

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 662.76; 536.24

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЩЕПЫ СТАРЫХ ШПАЛ

Г.И. Павлов, А.И. Ахметшина, А.Н. Сабирзянов, О.А. Тихонов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия
galimova.alfiya@mail.ru

Резюме: Предложена расчетная схема утилизации щепы старых деревянных шпал в вихревой топке. Вихревая топка предусматривает две зоны реагирования горючего вещества с воздухом: первичная зона – газификация старых шпал и дожигание твердого остатка при недостатке кислорода воздуха; вторичная зона – горение газовой фазы. Приведены исходные данные для термодинамического расчета. Представлены результаты равновесного расчета термического разложения древесины на колосниковой решетке и горения продуктов газификации при разных значениях коэффициента избытка воздуха, а также некоторые опытные данные. Проведено сопоставление результатов расчета с опытными данными.

Ключевые слова: утилизация, энергосбережение, вихревая топка, термическое разложение, горение, равновесный состав, огневого стенд, эмиссионные характеристики.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20- 1-2 -3-13

DEVELOPMENT OF THE DESIGN SCHEME OF THE COMBUSTION CHAMBER FOR BURNING OF WOOD CHIPS THE OLD SLEEPERS

G.I. Pavlov, A.I. Akhmetshina, A.N. Sabirzyanov, A.A. Tikhonov

Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev - KAI
galimova.alfiya@mail.ru

Abstract: A calculation scheme for the utilization of chips of old wooden sleepers in a vortex furnace is proposed. The vortex furnace provides two zones of reaction of a combustible substance with air: the primary zone is the gasification of old sleepers and the afterburning of the solid residue with a lack of air oxygen, the secondary zone is the burning of the gas phase. The initial data for the thermodynamic calculation is given. The results of the equilibrium calculation of the thermal decomposition of wood on the grate and the combustion of gasification products are presented for different values of the excess air factor, as well as some experimental data. A comparison of the calculation results with the experimental data is carried out.

Keywords: utilization, energy saving, vortex furnace, thermal decomposition, combustion, equilibrium composition, fire stand, emission characteristics

В России каждый год образуется около 14 миллионов деревянных шпал, негодных к использованию [1]. Полигоны для их хранения переполнены. В большинстве случаев, деревянные шпалы складывают в местах, не предназначенных для этого, что, в свою очередь, негативно влияет на экологию. Установлено, что под атмосферным воздействием шпалы создают фоновое загрязнение [2]. Причиной вредного воздействия деревянных шпал на окружающую среду являются токсичные вещества, которыми пропитаны шпалы [3]. В состав пропиточного материала входят углеводороды с примесью фенолов, нафталина, антрацена. Эти соединения, попав в воздух, способны вызвать тяжелые отравления у людей и появление онкологических заболеваний [3]. В связи с этим задача экологически безопасной утилизации шпал является актуальной, и ее решение требует дополнительных исследований и специальных технологий.

Известно, что теплотворная способность старых шпал находится на уровне $Q_{\text{н}} = 16521$ кДж/кг [4], что на 10–12% выше, чем у древесной щепы лиственных растений. Это по экономическим показателям позволяет считать перспективным сжигание отработанных шпал с целью получения тепловой энергии. Использование отходов шпал в качестве твердого топлива ограничено отсутствием экологически безопасной и экономически выгодной технологии их сжигания. Попытки использования шпал в качестве топлива в обычных топках не привели к успеху. Причина заключается в выделении при сжигании шпал большого количества токсичных веществ, таких как ацетон, бутанол, фенолы, фенантрены [3]. Условия горения в штатных топках не обеспечивают желаемую концентрацию вышеуказанных ингредиентов в продуктах сгорания шпал [4]. Для экологически чистого их сжигания требуются специальные режимные условия в топке и нейтрализация вредных газов. Работ, посвященных данной проблеме, крайне мало, и исследования в этой области являются весьма актуальными.

Одна из наиболее сложных задач на пути создания топков – выбор оптимальных параметров процесса горения при соблюдении ряда необходимых условий. К одному из таких условий следует отнести поддержание высокой температуры в топке, поскольку такие углеводородные соединения, как C_2H_4 и их производные воспламеняются при температуре не менее 530°C . Другим важным фактором является качественное перемешивание горючих газов с воздухом и размер частиц, что оказывает существенное влияние на процесс сжигания твердых горючих веществ: чем крупнее частицы горючего вещества, тем продолжительнее процесс сжигания. Кроме того, содержание влаги в горючем веществе во многом определяет схему организации процесса сжигания.

Очевидно, что натурным экспериментам по оптимизации рабочих процессов в вихревой топке, принципиальная схема которой описана ниже, должны предшествовать расчетные исследования. В свою очередь, вычислительные эксперименты должны основываться на достоверных данных об исходном горючем веществе, что и определило цель данной работы.

Вихревая топка (рис. 1) имеет две зоны реагирования горючих компонентов с воздухом. В первой зоне горение щепы шпал происходит в слое на колоснике. Для этой зоны характерны такие сложные физико-химические процессы, как нагрев и термическое разложение древесины, пропиточных веществ, частичное сгорание газовой фазы и т.п. Эти явления происходят за счет тепла, выделяющегося при сжигании части газовой фазы и углей, а воздух подводится в количестве, необходимом для горения небольшой части горючих газов. Далее газовая смесь, состоящая из горючих газов термического разложения древесины и продуктов сгорания, поступает во вторую зону, расположенную выше. В эту же зону по разным поясам подводится вторичный воздух. Воздух подается в виде отдельных струй под разными углами к радиусу, тем самым формируется вихревой поток разной структуры (подвод вторичного воздуха под разными углами на рис. 1 условно не показан). Изменение интенсивности закрутки потока определяет время пребывания продуктов

горения в реакционной зоне и возможность регулировки экологических показателей утилизации.

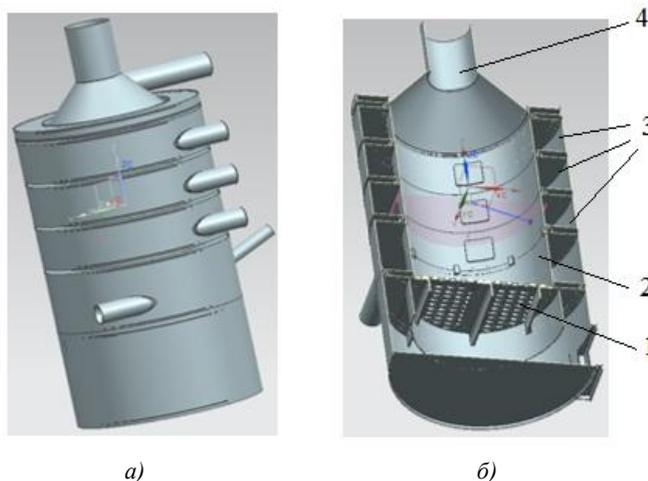


Рис. 1. Геометрическая модель топки: а) общий вид; б) продольный разрез:
1 – колосник; 2 – зона газогенерации; 3 – воздушные кольцевые коллекторы; 4 – дымовая труба

Детальное моделирование сложного физико-химического процесса горения старых шпал, протекающий в такой топке, не представляется возможным [5]. Целесообразно существенное упрощение расчетной модели, при котором можно предположить, что первая зона топки является генератором горючих газов, состав которых постоянен. Такое допущение позволяет рассматривать вторую зону топки зоной гомогенной реакции горения. В настоящее время существует ряд подходов и программных продуктов, позволяющих с достаточной точностью решать задачи горения гомогенных смесей в проточной части реактора. В качестве исходных данных для расчета процессов горения в упрощенной постановке необходим состав генераторных газов на выходе из первой зоны и соответствующие параметры потока. Очевидно, что состав генераторных газов, в числе которых и продукты пиролиза, является весьма многокомпонентным, и одно из возможных допущений при расчете его сжигания может соответствовать рамкам равновесного подхода.

Расчет равновесного состава и теплофизических свойств продуктов сгорания горючих веществ базируется на знании элементного состава и энтальпии горючих веществ. Анализ литературных источников показал, что на данный момент существует далеко не полная информация о химическом составе горючей части деревянных шпал, определить по которой надежный элементный состав не представляется возможным. Неполная и противоречивая информация существует и в отношении минеральной части шпал. Наиболее ценными явились данные о теплотах сгорания отработанных и вновь изготовленных шпал, полученные испытательной лабораторией топлива Ижевской ТЭЦ-2 (протоколы испытаний от 13.09.2013). Однако адекватный переход от известных значений теплоты сгорания к энтальпии горючего возможен лишь при точном знании элементного состава составляющих частей деревянных шпал. Поэтому первоочередной задачей явились расчетные оценки состава и энтальпий составляющих частей деревянных шпал и их пропиточного материала (креозота).

Принятые значения исходных величин

Состав горючей части дров различных пород примерно одинаков и достаточно хорошо известен. При теплотехнических расчетах обычно принимают: $C = 51$; $H = 6,1$; $O = 42,3$; $N = 0,6\%$. Эти значения элементного состава приняты и в данной работе.

Содержание и состав минеральной части золы в процентах по массе взяты по данным интернет-издания «Большая энциклопедия нефти и газа» для сосны, которые скорректированы до 100%: $K_2O = 13$; $Na_2O = 5,05$; $CaO = 40,26$; $P_2O_5 = 3,5$; $MgO = 8,44$; $MnO = 4,72$; $Fe_2O_3 = 2,46$; $SO_3 = 3,7\%$; $CO_2 = 18,87\%$. Содержание минеральной части в древесине сосны составляет 0,206 % (по массе). Зольность отработанных деревянных шпал – 2,5%, что характерно для древесного угля.

Состав элементного креозота был оценен по формуле Д.И. Менделеева для жидких углеводородных горючих:

$$H \% = 26 - 15\rho_u^{15}; \quad C \% = 100 - H \%$$

Плотность древесного креозота равна $1,037...1,087 \text{ г/см}^3$. Для среднего значения плотности $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$ получим значение $H = 10,25\%$ и $C = 89,75\%$. В шпалах содержание каменноугольного масла составляет ~ 12,9% (по массе).

Относительная влажность древесины может колебаться в широких пределах. Влажность свежесрубленной сосны обыкновенной порядка 47%, а воздушно-сухая древесина, т.е. древесина, длительное время находящаяся на открытом воздухе, имеет влажность 13...17%. В данных исследованиях влажность варьировалась от 17 до 50%.

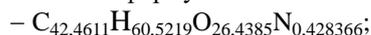
Энтальпии всех частей деревянных шпал определялись расчетным методом [6; 10].

Основные допущения к термодинамическому расчету следующие: для газовой фазы справедлива модель смеси идеальных газов; силы поверхностного натяжения на границах фаз не учитывались; конденсированные фазы принимались как индивидуальные вещества, не образующие растворы или сплавы; объемом конденсированных фаз пренебрегалось; давление броуновского движения конденсированных веществ не учитывалось; горение адиабатное, т.е. без теплообмена с окружающей средой; распределение параметров по реакционному объему однородное; скорость продуктов сгорания в реакционном объеме принималась равной нулю, т.е. $p = \text{const}$.

Вычислительные эксперименты проводились с использованием расчетного комплекса АСТРА, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Элементный состав ингредиентов горючего и значения их энтальпий, необходимые для равновесного расчета, следующие.

Условная формула элементного состава органической части сосны и ее энтальпия:



$$- i = - 6516,04 \text{ кДж/кг.}$$

Условная формула элементного состава минеральной части сосны и ее энтальпия:



$$- i = - 10606,8 \text{ кДж/кг.}$$

Условная формула элементного состава креозота и его энтальпия:



$$- i = - 1897,14 \text{ кДж/кг.}$$

В связи с незначительным содержанием элементов Fe и S в минеральной части древесины принято допущение не учитывать их наличие при проведении расчетов. Результаты термодинамических расчетов термического разложения и горения представлены для трех исходных вариантов горючих веществ, принципиально отличающихся содержанием органической, минеральной частей древесины, содержанием креозота и по влажности.

Вариант № 1. Состав шпал (в % по массе), условная формула и энтальпия:

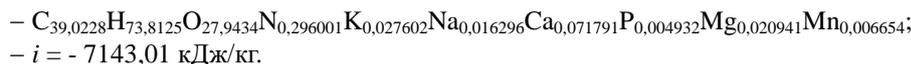
– органическая часть – 36,894%; минеральная часть (зола) – 0,206%; креозот – 12,9%; вода – 50%;



$$- i = - 9367,18 \text{ кДж/кг.}$$

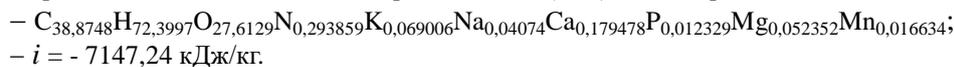
Вариант № 2. Состав шпал (в % по массе), условная формула и энтальпия:

– органическая часть – 69,1%; минеральная часть (зола) – 1%; креозот – 12,9%; вода – 17%;

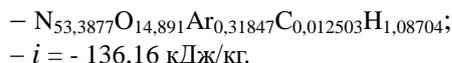


Вариант № 3. Состав шпал (в % по массе), условная формула и энтальпия:

– органическая часть – 68,6%; минеральная часть (зола) – 2,5%; креозот – 12,9%; вода – 16%;



Для получения термодинамических параметров равновесного горения принятых вариантов исходных горючих веществ во второй зоне вихревой топки использовалась условная формула элементного состава воздуха с относительной влажностью 50 % и его энтальпия:



Основные результаты и их обсуждение

Термическое разложение древесины на колосниковой решетке происходит при существенном недостатке окислителя, и возможна оценка состава и свойств продуктов разложения исходного горючего при заданных p и T с позиции равновесного состояния. Подобный подход к моделированию процессов термического разложения углеводородных топлив представлен в работе [7].

На рис. 2 показаны некоторые результаты расчета равновесного состава продуктов термического разложения рассматриваемых исходных горючих в зависимости от температуры при $p = 101325$ Па без «замораживания» каких-либо медленных реакций. Представленный характер изменения состава продуктов термического разложения весьма хорошо согласуется с температурными диапазонами низкотемпературного ($200^{\circ}C \div 450^{\circ}C$) и высокотемпературного ($500^{\circ}C \div 800^{\circ}C$) пиролиза [8]. Показано принципиальное влияние влажности, содержания органической составляющей древесины и температурного диапазона термического разложения на состав продуктов разложения. Представленные иллюстрации изменения мольных долей продуктов термического разложения отражают эффективность низкотемпературного термического разложения, способствующего более высокому проценту выхода возобновляемых ресурсов, и соответствуют данным работы [8]. Очевидна нецелесообразность высокотемпературного термического разложения из-за интенсивного образования водорода, дальнейшее сжигание которого сопровождается высокими температурами. Отличие температурных изменений мольной доли летучей фазы продуктов термического разложения горючих веществ варианта № 3 весьма незначительно отличается от варианта № 2.

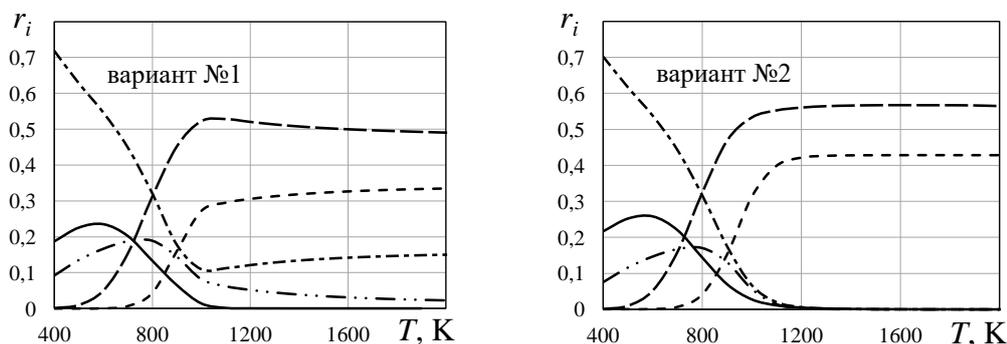


Рис. 2. Изменения мольных долей летучей фазы продуктов термического разложения шпал:

— — — — H_2 ; - - - - - CO ; · · · · · H_2O ; - · - · - CO_2 ; — — — — CH_4

Температурная зависимость массовой доли конденсированной фазы продуктов термического разложения исследуемых вариантов горючих веществ показана на рис. 3, где основным компонентом является углерод. Показано принципиальное влияние влажности (варианты № 1 и № 2) на содержание в продуктах разложения конденсированной фазы, что подтверждает необходимость сушки древесины для уменьшения выхода конденсированной фазы. Результаты для варианта № 2 весьма хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью массовой доли конденсата от температуры пиролиза древесины сосны и отработанных деревянных шпал [8]. Следует отметить, что увеличение выхода угля с уменьшением температуры пиролиза [8] соответствует границам высокотемпературного и низкотемпературного термического разложения. В свою очередь, увеличение минеральной части древесины за счет уменьшения органической части и влажности также приводит к увеличению массовой доли конденсированных продуктов (рис. 3).

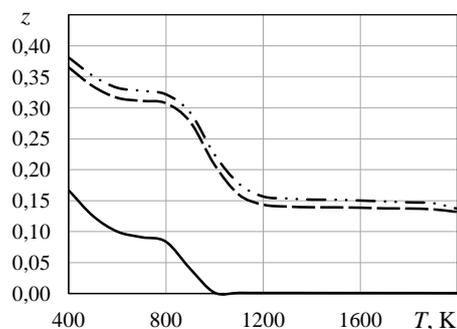


Рис. 3. Температурная зависимость массовой доли конденсированных продуктов термического разложения: — — — вариант расчета № 1; — — — вариант № 2; — . . — вариант № 3

Термодинамические свойства и равновесный состав продуктов сгорания генераторных газов исследуемых вариантов горючих веществ во второй зоне вихревой точки в зависимости от избытка окислителя показаны на рис. 4.

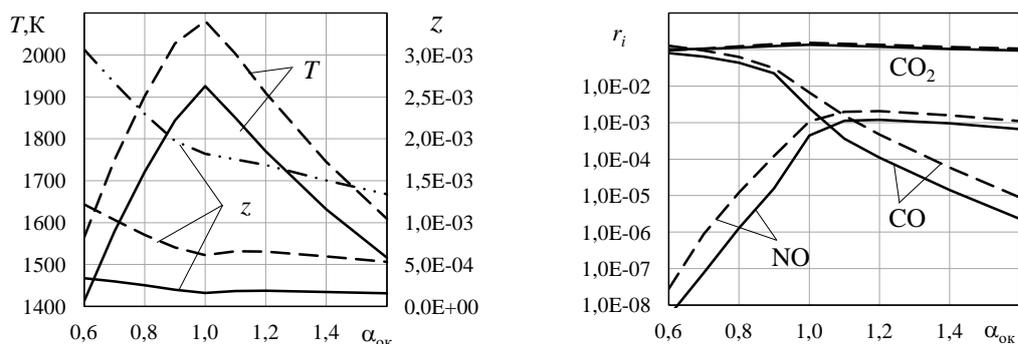


Рис. 4. Зависимости температуры (T), массовой доли конденсированной фазы (z) и мольной доли (r_i) некоторых соединений в продуктах сгорания от коэффициента избытка окислителя: — — — вариант расчета № 1; — — — вариант № 2; — . . — вариант № 3.

Максимальные отличия равновесной температуры горения между вариантами № 1 и № 2 наблюдаются в восстановительной (богатой) области и не превышают 10%. С увеличением коэффициента избытка окислителя различие в равновесной температуре уменьшается до величины порядка 6%. По мольной доле NO и CO максимальные отличия

между вариантами № 1 и № 2 соответственно составляют порядка 90 и 77%. Динамика изменений различий отражена на графиках. Независимо от коэффициента избытка окислителя увеличение различий по выходу конденсированной фазы отмечают при увеличении органической, минеральной составляющих древесины и при уменьшении влажности, что наглядно показано при сопоставлении всех трех вариантов расчета. Массовая доля конденсированной фазы z : продуктов сгорания во всех вариантах расчета состояла из MgO , CaO , MnO и $Ca_3P_2O_8$. В свою очередь, отличия температуры горения и изменения мольной доли летучей фазы продуктов термического разложения горючих веществ варианта № 3 весьма незначительно отличается от варианта № 2 в зависимости от коэффициента избытка окислителя, и графически это не представлено.

Полученные результаты расчетов носят ориентировочный характер, так как их точность обусловлена точностью исходных данных и принятыми допущениями. Оценить точность результатов расчета и дальнейшее совершенствование моделей расчета возможно путем сопоставления модельных результатов с экспериментальными данными. Для получения таких данных разработан огневой стенд, схема которого показана на рис. 5. Подробное описание стенда изложено в работе [4]. Вихревая топка 1 соответствует модели, показанной на рис. 1.

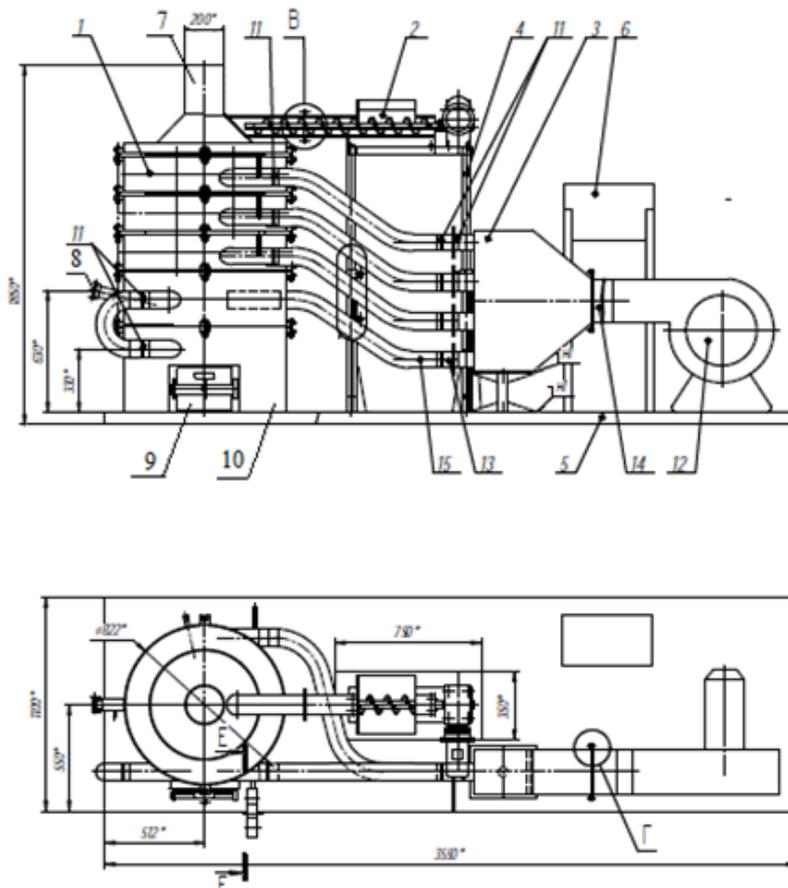


Рис. 5. Общий вид огневого стенда: 1 – вихревая топка; 2 – шнековый питатель; 3 – воздушный коллектор; 4 – рама шнекового питателя; 5 – рамное основание; 6 – пульт управления; 7 – дымовая труба; 8 – смотровой люк; 9 – люк выгрузки золы; 10 – основание вихревой топки; 11 – шиберы воздушных каналов; 12 – электроventильатор; 13 – штуцер для установки манометра; 14 – патрубок гофрированный; 15 – воздушные патрубки

В ходе экспериментальных исследований измерялись: температура продуктов сгорания в топочном пространстве и на выходе из топки; состав газов на выходе из зоны газификации и на выходном срезе трубы; расход и температура воздуха, подаваемого под колосник и в воздушные коллекторы. Для проведения измерений соответствующих параметров использовались аттестованные приборы и оборудование: манометр (термоанемометр) *PCE-PFM 2*, измеритель температуры электронный (термометр контактный ТК-5), газоанализатор *Testo 340*, хроматограф *Focus GC* газовый (*Thermo*), термоанемометр *CTV 310*.

Состав шпал в экспериментальных условиях приблизительно соответствовал заданным расчетным, а коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах $0,8 \div 0,9$.

Исследование органической части продуктов сгорания проводилось методом сорбции органических продуктов сгорания на сорбенте, с последующим изучением десорбированной газовой фазы на хромато-масс спектрометре. Количественный состав углеводородов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав органической части продуктов сгорания

Компонент	Объемные доли, %
Нафталин и его гомологи	1,0
Дифениленоксид	0,3
Бензантрацен	0,09
Бенз(а)пирен	0,95
Хинолин и его гомологи	0,85
Гомологи пиридина	0,36
Индолы	0,86
Фенантрацен	0,36
Карбазолы	0,58
Фенолы(алкилфенолы)	1,41
Бензол	0,2
Ксилолы (сумма)	0,3
Гомологи 1,3 диоксана	1,2
Нитробензол	1,14
Алифатические УВ	16,3
Алкилтолуолсульфокислоты	1,12
Дибензо-пара-диоксин	0,1
Остальное	трудно идентифицируемые компоненты

Результаты измерений неорганических соединений в газовой смеси продуктов термического разложения и сгорания (измерения проводились на выходе из топки при ее работе в режиме газогенерации – воздух подводился только под колосниковое пространство) в сопоставлении с результатами равновесного расчета продуктов сгорания приведены в табл. 2. Представленный расчетный состав пересчитывался через мольную долю по следующим зависимостям: $C_{NO} = r_{NO} \cdot 2,054 \cdot 10^6$; $C_{CO} = r_{CO} \cdot 1,25 \cdot 10^6$.

Таблица 2

Состав неорганической части продуктов сгорания, мг/м³

–	T, К	CO	NO
Экспериментальные данные ($\alpha_{ок} = 0,7 \dots 0,9$)	1490	3958±21	180 ±12
Расчетные данные для варианта №1:			
$\alpha_{ок}=0,8$	1721	54729	2,64
$\alpha_{ок}=0,9$	1844	27844	32,45
$\alpha_{ок}=1,0$	1926	3100	908,03

Из таблицы видно, что расхождение между расчетными и измеренными данными температуры генераторных газов составляет около 20%. Расчетные значения концентрации оксида углерода превышают измеренные значения более чем на 90%. Разница концентраций оксида азота между опытными данными и расчетами также составляет почти 94%.

Выводы

Большие расхождения концентраций неорганических соединений между расчетными показателями и экспериментальными данными объясняются тем, что расчетные данные получены на основании равновесной модели без каких-либо уточнений. Кроме того, в опытах сложно было обеспечить заданные значения коэффициента избытка воздуха из-за грубой дозировки древесной щепы. Несмотря на большие расхождения результатов теоретических и экспериментальных исследований, равновесный подход расчета может быть использован при проектировании модельной установки для грубой оценки выходных параметров газогенератора.

Дальнейшие вычислительные эксперименты горения гомогенной газовой смеси в топочном пространстве с учетом подвода недостающего количества воздуха в виде газовых струй, истекающих под разными углами к радиусу топки, целесообразно провести на основе экспериментальных данных. При получении этих данных необходимо свести к минимуму влияние дозирования свежей щепы на коэффициент избытка воздуха. Предложенная модель расчета выходных параметров газогенератора, основанная на вышеуказанных допущениях, требует совершенствования.

Литература

1. Утилизация древесной коры. М.: Лесная промышленность. 1985.
2. Павлов Г.И., Гармонов С.Ю., Исмаилов М.В., Стремоухова М.В., Галимова А.И., Кондукторов Р.В. Экологическая оценка термической утилизации отработанных шпал // Вестник Казанского технологического университета. 2016. т. 16, № 12. С. 158–162.
3. Павлов Г.И., Гармонов С.Ю., Исмаилов М.В., Стремоухова М.В., Галимова А.И., Кондукторов Р.В. Установление состава отработанных шпал // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 16, № 12. С. 158–162.
4. Павлов Г.И., Кочергин А.В., Галимова А.И., Ситников О.Р. Загрязнение окружающей среды продуктами термического разложения старых деревянных шпал // Экология и промышленность России. № 10. С. 11–15.
5. Волков В.А., Иванов А.В., Стрельцов В.Ю., Хохлов А.В. Использование равновесных моделей для расчета газозафазного горения // Труды РНКТ-5, БЭИ. 2010. Т. 3. С. 161–164.
6. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / Справочник. Т. 1. Методы расчета / Под ред. акад. В.П. Глушко М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 266 с.
7. Аверьков И.С., Байков А.В., Яновский Л.С., Волохов В.М. Моделирование процессов термического разложения углеводородных топлив в обогреваемых каналах // Известия Академии наук. Серия химическая. 2016. № 8. С. 2004–2010.
8. Грачев А.Н., Исхаков Т.Д., Башкиров В.Н., Иманаев Р.М. Утилизация отработанных деревянных шпал методом пиролиза // Вестник Казанского технологического университета. 2008. № 5. С. 166–170.
9. Тунцев Д.В., Сафин Г.Г., Хисматов Р.Г., Хайруллина М.Р., Антипова Э.Е., Гараева И.Ф. Ресурсосбережение при утилизации отработанных деревянных шпал // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 5. С. 248–250.
10. Дрегалин А.Ф., Черенков А.С. Общие методы теории высокотемпературных процессов в тепловых двигателях. М.: «Янус-К», 1997. 328 с.
11. Nakamura H., Kondo T., Watano S. Improvement of particle mixing and fluidization quality in rotating // Chemical Engng Sci. 2013. Vol. 91. P. 70–78.

Авторы публикации

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Специальные технологии в образовании» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: pavlov16@mail.ru.

Ахметшина Альфия Илдусовна – ассистент кафедры «Специальные технологии в образовании» Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева. E-mail: galimova.alfiya@mail.ru.

Сабирзянов Андрей Наилевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: ansabirzyanov@kai.ru.

Тихонов Олег Александрович – ст. преподаватель кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева. E-mail: olatikhonov@kai.ru.

References

1. Utilizatsiya drevesnoi kory. M.: Lesnaya promyshlennost'. 1985.
2. Pavlov G.I., Garmonov S.Yu., Ismailov M.V., Stremoukhova M.V., Galimova A.I., Konduktorov R.V. Ekologicheskaya otsenka termicheskoi utilizatsii otrabotannykh shpal // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2016. V. 16, No. 12. P. 158–162.
3. Pavlov G.I., Garmonov S.Yu., Ismailov M.V., Stremoukhova M.V., Galimova A.I., Konduktorov R.V. Ustanovlenie sostava otrabotannykh shpal // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2016. V. 16, No. 12. P. 158–162.
4. Pavlov G.I., Kochergin A.V., Galimova A.I., Sitnikov O.R. Zagryaznenie okruzhayushchei sredy produktami termicheskogo razlozheniya starykh derevyannykh shpal. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. No. 10, P. 11–15.
5. Volkov V.A., Ivanov A.V., Strel'tsov V.Yu., Khokhlov A.V. Ispol'zovanie ravnovesnykh modelei dlya rascheta gazofaznogo goreniya. Trudy RNKT-5, "EI, 2010, V. 3, P. 161–164.
6. Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya / Spravochnik. Tom 1. Metody rascheta / Pod red. akad. V.P. Glushko M.: VINITI AN SSSR, 1971. 266 p.
7. Aver'kov I.S., Baikov A.V., Yanovskii L.S., Volokhov V.M. Modelirovanie protsessov termicheskogo razlozheniya uglevodородnykh topliv v obogrevaemykh kanalakh // Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya. 2016. No. 8. P. 2004–2010.
8. Grachev A.N., Iskhakov T.D., Bashkirov V.N., Imanaev R.M. Utilizatsiya otrabotannykh derevyannykh shpal metodom piroliza // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2008. No. 5. P. 166–170.
9. Tuntsev D.V., Safin G.G., Khismatov R.G., Khairullina M.R., Antipova E.E., Garaeva I.F. Resursoberezhenie pri utilizatsii otrabotannykh derevyannykh shpal // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. V. 18, No. 5. P. 248–250.
10. Dregalin A.F., Cherenkov A.S. Obshchie metody teorii vysokotemperaturnykh protsessov v teplovykh dvigatelyakh. M.: «Yanus-K», 1997. 328 p.
11. Nakamura H., Kondo T., Watano S. Improvement of particle mixing and fluidization quality in rotating // Chemical Engng Sci. 2013. Vol. 91. P. 70–78.

© Г.И. Павлов, А.И. Ахметшина, А.Н. Сабирзянов, О.А. Тихонов

Authors of the publication

Grigory Pavlov – Dr. Sci (Techn.), Professor, Department of Special technologies in education Kazan national research technical University. A.N. Tupolev. E-mail: pavlov16@mail.ru.

Alfiya Akhmetshina – assistant Professor of Special technologies in education Kazan national research technical University. A.N. Tupolev. E-mail: galimova.alfiya@mail.ru.

Andrew Sabirzyanov – Cand. Sci. (Techn.), associate Professor of Jet engines and power plants of Kazan national research technical University. A.N. Tupolev. E-mail: ansabirzyanov@kai.ru.

Oleg Tikhonov– senior lecturer of the Department of Jet engines and power plants of Kazan national research technical University. A.N. Tupolev. E-mail: olatikhonov@kai.ru.

Поступила в редакцию

29 августа 2017 г.