

References

1. DNAOP 0.00.-1.26-96, [Terms of design and safe operation of steam boilers with steam pressure not exceeding 0.07 MPa (0.7 kgf/cm²), boilers and water heaters heat water with a temperature no higher than 115 °C], Kiev : State regulation of labor protection, 1996, 128 p. (Ukr.)
2. Balaban-Irmenin Ju.V., Suslov P.S. [Features of antiscaling in heating systems], *Proceedings of the IV Conference «Modern water treatment technology and corrosion protection of equipment and scale formation»*. — [Electron resource]. — <http://www.travers.su/upload/iblock/b14/b14caa976c3907580eb8aa6a5b179ddf.pdf> (Rus.)
3. Rudakova G.Ja., Samsonova N.K., Larchenko V.E. [Some aspects of the practice and use of complexons for water treatment], *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka*, 2007, (2), pp. 32–33. (Rus.)
4. Driker B.N., Sikorskiy I.P., Cirul'nikova N.V. [Explore the use of zinc complexonates IOMC for the inhibition of structural steels corrosion], *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka*, 2006 (2), pp. 7–9. (Rus.)
5. Nesterenko S.V. [Feed water treatment technology to prevent corrosion and scaling processes on heat transfer surfaces], *Kommunal'noe hozjajstvo gorodov*, 2008, Iss. 84, pp.190–194. (Rus.)
6. Pager S., Gerasimenko Ju. [Inhibiting effect of scale formed in the ultrasonic field on heat transfer surfaces], *Fiziko-himichna mehanika materialiv. Problemi korozii i protikorozijnogo zahistu materialiv*, L'viv, 2012, 1 (9), pp. 272–278. (Ukr.)
7. DSTU 3895–99. (GOST 9.514-99). [Corrosion inhibitors of metals for water systems. Electrochemical method for determining the protective ability]. (Ukr.)
8. Gerasimenko Ju.S., Nechaj M.V., Belousova N.A., Shlokova E.A. [Estimation of the accuracy of measurements of corrosion rate by the method of polarization resistance], *Fiz.-him. mehanika materialov*, 1996, 31 (3), pp. 302–306. (Rus.)
9. [Encyclopedia of heating. Deposits and abrasion]. — [Electron resource]. — <http://www.rosteplo.ru/w/> (Rus.)
10. Potapov S.A. [Complexions water-chemical mode of heat supply system. Problems and solutions], *Materials of the conference «Modern technologies of water treatment and protect equipment from corrosion»*, Moscow, June 2003, IREA, pp. 20–28. (Rus.)
11. Gerasimenko Ju., Bilousova N., Red'ko R. [Scale, its anticorrosive properties and regulation], *13th International Conference «Corrosion 2016»*, Lvov, Ukraine, 14–15 June 2016, Lvov, 2016. (Ukr.)

Received May 19, 2016

УДК 662.743

Скляренко Е.В., Билека Б.Д., докт. техн. наук**Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев***ул. Желябова, 2а, 03057 Киев, Украина, e-mail: bilbo1@i.com.ua*

Исследование процесса термохимической конверсии растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод на установке шнекового типа

Представлены результаты исследования процесса термохимической конверсии мелкофракционной растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод на установке шнекового типа. В процессе применяется скоростной пиролиз биомассы с комбинированным обогревом и фильтрацией высокотемпературных продуктов неполного сгорания углеводородного газа через уплотненный подвижный слой. Исследовано распределение температур продуктов конверсии и их выход по длине реактора в зависимости от температуры процесса, времени пребывания, параметров теплоносителя и исходной растительной биомассы. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований основных режимных параметров процесса. *Библ. 11, рис. 4.*

Ключевые слова: биомасса, термохимическая конверсия, пиролиз, фильтрация газового теплоносителя, шнековый реактор.

Термохимическая конверсия растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод является актуальным и перспективным методом повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии, замещения и экономии традиционных ископаемых топлив и сокращения вредных выбросов в окружающую среду.

Одним из основных сдерживающих факторов широкого практического использования растительной биомассы в энергетических установках является недостаточная эффективность существующих технологий получения высококачественных и с низкой себестоимостью энергетических продуктов.

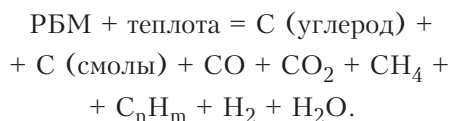
Постановка задачи

Наиболее широко используемыми технологиями термохимической конверсии растительной биомассы являются технологии, базирующиеся на процессах газификации и пиролиза.

Газификация — процесс получения газового топлива при максимальной степени конверсии (до 70–75 %) энергетического потенциала исходной биомассы в его теплоту сгорания. Процесс газификации протекает при температурах 800–1300 °С. Полученные в результате газификации биомассы газообразные продукты, состав которых зависит от применяемого окислителя, не всегда удовлетворяют требованиям существующего энергетического оборудования. Для получения высококалорийных газообразных продуктов газификации необходима реализация сложных и дорогостоящих технологий.

Повысить эффективность энергетического использования разных видов биомассы, особенно мелкофракционной растительной биомассы, позволяют пиролизные процессы, которые осуществляются за счет теплоты экзотермических реакций (взаимодействие органических веществ и связанного кислорода) или дополнительной теплоты стороннего источника энергии. Процесс пиролиза проходит при более низких температурах (карбонизация — 170–350 °С, полукоксование — 500–700 °С, коксование — 900–1100 °С).

Схематически процесс пиролиза можно представить так:



В процессе пиролиза происходит деструкция органической части исходной растительной

биомассы (РБМ) на газовую фазу, жидкие и твердые продукты.

Твердым продуктом является коксовый остаток (биоуглерод) с теплотой сгорания до $Q_{\text{н}}^{\text{Р}} = 30$ МДж/кг и средним выходом 25–30 % от сухой массы биомассы, в зависимости от ее вида и температуры процесса.

Жидкие продукты (до 50–55 % (мас.)) состоят из смеси высокомолекулярных углеводов и воды (до 20 % (мас.)) и имеют теплоту сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{Р}} = 20$ –25 МДж/кг. Их можно использовать как топливо, для энергетических установок или как сырье для дальнейшей химической переработки.

Газовая фаза (до 20–35 % (мас.)) — это горючий газ с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{Р}} = 15$ –22 МДж/нм³, что существенно превосходит теплоту сгорания (5–6 МДж/нм³) горючего газа воздушной газификации.

Основным недостатком пиролизных процессов является относительно невысокий удельный выход горючих газов и значительное количество (до 30 % (мас.)) диоксида углерода в его составе. Например, отношение теплоты сгорания газообразных продуктов пиролиза к теплоте сгорания исходной растительной биомассы не превышает 30 %. Повышение этого показателя на 15–20 % можно достичь за счет высокотемпературной конверсии жидкой фазы в газообразные продукты или использования горючего газа без охлаждения и конденсации.

В ходе пиролизного процесса происходит не только разложение органической части, но и перераспределение энергии исходной биомассы в получаемые продукты. Например, на рис.1 приведены обобщенные данные пиролиза древесины [1] и перераспределения энергии исходной биомассы в продукты пиролиза в зависимости от температуры процесса. Особенно этот процесс интенсифицируется с началом экзотермических реакций (для древесины это 275–280 °С), когда часть выделившейся энергии идет на разогрев

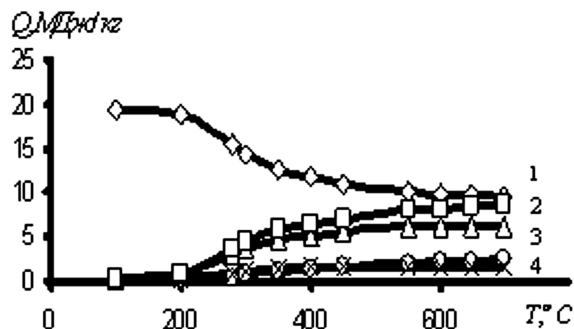


Рис.1. Зависимость распределения тепловой энергии древесины в продуктах ее пиролиза от температуры процесса: 1 — древесный уголь; 2 — парогазы; 3 — жидкие продукты; 4 — газы.

исходного сырья и покрытие потерь через стенку аппарата.

Из рис.1 видно, что значительная часть (примерно 50 %) тепловой энергии Q абсолютно сухой древесины при повышении температуры пиролиза переходит в парогазовые продукты, где более 70 % энергии приходится на конденсированные (жидкие) продукты. Остальная часть переходит в древесный уголь, уменьшаясь с повышением температуры процесса, хотя при этом его качество существенно улучшается (наличие твердого нелетучего углерода достигает более 80 %).

Анализируя энергетическую эффективность использования мелкофракционной растительной биомассы, можно сделать вывод, что целевая конверсия в чисто газовое, жидкое или твердое топливо является малорациональной из-за высокой себестоимости получения конечных энергетических продуктов (тепловой и электрической энергии).

Для повышения эффективности использования энергии такой растительной биомассы, сокращения вредных выбросов и снижения себестоимости целевых продуктов перспективными представляются технологии и процессы энерготехнологической направленности, в которых наряду с энергетическими продуктами получают и другие высоколиквидные продукты. Как видно из рис.1, такие продукты наиболее целесообразно получать в температурном диапазоне 350–500 °С, поскольку затраты на их получение будут минимальны, а выход и качество наиболее оптимальны.

В разработанной технологии термохимической конверсии растительной биомассы [2, 3] таким продуктом наряду с горючим газом является биоуглерод, имеющий высокие теплотехнические и потребительские характеристики. Его можно использовать как твердое топливо в быту, для технологических нужд промышленности, производства технических сорбентов (для очистки воды и газов), получения топливного газа, минеральных удобрений и др.

Суть рассматриваемого технологического процесса состоит в том, что конверсия растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод осуществляется вследствие скоростного пиролиза в режиме «теплого удара» при комбинированном обогреве и фильтрации высокотемпературных продуктов неполного сгорания углеводородного газа через уплотненный подвижный слой.

Реализация данного процесса позволяет получить следующие преимущества:

— высокотемпературные продукты неполного сгорания углеводородного газа позволяют

достичь высокой стабильности процесса при изменении влажности биомассы, повысить теплоту сгорания горючего газа, получить новые твердые углеродсодержащие материалы;

— уплотненный слой позволяет форсировать скорость фильтрации теплоносителя, предотвратить механический вынос мелких частиц биомассы и интенсифицировать тепло- и массообменные процессы в реакционной зоне, а также увеличить коэффициент заполнения реактора, что способствует уменьшению массы и габаритов установки;

— подвижность слоя позволяет интенсифицировать тепло- и массообменные процессы, предотвратить обгар и спекание частиц в отдельных зонах, получить биоуглерод однородного качества.

Управлять таким процессом для получения нужных конечных продуктов можно, изменяя технологические параметры процесса: температуру, давление, скорость нагрева, время пребывания биомассы в реакционной зоне, характеристики теплоносителя. Сам процесс пиролиза и влияние на него вышеперечисленных факторов изучен и освещен в литературе. Однако, в реальных условиях технологического процесса и аппарата эта взаимозависимость имеет индивидуальную специфику, поэтому необходимым условием эффективного управления процессом является получение соответствующих данных. Для решения поставленной задачи был проведен комплекс аналитических и экспериментальных исследований.

Изучение данного процесса сопряжено с решением двух проблем.

Первая из них — это определение количества продуктов пиролиза и их состава, а также термодинамических характеристик при близких к оптимальным тепловым, температурным и гидродинамическим условиям процесса. При выполнении аналитических исследований, сведения теплого и материального балансов эти условия идеализировались, поскольку использование термохимии и термодинамики для анализа процесса требует значительно более подробных исходных данных.

Как показывает анализ литературных источников, например, некоторые кинетические характеристики, необходимые для таких расчетов, либо отсутствуют, либо изучены недостаточно.

Другая проблема — это оценка теплоты, которая выделяется или поглощается в химических реакциях процесса. Очевидно, что при рассмотрении этого вопроса необходимо учитывать не только тепловые эффекты реакций и скорости их прохождения, но и процессы сме-

шения, подвода теплоты, потерь через стенку аппарата и другие факторы. Обычно принимается, что интегральный эффект равен нулю, а процесс осуществляется непрерывно в квазистационарном режиме и в адиабатных условиях, при постоянном давлении и времени пребывания, достаточном для достижения термохимического равновесия.

В нашем случае при разработке нового технологического процесса конверсии растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод можно ограничиться более простыми исходными данными, а именно: какое общее количество летучих и биоуглерода может выделиться из исходной биомассы, каков элементарный состав и необходимые технологические условия их получения в данном аппарате.

При принятии этих и некоторых других допущений были разработаны математическая модель и программа расчета процесса [4]. В данной работе приведены основные результаты расчетно-экспериментальных работ, направленных на получение детальной информации о технологических параметрах рабочего процесса в динамике, а именно: определялось распределение температур продуктов конверсии и их выход по длине реактора в зависимости от температуры процесса, времени пребывания, параметров теплоносителя и исходной биомассы.

Экспериментальные работы проводились на лабораторной установке, описанной в работе [5]. Установка представляет собой горизонтальный цилиндрический реактор со шнеком, обеспечивающий уплотнение и перемещение растительной биомассы вдоль камеры пиролиза, которая имеет тепловую обечайку. В нее из технологической топки подается теплоноситель в виде высокотемпературных продуктов неполного сгорания углеводородного газа. Теплоноситель отдает некоторую часть теплоты биомассе через стенку камеры пиролиза, а затем поступает в камеру пиролиза и фильтруется через уплотненный шнеком подвижный слой биомассы. Благодаря развитой поверхности пористого слоя биомассы происходит интенсивный разогрев и разложение ее органической части на летучие продукты и твердый остаток. Степень такого превращения регулируется температурой процесса и временем пребывания биомассы в реакционной зоне.

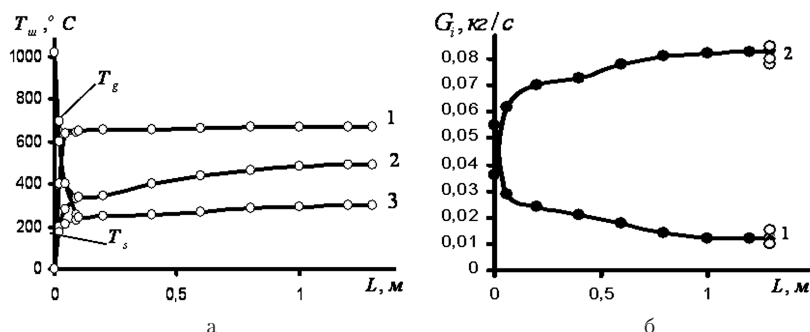


Рис.2. Изменение температуры прогрева слоя растительной биомассы (T_s) разной исходной влажности $W^p, \%$: 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40, по длине реактора (L), при начальной температуре газового теплоносителя $T_g = 1020\text{--}1040\text{ }^\circ\text{C}$ (а) и выхода продуктов пиролиза G_i из биомассы влажностью 30 % при тех же условиях (б): 1 – биоуглерод; 2 – летучие.

На рис.2 приведено изменение температуры прогрева слоя растительной биомассы T_s разной исходной влажности по длине реактора при начальной температуре газового теплоносителя $T_g = 1020\text{--}1040\text{ }^\circ\text{C}$ и выход продуктов пиролиза (G_i) из биомассы 30 % влажности, при тех же условиях.

Из рис.2 видно, что вблизи входного сечения реактора физико-химические процессы смешения и теплообмена имеют высокую интенсивность, поскольку они проходят в режиме «теплового удара». Это позволяет при длине камеры пиролиза $L = 1,3\text{ м}$ и ее диаметре $D = 0,309\text{ м}$ за 15–20 мин эффективно нагреть слой биомассы 0,35 м с 30 %-й влажностью (кривая 2) до заданной температуры процесса (450–500 $^\circ\text{C}$). При изменении влажности до 40 % (кривая 3) необходимо увеличить расход технологического газа на 17 % или увеличить время пребывания биомассы в реакционной зоне почти в 3 раза, что увеличивает габариты установки. Таким образом, влажность исходной биомассы является ключевым фактором, влияющим не только на качество энергетических продуктов и расходы технологического газа, но и на конструктивные

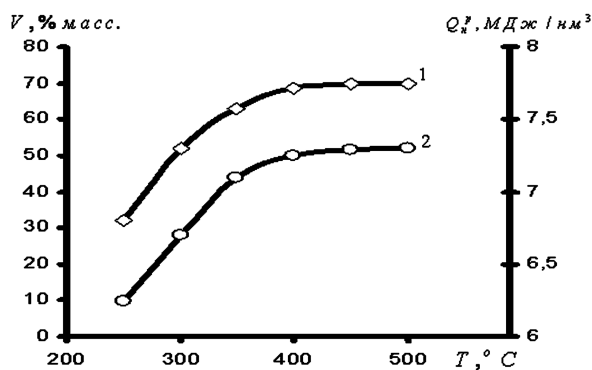


Рис.3. Влияние температуры пиролиза T на выход летучих V (1) и их теплоту сгорания Q_p^* (2).

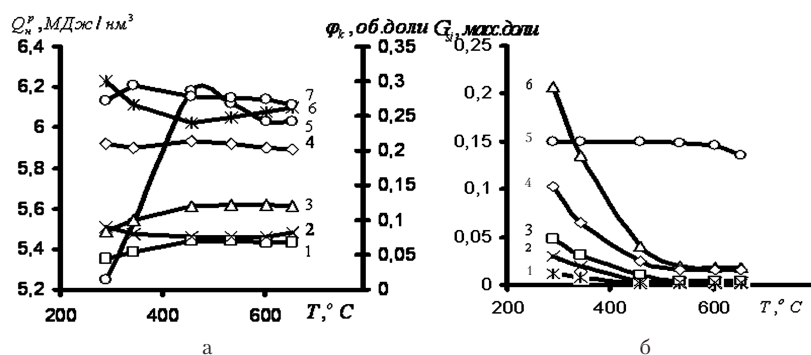


Рис.4. Влияние температуры пиролиза растительной биомассы на состав горячего газа (а) ϕ_k : 1 – CH₄; 2 – CO; 3 – CO₂; 4 – H₂; 5 – N₂; 6 – H₂O; 7 – H₂O; 8 – H₂O; теплоту сгорания $Q_{п}^p$ (5), а также выход и состав биоуглерода (б), $G_{сг}$: 1 – H₂; 2 – CO; 3 – CH₄; 4 – CO₂; 5 – C (биоуглерод); 6 – H₂O.

особенности аппарата: характеристики шнека (диаметр, шаг витка, частота вращения), длину и диаметр реактора, которые непосредственно определяют время пребывания биомассы в реакционной зоне.

При этом установлено, что данный температурный диапазон является оптимальным для выхода летучих V и их качества (рис.3), поскольку процесс их выхода практически завершается на 70 %, а их низшая теплота сгорания $Q_{н}^p$ составляет около 7,3 МДж/нм³.

Температура процесса является основным фактором, влияющим на качественный состав продуктов пиролиза, что показано на рис.4.

В рассматриваемом температурном диапазоне выход летучих составил до 1,8 кг/кг рабочей массы. Это смесь конденсированных и неконденсированных продуктов, которую наиболее рационально использовать в существующих энергетических установках в горячем состоянии (без конденсации). Теплота сгорания неконденсированной части (горючего газа) составляет около 6,5 МДж/нм³.

Выход биоуглерода составил 0,13–0,175 кг/кг рабочей массы; его средний состав, %: углерод – 70–80; летучие – до 15; зольность – 4–10; влажность – 4–10.

Проведенные исследования установили влияние использования газового теплоносителя на качество газовой фазы, поскольку в его составе имеются горючие компоненты H₂, CO и CH₄ [6]. Определено, что за счет теплоносителя теплоту сгорания пиролизного газа можно повысить примерно на 20 %. Это является действенным механизмом управления процессом и качеством конечных продуктов пиролиза за счет изменения режима работы установки или исходной влажности биомассы.

Другим фактором регулирования качества горячего газа является возможность введения в

теплоноситель вторичного углеводородного газа. При этом углеводородный газ разлагается на водород и твердый углерод на поверхности раскаленного биоуглерода, повышая его механические и теплотехнические характеристики. Принципиальная возможность получения водорода в результате гетерогенного пиролиза углеводородного газа в процессе его фильтрации через пористый слой растительной биомассы рассмотрена в работах [7–9].

Использование растительной биомассы по предлагаемой технологии для получения новых углеродсодержащих материалов с заданными свойствами, а также для нейтрализации различных газов в разогретом слое биоуглерода посредством их восстановления в присутствии газа-восстановителя (CO, CH₄, H₂) [10, 11] является перспективным направлением дальнейших исследований.

Результаты выполненных исследований были использованы при создании энерготехнологической установки конверсии мелкофракционной растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод.

Выводы

Результаты выполненных исследований позволили определить технологические параметры процесса, а также конструктивные особенности установки: диаметр и длину пиролизной камеры, параметры шнека, горелки, вентилятора и технологической топки.

Эти данные позволили создать экспериментальную энерготехнологическую установку ЭТУ-1 производительностью 200 кг/ч по древесной щепе при выходе до 300 нм³/ч горячего газа с теплотой сгорания 6,3–7,5 МДж/нм³ и 30–35 кг/ч биоуглерода.

Важным достоинством технологии является ее безотходность и возможность использовать мелкофракционную растительную биомассу с высокой влажностью (50–55 %) в существующих энерготехнологических установках без их существенной реконструкции.

Список литературы

1. Козлов В.Н. Пиролиз древесины. — М. : Изд-во АН СССР, 1952. — 283 с.
2. Патент на винахід 43070 А Україна, МПК С 10 В 53/02. Спосіб піролізу деревини / В.Г.Носач, Л.І.Іванова, П.П.Яворовський, Є.В.Скляренко,

- В.І.Родіонов; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України. — № 2001020750; заявл 02.02.2001. — Опубл. 15.11.2001, Бюл. № 10.
3. Патент на винахід UA 102789 С2 Україна, МПК С 10 В 51/00, С 10 В 53/02, С 10 В 53/00, С 10 J 3/00, F 23 J 15/00, F 23 G 5/027, F 23 G 7/00, F 23 L 15/00. Спосіб енерготехнологічної переробки біомаси / В.Г.Носач, Б.І.Басок, Б.Д.Білека, С.К.Демиденко, В.М.Погожев, Є.В.Скляренко; власник: Інститут технічної теплофізики НАН України. — № а 2012 07752; заявл.: 25.06.2012. — Опубл. 12.08.2013, Бюл. № 15.
 4. Баштовой А.И., Скляренко Е.В. Математическое моделирование процесса газификации древесины // Пром. теплотехника. — 2006. — Т. 28, № 6. — С. 71–77.
 5. Носач В.Г., Скляренко Е.В., Родионов В.И. Исследование термохимической переработки древесины в зажатом подвижном и фильтруемом слое // Пром. теплотехника. — 2005. — Т. 27, № 5. — С. 66–69.
 6. Бербенеv В.И. Сжигание газа в печах безокислительного и малоокислительного нагрева. — Л. : Недра, 1988. — 175 с.
 7. Зайченко В.М., Шпильрайн Э.Э., Штеренберг В.Я. Комплексная переработка природного газа с получением водорода для энергетики и углеродных материалов широкого промышленного применения // Теплоэнергетика. — 2006. — № 3. — С. 51–56.
 8. Зайченко В.М., Косов В.В., Косов В.Ф. и др. Новый композитный углеродный материал : Технология и перспективы // Сталь. — 2008. — № 4. — С. 77–84.
 9. Зайченко В.М., Косов В.В., Косов В.Ф. и др. Экспериментальное обоснование технологии комплексной переработки древесных отходов и природного газа // Теплоэнергетика. — 2008. — № 7. — С. 47–53.
 10. Кузнецов И.Е., Троицкая И.М. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами. — М. : Химия, 1979. — 344 с.
 11. Білека Б.Д., Кабков В.Я., Скляренко Е.В., Погожев В.Н. Пути улучшения тепловых и экологических характеристик когенерационных установок с приводом от газотурбинных и газопоршневых двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011. — № 10.

Поступила в редакцию 13.05.16

Скляренко Є.В., Білека Б.Д., докт. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

вул. Желябова, 2а, 03057 Київ, Україна, e-mail: bilbo1@i.com.ua

Дослідження процесу термохімічної конверсії рослинної біомаси у горючий газ та біовуглець на установці шнекового типу

Представлено результати дослідження процесу термохімічної конверсії дрібнофракційної рослинної біомаси у горючий газ та біовуглець на установці шнекового типу. У процесі використовується швидкісний піроліз біомаси з комбінованим обігрівом та фільтрацією високотемпературних продуктів неповного згорання вуглеводневого газу через ущільнений рухомий шар. Досліджено розподілення температур продуктів конверсії та їх вихід по довжині реактора у залежності від температури процесу, часу перебування, параметрів теплоносія та вихідної рослинної біомаси. Наведено результати розрахункових та експериментальних досліджень основних режимних параметрів процесу. *Бібл. 11, рис. 4.*

Ключові слова: біомаса, термохімічна конверсія, піроліз, фільтрація газового теплоносія, шнековий реактор.

Sklyarenko E.V., Bileka B.D., Doctor of Technical Sciences
Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 2a, Zhelyabova Str., 03057 Kiev, Ukraine, e-mail: bilbo1@i.com. ua

Experimental Study of Thermochemical Conversion Process for Plant Biomass into Combustible Gas and Biocarbon on Installation of Screw Type

Installation of screw type that implements the technology of thermochemical conversion of small fraction plant biomass into combustible gas and biocarbon is proposed. The technology is based on the use of high-speed pyrolysis of biomass in combined heating and filtering high temperature products of incomplete combustion of hydrocarbon gas through the pressed movable layer. Temperature distribution of conversion products and their output along the reactor length depending on process temperature, dwell time, heat transfer medium parameters and initial plant biomass are investigated on the basis of the developed mathematical model. The results of theoretical and experimental studies of the basic regime parameters of process are presented. *Bibl. 11, Fig. 4.*

Key words: biomass, thermochemical conversion, pyrolysis, filtration of the gas heat medium, screw reactor.

References

1. Kozlov V.N. [Wood pyrolysis], Moscow : Izdatelstvo AN SSSR, 1952, 283 p. (Rus.)
2. Patent na vinahid 43070 A Ukraïna, MPK S10V 53/02 [Wood pyrolysis method], Nosach V.G., Ivanova L.I., Javorovs'kij P.P., Skljarenko E.V., Rodionov V.I.; vlasnik: Institut tehničnoï teplofiziki NAN Ukraïni. — № 2001020750; zajavl 02.02.2001, Publ. 15.11.2001, Bjul. 10. (Ukr.)
3. Patent na vinahid 102789 C2 UA, MPK C 10 B 51/00, C 10 B 53/02, C 10 B 53/00, C 10 J 3/00, F 23 J 15/00, F 23 G 5/027, F 23 G 7/00, F 23 L 15/00, [Power and technological method of biomass processing], Nosach V.G., Basok B.I., Bileka B.D., Demidenko S.K., Pogozhev V. M., Skljarenko E.V.; vlasnik: Institut tehničnoï teplofiziki NAN Ukraïni. — № a 2012 07752; zajavl.: 25.06.2012. — Publ. 12.08.2013, Bjul. 15. (Ukr.)
4. Bashtovoj A.I., Skljarenko E.V. [Mathematical simulation of wood gasification process], *Promyshlennaja teplotehnika*, 2006, 28 (6), pp.71–77. (Rus.)
5. Nosach V.G., Skljarenko E.V., Rodionov V.I. [Investigation of thermochemical processing of wood in pressed movable and filtered layer], *Promyshlennaja teplotehnika*, 2005, 27 (5), pp. 66–69. (Rus.)
6. Berbenev V.I. Gas combustion in furnaces of heating without oxidation and low oxidation heating, Leningrad : Nedra, 1988, 175 p. (Rus.)
7. Zajchenko V.M., Shpil'rajn Ye.Ye., Shterenberg V.Ja. [Complex processing of natural gas with hydrogen production for power engineering and carbon materials of wide industrial application], *Teplojenergetika*, 2006, (3), pp. 51–56. (Rus.)
8. Zajchenko V.M., Kosov V.V., Kosov V.F., Sinel'shnikov V.A., Sokol G.F. [New composite carbon material : Technology and prospects], *Stal'*, 2008, (4), pp. 77–84. (Rus.)
9. Zajchenko V.M., Kosov V.V., Kosov V.F., Sinel'shnikov V.A., Sokol G.F. [Experimental substantiation of technology of complex processing of wood waste and natural gas], *Teplojenergetika*, 2008, (7), pp. 47–53. (Rus.)
10. Kuznecov I.E., Troickaja I.M. [Air pool protection from pollution by harmful substances], Moscow : Himija, 1979, 344 p. (Rus.)
11. Bileka B.D., Kabkov V.Ja., Skljarenko E.V., Pogozhev V.N. [Ways of improving thermal and environmental characteristics of gas turbine and gas piston motor — operated cogeneration plants], *Aviacionno-kosmicheskaja tehnik i tehnologija*, 2011, (10). (Rus.)

Received May 13, 2016