

УДК 66.041.45

Таймаров М.А. – доктор технических наук, профессор

E-mail: taimarovma@yandex.ru

Казанский государственный энергетический университет

Адрес организации: 420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Лавирко Ю.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: lav.yu55@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Теплогенерирующий агрегат с выработкой пиролизного газа

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы является исследование теплотехнических характеристик спроектированного и изготовленного комбинированного теплогенерирующего агрегата для использования в системах отопления. Агрегат позволяет получать древесный уголь и пиролизный газ из исходного древесного сырья.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что с повышением температуры пиролиза от 400 °С до 600 °С возрастает содержание водорода в составе пиролизного газа, что вызывает снижение теплотворной способности пиролизного газа, получаемого при температуре 600 °С. Оптимальным значением температуры для получения пиролизного газа является температура 500 °С, при которой интенсивность образования водорода невелика по сравнению с количеством образующегося метана.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в возможности сооружения котельных установок, которые в качестве рабочего топлива будут использовать пиролизный газ. Процесс получения пиролизного газа необходимо проводить при температурах около 500 °С, при которых в составе пиролизного газа доля метана составляет около 20 % по массе, а доля водорода – около 15 %. При использовании пиролизного газа в качестве газообразного топлива, сжигаемого при 600 °С (доля водорода составляет 21 %), необходимы специальные горелки ввиду высокой скорости горения водорода по сравнению со сжиганием метана. Пиролизный газ с повышенным содержанием водорода до 21 % имеет более широкие пределы воспламенения в смеси с воздухом по сравнению с пиролизным газом, полученным при температурах около 500 °С.

Ключевые слова: пиролиз, пиролизный газ, состав, метан, оксид углерода, водород, древесина, температура, теплотворная способность, избыток воздуха, предел воспламенения.

Введение

Использование древесины для теплотехнических целей возможно двумя способами: прямым сжиганием и с применением термохимического разложения. Второй способ подразделяется по подводу теплоты на процессы с внутренним и внешним теплоносителем. В теплоэнергетических агрегатах с внутренним теплоносителем (газогенераторах) горючая часть древесины превращается в газообразное топливо полностью путем воздействия на нее кислорода воздуха, водяного пара и двуокиси углерода или их смесей при высокой температуре. Этот процесс называется газификацией, а получаемый газ – генераторным газом. Прямой процесс газификации характеризуется встречным движением древесины (сверху вниз) и воздуха, а также генераторного газа (снизу вверх). При обратном процессе газификации направление движения воздуха и газа совпадает с направлением движения древесины. Обратный процесс газификации упрощает очистку генераторного газа от смол, пыли, воды и применяется для газификации топлив с большим выходом летучих компонентов [1-4].

В теплоэнергетических агрегатах с внешним теплоносителем термохимическое разложение древесины происходит при нагреве без подвода воздуха, и процесс

называется сухой перегонкой или пиролизом древесины, а образующаяся газообразная смесь называется пиролизным газом. Теплотворная способность генераторного газа ниже, чем пиролизного газа.

При процессе прямого сжигания древесины в области горения протекают две взаимосвязанных и взаимоисключающих стадии – пиролиз древесины и горение продуктов пиролиза, которые неразрывно связаны и не имеют четкой границы между ними. При прямом сжигании древесины, особенно с повышенным содержанием влаги, невозможно получить высокие температуры.

При сжигании пиролизного газа, полученного из древесины, такие температуры вполне достижимы. При сжигании газа требуется меньшее количество избыточного воздуха по сравнению с кусковой древесиной. При этом увеличивается температура горения и полнота использования химической энергии, содержащейся в топливе. Процесс сжигания пиролизного газа технически легче автоматизировать. В рамках Киотского протокола, который подписала Россия, в пользу возобновляемых видов топлива установлены ежегодные сокращаемые квоты на использование минеральных топлив [5-8]. Выход и свойства газообразных и парообразных продуктов пиролиза древесины, помимо химического состава и влажности древесины сильно зависят параметров технологического процесса, в частности от температуры и скорости подвода теплоты для поддержания температурного уровня процесса пиролиза. Полученные в результате пиролиза пары смолы, уксусную кислоту, газы и древесный уголь можно использовать в качестве сырья для получения ценных химических продуктов. При сгорании пиролизного газа выделяется значительное количество теплоты, превышающее затраченную теплоту на нагрев древесины, подвергающейся пиролизу.

Пиролиз древесины осуществляется по двум методам: сухой пиролиз и окислительный.

Метод сухого пиролиза (сухой перегонки древесины) проводится без доступа в процесс кислорода. Процесс, направленный на термохимическое разложение древесины при ее частичном сжигании или под воздействием высоких температур в среде горячих дымовых газов называется окислительным пиролизом. Для сухого пиролиза существует три температурных режима: низкотемпературный при 450-550 °С, среднетемпературный при 800 °С и высокотемпературный при 900-1050 °С. Низкотемпературный пиролиз позволяет получить при максимальном количестве жидкого и твердого остатка (угля) достаточное количество пиролизного газа с максимальным значением теплоты сгорания. Среднетемпературный пиролиз характеризуется повышенным выходом газа с меньшей теплотворной способностью и небольшим количеством кокса и жидкого остатка. Высокотемпературный пиролиз характеризуется минимальным выходом жидких и твердых остатков и максимальным количеством вырабатываемого газа с минимальным значением теплоты сгорания [8-11].

Поэтому совершенствование технологии сжигания с использованием термохимического разложения древесины являются актуальными для практического применения. В данной статье рассматривается технология и агрегат для низкотемпературного пиролиза древесины.

Теоретическое обоснование технологии низкотемпературного пиролиза

Термохимическое разложение древесины при низкотемпературном пиролизе происходит при температурах в диапазоне 200-500 °С с выделением тепла в определенном температурном диапазоне, при котором процесс экзотермический, в связи с чем облегчается прогрев всей массы древесины, загруженной для пиролиза. В области температур 200 °С, начинается выделение газов оксида углерода СО и углекислого газа СО₂. Парогазовая смесь, состоит из газов, которые представляют собой соединения углерода, водорода, пары смолы, уксусной древесной кислоты СН₃СООН и паров воды. Смола – это смесь различных сложных веществ, жидкая, вязкая, твердая при комнатной температуре. Смола горит с выделением большого количества тепла, а при нагревании испаряется, образуя газообразный продукт.

Процесс разложения древесины при пиролизе разделяется на четыре этапа: 1) сушку; 2) начало разложения; 3) образование, испарение и возгонку основного

количества продуктов разложения древесины при 270-450 °С с активным выделением тепла экзотермического процесса; 4) прокаливание угля до конечной температуры обычно не выше 550-600 °С и удаление остатков летучих веществ. Кроме третьего этапа, для всех остальных необходим внешний подвод теплоты. Тепловой эффект процесса термораспада древесины зависит от условий проведения пиролиза и от конструкции теплогенерирующего агрегата. В среднем значение низшего теплового эффекта составляет 1000-1250 кДж/кг или 5-6 % от теплоты сгорания исходной древесины [8-11].

На количество и качество выхода продуктов пиролиза древесины влияют два параметра: температура и скорость пиролиза. С ростом температуры скорость пиролиза увеличивается и наоборот. На скорость пиролиза косвенно влияет размер кусков, порода дерева и влажность древесины. По скорости нагрева сырья различают быстрый, медленный пиролизы и карбонизацию. Длительность процесса термохимической конверсии древесины при быстром пиролизе равна одной секунде, при медленном пиролизе составляет от 5 до 30 минут, при карбонизации – 1...24 часа. В настоящее время низко температурный быстрый пиролиз является перспективной технологией термохимической конверсии древесины со значительным потенциалом, особенно для высокого выхода жидкого топлива и химических продуктов.

Описание экспериментальной установки и условий проведения экспериментов

Схема теплогенерирующего агрегата, изготовленного для экспериментального исследования процессов термохимической конверсии древесины при низкотемпературно пиролизе приведена на рис. 1.

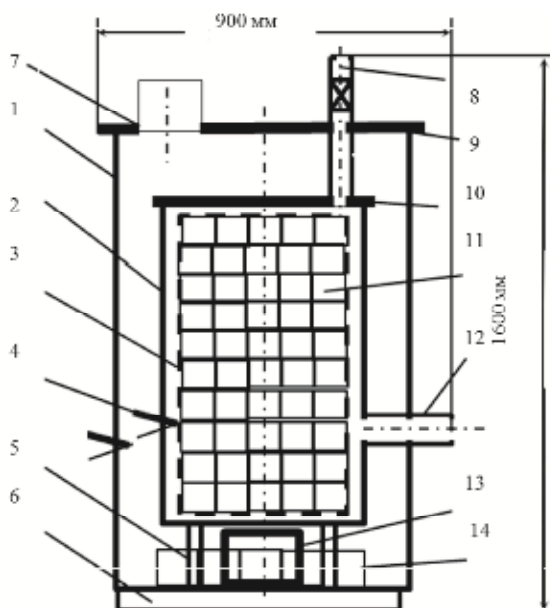


Рис. 1. Схема теплогенерирующего агрегата для термохимической конверсии древесины:
1 – наружный кожух отопительной камеры, 2 – кожух пиролизного реактора, 3 – съемная реторта,
4 – термопара, 5 – опора пиролизного реактора, 6 – огнеупорное основание отопительной камеры,
7 – выходное отверстие под дымовую трубу отопительной камеры,
8 – продувочный патрубок пиролизного реактора, 9 – съемная крышка отопительной камеры,
10 – съемная крышка пиролизного реактора, 11 – кусковая древесина для пиролиза,
12 – патрубок выхода пиролизных газов, 13 – загрузочный топливный люк отопительной камеры,
14 – кусковая древесина для отопления кожуха пиролизного реактора

Теплогенерирующий агрегат (рис. 1) для термохимической конверсии древесины состоит из двух коаксиально расположенных цилиндрических стальных кожухов отопительной камеры 1 и пиролизного реактора 2, закрываемых съемными крышками 9, 10. Кусковая сосновая древесина с влажностью 20 % и с размерами 100×100×100 мм в экспериментах загружается с помощью съемной сеточной стальной реторты в количестве

12 кг вовнутрь кожуха реактора 2. Через люк 13 загружается топливо в виде кусковой древесины 14 в количестве, обеспечивающем непрерывное интенсивное горение в течение двух часов. Первоначальная загрузка составляла 35 кг и осуществлялась, включая концентрическую полость между кожухами 1 и 2. После загрузки топлива и древесины для пиролиза крышки 9, 10 закрывались, ввертывался посредством резьбы в крышке 10 продувочный патрубок 8 и устанавливалась в отверстие 7 съемная дымовая труба (на рис. 1 позицией не обозначена). Производился розжиг отопительной древесины 14 через люк 13. Контроль температуры внутри и снаружи кожуха 2 пиролизного реактора проводился с помощью хромель-алюмелевых термопар 4, расположенных на высоте 20 см от дна реактора в стальных гильзах. Начало стадии сушки древесины и последующих стадий контролировалось через продувочный патрубок 8. Начало выделения пиролизных газов контролировалась по самовоспламенению пиролизного газа через патрубок 12, с помощью которого осуществлялся анализ состава пиролизного газа при помощи газоанализатора «Ока» в исполнении И11. Для поддержания интенсивности процесса низкотемпературного пиролиза по мере выгорания древесины для отопления осуществлялось пополнение ее количества через отверстие 7 при снятой дымовой трубе. Осуществлялось определение выхода летучих веществ путем отбора проб кусковой древесины 11 при снятой дымовой трубе и кратковременно снятых крышках 9, 10 и вывернутом патрубке 8. Эксперименты на агрегате проведены в полевых условиях при температуре наружного воздуха + 1 °С. Систематическая погрешность измерения температуры процесса пиролиза составляла $\pm 1,7\%$, погрешность определения состава пиролизного газа по содержанию кислорода составляла $\pm 1\%$. Низшая теплотворная способность пиролизного газа $Q_{н}^p$ (кДж/м³) определялась как сумма произведений тепловых эффектов компонентов горючих газов на их количество по формуле:

$$Q_{н}^p = 126,4 \text{ CO} + 107,9 \text{ H}_2 + 358,8 \text{ CH}_4 + 590,6 \text{ C}_2\text{H}_4 + 643,6 \text{ C}_2\text{H}_6 + 931,8 \text{ C}_3\text{H}_8 + 1731,7 \text{ C}_6\text{H}_{14}, \quad (1)$$

где CO, H₂, CH₄, C₂H₄ и т.д. – объемное содержание газообразных горючих компонентов в смеси, %.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 приведены экспериментальные данные по зависимости температуры снаружи $t_{сн}$ и внутри $t_{вн}$ пиролизного реактора и доли выхода летучих V^{daf} от времени $t_{п}$ пиролиза.

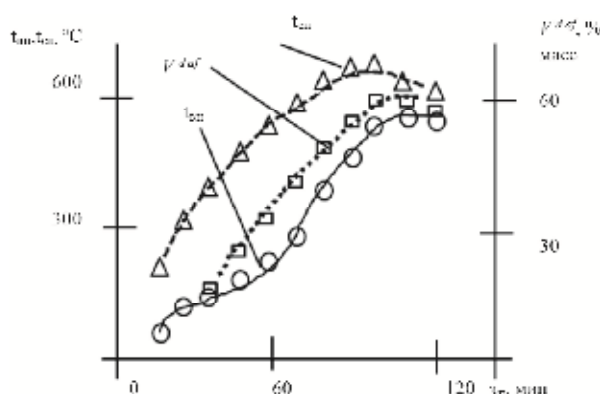


Рис. 2. Зависимость температуры внутри $t_{вн}$ и снаружи $t_{сн}$ реактора, доли выхода летучих V^{daf} от времени $t_{п}$ пиролиза

Как видно из рис. 2, на графике изменения температуры внутри пиролизной реторты $t_{вн}$ в зависимости от времени от начала процесса $t_{п}$ наблюдаются 4 участка:

1. Интервал изменения температур $t_{вн}$ до 140 °С, который длится до 30 мин от начала процесса и при котором удаляется влага из древесины и происходит сушка древесины. Выхода летучих веществ V^{daf} не наблюдается и процесс эндотермический и идет с поглощением теплоты, состав древесины не изменяется. Температура в коаксиальном канале между кожухом отопительной камеры и кожухом реактора $t_{сн}$ превышает температуру $t_{вн}$ в среднем на 150-200 °С. Для сокращения времени процесса

сушки можно увеличить скорость подвода теплоты за счет интенсификации лучистого теплообмена между продуктами горения топлива и кожухом 2.

2. Интервал изменения температур $t_{\text{вн}}$ от 140 °С до 260 °С с длительностью до 60 мин от начала процесса с поглощением теплоты, при котором начинается выделение летучих веществ $V^{d\text{af}}$ в количестве до 25 % при температуре внутри реторты 260 °С с разложением гемицеллюлоз и отдельных фрагментов лигнина и образованием низкомолекулярных продуктов в виде оксида углерода, водорода, углекислого газа. Температура в коаксиальном канале между кожухом отопительной камеры и кожухом реактора $t_{\text{сн}}$ превышает температуру $t_{\text{вн}}$ в среднем на 300 °С.

3. Интервал изменения температур $t_{\text{вн}}$ от 260 °С до 490 °С с длительностью до 90 мин от начала при экзотермическом процессе с выделением теплоты, при котором происходит интенсивное выделение летучих веществ $V^{d\text{af}}$ в количестве до 60 % с разложением целлюлозы и лигнина с образованием основной массы продуктов распада и формирование структуры древесного угля в виде остатка. Температура в коаксиальном канале между кожухом отопительной камеры и кожухом реактора $t_{\text{сн}}$ превышает температуру $t_{\text{вн}}$ в среднем на 200 °С.

4. Интервал изменения температур $t_{\text{вн}}$ от 490 °С до 600 °С с длительностью до 120 мин от начала при суммарном эндотермическом процессе с поглощением теплоты, при котором выход летучих веществ прекращается. В этом интервале происходит прокалка угля с выделением остаточных функциональных групп от углеродного скелета древесины. Температура в коаксиальном канале между кожухом отопительной камеры и кожухом реактора $t_{\text{сн1}}$ превышает температуру $t_{\text{вн}}$ в среднем на 50 °С. Состав пиролизного газа, измеренный газоанализатором на выходе из патрубка 12 при различных температурах $t_{\text{вн}}$ внутри реактора, получен следующий (табл. 1).

Таблица 1

**Состав пиролизного газа и низшая теплотворная способность $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$
при пиролизе древесины в зависимости от температуры**

Температура процесса $t_{\text{вн}}$, °С	Содержание горючих компонентов в составе пиролизного газа, % объемных					Теплотворная способность пиролизного газа $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$, кДж/м ³
	H ₂	CO	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₆ H ₁₄	
200	4,0	0	0	0	0	431,6
300	4,5	0,5	0	0	0	548,75
400	4,6	29	2	2,6	2,3	11290
500	12	21,4	14,3	4,1	3,2	18490
600	21	21,3	14,2	4,0	2,9	18800

Как видно из табл. 1, рост содержания водорода от 12 до 21 % при повышении температуры пиролиза от 500 °С до 600 °С не приводит к существенному росту теплотворной способности пиролизного газа. Сильный рост теплотворной способности $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ наблюдается при повышении температуры от 400 °С до 500 °С и объясняется увеличением содержания метана CH₄, пропана C₃H₈ и гексана C₆H₁₄.

На рис. 3 приведены фотосъемки пламени от горения пиролизного газа на начало интенсивного выделения пиролизного газа при 580 °С и его конец при 600 °С в сравнении с пламенем от горения топливной древесины на выходе 7 (рис. 1) из отопительной камеры. Как видно из рис. 3, пламя от горения пиролизного газа значительно по интенсивности излучения превышает интенсивность излучения пламени от горения топливной древесины, что связано с более высокой теплотворной способностью пиролизного газа равной 17443-17735 кДж/кг (при плотности пиролизного газа 1,06 кг/м³) по сравнению с горением влажной (при влагосодержании 20 %) топливной сосновой древесины равной 14100 кДж/кг. Уменьшение объема пламени при горении пиролизного газа в конце процесса (рис. 3 б) по сравнению с объемом в начале связано с меньшим выходом доли летучих компонентов $V^{d\text{af}}$ в конце процесса при 600 °С по сравнению с началом.

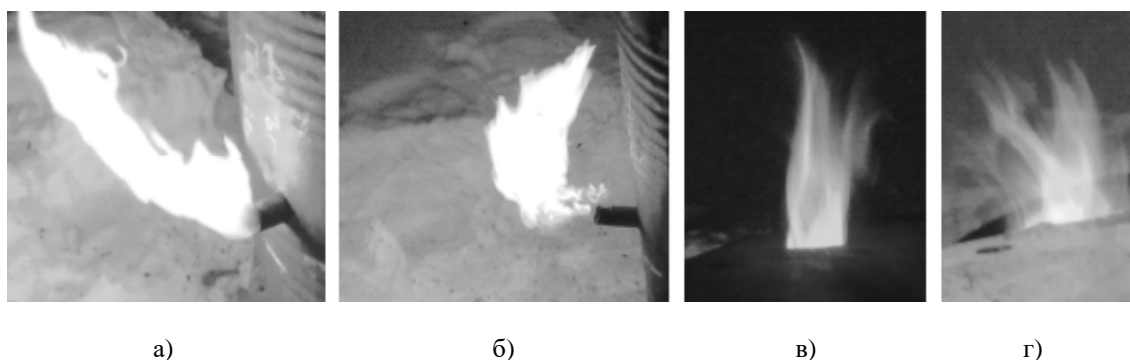


Рис. 3. Вид пламени от горения пиролизного газа на начало интенсивного выделения пиролизного газа при 580 °С (А) и его конец при 600 °С (Б) в сравнении с пламенем от горения топливной древесины на выходе 7 (рис. 1) из отопительной камеры на начало (В) и конец (Г) процесса интенсивного пиролиза

Относительные приращения теплоты сгорания DQ_n^p пиролизного газа и температуры в внутри реактора $Dt_{вн}$ в зависимости от температурного интервала процесса приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, для низко температурного пиролиза основной рост приращений теплоты сгорания DQ_n^p происходит в диапазоне 400...450 °С. Экзотермические реакции пиролиза в этой области дают заметный рост приращений температуры внутри пиролизного реактора $Dt_{вн}$. Повышение скорости подвода теплоты к пиролизному реактору приводит к более значительным приращениям DQ_n^p в области температур 400-450 °С.

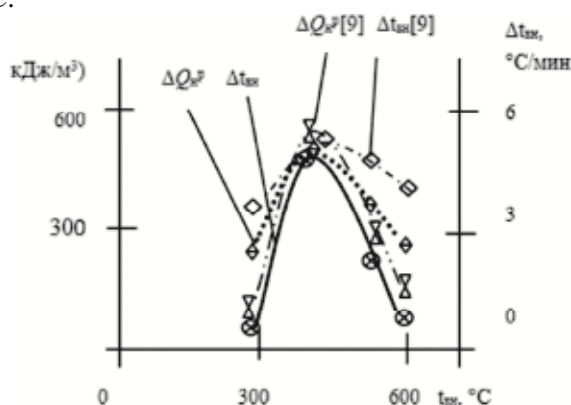


Рис. 4. Характеристики относительных приростов теплоты сгорания DQ_n^p пиролизного газа и приращений температуры $Dt_{вн}$ по промежуткам времени внутри пиролизного реактора для различных температурных интервалов в сравнении с данными других авторов [9]

Энергетический баланс пиролизного реактора при получении пиролизного газа из влажной древесины приведен в табл. 2.

Таблица 2

Энергетический баланс пиролизного реактора при получении пиролизного газа из влажной древесины

Приход			Расход		
Показатель	Значение		Показатель	Значение	
	МДж/кг	%		МДж/кг	%
Теплота химической энергии древесины	14,1	27,2	Теплота химической энергии пиролизного газа	17,7	34,2
Теплота на нагрев древесины	37,7	72,8	Теплота химической энергии угля	32,3	62,4
			Физическая теплота пиролизного газа	1,5	2,9
			Физическая теплота угля	0,3	0,6
			Невязка баланса		- 0,1
Итого	51,8	100	Итого	51,8	100

Как видно из табл. 2, в результате низкотемпературного пиролиза получают конечные качественные горючие продукты в виде пиролизного газа с теплотворной способностью 17,7 МДж/кг и древесного угля с теплотворной способностью 32,3 МДж/кг при использовании в качестве исходного сырья – древесины с влажностью 20 % и с теплотворной способностью 14,1 МДж/кг. Коэффициент использования древесины в качестве топлива для отопления пиролизного реактора составляет 72,8 %, что подтверждает экономичность использования древесины с влажностью 20 % для получения пиролизного газа и древесного угля.

Выводы

1. Для отопительных целей получение пиролизного газа из древесины методом низкотемпературного пиролиза в области температур 400-500 °С является предпочтительным по сравнению с пиролизом в области температур свыше 600 °С, так как приращение теплотворной способности с повышением температуры невелико и подводимая теплота используется на увеличение содержания водорода в составе пиролизного газа.

2. Коэффициент использования древесины с влажностью 20 % в качестве топлива и сырья для работы пиролизного реактора составляет в 72,8 %, что приемлемо для практического применения предложенной схемы и технологии.

Список библиографических ссылок

1. Басков В. Н., Панцхава Е. С. Моторные биотоплива: состояние и перспективы развития технологии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2013. № 4. С. 43–47.
2. Султангузин И. А., Замерград В. Э., Карасевич В. А., Албул А. В., Федюхин А. В. Оптимизация использования природного газа и возобновляемых источников энергии в энергетических компаниях // Наука и техника в газовой промышленности. 2013. № 1. С. 63–76.
3. Ahrenfeldt J., Thomsen T. P., Henriksen U., Clausen L. R. Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives // Applied Thermal Engineering. 2013. № 50. P. 1407–1417.
4. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and theory. Burlington: Elsevier, 2010. 352 p.
5. Buljit B., Pinakeswar M., Vijayand S. M. Thermodynamic optimization of biomass gasification for decentralized power generation and Fischere-Tropsch synthesis // Energy. 2010. № 35. P. 2557–2579.
6. François J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F., Dufour A. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // Chemical engineering transactions. 2012. № 29. P. 769–774.
7. Idris S. S., Rahman N. A., Ismail K., Alias A. B., Rashid Z. A., Aris M. J. Investigation on thermochemical behavior of low rank Malaysian coal, oil palm biomass and their blends during pyrolysis via thermogravimetric analysis (TGA) // Bioresource Technology. 2010. № 101. P. 4584–4592.
8. Ramzan N., Ashraf A., Naveed S., Malik A. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste // Biomass and Bioenergy. 2011. № 35. P. 3962–3969.
9. Rui Lou, Shu Bin Wu. Products properties from fast pyrolysis of enzymatic/mild acidolysis lignin // Applied Energy. 2011. № 88. P. 316–322.
10. Shen Y., Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. № 21. P. 371–392.
11. Uisung L., Elango B., Chung J. N. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications // Applied Energy. 2013. № 101. P. 699–708.

Taymarov M.A. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: taimarovma@yandex.ru

Kazan State Power University

The organization address: 420066, Russia, Kazan, Krasnoselskaya st., 51

Lavirko Yu.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: lav.yu55@gmail.com

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

The heat generating unit with the pyrolysis gas generation

Abstract

Problem statement. The aim of the work is to study the thermal characteristics of a designed and manufactured combined heat-generating unit for use in heating systems. The unit allows to receive charcoal and pyrolysis gas from the raw wood raw material.

Results. The main results of the study are that with an increase in the pyrolysis temperature from 400 °C to 600 °C, the hydrogen content of the pyrolysis gas increases, which causes a reduction in the calorific value of the pyrolysis gas obtained at a temperature of 600 °C. The optimum temperature for producing pyrolysis gas is a temperature of 500 °C, at which the intensity of hydrogen formation is small compared to the amount of methane formed.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the possibility of building boiler plants that use pyrolysis gas as the working fuel. The process of pyrolysis gas production must be carried out at temperatures of about 500 °C, in which the share of methane in the pyrolysis gas is about 20 % by mass, and the share of hydrogen is about 15 %. If the pyrolysis gas will use as a gaseous fuel burned at 600 °C (the proportion of hydrogen is 21 %), will need special burners because of the high rate of hydrogen burning compared to the combustion of methane. Pyrolysis gas with an increased hydrogen content of up to 21 % has wider ignition limits in a mixture with air compared to pyrolysis gas obtained at temperatures of about 500 °C.

Keywords: pyrolysis, pyrolysis gas, composition, methane, carbon monoxide, hydrogen, wood, temperature, calorific value, excess air, limit of ignition.

References

1. Baskov V. N., Pantskhava E. S. Motor biofuel: state and development prospects in the world and in Russia // *Teploenergetika*. 2013. № 4. P. 43–47.
2. Sultanguzin I. A., Zamerrad V. E., Karasevich V. A., Albul A. V., Fedyukhin A. V. Optimizing the use of natural gas and renewable energy sources in energy companies // *Nauka i tehnika v gazovoy promishlennosti*. 2013. № 1. P. 63–76.
3. Ahrenfeldt J., Thomsen T. P., Henriksen U., Clausen L. R. Biomass gasification cogeneration. A review of state of the art technology and near future perspectives // *Applied Thermal Engineering*. 2013. № 50. P. 1407–1417.
4. Basu P. Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and theory. Burlington: Elsevier, 2010. 352 p.
5. Buljit B., Pinakeswar M., Vijayand S. M. Thermodynamic optimization of biomass gasification for decentralized power generation and Fischere-Tropsch synthesis // *Energy*. 2010. № 35. P. 2557–2579.
6. François J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F., Dufour A. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // *Chemical engineering transactions*. 2012. № 29. P. 769–774.
7. Idris S. S., Rahman N. A., Ismail K., Alias A. B., Rashid Z. A., Aris M. J. Investigation on thermochemical behavior of low rank Malaysian coal, oil palm biomass and their

- blends during pyrolysis via thermogravimetric analysis (TGA) // *Bioresource Technology*. 2010. № 101. P. 4584–4592.
8. Ramzan N., Ashraf A., Naveed S., Malik A. Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste // *Biomass and Bioenergy*. 2011. № 35. P. 3962–3969.
 9. Rui Lou, Shu Bin Wu. Products properties from fast pyrolysis of enzymatic/mild acidolysis lignin // *Applied Energy*. 2011. № 88. P. 316–322.
 10. Shen Y., Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. № 21. P. 371–392.
 11. Uisung L., Elango B., Chung J. N. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications // *Applied Energy*. 2013. № 101. P. 699–708.