

## КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ БАГАССЫ

Доктор технических наук, профессор **А.И. Везенцев**<sup>1</sup>

Аспирант **Нгуен Динь Тьен**<sup>1,2</sup>

Аспирант **М.О. Михайлюкова**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет НИУ «БелГУ». г. Белгород,  
Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт экологических технологий Вьетнамской Академии Наук и Технологий, г. Ханой, Вьетнам

Чрезмерная вырубка лесов приводит к экологическим проблемам глобального масштаба, в частности таким, как нарушение углеродного цикла, увеличение концентрации парниковых газов, эрозия почв... Для сокращения нецелесообразного расходования древесины, улучшения экологического состояния планеты Земля и рационального использования отходов производства сахарозы из сахарного тростника (багассы), нами предложено разработать на их основе способ производства активированного угля, который в настоящее время получают главным образом из ценных пород древесины. Методами классической аналитической химии установлен состав отходов производства сахарозы из сахарного тростника - это 47,59 масс. % целлюлоза, 26,92 масс. % гемицеллюлоза, 21,53 масс. % лигнин, 1,37 масс. % вещества, экстрагированные органическими растворителями и 2,59 масс. % зола. Характеристики процесса термической деструкции багассы определены комплексным термическим методом анализа в окислительной (воздушной) и защитной (азотной) атмосферах. При прокаливании багассы в воздушной среде самая значительная потеря массы происходит в интервале температур от 230°C до 360°C. Скорость процесса уменьшения массы замедляется до 520°C, в диапазоне температур 230-520°C происходит интенсивное окисление ингредиентов материала с выделением тепловой энергии. В защитной среде наблюдается смещение интервалов температур, при которых происходит уменьшение массы, в сторону больших температур по сравнению с окислительной средой. Интенсивная термическая деструкция багассы в защитной среде происходит с большой потерей массы в диапазоне температур 240-395°C. Скорость термического разложения гемицеллюлозы максимальна при 307°C, целлюлозы – 357°C. На основе дифференциально-термического анализа выявлено, что компоненты багассы деструктируются в окислительной среде с выделением тепловой энергии, а в инертной среде без выделения тепловой энергии.

**Ключевые слова:** древесина, сохранение леса, целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, багасса, комплексный термический анализ, термическая деструкция, пиролиз, сорбенты.

## COMPONENT COMPOSITION AND CHARACTERISTICS OF THE THERMAL DESTRUCTION PROCESS OF BAGASSA

DSc (Engineering), Professor **A.I. Vezentsev**<sup>1</sup>

Post-graduate student **Nguyen Dinh Tien**<sup>1,2</sup>

Post-graduate student **Dang Min Thuy**<sup>1</sup>

Post-graduate student **M.O. Mikhailyukova**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State National Research University "BelSU", Belgorod, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Environmental Technologies of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

Excessive deforestation leads to environmental problems of a global scale, in particular such as violation of carbon cycle, increase in concentration of greenhouse gases, soil erosion ... To reduce the inappropriate use of wood, improve the ecological condition of the Earth and rational use of sucrose waste from sugar cane (bagasse), we have proposed to develop a method for the production of activated carbon on their basis, which at present is mainly derived from valuable species of wood. By methods of classical analytical chemistry, the composition of waste produced by sucrose from sugar cane is defined: cellulose is 47.59 wt. % , hemicellulose is 26.92 wt. % , lignin is 21.53 wt. % , the substance extracted with organic solvents is 1.37 wt. % and 2.59 wt. % of ash. Characteristics of the process of thermal destruction of bagasse are determined by a complex thermal method of analysis in oxidative (air) and protective (nitrogen) atmospheres. Вкштп bagasse calcination in air, the most significant loss of mass occurs in the temperature range from 230 C to 360°C. The speed of the process of reducing the mass is slowed down to 520°C, and there is an intensive oxidation of the ingredients of the material with the release of thermal energy in the temperature range of 230-520°C. In the protective environment, there is a shift in the temperature ranges at which the mass decreases, toward higher temperatures in comparison with the oxidizing medium. Intensive thermal destruction of bagasse in a protective environment occurs with a large loss of mass in the temperature range of 240-395°C. The rate of thermal decomposition of hemicellulose is maximal at 307°C, cellulose - 357°C. On the basis of differential thermal analysis we have revealed that the components of the bagasse are destructed in oxidizing environment with the release of thermal energy, and without the release of thermal energy in an inert medium.

**Keywords:** wood, forest preservation, cellulose, hemicellulose, lignin, bagasse, complex thermal analysis, thermal destruction, pyrolysis, sorbents.

В настоящее время значительная часть лесоматериалов (береза, дуб, сосна и др.) нерационально используется для производства древесных и активированных углей. Чрезмерная вырубка леса приводит к большим экологическим проблемам. Поэтому поиск новых видов сырья для производства активированных углей является актуальной задачей современной науки. Заменителями ценных пород древесины в производстве активированного угля, как многоотного эффективного сорбционно – активного материала, могут быть отходы растениеводческих сельскохозяйственных предприятий. Использование растениеводческих отходов сельского хозяйства для по-

лучения новых функциональных, в частности, сорбционно – активных материалов, является в настоящее время одной из серьезных проблем развития мировой экономики [1]. Превращение этих отходов в сорбционно – активные материалы одновременно обеспечивает решение трех задач. Во-первых, это направление помогает сохранять лес как один из ценнейших природных материалов, во-вторых позволяет получать жизненно необходимые материалы, такие как активированный уголь и в-третьих решает проблему загрязнения окружающей среды указанными отходами. Данная работа направлена на выявление возможности использования в производстве активированного

угля вместо ценных пород древесины отходов сахарной промышленности.

В настоящее время сахароза производится промышленно из двух типов растений: сахарная свекла и сахарный тростник. Сахарную свеклу выращивают в районах с умеренным климатом (Евросоюз, Россия, Украина...), а сахарный тростник главным образом культивируют в странах тропического пояса (Бразилия, Индия, Таиланд, Вьетнам...). По данным Международного независимого института аграрной политики суммарный годовой урожай сахарной свеклы 2015 года составил 260 миллионов тонн, а сахарного тростника 1842 миллионов тонн [2]. Преимущественная доля сахарного тростника позволяет сделать вывод о том, что данное растение является главным источником сахарозы. В Социалистической Республике Вьетнам выращивание сахарного тростника распределено во всех районах, но более развито в южных провинциях. В 2014 году объем производства сахарозы во Вьетнаме составил около 20 миллионов тонн, что позволило включить Вьетнам в список 20-и ведущих стран-производителей тростниковой сахарозы [3]. Производство сахарозы, как и многие другие производства, сопровождается образованием отходов. Отходы производства сахарозы из сахарного тростника называются багассой. Багасса – это волокнистая масса, остающаяся после выдавливания сока из сахарного тростника, с длиной шепковидных частиц значительно превышающей 1 метр.

На территории Вьетнама, багасса используется главным образом как корм сельскохозяйственных животных, субстрат для выращивания грибов или топливо. Эти направления применения отходов сахарного производства частично решают угрозу загрязнения окружающей среды указанными отходами, но не достаточны для утилизации их большого количества. На основе анализа литературных данных и своей точки зрения, мы предлагаем расширить сферу использования указанных отходов, путем их термообработки с целью получения адсорбционно активных материалов для поглощения загрязняющих веществ из различных сред (вода и почва). Для реше-

ния поставленных задач необходимо определить вещественный состав и характеристики процесса термической деструкции, в частности, пиролиза указанных отходов. Целью настоящей работы явились определение компонентного состава и выявление характеристик процесса термической деструкции багассы. В настоящей работе представлены результаты решения поставленных задач. Объектом исследования служил образец багассы фермера из уезда Жалам, города Ханой, Вьетнам.

Багасса, как и большинство подобных растительных материалов включая древесину, в основном состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. В составе багассы также присутствуют экстрагируемые органические и негорючие минеральные вещества. В настоящей работе содержание экстрагируемых органических веществ и гемицеллюлозы определено по соответствующим методикам, изложенным в работе [4], массовая доля целлюлозы и золы определены по методикам, описанным в работе [5]. Для определения экстрагируемых веществ использовали ацетон в качестве экстрагирующего агента, процесс провели в течение 3-х часов с применением аппарата Сокслета. Содержание гемицеллюлозы определено гравиметрическим методом после удаления ее гидролизом в 0,5М растворе NaOH. Зольность определили классическим общепринятым гравиметрическим методом и методом термогравиметрического анализа, а целлюлозу - азотно-спиртовым методом (методом Кюршнера). Содержание лигнина определено как остаточная часть материала от суммарного содержания экстрагируемых веществ, золы, гемицеллюлозы и целлюлозы. Определение целлюлозы, гемицеллюлозы, экстрактивных веществ и золы проводилось трехкратно для получения средних арифметических значений. Установлено, что в багассе содержится 46,69-48,25 масс. % целлюлозы, 24,99-29,19 масс. % гемицеллюлозы, 20,26-23,12 масс. % лигнина, 1,33-1,42 масс. % экстрагируемых органических веществ, 2,50-2,74 масс. % золы. Полученные результаты позволяют классифицировать багассу как лигноцеллюлозный материал.

Состав багассы (в масс. %)

Экстрагируемые вещества	Гемицеллюлоза	Целлюлоза	Лигнин	Зола	Источник
1,37	26,92	47,59	21,53	2,59	Данная работа
2,14	33,28	35,28	25,20	4,1	[4]
-	28,36	49,85	14,92	1,89	[6]
8,5	31,10	43,10	11,40	5,5	[7]
-	15,84	49,03	27,22	-	[8]

Для сравнения в таблице 1 приведены результаты определения состава багассы, установленного другими авторами.

Поскольку вещественный состав растительных материалов зависит от множественных факторов (климатические условия, почва, сорт растений, традиция культивирования...) поэтому полученные нами результаты характерны только для исследуемого образца багассы. Из таблицы 1 установлено, что полученные результаты совпадают с опубликованными результатами других авторов. Однако содержание экстрагируемых веществ в наших образцах оказалось ниже. Это может быть связано с условием хранения и транспортировки образца. Выявлено, что состав исследуемой багассы близок к составу древесины березы [9], которая является существенным источником получения активированных углей. В таблице 2 приведено содержание составляющих компонентов багассы и березы.

Таблица 2

Состава багассы и березы (в масс. %)

Компонент	Багасса	Береза [9]
Экстрагируемые вещества	1,37	3,5
Гемицеллюлоза	26,92	23,3
Целлюлоза	47,59	46,8
Лигнин	21,53	24,7

В таблице 2 показано, что состав багассы незначительно отличается от состава древесины березы, поэтому багасса может стать источником углерода для получения сорбционно – активированного угля, который традиционно получают методом пиро-

лиза, т.е. термического воздействия при ограниченном контакте с кислородом воздушной среды.

Перед тем, как применить термическое воздействие на растительные отходы, необходимо изучить поведение указанных отходов при их нагревании. Это осуществлено при помощи термографического анализа багассы на дериватографе Labsys Evo S60/58988 (производитель Setaram, Франция) в Институте Химии Вьетнамской Академии Наук и Технологий. Исследуемыми образцами были куски багассы, высушенные при  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Термографический анализ проведен в окислительной (воздушной) и защитной (азотной) атмосферах. Скорость подъема температуры была  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Скорость подачи азота составила  $20\text{мл}/\text{мин}$ . Масса образца при испытании в окислительной среде -  $8,53\text{мг}$ ; а в защитной среде -  $8,36\text{мг}$ . На рисунке 1 представлены полученные комплексные термограммы с термогравиметрическими кривыми ТГ1 и ТГ2, дифференциальными (дериватными) термогравиметрическими кривыми ДТГ1 и ДТГ2, а также кривыми дифференциально-термического анализа ДТА1 и ДТА2. Обозначение 1 соответствует образцу, прокаленному в окислительной (воздушной) среде, а 2 обозначает образец, прокаленный в защитной (азотной) атмосфере.

При анализе рисунка 1 установлено, что термогравиметрические кривые ТГ1 и ТГ2 подобны. Дифференциальные термогравиметрические кривые ДТГ1 и ДТГ2, а также кривые дифференциально-термического анализа ДТА1 и ДТА2 значительно отличаются друг от друга по форме, масштабу и ходу графических зависимостей. Для удобства анализа на рисунке 2 представлена комплексная термограмма

багассы в окислительной атмосфере с обозначенными численными значениями ключевых температур.

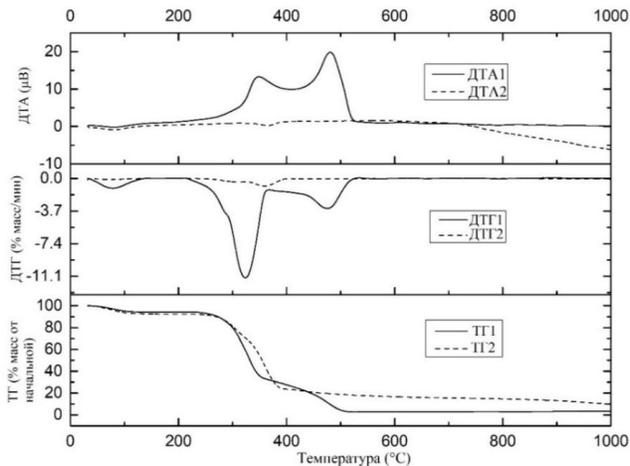


Рис. 1. Комплексные термограммы багассы в окислительной (1) и защитной (2) атмосферах

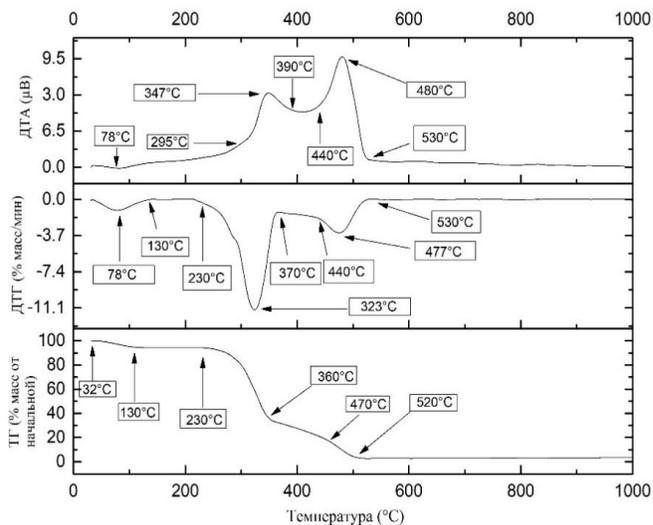


Рис. 2. Комплексная термограмма багассы в окислительной среде

Анализируя кривую ТГ1, установлено, что при нагревании от комнатной температуры (32°C) до 130°C происходит потеря массы. Это обусловлено удалением остаточной влаги образца. При нагреве от 130°C до 230°C зафиксирован практически прямой горизонтальный участок, указывающий на отсутствие изменения массы образца в этом диапазоне температур. На участке 230-360°C уменьшение массы заметно ускоряется, с перегибом в районе ~320°C. В

диапазоне 360-520°C потери массы заметно замедляются, хотя от ~470°C до 520°C скорость потери массы несколько интенсифицируется. На участке от 520°C до 1000°C изменение массы не наблюдается (линия идет практически горизонтально). На этом основании сделан вывод о том, что выгорание образца багассы совершается до 520°C, с образованием золы в количестве 2,80% от начальной массы. В целом кривую ТГ1 можно разделить на 3 ступени по уменьшению массы образца. Значение  $\Delta_1$  соответствует потери массы от комнатной температуры до 130°C; значение  $\Delta_2$  соответствует уменьшению массы от 230°C до 360°C; а  $\Delta_3$  – от 360°C до 520°C. Эти ступени изображены на рисунке 3. Относительное (в процентах) значение этих потерь массы представлено в таблице 3.

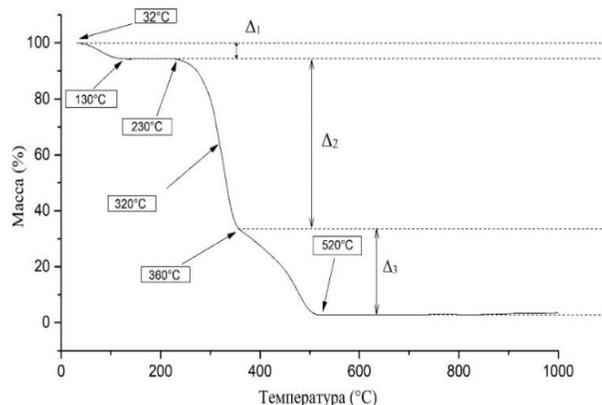


Рис. 3. Термогравиметрическая кривая багассы в окислительной атмосфере

Таблица 3

Потери массы багассы при прокаливании в окислительной атмосфере

Условное обозначение	Диапазон температур, °C		Потери массы, %
	От	До	
$\Delta_1$	32	130	5,80
$\Delta_2$	230	360	61,20
$\Delta_3$	360	520	30,20
<b>Сумма</b>	<b>32</b>	<b>1000</b>	<b>97,20</b>

Из таблицы 3 следует отметить, что самые значительные потери массы происходят при прокаливании от комнатной температуры до 360°C. Суммарная убыль массы в этом диапазоне температур составляет 67,0%, что значительно больше потери массы на участке 360-520°C. Также установлена разница между содержанием золы, определенным методом термогравиметрического анализа (2,80 масс. % с погрешностью прибора 0,01%) и содержанием золы, определенным методом классической аналитической химии (2,59 масс. % с погрешностью метода 0,5%). Эта разница является незначительной и составляет 0,21%.

На кривой ДТГ1, представляющей производную от потери массы по температуре –  $dm/dT$  (рис. 2) зафиксированы 3 минимума: при 78°C, 323°C и 477°C. Наличие 3-х минимумов является подтверждением того, что кривая ТГ1 трехступенчатая. Первый минимум при 78°C, соответствует потери массы в диапазоне температур 32-130°C. Этот эффект характерен для удаления остаточной влаги из образца. В окислительной атмосфере багасса обезвоживается с наибольшей скоростью при 78°C. Второе отклонение вниз от базисной линии зафиксировано в интервале температур от 230 до 370°C с максимальной скоростью процесса при 323°C, соответствующее потери массы  $\Delta 2$ . Третий минимум зафиксирован в интервале температур 440-530°C с наибольшей скоростью процесса при 477°C, соответствующий потери массы  $\Delta 3$ . Дальнейший ход кривой ДТГ1 (за третьим минимумом) демонстрирует ее следование базисной линии, вплоть до конечной температуры испытания. На этом участке кривой не наблюдается отклонение, что соответствует практическому постоянству массы. По глубине и площади этих эффектов легко отметить, что второй эффект с минимумом при 323°C является самым большим на кривой ДТГ1 и соответствует самой большой потери массы  $\Delta 2$ .

На кривой ДТА1 зафиксирован первый эндотермический эффект с минимумом при температуре 78°C. Этот эндоэффект обусловлен удалением остаточной влаги образца. От 230°C начинаются экзотермические эффекты значительные по величине (судя

по высоте и площади отклонения от базисной линии). Первый экзоэффект проявляется в диапазоне 295–390°C, второй экзоэффект в диапазоне 440–530°C. Эти экзоэффекты совпадают с наибольшими потерями массы  $\Delta 2$  и  $\Delta 3$ ; два его максимума наблюдаются при 347°C и 480°C с перегибом при температуре около 410°C. Данные термоэффекты свидетельствуют о интенсивном окислении материала в воздушной атмосфере с выделением тепловой энергии в диапазоне температур от ~230°C до ~530°C. От 530°C до 1000°C зафиксировано множество термоэффектов, которые незначительны по величине в сравнении с описанными ранее.

С целью определения оптимальной температуры пиролиза, нами проведен термический анализ багассы в защитной среде (атмосфере азота). На рисунке 4 представлены кривые термического анализа в защитной атмосфере с выявленными на них термоэффектами.

Из рисунков 3 и 5 установлено, что кривая ТГ2 по форме аналогична кривой ТГ1, однако существуют некоторые различия. В начальном диапазоне температур на кривой ТГ2 также зафиксированы потери массы за счет удаление остаточной влаги, но эта убыль массы шла до 135°C, что на 5°C выше, чем у образца, прокаленного в воздушной среде.

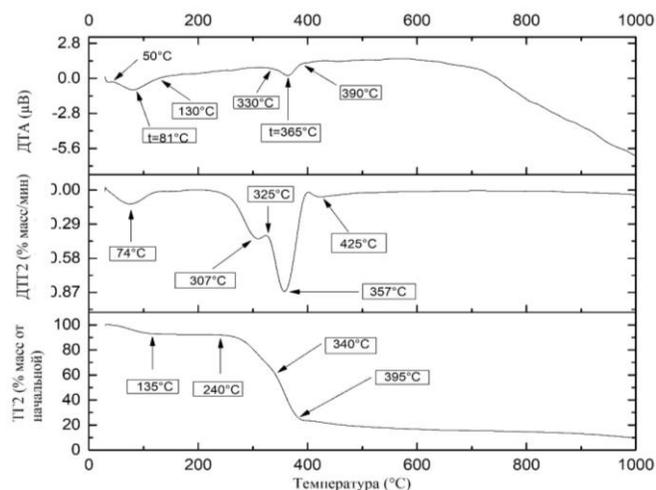


Рис. 4. Комплексная термограмма багассы в защитной среде

Далее наблюдается практически горизонтальный участок от 135 до 240°C, соответствующий

отсутствию изменения массы образца в этом диапазоне температур.

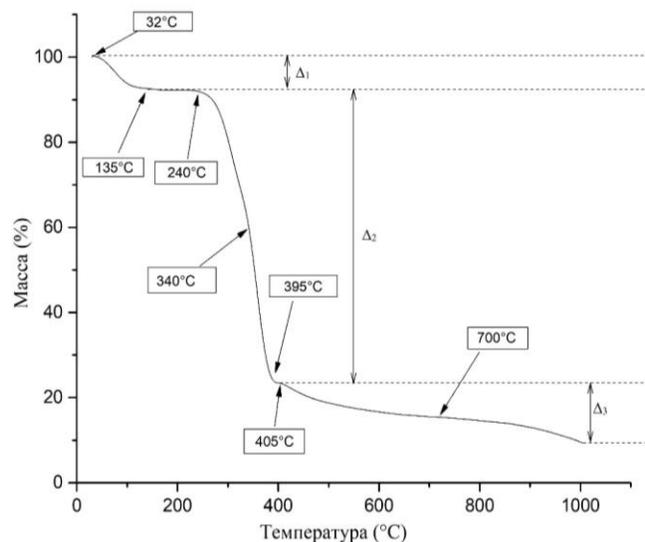


Рис. 5. Термогравиметрическая кривая багассы в защитной среде

Подобный участок также присутствует на кривой ТГ1, но на ТГ2 он несколько смещен в сторону больших температур. На участке 240-395°C падение массы заметно ускоряется с перегибом в районе ~340°C. После узкого участка 395-405°C скорость падения массы значительно уменьшилась. Начиная с 405°C до завершения процесса прокаливания образца кривая имеет минимальный уклон, который свидетельствует, что сокращение массы образца стало менее интенсивным чем в диапазоне 240-395°C.

При конечной температуре прокаливания зольность в среде азота зафиксирована в количестве 9,5 масс.%. Кривая ТГ2 также является трехступенчатой. Значение  $\Delta_1$  соответствует потери массы багассы от комнатной температуры до 135°C; значение  $\Delta_2$  соответствует уменьшению массы от 240 до 395°C; а  $\Delta_3$  – от 405 до 1000°C. Указанные ступени изображены на рисунке 5, а соответствующие значения потерь массы внесены в таблицу 5.

Из таблицы 5 установлено, что самая значительная потеря массы происходит при прокаливании багассы в атмосфере азота от комнатной температу-

ры до 395°C. Суммарная убыль массы при этом составляет 76,4 масс.%. Экспериментально установлено, что зольный остаток багассы, при пиролизе в атмосфере азота составляет 9,5 масс. %, что в 3,4 раза выше, чем при прокаливании в воздушной атмосфере.

На кривой ДТГ2 (рис. 4) зафиксированы 4 минимума: при 74°C, 307°C, 357°C и 425°C. Первый минимум, наблюдающийся при 74°C, соответствует максимальной скорости потери массы в диапазоне температур 32-135°C. Второе отклонение вниз от базисной линии зафиксировано при 307°C, а третий минимум при 357°C, эти два минимума находятся близко друг к другу, с перегибом при 325°C. Существование этих минимумов совпадает с ходом кривой ТГ2: скорость уменьшения массы на участке 240-340°C немного уступает скорости уменьшения массы на участке 340-395°C.

Если кривые ТГ1 и ТГ2 аналогичны, то кривые ДТГ1 и ДТГ2 сильно отличаются друг от друга. Первое наглядное отличие – это масштаб. На рисунке 1 установлено, что экстремумы на кривой ДТГ1 намного заметнее, глубже чем экстремумы кривой ДТГ2. Это объясняется тем, что при прокаливании в воздушной среде происходит образование газообразных продуктов за счет окисления компонентов багассы кислородом воздуха, а в случае пиролиза в среде азота (ДТГ2) изменение массы – это результат термического разложения компонентов багассы, без их окисления. Вторая большая разница между ДТГ1 и ДТГ2 - это форма и расположение пиков термических эффектов.

Первый пик у обеих кривых практически совпадает и соответствует потери массы за счет удаления остаточной воды. Второй и третий пики кривой ДТГ2 разделены отчетливо с максимумами при температурах 307°C и 357°C с перегибом при 325°C. На кривой ДТГ1 они соединены, образуя при этом большой пик с максимумом при 323°C. Решающую роль этого отличия играет кислород воздуха.

Таблица 5  
Потери массы багассы при пиролизе в защитной атмосфере

Условное обозначение	Диапазон температур, °С		Относительное значение потери массы, %
	От	До	
$\Delta_1$	32	135	7,3
$\Delta_2$	240	395	69,1
$\Delta_3$	405	1000	14,1
<b>Сумма</b>	<b>32</b>	<b>1000</b>	<b>90,5</b>

При температуре ~300°C кислород, присутствующий во воздухе является сильным окислителем, способным окислять гемицеллюлозу и целлюлозу одновременно, независимо от их молекулярной структуры. В случае пиролиза в среде азота, гемицеллюлоза разлагается при более низких температурах чем целлюлоза, поскольку молекулы гемицеллюлозы меньше, чем молекулы целлюлозы. Выявлено, что скорость термического разложения гемицеллюлозы максимальна при 307°C, а целлюлозы – 357°C. Наши результаты совпадают с результатами авторов работы [6], которые проводили пиролиз багассы сахарного тростника в среде диоксида углерода.

На кривых ДТГ1 и ДТГ2 также отмечены пики, соответствующие термическому разложению лигнина. По мнению многих исследователей, процесс термической деструкции лигнина происходит в большом диапазоне температур - от 160°C до 900°C с наибольшей скоростью при температурах выше 400°C [6, 10–12]. На кривых ДТГ1 и ДТГ2 зафиксированы пики при 477°C и 425°C соответственно, которые характерны разложению лигнина.

На кривой ДТА1 выявлены соответствующие термоэффекты. Первым является эндотермический эффект с минимумом при температуре 78°C. Этот эндозэффект обусловлен удалением остаточной влаги образца. От 230°C начинаются экзотермические эффекты значительные по величине (судя по высоте и площади отклонения от базисной линии). Первый экзозэффект проявляется в диапазоне 295 – 390°C, второй экзозэффект в диапазоне 440 – 530°C. Эти экзозэффекты совпадают с наибольшими потерями мас-

сы  $\Delta_2$  и  $\Delta_3$ ; два его максимума наблюдаются при 347°C и 480°C с перегибом при температуре около 410°C. Данные термоэффекты свидетельствуют о интенсивном окислении материала в воздушной атмосфере с выделением тепловой энергии в диапазоне температур от ~230°C до ~520°C. Далее, от 520°C до 1000°C происходит множество термоэффектов, которые незначительны по величине в сравнении с описанными термоэффектами. Кривая ДТА2 выглядит иначе. На ней фиксированы два эндотермических эффекта. Максимум первого эндотермического эффекта зарегистрирован при 81°C, соответствует максимальной скорости удаления остаточной воды из багассы. Второй эндозэффект проявляется в диапазоне температур 330 – 390°C с экстремумом при 365°C, что соответствует уменьшению массы этом диапазоне температур. Дальше кривая идет без больших экстремумов, но к концу испытания она содержит множество маленьких максимумов, минимумов и перегибов, что свидетельствует о сложном поведении образца при больших температурах. Отсюда следует отметить, что процесс термической деструкции багассы в присутствии кислорода воздуха сопровождается выделением тепловой энергии, что обуславливает его использование в виде топлива. В процессе термообработки багассы без доступа кислорода тепловая энергия не выделяется, но выделяются пиролизные газы с высокой теплотворной способностью.

### ВЫВОД

1. Методами классической аналитической химии определен компонентный состав багассы Вьетнама. Главными компонентами которой являются целлюлоза (47,59 масс. %), гемицеллюлоза (26,92 масс. %) и лигнин (21,53 масс. %), что практически соответствует составу березы, следовательно, багассу можно использовать в производстве активированного угля, сохраняя ценные сорта древесины.

2. Выявлено, что в случае прокаливания багассы в воздушной атмосфере самая значительная потеря массы происходит в интервале температур от 230°C до 360°C, скорость процесса уменьшения массы замедляется при повышении температуры до 520°C. В интервале температур 230-520°C происхо-

дит интенсивное окисление ингредиентов багассы (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина) с выделением тепловой энергии, что подтверждается наличием экзотермических эффектов на кривой ДТА1.

3. Показано отличие характеристик процесса термической деструкции багассы в воздушной и защитной атмосферах. В защитной среде наблюдается смещение интервалов температур, при которых происходит уменьшение массы, в сторону больших температур по сравнению с окислительной средой. Ком-

поненты деструктируются в защитной среде без выделения тепловой энергии, а в воздушной среде окисление компонентов в присутствии кислорода сопровождается выделением тепловой энергии. При прокаливании в окислительной среде гемицеллюлоза и целлюлоза деструктируются одновременно, образуя при этом общий пик на кривой ДТГ. При пиролизе в защитной среде гемицеллюлоза разрушается при более низких температурах, чем целлюлоза.

### Библиографический список

1. Коновалова А.И., Мухин В.М., Воропаева Н.Л., Белоножкина Т.Г., Карпачев В.В. Инновационная технология переработки сельхозостатков для получения активных углей различного назначения // Сборник научных трудов ВНИИОК. 2014. №7. С.528-531
2. МНИАП - Международный независимый институт аграрной политики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-sahara/>. – Загл. с экрана
3. ФАО – Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/faostat/ru/#data/QC/>. – Загл. с экрана
4. Augustine O. Ayeni. Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of an economically viable method suitable for woody and non-woody biomass [Электронный ресурс] / Augustine O. Ayeni, Opeyemi. A. Aleeyo, Oyinlola M. Oresgun, Temitayo O. Oladimeji // American Journal of Engineering Research (AJER). – 2015. – Volume 4 (4). – Режим доступа: [http://www.ajer.org/papers/v4\(04\)/C044014019.pdf](http://www.ajer.org/papers/v4(04)/C044014019.pdf).
5. Удоратина, Е. В. Химия древесины и синтетических полимеров [Текст]: Сборник описаний лабораторных работ для подготовки дипломированных специалистов по направлению 655000 «Химическая технология органических веществ и топлива», специальности 240406 «Технология химической переработки древесины» всех форм обучения / Е. В. Удоратина, В. А. Демин; Сыкт. лесн. ин-т. – Сыктывкар: СЛИ, 2007. – 32 с.
6. Lin Bo-Jhih, Chen Wei-Hsin. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. *Journal Frontiers in Energy Research*, 2015. – Vol. 3. P. 1 – 9.
7. Carlos Martín, Helene B. Klinke, Anne Belinda Thomsen. Wet oxidation as a pretreatment method for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007. Vol. 40, Is. 3, P. 426-432.
8. Mesa L., González E., Cara C., Ruiz E., Castro E., Mussatto S. I. An approach to optimization of enzymatic hydrolysis from sugarcane bagasse based on organosolv pretreatment. *Journal Chemistry Technology and Biotechnology*, 2010. Vol. 85. – Is. 8. – P. 1092–1098.
9. Судакова И.Г. Состав и связующие свойства лигнинов, полученных окислительной делигнификацией древесины пихты, осины и березы в среде уксусной кислоты [Текст] / И.Г. Судакова, Б.Н. Кузнецов, Н.В. Гарынцева, И.В. Королькова // Химия растительного сырья. – 2010. - №3. – с. 55-60.
10. Haiping Yang, Rong Yan, Hanping Chen, Dong Ho Lee, Chuguang Zheng, Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 2007. Vol. 86, – Is. 12–13, – P. 1781-1788.

11. Chen, W. H., Ye, S. C., and Sheen, H. K. Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. *Bioresource Technology*, 2012. Vol. 118. – P. 195–203.
12. Sharma R.K., Wooten J.B., Baliga V.L., et al. Characterisation of chars from pyrolysis of lignin. *Fuel*, 2004. Vol. 83. – P. 1469–1482.

### References

1. Konovalova A.I., Muhin V.M., Voropaeva N.L., Belonozhkina T.G., Karpachev V.V. Innovacionnaja tehnologija pererabotki sel'hozostatkov dlja poluchenija aktivnyh uglej razlichnogo naznacheniya // *Sbornik nauchnyh trudov VNIIOK*. 2014. №7. P.528-531.
2. MNIAP - Mezhdunarodnyj nezavisimyj institut agrarnoj politiki. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-sahara/>. – Zagl. s jekrana.
3. FAO – Prodoval'stvennaja i sel'skohozjajstvennaja organizacija Ob#edinennyh nacij. [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.fao.org/faostat/ru/#data/QC/>. – Zagl. s jekrana.
4. Augustine O. Ayeni. Compositional analysis of lignocellulosic materials: Evaluation of an economically viable method suitable for woody and non-woody biomass [Jelektronnyj resurs] / Augustine O. Ayeni, Opeyemi. A. Aleeyo, Oyinlola M. Oresangun, Temitayo O. Oladimeji // *American Journal of Engineering Research (AJER)*. – 2015. – Volume 4 (4). – Rezhim dostupa: [http://www.ajer.org/papers/v4\(04\)/C044014019.pdf](http://www.ajer.org/papers/v4(04)/C044014019.pdf).
5. Udoratina, E. V. Himija drevesiny i sinteticheskikh polimerov [Tekst]: Sbornik opisanij laboratornyh rabot dlja podgotovki diplomirovannyh specialistov po napravleniju 655000 «Himicheskaja tehnologija organicheskikh veshhestv i topliva», special'nosti 240406 «Tehnologija himicheskoy pererabotki drevesiny» vseh form obucheniya / E. V. Udoratina, V. A. Demin; Sykt. lesn. in-t. – Syktyvkar : SLI, 2007. – 32 p.
6. Lin Bo-Jhih, Chen Wei-Hsin. Sugarcane bagasse pyrolysis in a carbon dioxide atmosphere with conventional and microwave-assisted heating. *Journal Frontiers in Energy Research*, 2015. – Vol. 3. P. 1 – 9.
7. Carlos Martín, Helene B. Klinke, Anne Belinda Thomsen. Wet oxidation as a pretreatment method for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007. Vol. 40, Is. 3, P. 426-432.
8. Mesa L., González E., Cara C., Ruiz E., Castro E., Mussatto S. I. An approach to optimization of enzymatic hydrolysis from sugarcane bagasse based on organosolv pretreatment. *Journal Chemistry Technology and Biotechnology*, 2010. Vol. 85. – Is. 8. – P. 1092–1098.
9. Sudakova I.G. Sostav i svjazujushhie svojstva ligninov, poluchennyh okislitel'noj delignifikaciej drevesiny pihty, osiny i berezy v srede uksusnoj kisloty [Tekst] / I.G. Sudakova, B.N. Kuznecov, N.V. Garynceva, I.V. Korol'kova // *Himija rastitel'nogo syr'ja*. – 2010. - №3. – p. 55-60.
10. Haiping Yang, Rong Yan, Hanping Chen, Dong Ho Lee, Chuguang Zheng, Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 2007. Vol. 86, – Is. 12–13, – P. 1781-1788.
11. Chen, W. H., Ye, S. C., and Sheen, H. K. Hydrothermal carbonization of sugarcane bagasse via wet torrefaction in association with microwave heating. *Bioresource Technology*, 2012. Vol. 118. – P. 195–203.
12. Sharma R.K., Wooten J.B., Baliga V.L., et al. Characterisation of chars from pyrolysis of lignin. *Fuel*, 2004. Vol. 83. – P. 1469–1482.

## Сведение об авторах

*Везенцев Александр Иванович*, профессор, заведующий кафедрой Общей Химии, Института Инженерных Технологий и Естественных Наук, Белгородского Государственного Национального Исследовательского Университета (ИИТиЕН - НИУ «БелГУ») доктор технических наук, г. Белгород, Россия. E-mail: Vesentsev@bsu.edu.ru

*Нгуен Динь Тьен*, исследователь Департамента по применению и передаче технологий Института Экологических Технологий Вьетнамской Академии Наук и Технологий (ИЭТ – ВАНТ). Аспирант 2-о года обучения кафедры Общей Химии Института Инженерных Технологий и Естественных Наук Белгородского Государственного Национального Исследовательского Университета (ИИТиЕН - НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия. E-mail: ngudichi@yandex.ru

*Михайлюкова Мария Олеговна*, аспирант 3-о года обучения Кафедры Общей Химии, Института Инженерных Технологий и Естественных Наук, Белгородского Государственного Национального Исследовательского Университета (ИИТиЕН - НИУ «БелГУ»), г. Белгород, Россия. E-mail: mmihaylyukova@gmail.ru

## Information about authors

*Vezentsev Alexandr Ivanovich*, professor, head of the Department General Chemistry, Institute of Engineering Technology and Natural Science, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Belgorod State National Research University”, Belgorod, Russian Federation. E-mail: Vesentsev@bsu.edu.ru

*Nguyen Dinh Chien*, researcher of Department Technology Application and Transfer, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam. PhD student of Department General Chemistry, Institute of Engineering Technology and Natural Science, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Belgorod State National Research University”, Belgorod, Russian Federation. E-mail: ngudichi@yandex.ru

*Mikhailyukova Maria Olegovna*, PhD student of Department General Chemistry, Institute of Engineering Technology and Natural Science, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Belgorod State National Research University”, Belgorod, Russian Federation. E-mail: mmihaylyukova@gmail.ru