic raw conversion the authors have applied the mathematical modeling. Three-dimensional cocurrent flows of syngas and air were considered with non-isothermal incompressible multicomponent gas model in order to describe combustion mathematically. For numerical simulation of chemical reactions under turbulent flow conditions the authors applied the proven Spalding's EBU-model. The pulsation (turbulent) flow characteristics were calculated using a widespread two-parameter «k-ε» model. Calculation of radiation heat-exchange was produced by spherical harmonics approach in the first approximation.

The results. The discussed low-grade fuels of Tomsk region in untreated form are not able to replace imported coal in regional energy balance, because of the high moisture and ash content values. The promising direction of low-temperature fuel processing is a catalytic conversion, which allows receiving hydrogen-enriched syngas from the initial solid raw. Obtained syngas can be used effectively in the power industry to produce heat and electricity without expensive upgrades of gas equipment.

Key words:

Thermal engineering, low-grade fuel, fuel-energy balance, thermotechnical characteristics, mineral components, energy use, heat-technology recycling.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within R&D state tasks no. 2069 (topic no. 2.1322.2014).

REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda. Utv. rasporyazheniem Pravitelstva RF of 13 November 2009 № 1715-r* [Energy strategy of Russia till 2030. Approved by the Government of the Russian Federation from 13 November 2009. No. 1715-r]. 144 p.
2. Emeshev V.G., Parovinchak M.S. Bez privoznoy energetiki [Without imported energy sector]. *Neftegazovaya vertikal*, 2008, no. 17, pp. 63–65.
3. Myaki A.E. Istinnye prichiny problem otopeniya v severnykh regionakh [The true causes of the problems with heating in the northern regions]. *Toplivno-energeticheskiy kompleks*, 2003, no. 2, pp. 95–98.
4. Sarker M., Mohammed A.S.M.D., Rashid M.M., Schiralli N., Zaman A., Kabir A., Rahman S., Islam K., Molla M. New alternative energy from solid waste plastics. *ICDRET: Proc. of 1st Intern. Conf. on the Developments in Renewable Energy Technology*. Bangladesh, Dhaka, 2009. pp. 100–103 (article number 5454177).
5. Lorincz J., Bule I. Renewable energy sources for power supply of base station sites. *International Journal of Business Data Communications and Networking*, 2013, vol. 9, Iss. 3, pp. 53–74.
6. Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Mikhanteva L.S. *Torfyanye resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat Resources of Tomsk region and their usage]. Novosibirsk, SORASKhN Press, 1995. 88 p.
7. *Prilozhenie k Postanovleniyu Gosudarstvennoy Dumi Tomskoy oblasti ot 28.02.2008 no. 1008 «Energeticheskaya strategiya Tomskoy oblasti na period do 2020 goda»* [Appendix to the Decision of the Tomsk State Duma of 28.02.2008 no. 1008 «Energy strategy of Tomsk region till 2020»]. Available at: <http://lawsrf.ru/region/documents/1547168/> (accessed 07.09.2015).
8. Bernatonis V.K., Bernatonis P.V. Kontseptsiya osvoeniya resursov torfa v sovremennykh ekonomicheskikh usloviyakh (na primere Tomskoy oblasti) [The concept of peat resources development with the current economic conditions (for example the Tomsk region)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 316, no. 2, pp. 95–98.
9. Tabakaev R.B. *Teplotekhnologiya polucheniya tverdogo kompozitnogo topliva iz nizkosortnogo organicheskogo syrya*. Dis. Kand. nauk [Heat technology of obtaining composite solid fuel from low-grade organic materials. Cand. Diss.]. Tomsk, 2015. 144 p.
10. Tabakaev R.B., Gergelizhiu P.S., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Biomass recycling heat technology and energy products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 66, pp. 1–4 (012052).
11. Tabakaev R.B., Kazakov A.V., Zavorin A.S. Tverdoe kompozitnoe toplivo iz nizkosortnogo syrya (tehnologicheskii aspekt) [Solid composite fuel from low-grade raw materials (technological aspect)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 56–64.
12. 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, Iss. 16, pp. 9852–9858.
13. Karmanov V.V., Mikhaylik V.D., Kostyunin N.L. Poluchenie toplivnykh granul, pelletov, briketov iz otkhodov rastitelnogo syrya [Production of fuel pellets, wood pellets, briquettes from waste vegetable raw materials]. *Vestnik Khersonskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 13, pp. 197–200.
14. Idrisov V.I., Syroezhko A.M., Dronov S.V., Strakhov V.M., Goncharov M.O. Toplivnye briкеты na osnove burogo uglya s ispolzovaniem neftyanykh shlamov v kachestve svyazuyushchego [Fuel briquettes based on lignite with oil sludge as a binder]. *Coke and Chemistry*, 2013, no. 12, pp. 34–39.
15. Aysu T. Catalytic pyrolysis of *Alcea pallida* stems in a fixed-bed reactor for production of liquid bio-fuels. *Bioresource Technology*, 2015, vol. 191, pp. 253–262.
16. Das P., Dinda M., Gosai N., Maiti S. High energy density bio-oil via slow pyrolysis of *Jatropha curcas* shells. *Energy and Fuels*, 2015, vol. 29, Iss. 7, pp. 4311–4320.
17. Promdee K., Vitidsant T. Synthesis of char, bio-oil and gases using a screw feeder pyrolysis reactor. *Coke and chemistry*, 2013, vol. 56, Iss. 12, pp. 466–469.
18. Kulikov K.V., Litvinov V.V., Piyalkin V.N., Zabelkin S.A., Bashkirov V.N. Poluchenie i issledovanie zhidkikh biotopliv iz biomassy dereva metodom piroliza [Production and research of liquid biofuels from wood biomass by pyrolysis]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 15, no. 13, pp. 197–200.
19. Kazakov A.V., Tabakaev R.B., Novoseltsev P.Y., Astafev A.V. Low-temperature conversion of low-grade organic raw, part 1 (technical aspects). *MATEC Web of Conferences*, 2014, vol. 19, pp. 1–4 (article number 01014).
20. Sister V.G., Kholmanskiy A.S., Chirkov V.G., Sorokina E.Yu., Ivannikova E.M. Analiz zavisimosti vykhoda i sostava gazoobraznykh produktov piroliza razlichnykh vidov organicheskogo syrya [Analysis of the dependence of the yield and composition of the gaseous products of pyrolysis of different types of organic materials]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, no. 4, pp. 222–226.
21. Timofeeva S.S., Mingaleeva G.R. Perspektivy ispolzovaniya torfa v regionalnoy energetike [Perspectives of using peat in regional energy]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 4, pp. 46–55.
22. Sircar I., Sane A., Wang W., Gore J.P. Experimental and modeling study of pinewood char gasification with CO₂. *Fuel*, 2014, vol. 119, pp. 38–46.
23. Kuznetsov G.V., Kulesh R.N., Polsongkram M. Povyshenie effektivnosti termicheskoy konversii drevesnoy biomassy [Improving the efficiency of the thermal conversion of woody biomass]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 22–25.
24. Kazakov A.V. *Termicheskaya konversiya nizkosortnykh topliv primenitelno k gazogeneriruyushchim ustanovkam*. Dis. Kand. nauk [Thermal conversion of low-grade fuels in relation to gas-generating plants. Cand. Diss.]. Tomsk, 2002. 159 p.
25. Weishaupt WKGL70 dual fuel burner Version 3LN. Available at: <http://www.il.weishaupt.de/local/documentBase/en/2046-GB-12-04.pdf> (accessed 05 September 2015).
26. *Teplivoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Boiler thermal design (Standard approach)]. St-Petersburg, NPO TsKTI Press, 1998. 256 p.
27. Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. *Proc. Combust. Inst.*, 1971, vol. 13, pp. 649–657.
28. Khaustov S.A., Zavorin A.S. Dalnoboynost fakela v zharovykh trubakh kotlov [Flame range in boiler fire tubes]. *Promyshlennaya energetika*, 2014, no. 10, pp. 16–20.

Received: 07 September 2015.