

УДК 66.092-977:662.636:662.76

ДВУХСТАДИЙНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ СОЛОМЫ И БАГАССЫ САХАРНОГО ТРОСТНИКА С ПОЛУЧЕНИЕМ СИНТЕЗ-ГАЗА

© 2020 г. В. М. Зайченко^{1,*}, А. Ю. Крылова^{1,**}, Ю. М. Фалеева^{1,***}

¹ ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), 125412 Москва, Россия

*e-mail: zaitch@oivtran.ru

**e-mail: aykrylova@yandex.ru

***e-mail: faleeva.julia@mail.ru

Поступила в редакцию 04.10.2019 г.

После доработки 11.10.2019 г.

Принята к публикации 25.11.2019 г.

Изучены особенности получения синтез-газа двухстадийной термической конверсией сельскохозяйственных отходов растительного происхождения (соломы и багассы сахарного тростника). Установлено, что метод позволяет получать 1.21–1.24 м³ синтез-газа из 1 кг исходного сырья. Теплота сгорания полученного газа составляет 10.6–11.0 МДж/м³, выход биоугля – 26.46–29.90% от исходной массы сырья.

Ключевые слова: солома, багасса, пиролиз, газификация, синтез-газ, биоуголь

DOI: 10.31857/S0023117720020127

Одна из важнейших задач современности – это использование новых эффективных источников энергии, поскольку ресурсы ископаемого топлива не безграничны. В этой связи актуально использование возобновляемых источников энергии, доступных повсеместно. К таким источникам относится, в частности, биомасса (прежде всего, отходы растительного и животного происхождения, твердые бытовые отходы).

Сельскохозяйственные отходы, которые образуются ежегодно в больших количествах, являются одним из основных источников биомассы. Растениеводство – ведущая отрасль сельского хозяйства в России. Производство зерновых культур связано с образованием значительного количества отходов в виде стерни и соломы, которые остаются на полях после сбора урожая. Стерня представляет собой нескошенные нижние части стебля и корни. Скошенная масса обмолачивается и разделяется на зерно и солому. Утилизация послеуборочных остатков связана с дополнительными финансовыми и временными затратами, а также требует специальных технологий. В России данная проблема традиционно решается методом простого сжигания. Исследования показали, что сжигание стерни и соломы приводит к уничтожению полезной почвенной микрофлоры и запасов гумуса, приводит к изменению физико-химических свойств и механической структуры почвы. При сжигании стерни и соломы с каждого гектара земли теряется до 4 т органического вещества и до

30 кг азота [1]. Кроме того, при сжигании этих отходов в атмосферу выбрасывается значительное количество сажи, которая представляет собой аэрозольную смесь мелких частиц, образующихся при неполном сгорании биомассы [2]. Установлено, что сажа удерживает в несколько сотен раз больше тепла, чем СО₂. Поступая в атмосферу, она поглощает солнечную энергию и излучает инфракрасную радиацию, что приводит к усилению эффекта изменения климата Арктики [3]. Сажа, оседающая на арктический снег и лед, снижает их отражающую способность и ускоряет таяние. Помимо влияния на изменение климата сажа оказывает негативное воздействие на здоровье человека [2]. Также стоит отметить, что сжигание послеуборочных остатков является нарушением федеральных законов “Об охране окружающей среды” и “Об охране атмосферного воздуха” [4, 5]. Согласно пункту 218 Правил противопожарного режима в Российской Федерации: “Запрещается выжигание сухой травянистой растительности, стерни, пожнивных остатков (за исключением рисовой соломы) на землях сельскохозяйственного назначения и землях запаса, разведение костров на полях” [6].

По данным Росстата, последние несколько лет производство пшеницы в России превышает 60% от общего валового сбора всех зерновых культур. В 2017 г. посевная площадь под озимую пшеницу составила около 15 млн га земли, под яровую пшеницу – 13 млн га земли. При этом урожай-

ность озимой и яровой пшеницы после доработки составила 85.9 млн т [7]. Соотношение массы зерна и массы соломы у озимой пшеницы составляет примерно 1:1.5, у яровой пшеницы – 1:1.3 [8]. Основываясь на данных об урожайности, нетрудно посчитать, что за 2017 г. образовалось около 98 млн т пшеничной соломы. Энергетический потенциал соломы 14 МДж на 1 кг сухой массы. Для сравнения, объем добычи бурого угля в Канско-Ачинском бассейне в 2017 г. составил 38.35 млн т [9]. Теплота сгорания бурого угля 11 МДж/кг, в брикетах – 13–25 МДж/кг. Таким образом, на полях ежегодно сжигается ресурс, по объему сопоставимый с добычей угля в одном из крупнейших буроугольных бассейнов России. Однако следует отметить, что использование соломы в качестве энергетического топлива связано с рядом трудностей, обусловленных, в частности, ее низкой насыпной плотностью и высокой влажностью. Стоит отметить, что также существуют соломенные котлы, предназначенные для отопления сжиганием целых тюков соломы.

Наряду с растительными остатками от производства зерновых культур, сельскохозяйственные отходы включают в себя побочные продукты промышленной обработки сельскохозяйственной продукции. К таким отходам относится багасса – волокнистая часть сахарного тростника, остающаяся после прессования стеблей и извлечения сахаросодержащего сока. Ежегодное мировое производство сахарного тростника составляет 1.6 млрд т, в результате чего образуется несколько сотен миллионов тонн багассы [10]. Бразилия является крупнейшим производителем сахарного тростника в мире с годовым объемом производства 690 млн т [11]. В среднем на 100 т измельченного тростника производится около 30 т влажных отходов (около 50% влажности) в год. Таким образом, на каждые 3 кг измельченного тростника приходится 1 кг багассы [12]. ЮАР является крупнейшим в Африке производителем сахарного тростника, где ежегодно производится около 3.3 млн т сырой багассы. В развитых странах (США, Бразилия, Индия) багассу используют в промышленности для производства этанола второго поколения. Но в большинстве случаев стратегия по управлению отходами в странах-производителях сахара отсутствует, и багассу складывают на территориях сахарных заводов, занимая полезные площади. Утилизацию багассы обычно проводят методом прямого сжигания в печах для выработки тепла и энергии для собственного потребления сахарных предприятий.

Сжигание багассы (как и соломы) в энергетических целях сопряжено с рядом трудностей. Целесообразным способом использования различных видов биомассы для энергетических целей является переработка исходного сырья в энерге-

тический высококалорийный газ, а затем его использование в качестве топлива.

Существующие методы термической конверсии биомассы, такие как газификация и пиролиз, не позволяют получить газ, который может быть использован в электропроводящем оборудовании. Производимый по данным технологиям газ содержит жидкую фракцию, что недопустимо при использовании в газопоршневых установках. Техническими условиями на эксплуатацию газопоршневых двигателей максимальное содержание смол в газовом топливе лимитировано 50 мг/м³. Использование схем с очисткой газа от жидкой фракции перед подачей в газопоршневую электростанцию требует значительного усложнения и удорожания процесса.

В настоящей работе для утилизации соломы и багассы сахарного тростника с получением синтез-газа использован метод двухстадийной термической конверсии биомассы, разработанный в Объединенном институте высоких температур (ОИВТ) РАН [13]. Сущность метода заключается в том, что процесс разделен на два этапа. На первой стадии перерабатываемое сырье подвергается пиролизу с получением биоугля и парогазовой смеси (ПГС), представляющей собой смесь летучих продуктов пиролиза и неконденсируемых газов. Вторая стадия – газификация при 1000°C полученного на первой стадии биоугля под воздействием ПГС как окислителя с образованием водорода и окиси углерода. В отличие от традиционного процесса газификации, данный метод термохимической конверсии не требует подвода извне окислительного агента: газификация биоугля осуществляется с использованием окислителя, полученного *in situ*, т.е. внутри процесса. Таким образом, двухстадийная термическая конверсия соответствует принципам зеленой химии, согласно которым следует минимизировать отходы и подачу дополнительных реагентов и материалов в технологический цикл. Получаемый по разрабатываемой технологии газ содержит малое количество жидкой фазы (не более 30–40 мг/м³). Преимущество этой технологии заключается в высокой степени конверсии исходного сырья в синтез-газ и возможности использования полученного газа в качестве топлива для энергопроизводящего оборудования.

В статье представлены результаты исследования двухстадийного пиролиза двух материалов: багассы и соломы. Багасса была предоставлена сахарной компанией *Lugazisugarfactory* (Кампала, Уганда). Соломенные пеллеты произведены на заводе “Продмаш” (Ростов-на-Дону, Россия). Перед проведением экспериментов образцы двух материалов были высушены при температуре $105 \pm 5^\circ\text{C}$ до влажности 0–1%.

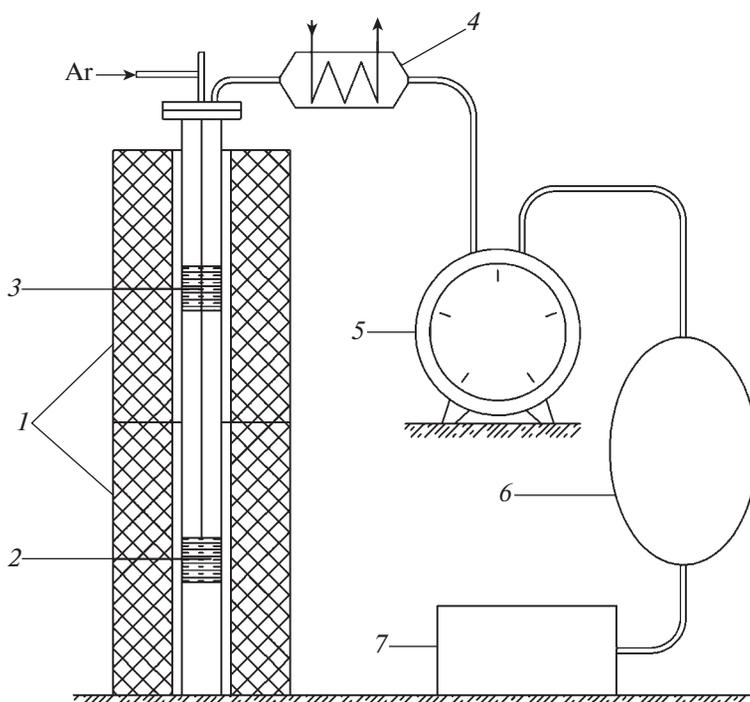


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – двухсекционная печь, 2 – зона пиролиза реактора, 3 – зона газификации реактора, 4 – холодильник, 5 – газосчетчик барабанный, 6 – газгольдер, 7 – газовый анализатор.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, реактор которой выполнен из стали 12Х18Н10Т в виде трубы диаметром 37 мм и высотой 850 мм. В зонах пиролиза и газификации установлены чаши, плотно прилегающие к стенкам трубы и имеющие перфорацию в днище для газопроницаемости.

В нижнюю чашу (зона пиролиза) помещалось исходное сырье, в верхнюю (зона газификации) – биоуголь, предварительно прогретый в инертной среде при 1050°C. Реактор размещен в двухсекционной печи, оборудованной двумя автономными нагревателями. Перед экспериментом установку продували аргоном для обеспечения инертной среды. В начале эксперимента зону крекинга нагревали до температуры $1000 \pm 5^\circ\text{C}$, которую поддерживали далее на постоянном уровне. Установку еще раз продували аргоном, поддерживая температуру 105°C в нижней секции. Затем температуру в зоне пиролиза повышали до 1000°C со скоростью 7°C/мин.

Температуру контролировали при помощи термопар. В холодильнике продукты реакции охлаждались и поступали в барабанный счетчик с жидкостным затвором (РГ7000). Состав газовой смеси определяли с помощью анализатора газа *Vario Plus Industrial (MRU GmbH, Германия)*.

В ходе исследований был проведен элементный анализ исходного сырья с использованием элементного анализатора *Vario Macro Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия)*.

Зольность образцов определяли в соответствии с ГОСТ Р 56881-2016.

В табл. 1 приведены основные теплотехнические характеристики исследуемых материалов в пересчете на сухое состояние: элементный состав, зольность и теплота сгорания.

Как следует из данных, представленных в табл. 1, элементный состав багассы и соломы заметно различается по содержанию кислорода и углерода, которое составляет 51.10 и 41.48% для багассы и 40.53 и 45.55% для соломы соответственно. Количество водорода в багассе и соломе отличалось меньше и было равно 5.14 и 6.45% соответственно. В результате соломенные pellets обладали большей теплотой сгорания, несмотря на высокое содержание золы (в 3.8 раза больше, чем у багассы).

В табл. 2 представлены основные теплотехнические характеристики биоугля, полученного в результате высокотемпературного пиролиза биомассы: элементный состав, зольность, теплота сгорания, выход (отношение массы твердого остатка в зоне пиролиза к массе исходного сырья в пересчете на сухое состояние), углеродная эффективность (количество углерода, перешедшего из сырья в биоуголь) и энергетическая эффективность (отношение теплоты сгорания биоугля к теплоте сгорания сырья, помноженное на выход).

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья

Исходное сырье	Элементный состав и зольность*, %						Теплота сгорания, МДж/кг
	С	Н	N	S	O**	Ash	Q _{низш} ***
Багасса	41.48	5.14	0.36	0.06	51.10	1.86	13.79
Солома	45.55	6.45	0.32	0.08	40.53	7.07	17.68

* На сухую массу.

** По разности.

*** По формуле М.И. Менделеева.

Таблица 2. Основные теплотехнические характеристики биоугля

Исходное сырье	Элементный анализ и зольность*, %						Теплота сгорания, МДж/кг	Выход, %	УЭ, %	ЭЭ, %
	С	Н	N	S	O**	Ash	Q _{низш} ***			
Багасса	90.15	0.15	0.27	0.27	2.13	7.03	30.51	26.46	57.51	58.54
Солома	74.62	0.66	0.59	0.19	0.29	23.65	25.97	29.90	48.98	43.92

* На сухую массу.

** По разности.

*** По формуле М.И. Менделеева.

Таблица 3. Характеристики газовой смеси

Исходное сырье	Содержание газов, об. %					Выход газа, м ³ /кг	Низшая теплота сгорания*, МДж/м ³	ЭЭ, %
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂			
Багасса	1.02	49.93	46.25	0.83	1.97	1.21	10.63	93
Солома	0.55	44.71	53.46	1.16	0.12	1.24	11.03	77

* При 25°C.

Можно видеть, что выход биоугля из багассы и соломенных пеллет составляет 26.46 и 29.90% соответственно (табл. 2). Это означает, что при переработке данным методом 1 т багассы или соломенных пеллет будет образовываться 260–300 кг биоугля. Полученный биоуголь можно использовать для газификации. Таким образом, будет организован замкнутый процесс без добавления окислителя и дополнительного биоугля. Как видно из табл. 2, углеродная и энергетическая эффективность термической переработки багассы составляют 57.51 и 58.55%, в то время как для соломы аналогичные показатели равны 48.98 и 43.92% соответственно. Это связано с низким содержанием углерода в биоугле из соломенных пеллет по сравнению с биоуглем, полученным из багассы (74.62 и 90.15% соответственно).

В табл. 3 приведены результаты двухстадийной термической конверсии багассы и соломы: компонентный состав полученного синтез-газа, его выход, теплота сгорания и энергетическая эффективность (ЭЭ) процесса, которая рассчитана

как отношение теплоты сгорания газа, полученного из 1 кг исходного сырья, к теплоте сгорания исходного сырья.

Выход синтез-газа, полученный при термической конверсии двух материалов оказался приблизительно одинаковым (табл. 3). Установлено, что полученная смесь газов на 96–98% состоит из водорода и оксида углерода. Однако соотношение этих газов несколько отличается: в синтез-газе, полученном при переработке багассы и соломенных пеллет, отношение H₂/CO = 0.93 и 1.20, соответственно, т.е. использование соломы позволяет получать синтез-газ, заметно более богатый водородом (46 и 53% соответственно). Низшие теплоты сгорания синтез-газа, полученного из соломы и багассы, оказались близкими по значению (10.63 и 11.03 МДж/м³ соответственно).

Следует отметить, что энергетическая эффективность двухстадийной термической конверсии багассы приближалась к единице и была существенно выше аналогичного показателя для соломы (табл. 3). Это свидетельствует о том, что почти

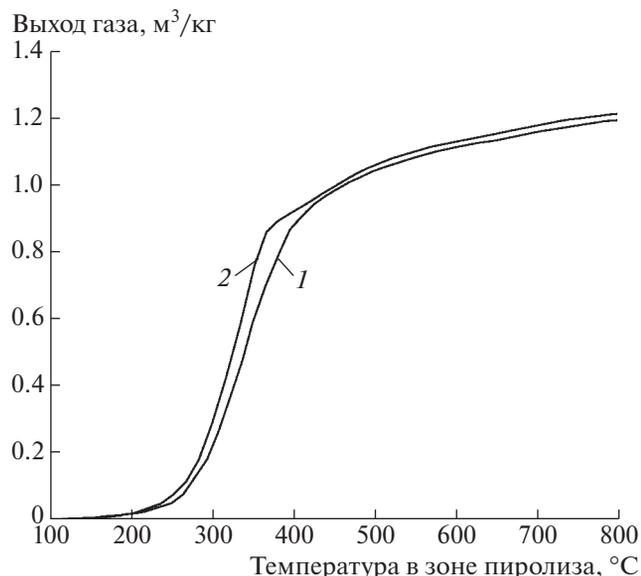


Рис. 2. Выход синтез-газа в зависимости от температуры в зоне пиролиза при двухстадийной термической конверсии багассы (1), соломы (2).

вся внутренняя энергия багассы при ее переработке данным методом переходит в тепловую энергию синтез-газа.

На рис. 2 показана зависимость выхода синтез-газа, полученного из багассы и соломы, от температуры в зоне пиролиза. Можно видеть, что наибольшая интенсивность газообразования наблюдается в области 250–400 °С. Этот интервал соответствует разложению гемицеллюлозы и целлюлозы [14].

Таким образом, переработка методом двухстадийной термической конверсии соломы или багассы сахарного тростника позволяет получать более 1.2 м³ синтез-газа, на 96–98% состоящего из водорода и окиси углерода, с теплотворной способностью около 11 МДж/м³. Полученный синтез-газ можно использовать как для выработки электроэнергии, так и для получения жидких химических веществ преимущественно топливного назначения.

Несмотря на различные климатические зоны произрастания таких сельскохозяйственных культур, как пшеница и сахарный тростник, они имеют одно важное сходство: их растительные остатки являются распространенными и дешевыми органическими отходами. Предложенный ме-

тод их утилизации с точки зрения экономики и влияния на природное равновесие наиболее выгодный и безопасный по отношению к прямому сжиганию на полях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 14 “Физическая химия адсорбционных явлений и активных наночастиц”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельскохозяйственные сжигания в России: регулирование, мониторинг и подходы к их сокращению // Bellona. 2017. Интернет ресурс: bellona.ru.
2. Evans M., Kholod N., Kuklinski T., Denysenko A., Smith S.J., Staniszewski A., Hao W.M., Liu L., Bond T.C. // Atmos. Environ. 2017. V. 163. P. 9. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.026>
3. Морозова И.А., Игнатьева Ю.С. Пилотные оценки выбросов черного углерода в арктической зоне российской федерации // 2017. Интернет ресурс: nii-atmosphere.ru.
4. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ “Об охране окружающей среды”.
5. Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ “Об охране атмосферного воздуха”.
6. Постановление Правительства РФ от 25.05.2012 N 390 “О противопожарном режиме”.
7. Россия в цифрах. 2018 // Крат. стат. сб. М.: Росстат, 2018. 102 с.
8. Михалев С.С., Хохлов Н.Ф., Лазарев Н.Н. Кормопроизводство с основами земледелия. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. Гл. 10.3. 352 с.
9. Таразанов И.Г. // Уголь. 2018. № 3. С. 58. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-58-73>
10. Ray R.C., Ramachandran S. Bioethanol Production from Food Crops. Academic Press, 2019. Ch. 10. 460 p.
11. David G.F., Justo O.R., Perez V.H., Garcia-Perez M. // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2018. V. 133. P. 246. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.004>
12. Anukam A., Mampfweli S., Reddy P., Meyer E., Okoh O. // Renewable Sustainable Energy Rev. 2016. V. 66. P. 775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>
13. Батенин В.М., Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельников В.А. // Теплоэнергетика. 2010. № 11. С. 36–42 [Thermal Engineering, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 946–952] DOI: 10.1134/S0040601510110066].
14. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. // Fuel. 2007. V. 86. P. 1781. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>