



РАЗРАБОТКА ПРЯМОТОЧНОЙ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

М.А. Таймаров, Е.Г. Чикляев

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
tvt_kgeu@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть возобновляемый источник энергии. Сравнить предлагаемую конструкцию с другими пиролизными технологиями и убедиться в том, что предлагаемая конструкция снизит расход топлива. МЕТОДЫ. В данной статье предлагается конструкция и технологический принцип процесса пирогенетической переработки древесины с выработкой различных составов пиролизного газа и древесного угля. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана предлагаемая конструкция, для нее произведены расчеты теплового баланса и определены эксплуатационные параметры технологического процесса. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Главным положительным отличием предлагаемой конструкции установки и технологии от других пиролизных технологий является высокий уровень экономии топлива за счет утилизации теплоты на промежуточных стадиях процесса. Утилизируется теплота охлаждаемого древесного угля и уходящих продуктов полного сгорания топлива. Разработанная конструкция позволяет снизить расход топлива, а так же номенклатура получаемых газообразных компонентов в результате пирогенетического разложения сырьевой древесины в прямоточной пиролизной установке может быть увеличена.

Ключевые слова: Древесина, пиролиз, пирогенетический, прямоточный, разложение, температура, непрерывный, уголь, пиролизный газ, технология.

Для цитирования: Таймаров М.А., Чикляев Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.

DEVELOPMENT OF A DIRECT FLOW PYROLYSIS PLANT FOR PYROGENETIC DECOMPOSITION OF WOOD

MA. Taimarov, EG. Chiklyayev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
tvt_kgeu@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Consider a renewable energy source. Compare the proposed design with other pyrolysis technologies and make sure that the proposed design will reduce fuel consumption. METHODS. This article proposes the design and technological principle of the process of pyrogenetic wood processing with the production of various compositions of pyrolysis gas and charcoal. RESULTS. The article describes the proposed design, calculates the heat balance for it, and determines the operational parameters of the technological process. CONCLUSION. The main positive difference between the proposed plant design and technology from other pyrolysis technologies is a high level of fuel economy due to heat utilization at intermediate stages of the process. The heat of the cooled charcoal and the waste products of complete fuel combustion are utilized. The developed design allows reducing fuel consumption, as well as the range of gaseous components obtained as a result of pyrogenetic decomposition of raw wood in a direct-flow pyrolysis plant can be increased.

Keywords: Wood, pyrolysis, pyrogenetic, direct-flow, decomposition, temperature, continuous, coal, pyrolysis gas, technology.

For citation: Taimarov MA, Chiklyayev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):68-78. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78.

Введение

Пиролиз древесины для выработки пиролизного газа и угля является приоритетным направлением в лесохимическом использовании возобновляемых источников углеводородного сырья [1-4]. Имеется достаточное количество конструкций пиролизных установок, характеризующихся различным температурным уровнем процесса химико-термического разложения древесины, удельным расходом топлива, количеством получаемых компонентов в составе пиролизного газа, производительностью. Главными показателями эффективности работы установок служат эффективность использования топлива и производительность по выпуску качественных компонентов, пригодных для использования в качестве заменителей углеводородных соединений для нефтехимии, которая отличается крупнотоннажным производством. Поэтому разработка конструкций пиролизных установок с высокой производительностью, которой посвящена данная статья, является актуальным и востребованным направлением в области создания новых технологий пирогенетического разложения древесины.

Описание объекта исследования

Выпускаемые промышленностью известные установки для пиролиза древесины, как правило, имеют периодическое действие, связанное с загрузкой древесного сырья и выгрузкой угля. Их особенностью является также раздельное выполнение технологических операций, связанных с сушкой древесины, предварительным нагревом загруженного древесного сырья, охлаждение выгруженного угля [5]. По целевому назначению большинство выпускаемых промышленностью пиролизных установок пирогенетического разложения древесины предназначены для получения древесного угля. В таких технологиях пиролизный газ является побочным продуктом с невысокой теплотой сгорания. Значительные потери теплоты сжигаемого топлива связаны с подогревом воздуха, подаваемого на горение. Эти два последних недостатка характерны также для установок пирогенетического разложения древесины непрерывного действия, выпуск которых также в небольшом количестве освоен промышленностью. В разработанной конструкции указанные недостатки устранены путем отделения топки от реторты, в которой происходит пиролиз древесины, и от камеры сушки. Нагрев воздуха, подаваемого в топочную камеру, происходит за счет отводимой от охлаждаемого угля теплоты. Схема разработанной прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины приведена на рис. 1.

Герметичный люк 1 (см. рис. 1) служит для загрузки сырьевой предварительно измельченной древесины, предназначенной для получения из нее древесного угля. Через герметичный люк 2 загружается предварительно измельченная топливная древесина, из которой при сжигании вырабатывается теплота для нагрева камеры сушки 5 и камеры пиролиза 11. На стадии сушки из сырьевой древесины 3 удаляется влага путем нагрева в герметичной камере сушки 5. Пары воды отводятся по трубе 27 в дымовую теплоизолированную трубу 26. Таким образом, в составе одной установки имеется камера сушки 5, использующая теплоту от топочной камеры 4.

В топочной камере 4 сжигается топливная древесина 6 и получаемая теплота передается через стенку камеры пиролиза 11 нагреваемой сырьевой древесине 10. Конструктивно топочная камера 4 расположена коаксиально по отношению к цилиндрической камере пиролиза 11. [6-7].

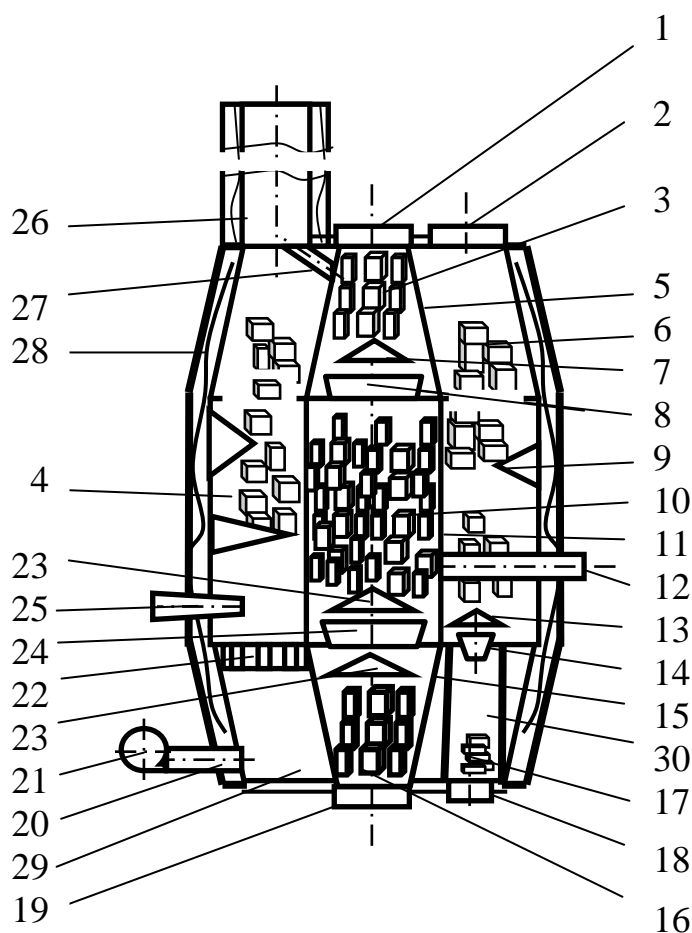


Рис. 1. Схема прямооточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины: 1-люк для загрузки сырьевой древесины, 2- люк для загрузки топливной древесины, 3- сырьевая древесина на стадии сушки, 4 – топочная камера, 5 – камера сушки, 6 – топливная древесина, 7 – конус для загрузки сухой древесины, 8 – сушильный разделяющий конус, 9 – распределительные ребра, 10 - сырьевая древесина на стадии пиролиза, 11- камера пиролиза, 12 – труба отвода пиролизных газов, 13 – конус для выгрузки золы, 14 – зольный разделяющий конус, 15 – камера охлаждения угля, 16 – уголь на стадии охлаждения, 17 - зола, 18 – люк для удаления золы, 19 - люк для удаления угля, 20 – труба подачи воздуха, 21 - дутьевой вентилятор, 22 - колосник, 23 – конус для выгрузки угля, 24 – пиролизный разделяющий конус, 25 – растопочная горелка, 26 – дымовая труба, 27 – труба удаления водяного пара, 28 – тепловая изоляция, 29 – форкамера, 30 – зольный отсек

Топливная древесина 6 в измельченном виде используется в разработанной установке путем прямого сжигания в топочной камере 4 в качестве топлива. Конус 7 для загрузки сухой древесины является подвижным элементом и служит подачи высушенной древесины 3 в камеру пиролиза 11. Сушильный разделяющий конус 8 служит для отделения объема камеры сушки 5 от объема камеры пиролиза 11. Для загрузки высушенной древесины 3 из камеры сушки 5 в камеру пиролиза 11 разделяющий конус 8 посередине имеет проходное отверстие, которое на стадии сушки древесины 3 закрыто конусом 7. При этом камера сушки 5 и камера пиролиза 11 герметично разобщены. Наличие разделяющего конуса 8, который за исключением непродолжительного по времени периода загрузки высушенной древесины 3 в камеру пиролиза 11, закрыт конусом 7 является отличительным признаком разработанной конструкции по сравнению с известными конструкциями пиролизных установок выпускаемых промышленностью.

Распределительные ребра 9 выравнивают слой топливной древесины 6 по объему топочной камеры 4. С помощью распределительных ребер 9 достигается равномерная циркуляция нагретых продуктов сгорания топлива в топочной камере 4 для передачи теплоты по высоте камеры пиролиза 11. Сырьевая древесина 10 под действие высокой

температуры, получаемой за счет внешнего повода теплоты через стенку камеры пиролиза 11, подвергается пирогенетическому разложению без доступа воздуха.

Труба 12 отвода пиролизных газов соединена с внутренним объемом камеры пиролиза 11 и предназначена для подачи пиролизного газа внешним потребителям. Непосредственно в технологическом рабочем режиме для обеспечения процесса пирогенетического разложения древесины 10 получаемый пиролизный газ не используется.

Подвижный конус 13 служит для выгрузки золы 17, образующейся при сгорании топливной древесины 6 в топочной камере 4. Неподвижный зольный разделяющий конус 14 отделяет зольный отсек 30 от топочной камеры 4. При отсутствии выгрузки золы из топочной камеры 4 конус 13 герметично перекрывает проходное отверстие зольного разделяющего конуса 14. В камере 15 происходит охлаждение нагретого угля, выгруженного из камеры пиролиза 11. Теплота нагретого угля 16 передается через стенку к нагреваемому воздуху, поступающему по трубе 20 от дутьевого вентилятора 21. Нагретый воздух через колосник 22 поступает на горение топливной древесины 6.

Древесный уголь 16 является конечным твердым продуктом термохимического разложения сырьевой древесины 3 в камере пиролиза 11. Отводимая от него теплота используется непосредственно в самой установке в топочной камере 4. Зола 17 является конечным твердым продуктом от сжигания топливной древесины 6 и периодически удаляется из зольного отсека 30 при помощи герметичного люка 18. Теплота, выделяемая золой 17 за время пребывания в зольном отсеке 30, передается через стенку нагреваемому воздуху, находящемуся в форкамере 29. Люк 19 служит для выгрузки охлажденного угля 16 из камеры охлаждения 15.

Колосник 22 предотвращает провал золы из топочной камеры 4 в форкамеру 29. Подвижные конусы 23 служат для периодической выгрузки древесного угля из камеры пиролиза 11 в камеру охлаждения 15 через проходное отверстие в разделяющем конусе 24. С помощью конусов 23 и неподвижного пиролизного разделяющего конуса 24 также происходит герметичное отделение камеры пиролиза 11 от камеры охлаждения 15 при отсутствии выгрузки угля. При герметизации верхний конус 23 опускается, а нижний конус 23 при этом поднимается и происходит перекрытие проходного отверстия в разделяющем конусе 24.

Комбинированная растопочная горелка 25 предназначена для первичного воспламенения топливной древесины 6 в топочной камере 4 за счет факела, получаемого от сжигания газообразного или жидкого топлива. После воспламенения топливной древесины 6 в топочной камере 4 горелка 25 отключается. Тепловая изоляция 28 служит для предотвращения теплопотерь топочной камеры 4 и пиролизной камеры 11 от наружного охлаждения. Форкамера 29 предназначена для создания объема воздуха, нагреваемого за счет теплоты, отводимой от угля 16 и золы 17, перед подачей его в топочную камеру 4. Форкамера 29 расположена снаружи вокруг камеры охлаждения угля 15 и вокруг зольного отсека 30.

Зольный отсек 30 служит для промежуточного хранения нагретой золы 17 при отдаче ее теплоты нагреваемому воздуху, находящемуся в форкамере 29. Открытие и закрытие люков 1, 2, 18, 19, перемещение конусов 7, 13, 23 осуществляется при помощи механизмов с электрическими сервоприводами от миникомпьютера по программе в автоматическом режиме.

Пиролизная установка работает следующим образом. Заранее измельченная сырьевая древесина 3 размером кусков не более 80х80х80 мм через люк 1 загружается в камеру сушки 5 при опущенном конусе 7 и закрытом с его помощью разделяющем конусе 8. После загрузки древесины 3 люк 1 герметично закрывается. Закрытыми также являются пиролизный разделяющий конус 24, зольный конус 14, люки 2, 18 и 19.

Через люк 2, после его открытия, загружается измельченная топливная древесина 6 с размером кусков не более 80х80х80 мм. После загрузки древесины 6 люк 2 герметично закрывается. При помощи распределительных ребер 9 при загрузке происходит выравнивание укладки древесины 6 в топочной камере 4. Включается дутьевой вентилятор 21 и через трубу 20, форкамеру 29, через колосник 22 подается воздух в топку 4.

Включается подача вспомогательного топлива в растопочную горелку 25 и производится его электрическое воспламенение. За счет получаемого факела от горения вспомогательного топлива происходит слоевое воспламенение топливной древесины 6. После слоевого воспламенения топливной древесины 6 подача вспомогательного топлива в растопочную горелку 25 прекращается. За счет выделяющейся при горении топливной древесины 6 теплоты производится прогрев камеры пиролиза 11 и сушка сырьевой древесины 3 в камере сушки 5.

Образующаяся от сгорания топливной древесины 6 нагретая зола за счет движения воздуха, непрерывно подаваемого в топочную камеру 4 через отверстия в колоснике 22, скапливается на конусе 13 и на входе разделяющего конуса 14. После накопления определенной массы золы, периодически в автоматическом режиме сервоприводом от миникомпьютера конус 13 приподнимается вверх и через освобожденное проходное отверстие разделяющего конуса 14 зола 17 воздухом проталкивается в зольный отсек 30. После перемещения золы 17 конус 13 опускается и герметично закрывает проходное отверстие разделяющего конуса 14.

Зола 17 в зольном отсеке 30 охлаждается путем отдачи теплоты через стенку воздуху, который находится в форкамере 29 и затем поступает в топочную камеру 4. После охлаждения золы 17, люк 18 открывается, и зола удаляется из зольного отсека 30. Затем происходит герметичное закрытие люка 18. После удаления влаги из сырьевой древесины 3, конус 7 приподнимается, освобождая проходное отверстие разделяющего конуса 8, и высушенная древесина поступает в камеру пиролиза 11, стенка которой уже прогрета за счет теплоты, подведенной от сгоревшей топливной древесины 6.

После загрузки камеры пиролиза 11 древесиной 10, конус 7 опускается вниз и герметично перекрывает проходное отверстие разделяющего конуса 8. Затем открывается люк 1 и загружается новая порция сырьевой древесины 3 для удаления из нее влаги. После загрузки древесины 3 люк 1 герметично закрывается и древесина 3 подвергается нагреву за счет подведенной теплоты от сгорания топливной древесины 6. Образующиеся при сушке пары воды непрерывно удаляются через трубу 27 в дымовую трубу 26 за счет ее самотяги. Подача новой порции топливной древесины 6 взамен сгоревшей происходит периодически путем открытия люка 2.

В камере 11 после прогрева древесины 10 наступает процесс ее пиролизного разложения без доступа воздуха. Выделяющийся под действие высокой температуры при термохимическом разложении древесины высококондиционный пиролизный газ под избыточным давлением поступает через трубу 12 к внешним потребителям и в рабочем режиме в разработанной установке в виде топлива не используется. После завершения процесса пиролиза и выделения пиролизного газа механизмом с электрическим сервоприводом поднимается верхний конус 23 и опускается нижний конус 23 и через освободившееся проходное отверстие разделяющего конуса 24 происходит удаление древесного угля 16 в камеру охлаждения 15. Перемещение верхнего конуса 23 происходит в колебательном режиме и высота подъема зависит от размера кусков образовавшегося угля 16.

После удаления угля 16 из камеры 11 проходное отверстие конуса 24 герметично перекрывается конусами 23, а в освободившийся объем подается древесина 3 из камеры 5. В освободившийся объем камеры 5 через люк 1 подается новая порция древесины 3 для сушки. От нагретого угля 16 через стенку камеры 15 отводится теплота к подаваемому вентилятором 21 на горение топлива 6 воздуху, который поступает в топочную камеру 4 уже подогретым за счет отведенной от охлаждаемого угля 16 теплоты.

После охлаждения уголь из камеры 15 удаляется путем открытия люка 19, который затем герметично закрывается. По мере сгорания топливной древесины 6 в камере 4 новая порция древесины загружается периодически через люк 2. Далее все процессы функционирования пиролизной установки повторяются. [8-10]

Результаты

Для разработанной конструкции пиролизной установки произведены расчеты теплового баланса и определены эксплуатационные параметры технологического процесса с учетом получаемых конечных продуктов при различных режимах работы. Тепловой баланс пиролизной установки для пиролизного разложения сосновой древесины с влажностью 25 % приведен в табл. 1.

Таблица 1

Тепловой баланс пиролизной установки, рассчитанный на 1 кг подвергаемой пиролизу сырьевой древесины с влажностью 25 %.

| Приход | | | Расход | | |
|-------------------------------------|----------|-----|--|----------|-------|
| Показатель | Значение | | Показатель | Значение | |
| | МДж/кг | % | | МДж/кг | % |
| Затрата теплоты топливной древесины | 2,6 | 100 | Расход теплоты на пирогенетическое разложение сырьевой древесины q_p | 2,45 | 94,23 |
| | | | Потеря теплоты с уходящими дымовыми газами от горения топливной древесины | 0,08 | 3,08 |
| | | | Потеря теплоты от наружного охлаждения | 0,04 | 1,54 |
| | | | Потеря с физической остаточной теплотой золы, угля, пиролизного газа и водяного пара | 0,03 | 1,15 |
| Итого | 2,6 | 100 | Итого | 2,6 | 100 |

Расчет расхода теплоты на пирогенетическое разложение 1 кг сырьевой древесины выполнен по формуле [16]

$$q_p = \frac{0,001t_m(96W_c + 5,3t_n + 35k - 820)}{t_m - t_n} \text{ МДж/кг,} \quad (1)$$

Где t_m и t_n – температура продуктов сгорания в топочной камере 4 и температура пиролизных газов на выходе из трубы 12 (см. рис. 1), °С; W_c – влажность сырьевой древесины, поступающей в камеру пиролиза, %; k – коэффициент теплопередачи через стенку камеры пиролиза, Дж/(м²×°С).

Значение расхода теплоты на пирогенетическое разложение 1 кг сырьевой древесины q_p , приведенное в табл.1, получено при следующих параметрах процесса: t_m = 600°С, t_n = 150°С, W_c = 25% с учетом снижения влажности на 6 % за счет сушки сырьевой древесины в камере сушки 5 (см. рис. 1), k = 1 Дж/(м²×°С).

Определение массового расхода и потерь теплоты осуществляется исходя из следующих характеристик топливной древесины. Низшая теплота сгорания в рабочей массе 1 кг топливной древесины Q_n^p (МДж/кг) в зависимости от ее влажности W_c (%) может быть определена по зависимости:

$$Q_n^p = 18 - 0,146 \times W_c \text{ МДж/кг,}$$

Под влажностью W_c понимается масса воды в древесине, поделенная на массу сухого остатка и выраженная в процентах. При сгорании 1 кг сухой древесины удельное массовое выделение водяных паров в среднем составляет $d_B = 0,567$ кг/кг. Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг сухой топливной древесины $V_T^B = 5,2$ нм³/кг.

Преимуществом сушки сырьевой древесины в камере сушки 5 (см. рис. 1) является отвод испаряемой влаги по трубе 27 в дымовую трубу 26 с выбросом в атмосферу. В дымовой теплоизолированной трубе 26 температура внутренних стенок выше 80°С и конденсат не образуется. Поэтому в конструкции установки (см. рис. 1) возможно осуществление охлаждения дымовых газов от сгорания топлива до температур в диапазоне от 80°С до 100°С. В существующих вертикальных промышленных пиролизных установках камера сушки отсутствует и сырьевая древесина загружается сразу в камеру пиролиза. Испаряемая влага не удаляется из камеры пиролиза и в качестве газообразного балласта присутствует в составе пиролизного газа.

Основной расход теплоты при пирогенетическом разложении сырьевой древесины q_p связан с величиной содержания в ней влаги. На рис. 2 приведена зависимость расхода теплоты q_p на пирогенетическое разложение сырьевой древесины при различных значениях влажности древесины W_c , температурах в топочной камере t_m и температурах пиролизных газов t_n .

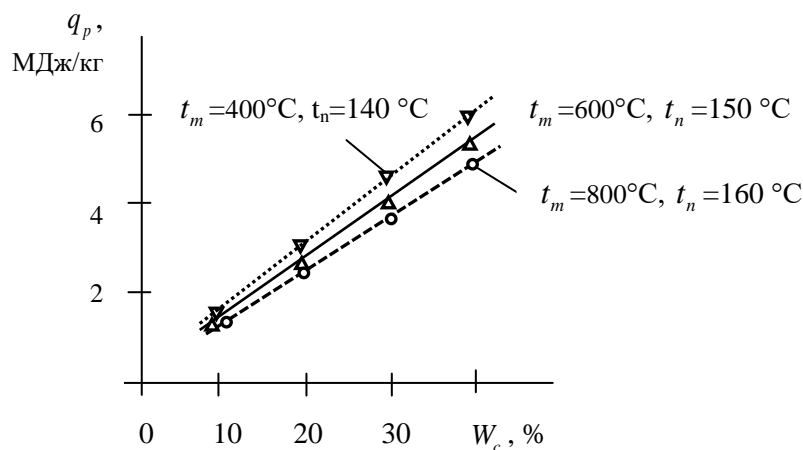


Рис. 2. Зависимость расхода теплоты q_p на пирогенетическое разложение 1 кг сырьевой древесины при различных значениях влажности древесины W_c , температурах в топочной камере t_m и температурах пиролизных газов t_n .

Из рис. 2 видно, что увеличение содержания влаги в сырьевой древесине на 10 % оказывает большее влияние на возрастание потребления теплоты q_p по сравнению с увеличением температуры в топочной камере t_m на 200°C . Поэтому применение в разработанной конструкции камеры сушки 5 является эффективным техническим решением для оптимизации процесса пиролиза.

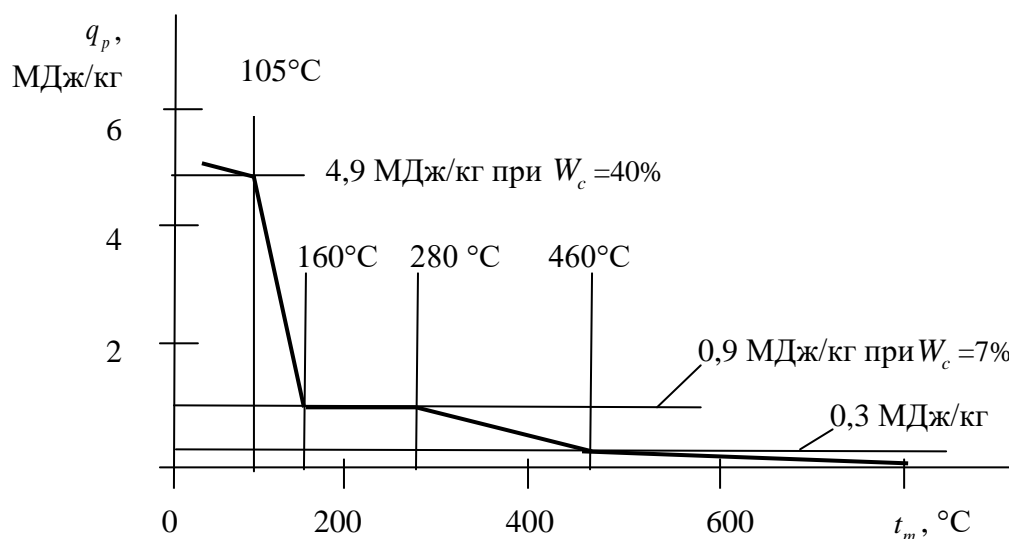


Рис.3. Зависимость расхода теплоты q_p по температурным интервалам процесса пирогенетического разложения древесины при температуре в топке $t_m = 800^\circ\text{C}$.

На рис.3. с использованием экспериментальных данных работы [11-12], построена зависимость расхода теплоты q_p для температурных интервалов процесса пирогагенетического разложения древесины при температуре в топке $t_m = 800^\circ\text{C}$.

На рис. 3 можно выделить 4 температурных области процесса пиролиза.

Первая область до температуры 160°C состоит из процесса сушки древесины с различной влажностью после камеры сушки 5 (см. рис. 1). Расход теплоты на процесс от температуры сырьевой древесины в камере сушки 105°C до достижения температуры 160°C в камере пиролиза 11 (см. рис. 1) определяется как разность Δq_p при 105°C и 160°C . Для влажности, указанной на рис. 3, на 1 кг сырьевой древесины $\Delta q_p = 4$ МДж/кг.

Вторая область свыше 160°C до 280°C характеризуется подводом теплоты извне и представляет собой начало разложения древесины и сопровождается распадом нестойких компонентов древесины, выделением диоксида и оксида углерода.[13-14]

Третья область свыше 280°C до 460°C характеризуется большим выделением теплоты вследствие экзотермического процесса пирогагенетического разложения сырьевой древесины с тепловым эффектом 0,9 МДж/кг и выделением пиролизного газа и смолы. Однако тепловой эффект проявляется только при непосредственном разложении древесины. Чем медленнее происходит процесс пирогагенетического разложения, тем выше его экзотермичность. Количество потребляемой извне теплоты от сжигания топливной древесины сильно уменьшается.

Четвертая область свыше 460°C до 800°C состоит из прокаливания древесного остатка за счет подводимой извне теплоты с образованием конечного продукта – древесного угля и остаточным выделением тяжелой смолы.

Как видно из рис. 3, на собственно процесс пирогагенетического разложения 1 кг сырьевой древесины расход подводимой извне теплоты $\Delta q_p = 0,6$ МДж/кг. Эффективность процесса пирогагенетического разложения сырьевой древесины 10 в камере пиролиза 11 зависит от скорости подвода теплоты из топочной камеры 4 (см. рис. 1).

Изменение скорости нагрева сырьевой древесины от начальной температуры до температуры завершения пирогагенетического разложения приводит к качественному и количественному смещению температурных областей процесса приведенных на рис. 3.

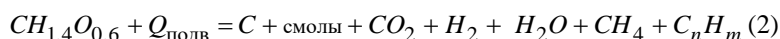
Медленный нагрев приводит к смещению температурных диапазонов в область более низких значений, а увеличение скорости нагрева перемещает их в область более высоких значений.

При соответствующих конструктивных параметрах топочной камеры 4, камеры сушки 5, камеры пиролиза 11 и камеры охлаждения угля 15 в разработанной прямоточной пиролизной установке (см. рис. 1) могут быть реализованы следующие технологические виды режимов пирогагенетического разложения сырьевой древесины 10.

Режим медленного пиролиза, заключающийся в термохимической деструкции сырьевой древесины без доступа воздуха, при котором скорость нагрева древесины составляет $1-15^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Режим быстрого пиролиза, заключающийся в термохимической деструкции сырьевой древесины без доступа воздуха, при котором скорость нагрева древесины составляет $200-600^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Из предпосылки [15], что химический состав сырьевой древесины описывается формулой $CH_{1,4}O_{0,6}$, реакция пирогагенетического разложения древесины может быть выражена как:



где C - углеводный остаток, $Q_{\text{подв}}$ – подведенная теплота к сырьевой древесине в камере пиролиза 11 (см. рис. 1).

В зависимости от количества и скорости подведения теплоты $Q_{\text{подв}}$, то есть от вида режима пиролиза, в правой части уравнения (2) получается необходимая номенклатура компонентов пирогагенетического разложения древесины.

На рис.4 для 1 кг сырьевой древесины приведена зависимость скорости подвода теплоты в виде произведения Δq_p по различным температурным интервалам и величины этих интервалов Δt_m процесса пирогагенетического разложения древесины.

Из рис. 4 видно, что интенсивность подвода теплоты в диапазоне температур от 160°C до 460°C невысокая процесс пирогенетического разложения древесины идет в режиме медленного пиролиза, конечным продуктом которого является древесный уголь.

Для осуществления перехода к режиму быстрого пиролиза требуется увеличить количество подводимой теплоты от сжигания топливной древесины в диапазоне температур от 160°C до 460°C. Это может быть достигнуто путем снижения расхода теплоты на сушку древесины в области температур от 80°C до 160°C за счет загрузки в камеру сушки 5 (см. рис. 1) сырьевой древесины с влажностью 10 %.

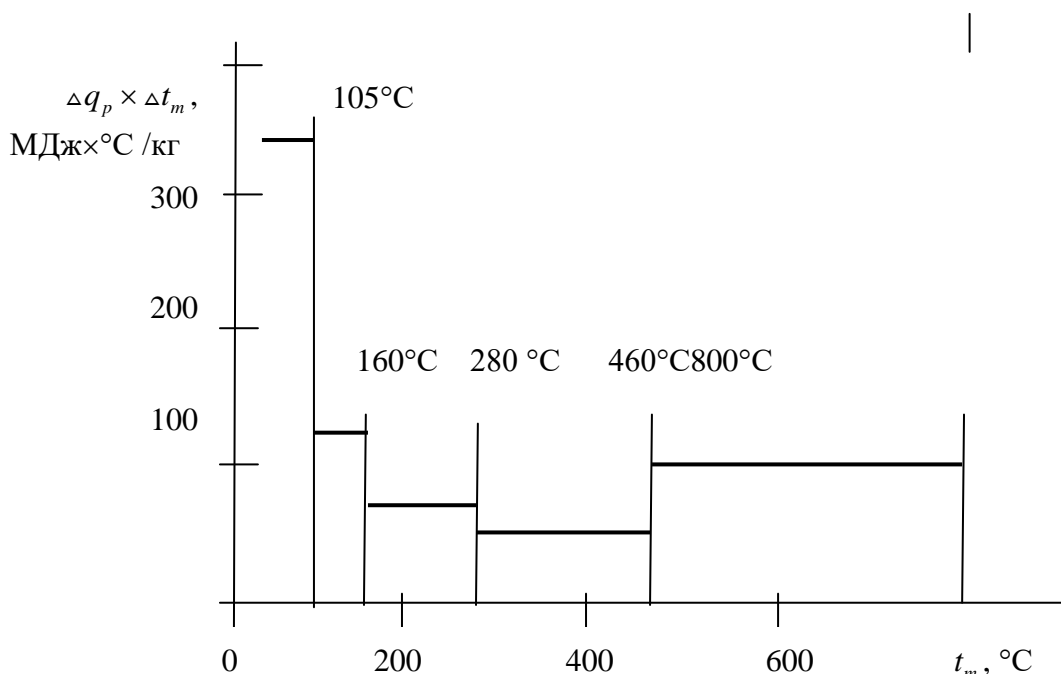


Рис.4. Величина $\Delta q_p \times \Delta t_m$ по различным температурным интервалам процесса пирогенетического разложения 1 кг сырьевой древесины

За счет дополнительного подвода теплоты верхний температурный диапазон с 460°C сдвинется в область температур 550°C...600 °C с увеличением количества получаемых газообразных углеводородов и уменьшением количества получаемого древесного угля.

Выводы

1. Разработанная конструкция прямоточной пиролизной установки для пирогенетического разложения древесины позволяет снизить расход топлива путем дополнительного удаления влаги из сырьевой древесины в камере сушки за счет утилизации теплоты уходящих газов от сгорания топлива.

2. Номенклатура получаемых газообразных компонентов в результате пирогенетического разложения сырьевой древесины в прямоточной пиролизной установке может быть увеличена за счет применения быстрого пиролиза путем снижения влажности сырьевой древесины на входе в камеру пиролиза и увеличения подвода теплоты из топки в температурном диапазоне от 160°C до 460°C.

Литература

1. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г., Касимова Л.И. Получение водорода из вторичной древесины. В сб. статей Международной научно-практической конференции «Наука в современном обществе: закономерности и тенденции развития». Аэтерна, Магнитогорск. 2018. С. 44 -47.
2. Таймаров М.А., Чикляев Е.Г., Касимова Л.И. Пирогенетическая переработка древесины при переменных параметрах процесса. В сб. статей Международной научно-практической конференции «Технологическая кооперация науки и производства: новые идеи и перспективы развития. Аэтерна, Тюмень, 2018. С. 64-67
3. Beckmann M., Klepmann F., Martin J., Scholz R. / Classification of Waste-to-energy Plants in Terms of Energy Recovery//VGB Power Tech. 2017. № 10. P. 76-81.

4. Francois J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // *Chemical engineering transactions*. 2016. №29. P. 769-774.
5. 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.
6. Uisung L., Elango B., Chung J. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications // *Applied Energy*. 2013. №101. P. 699-708.
7. Liu X. Calcium Methoxide as a Solid Base Catalyst for the Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel with Methanol // *Fuel*. 2008. V. 87. P. 1076–1082.
8. Russbueldt B., Hoelderich W. New Rare Earth Oxide Catalysts for the Transesterification of Triglycerides with Methanol Resulting in Biodiesel and Pure Glycerol // *Journal of Catalysis*. 2010. V. 271 (2). P. 290–304.
9. Demirbas A. Biodiesel: a Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines // London : Springer-Verlag London Limited, 2018. 209 p.
10. Balat M. Significance of LPG in Turkish Vehicular Transportation // *Energy Sources*. 2005. N. 27. P. 485-488.
11. Syred N. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners // *Applied Energy*. 2015. № 89 (1). P. 106-110.
12. Lieuwen T. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability. // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2008. №130 (1). 10p.
13. Arutyunov V. Utilization of Associated Petroleum Gas via Small-Scale Power Generation // *Russian journal of general chemistry*. 2011. V. 81. N. 12.
14. Faramawy S. Natural gas origin, composition, and processing // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. № 34. P. 34-54.
15. Ahrenfeldt J., Thomsen T., Henriksen U., Clausen L. Biomass gasification cogeneration. - A review of state of the art technology and near future perspectives // *Applied Thermal Engineering*. 2015. №50. P. 1407-1417.
16. Тюрина Э.А., Медников А.С., Елсуков П.Ю. Модульные установки комбинированного производства электроэнергии и жидких топлив на основе древесной биомассы. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22(1). С. 113-127.
17. Таймаров М.А., Ильин В.К., Осипов А.Л., Долгова А.Н., Ахмеров А.В. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2019. Т. 21(3-4). С. 7-14.
18. Таймаров М.А., Кувшинов Н.Е., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г. Особенности химических реакций горения метано-водородной фракции в радиантных топках. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2016. Т. 21(11-12). С. 124-128.

Авторы публикации

Таймаров Михаил Александрович – д-р тех. наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Чикляев Евгений Геннадьевич – старший преподаватель, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Taimarov MA, Chiklyayev EG, Kasimova LI. Obtaining hydrogen from secondary wood. In the collection of articles of the *International scientific and practical conference Science in modern society: patterns and trends of development*. Aeterna, Magnitogorsk, 2018. p. 44 -47.
2. Taimarov MA, Chiklyayev EG, Kasimova LI. Pyrogenetic processing of wood with variable process parameters. In the collection of articles of the *International scientific and practical conference: Technological cooperation of science and production: new ideas and prospects for development*. Aeterna, Tyumen, 2018, pp. 64-67.
3. Beckmann M, Klepmann F, Martin J, Scholz R. *Classification of Waste-to-energy Plants in Terms of Energy Recovery*. VGB PowerTech. 2017;10:76-81.
4. Francois J, Abdelouahed L, Mauviel G, et al. Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus. *Chemical engineering transactions*. 2016;29:769-774.
5. Shen Y, Yoshikawa K. Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;21:371–392.
6. Uisung L., Elango B., Chung J. An experimental evaluation of an integrated biomass gasification and power generation system for distributed power applications. *Applied Energy*. 2013;101:699-708.

7. Liu X. Calcium Methoxide as a Solid Base Catalyst for the Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel with Methanol. *Fuel*. 2008;87:1076–1082.
8. Russbueltd B, Hoelderich W. New Rare Earth Oxide Catalysts for the Transesterification of Triglycerides with Methanol Resulting in Biodiesel and Pure Glycerol. *Journal of Catalysis*. 2010;271(2): 290–304.
9. Demirbas A. *Biodiesel: a Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. London : Springer-Verlag London Limited, 2018. 209 p.
10. Balat M. Significance of LPG in Turkish Vehicular Transpotation. *Energy Sources*. 2005;27:485-488.
11. Syred N. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners. *Applied Energy*. 2015;89 (1):106-110.
12. Lieuwen T. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2008;130(1):10.
13. Arutyunov V. Utilization of Associated Petroleum Gas via Small-Scale Power Generation Russian journal of general chemistry. 2011;81:12.
14. Faramawy S. Natural gas origin, composition, and processing. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016;34:34-54.
15. Ahrenfeldt J, Thomsen T, Henriksen U, et al. Biomass gasification cogeneration. - A review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering*. 2015;50:1407-1417.
16. Tyurina EA, Mednikov AS, Elsukov PYu. Modular plants for combined biomass-based production of electricity and synthetic liquid fuel. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):113-127.
17. Taimarov MA, Ilyin VK, Osipov AL, et al. Heat pumps complex for recycling of secondary energy resources of petrochemical plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21 (3-4):7-14.
18. Tajmarov MA, Kuvshinov NE, Ahmetova RV, et al. Especially the chemical reactions of combustion of methane-hydrogen fraction in radiant furnaces. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(11-12):124-128.

Authors of the publication

Mikhail A. Taimarov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Evgenii G. Chiklyayev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

19 ноября 2020г.

Отредактировано

10 декабря 2020г.

Принято

10 декабря 2020г.