

1. Magnetic fluids and applications, Handbook / Editor-in-chief: B.Berkovski, Ed.: V.Bashtovoi. – New York: Begell House Inc. Publishers, 1996. – 851p.

2. Берковский, Б.М. Магнитные жидкости /Б.М. Берковский, В.Ф.Медведев, М.С. Краков. – М.: Химия, 1989. – 240с.

## **Термохимическая конверсия растительной биомассы: новые закономерности и перспективные методы**

Пальчёнок Г.И., Хутская Н.Г., Иващенко Е.Ю.  
Белорусский национальный технический университет

Растительная, в частности, древесная биомасса является ценным углеводородным сырьем, воспроизводимым в природе путем биосинтеза за счет солнечной энергии. Древесина содержит ничтожно малые количества золы (~ 1 %), серы (~ 0,01 %), азота (~ 0,1 %) и является CO<sub>2</sub>-нейтральным энергоресурсом, рациональное и эффективное использование которого при условии его равновесного воспроизводства открывает возможность получения возобновляемой энергии (прямое сжигание) или, в результате термохимической конверсии (ТХК), вторичных энергонасыщенных топлив (газообразного – синтез-газ, водород; жидкого – бионефть; твердого – полукокс, биоуголь) и углеродных сорбентов.

Целевые продукты и эффективность конверсии зависят от вида и условий проведения процесса. В настоящей работе приведены результаты расчетов равновесного состава продуктов ТХК и предложены перспективные методы ее реализации. Расчеты выполнены с помощью компьютерной программы прикладных расчетов химического равновесия *CEA* [1].

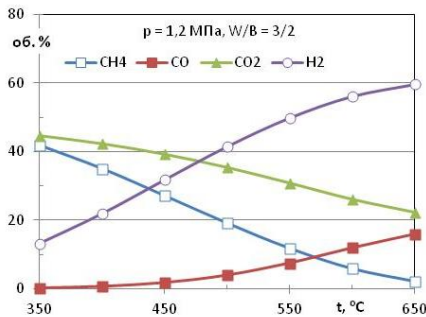


Рисунок 1. Состав сухих продуктов конверсии древесины

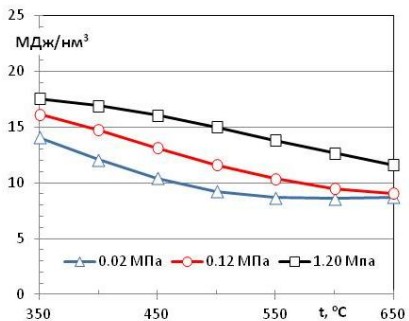


Рисунок 2. Низшая теплота сгорания сухих газов

**Паровая конверсия древесины** с целью получения газообразного топлива или водорода. На рис. 1 представлены типичные результаты расчетов объемного состава сухих продуктов конверсии в зависимости в зависимости от температуры при атмосферном давлении. Массовое соотношение пар/биомасса (горючая масса)  $W/B = 3/2$ . Рис. 2 иллюстрирует влияние давления на низшую теплоту сгорания сухих газов при тех же условиях.

С ростом температуры увеличиваются равновесные содержания водорода и монооксида углерода в газах, падает концентрация метана и, соответственно, уменьшается теплотворная способность газов. Концентрация  $H_2$  достигает 60%, что создает оптимальные условия для его получения как целевого продукта. Повышение давления, также как уменьшение отношения  $W/B$  приводит к увеличению теплоты сгорания газов, что важно при производстве топливного газа. При этом уменьшается выход водорода.

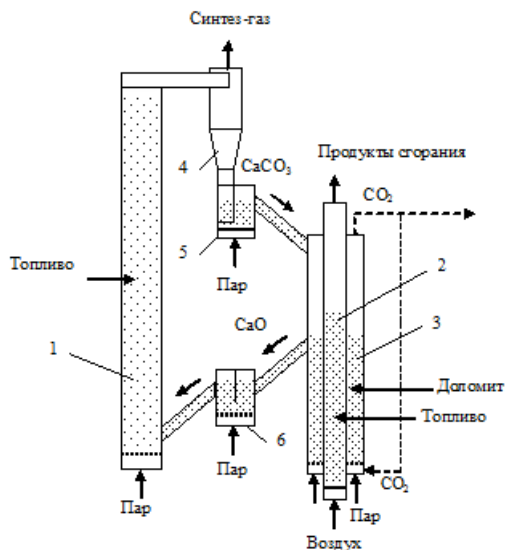


Рисунок 3. Сдвоенный реактор кипящего слоя для непрямой паровой конверсии биомассы с адсорбцией  $\text{CO}_2$

Дальнейшее повышение концентрации водорода возможно путем непрерывного удаления  $\text{CO}_2$  из реактора с помощью его адсорбции оксидом кальция  $\text{CaO}$ . При этом теоретически единственным газовым продуктом конверсии биомассы может стать водород:  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z + 2 - y \text{H}_2\text{O} + \text{CaO} = \text{CaCO}_3 + 0.5x + 2 - y \text{H}_2$ .

Для реализации этого процесса в [1] предложены способ и устройство со сдвоенным реактором кипящего слоя (КС) (рис. 3). Процесс конверсии осуществляется в реакторе 1 с циркулирующим КС, в который непрерывно вводится сорбент  $\text{CaO}$ , являющийся одновременно промежуточным теплоносителем. В процессе адсорбции углекислого газа образуется карбонат кальция  $\text{CaCO}_3$ , частицы которого выносятся из реактора и подвергаются регенерации в кольцевом реакторе обжига 2, concentрически опоясывающем топку КС 3, в которой сжигается часть перерабатываемой биомассы. Теплота сгорания передается через стенку в реактор 2, где расходуется на реакцию обжига и переносится частицами оксида кальция в реактор 1, обеспечивая проведение процесса конверсии. В предложенном устройстве

предотвращается разбавление синтез-газа азотом воздуха, потребляемой на сжигание биомассы. Кроме того,  $\text{CO}_2$ , выводимый из продуктов конверсии, также не смешивается с продуктами сгорания, как это происходит в известных аналогах, и может быть использован в качестве товарного продукта или секвестрирован в специальном хранилище. Таким образом, процесс конверсии позволяет снизить выбросы парниковых газов.

**Пиролиз древесины** с целью получения древесного угля или углеродного адсорбента. На рис. 4 сопоставлены данные по массовому выходу угля в процессе пиролиза древесины, исследованного на кафедре ЮНЕСКО БНТУ в различных условиях: в плотной засыпке мелкодисперсного сырья при атмосферном (АП) [3] и повышенном давлении (ПД) [4], а также при **солнечном пиролизе** одиночных древесных частиц и гранул (СП). Солнечная энергия подводилась к обрабатываемым частицам с помощью параболического концентратора.

Результаты этих исследований хорошо согласуются между собой и с эмпирической зависимостью [3]

$$m_{y_2} / m_o^c = 7006 t^{-1,63}, \quad (1)$$

обобщающей литературные данные по традиционному пиролизу древесной термически "толстых" частиц и засыпок древесной биомассы в различных лабораторных, демонстрационных и промышленных условиях. В (1)  $m_{y_2}$  – масса угля,  $m_o^c$  – сухая масса исходной древесины,  $t$  – температура, °С.

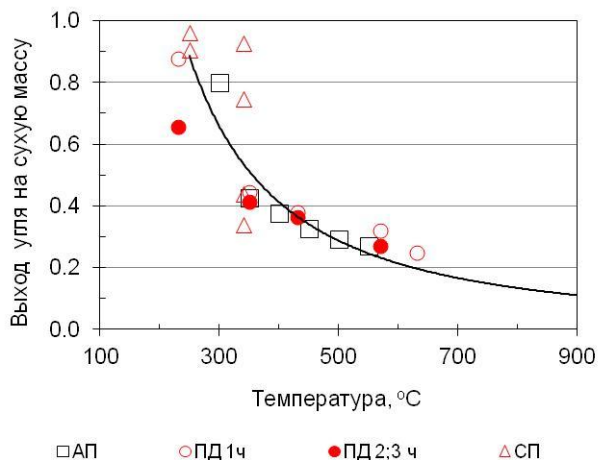


Рисунок 4. Сопоставление экспериментальных данных по выходу биоугля при пиролизе древесины при атмосферном (АП), повышенном давлении (ПД) и солнечном пиролизе (СП); линия – расчеты по зависимости (1); цифры при ПД – продолжительность пиролиза в часах.

Проведенные оценки содержания углерода в древесном угле, полученном при пиролизе под давлением, удовлетворительно согласуются с равновесными расчетами (рис. 5), согласно которым выход углерода практически не зависит от давления.

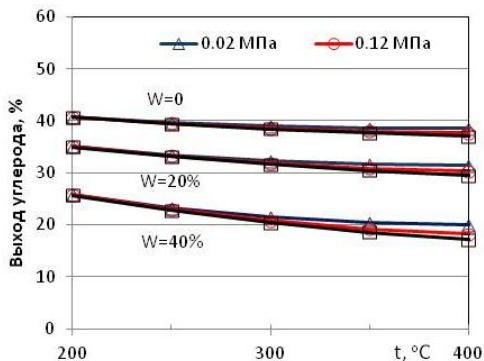


Рисунок 5. Равновесный выход твердого углерода на органическую массу древесины различной влажности W

Это кажущееся противоречие можно объяснить тем, что давление в герметичном реакторе при экспериментах повышалось за счет накопления в нем газообразных продуктов. Это увеличивало время контакта обрабатываемого сырья и продуктов конверсии по сравнению с проточными атмосферными реакторами, что приближало процесс к равновесию. Выход биоугля при солнечном пиролизе качественно согласуются с результатами, полученными в других условиях, что подтверждает перспективность продолжения исследований в этом направлении использования концентрированной солнечной энергии.

### Литература

1. The NASA Computer program CEA (Chemical Equilibrium with Applications) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/ceaguiDownload-win.htm> (30.01.2018).
2. Бородуля В.А., Пальченко Г.И., Хутская Н.Г., Василевич С.В. Способ получения генераторного газа и устройство для его осуществления // Патент РБ № 15605 (2012.04.30).
3. Пальченко Г.И. Макрокинетика и тепломассоперенос в процессах термохимической конверсии биомассы / Г.И. Пальченко, Н.Г. Хутская, И.В. Янцевич, Т.М. Мощина // Возобновляемые источники энергии. Потенциал, достижения, перспективы: материалы междунар. семинара экспертов, Минск, 2011 г. / Белорусская наука. – Минск, 2011. – С. 206-220.
4. Пальченко Г.И., Хутская Н.Г., Василевич С.В., Лейченко Н.С. Способ получения древесного угля // Патент РБ № 19789 (2016.02.28).