

УДК 66.092-977; 661.728.7

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕДЛЕННОГО ПИРОЛИЗА ЛИГНИНА, ГЕМИЦЕЛЛЮЛОЗЫ, ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ЭФФЕКТА ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЕ

© 2023 г. В. М. Зайченко^{1,*}, В. А. Лавренов^{1,**}, Ю. М. Фалеева^{1,***}

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

*e-mail: zaitch@oivtran.ru

**e-mail: v.a.lavrenov@gmail.com

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

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 13.07.2023 г.

Принята к публикации 19.07.2023 г.

Проведены исследования пиролиза двух видов сырья растительного происхождения (древесные опилки и лузга подсолнечника), компонентов органической части биомассы (гемицеллюлоза, целлюлоза и лигнин), а также модельных смесей, приготовленных из компонентов в соответствии с их пропорциями в сырье. Пиролиз материалов выполнен с использованием ТГА и лабораторной установки, включающей реактор с неподвижным слоем. Распределение и состав продуктов определяли при температурах пиролиза 350, 425, 500 и 575°C. Экспериментальные данные для образцов биомассы и модельных смесей сравнивали с расчетными значениями, полученными на основе пиролиза компонентов по отдельности и их пропорций в биомассе. Исследована возможность прогнозировать распределение продуктов пиролиза в зависимости от компонентного состава. Выявлено влияние межкомпонентного взаимодействия в биомассе на выход и состав продуктов пиролиза.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, биомасса, пиролиз, целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин

DOI: 10.31857/S0023117723060105, EDN: BSGBTS

ВВЕДЕНИЕ

Из-за экологических проблем в настоящее время увеличивается спрос на новые “зеленые” технологии, одной из которых является использование биомассы — возобновляемого, относительно дешевого общедоступного сырья. Энергетическая утилизация растительных остатков, в частности отходов лесоперерабатывающей отрасли и агропромышленного комплекса, позволит эффективно использовать не востребуемое сырье, а также снизить зависимость от ископаемого топлива.

Процесс преобразования биомассы в удобные формы энергии может быть организован термохимическим путем, который включает горение, пиролиз, торрефикацию, газификацию и гидротермальную карбонизацию [1]. Пиролиз — это термический процесс, при котором органическое вещество разлагается при повышении температуры в отсутствии кислорода. Это разложение вызывает необратимые изменения в химическом составе и физических свойствах биомассы, в результате которых образуется три типа продуктов: жидкая фракция, газы и твердый остаток (био-

уголь) [2, 3]. Жидкая фракция продуктов пиролиза состоит из двух фаз: водной фазы, содержащей широкий спектр кислородсодержащих органических соединений низкой молекулярной массы, и неводной фазы (бионефти), содержащей нерастворимую органику высокой молекулярной массы [4]. Бионефть представляет особый интерес, поскольку считается перспективным сырьем для замены нефтяного топлива в энергетике из-за ее высокой плотности энергии и удобства хранения или транспортировки [5].

На выход и состав продуктов пиролиза огромное влияние оказывают рабочие параметры процесса (температура, время пребывания сырья в реакторе, давление), но также и свойства исходной биомассы (химический состав, зольность, размер частиц) [2]. Известно, что органическая часть растительной биомассы состоит из трех компонентов: лигнина, целлюлозы, гемицеллюлозы, и их процентное содержание в биомассе варьируется в зависимости от типа растительного сырья [6]. Свойства компонентов оказывают большое влияние на характеристики пиролиза из-за их различной реакционной способности



Рис. 1. Компоненты смесей: Г (а), Ц (б) и Л (в).

при воздействии температуры [6–9]. Целлюлоза — линейный полисахарид, состоящий из повторяющихся молекул глюкозы. Прочная водородная связь между прямыми цепями придает целлюлозе кристаллическую структуру, что объясняет ее механическую прочность и химическую стабильность [7, 9]. Лигнин, сильно разветвленный ароматический полимер, обладает длинной цепью, не имеющей упорядоченных повторяющихся звеньев, что затрудняет его разложение при пиролизе [3, 10]. Гемичеселлюлоза является наименее стойким к термическому воздействию компонентом, поскольку, в отличие от целлюлозы, данный полисахарид имеет разветвленную аморфную структуру [7].

Предыдущие исследования показали, что пиролиз трех компонентов протекает в различных температурных диапазонах [11–16]. Разложение целлюлозы происходит в относительно узком диапазоне температур. С другой стороны, гемичеселлюлоза и лигнин пиролизуются в более широком диапазоне, начиная при более низких температурах, чем целлюлоза. Хотя разложение лигнина продолжается при более высоких температурах, максимальная скорость потери массы целлюлозы и лигнина совпадает в диапазоне 350–400°C [3, 7].

В ряде работ, например [7, 17], была предпринята попытка предсказать термическое и кинетическое поведение различных видов биомассы по их составу, используя закон аддитивности. Однако отдельные компоненты в природном сырье неравномерно распределены внутри биомассы и образуют макроскопические структуры за счет неоднородного сочетания связей [18]. Предполагается, что гемичеселлюлоза связана с целлюлозой водородными связями, тогда как лигнин и гемичеселлюлоза — ковалентными через сложноэфирные группы [7]. Высказано предположение, что компоненты биомассы могут взаимодействовать между собой в процессе пиролиза, и характер этого взаимодействия определяется условиями проведения процесса [17]. Так, Gani и соавт. [19], обнаружили, что содержание целлюлозы и лигнина в биомассе является одним из важных параметров при оценке характеристик пиролиза. В работе [20] изуча-

лась интенсивность взаимодействий между компонентами в бинарных смесях. Было обнаружено, что взаимодействие между целлюлозой/лигнином и гемичеселлюлозой/лигнином способствует термическому разложению лигнина.

Цель исследования — изучение влияния межкомпонентного взаимодействия в биомассе на выход и состав продуктов пиролиза. Для этого были проведены эксперименты по медленному пиролизу образцов растительной биомассы с различным компонентным составом, трех компонентов по отдельности и модельных смесей компонентов, имитирующих растительный материал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве образцов биомассы были выбраны отходы деревообработки — опилки древесные (ОД) хвойных пород, а также сельскохозяйственные отходы — лузга подсолнечника (ЛП). Оба вида отходов широко распространены и доступны, имеют огромный потенциал для энергетической переработки в товарную продукцию. В качестве компонентов для приготовления смеси модельной опилок древесных (СМОД) и смеси модельной лузги подсолнечника (СМЛП) использовалась гемичеселлюлоза (Г), полученная из грибов *Trichoderma reesei*, целлюлоза (Ц) микрокристаллическая МКЦ 102 и лигнин (Л) гидролизный, внешний вид которых представлен на рис. 1.

Предварительная подготовка сырья состояла в получении аналитической пробы и включала размол (при необходимости) до крупности зерен менее 0.2 мм и подсушку в сушильном шкафу до значения относительной влажности (1.5 ± 1) мас. %. Измерение массовой доли влаги общей производилось при помощи анализатора влажности *Ohaus MB-45*. Зольность аналитических проб сырья и компонентов измерялась при помощи лабораторной муфельной печи *Nabertherm L9/12/SW*. Технический анализ материалов выполняли с использованием термогравиметрического прибора *STA 2500 (NETZSCH, Япония)*. Элементный состав (массовые доли углерода, водорода, азота, серы) проб определяли на элементном анализаторе.

Таблица 1. Технический и элементный анализ сырья, компонентов и модельных смесей на сухое состояние

Образец	Доля, мас. %		Зольность, мас. %	Элементный состав, мас. %			
	летучих	связанного углерода		С	Н	N	O
ОД	80.87	18.59	0.54	48.78	5.85	0.11	44.72
ЛП	71.32	26.18	2.51	50.06	6.12	0.69	40.62
Г	73.32	18.78	7.90	40.36	7.74	3.69	40.31
Ц	87.38	12.62	0.00	44.81	7.59	0.09	47.51
Л	58.97	35.84	5.19	58.64	6.15	0.30	29.72
СМОД	70.99	26.94	2.07	47.76	7.41	0.98	41.78
СМЛП	68.88	28.30	2.81	47.97	7.68	1.32	40.22

ре *Vario Macro Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия)*. Массовая доля кислорода вычислялась по остаточному принципу.

Результаты определения доли летучих, связанного углерода, зольности и элементного состава (С, Н, N, O) материалов на сухое состояние представлены в табл. 1. Сера не указана в табл. 1 ввиду ее низкого содержания во всех исследованных пробах (менее 0.2 мас. %, что ниже погрешности определения).

Химический анализ образцов древесных опилок и лузги подсолнечника для определения массовых долей гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина был выполнен на научном оборудовании центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра “Карельский научный центр Российской академии наук”. Использовался гравиметрический метод определения массовых долей гемицеллюлоз (последовательный гидролиз салициловой кислотой и соляной кислотой), целлюлозы (метод Кюршнера-Хоффера) и лигнина (кислотный гидролиз в 72%-ной серной кислоте). Эксперименты были выполнены последовательно и повторялись дважды для каждого образца. Результат был получен как среднее арифметическое значений измеренных массовых долей компонентов.

В табл. 2 представлен компонентный состав образцов биомассы (ОД и ЛП), не нормированный на 100%, на сухую массу исходного образца.

Для проведения экспериментальных исследований процесса пиролиза образцов биомассы, компонентов и модельных смесей с целью получения твердого остатка, жидкости и газа, а также определения значений их удельного выхода был использован лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 2.

В начале опыта газовые пипетки, градуированные для измерения объема, наполняли солевым раствором, нижние концы пипеток опускали в открытую емкость с раствором. Образец (5 г) помещали в чашу реактора. Инертная атмосфера со-

здавалась за счет подачи аргона через внутреннюю трубу реактора. После продувки подачу аргона закрывали. Реактор нагревали в электропечи со скоростью 10°C/мин до заданной температуры в зависимости от опыта (350, 425, 500 и 575°C). Для контроля температуры использовалась хромель-алюмелевая термопара. Выделяющаяся в процессе нагрева парогазовая смесь из реактора пиролиза по трубке поступала в конденсатор, где происходил сбор жидкой фракции. Неконденсирующиеся газы собирались в газовых пипетках, вытесняя раствор в открытую емкость. После достижения конечной температуры нагрева электропечь отключалась, снимались конечные показания объема газа в пипетках. Состав собранного пиролизного газа измеряли на газовом хроматографе “Кристаллюкс-4000М”. В конце опыта производилось взвешивание твердого остатка, а также конденсатора для определения массы жидких продуктов пиролиза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены зависимости соотношения массовых долей твердой, жидкой и газообразной фракций от температуры пиролиза компонентов (Г, Ц и Л), образцов биомассы (ОД и ЛП), а также модельных смесей (СМОД и СМЛП). Рисунок 3 также содержит расчетные значения для ОД и ЛП, основанные на пиролизе компонентов по отдельности и их пропорциях в биомассе.

Таблица 2. Соотношение массовых долей компонентов в сырье (ОД и ЛП) на сухое состояние

Образец	Массовая доля компонента, %			
	экстрактивные вещества	Г	Ц	Л
ОД	2.64	21.56	48.41	26.67
ЛП	2.74	29.95	38.96	28.48

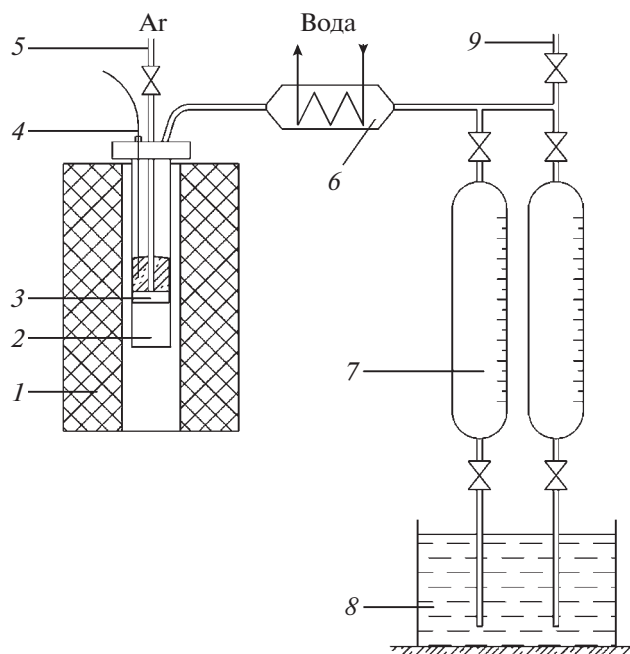


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: 1 — печь, 2 — реактор, 3 — чаша с образцом, 4 — термопара, 5 — подача аргона, 6 — конденсатор, 7 — газовые пипетки, 8 — емкость с солевым раствором, 9 — отвод газа.

Из представленных зависимостей видно, что с увеличением температуры (ужесточением режима) пиролиза увеличиваются массовые доли жидких и газообразных продуктов. Из зависимости соотношения массовых долей продуктов от температуры пиролиза Г, Ц и Л (рис. 3, а–в) можно сделать вывод, что при схожем выходе газа выход жидкой фракции при пиролизе Л значительно ниже по сравнению с двумя другими компонентами (от 13.2 до 23.7% с ростом температуры пиролиза от 350 до 500°C). Выход жидкой фракции при пиролизе Ц и Г при температуре 575°C составляет 46.6 и 41.0% соответственно. Увеличение массовой доли пиролизного газа составляет от 13.1 до 23.5% для Ц, от 13.0 до 19.2% для Г и от 10.6 до 24.0% для Л при повышении температуры от 350 до 575°C. Массовая доля твердого остатка при пиролизе Л является наибольшей (от 75.2 до 53.1%). Из сравнения представленных зависимостей (рис. 3, г, д, ж, з) можно сделать вывод о том, что в целом во всем исследуемом температурном диапазоне характер распределения фракций продуктов пиролиза для биомассы и приготовленных модельных смесей совпадает (средний разброс для ОД–СМОД составляет 1.8%, для ЛП–СМЛП — 2.8%). Наибольшие отличия замечены в соотношении массовых долей твердого остатка (до 3.7% и 4.5% для ОД–СМОД и ЛП–СМЛП соответственно) и газа (до 4.6% для ЛП–СМЛП при 575°C). Среднее отклонение между экспериментальными данными для модельных смесей и ре-

зультатами расчетов также составляет всего 2.0% для СМОД и 2.1% для СМЛП. Наибольшие различия соответствуют массовым долям твердого остатка (4.3 и 3.8% для СМОД и СМЛП соответственно). Средний разброс между экспериментальными данными для образцов биомассы и результатами расчетов составляет 2.3% для ОД и 4.5% для ЛП. Наибольшее расхождение соответствует выходу пиролизного газа из ОД (7.7% при 575°C). При этом выход пиролизной жидкости из образцов биомассы хорошо согласуется с расчетными значениями, как для ОД, так и для ЛП (приблизительно 1.5%). Полученные данные согласуются с ранее проведенными исследованиями возможности прогнозирования выхода продуктов в зависимости от компонентного состава. Уи и соавт. [7] заметили, что при низких температурах пиролиза экспериментальное распределение продуктов соответствовало предполагаемому по поведению отдельных компонентов биомассы. Таким образом, результаты показывают, что существует возможность прогнозировать распределение продуктов пиролиза при известном компонентном составе исследуемых образцов.

На рис. 4 представлены зависимости соотношения массовых долей элементов в твердом остатке от температуры пиролиза компонентов (Г, Ц и Л), образцов биомассы (ОД и ЛП), а также модельных смесей (СМОД и СМЛП). Рисунок 4 также содержит расчетные значения для ОД и ЛП, основанные на пиролизе компонентов и их пропорциях в биомассе. С увеличением температуры пиролиза увеличиваются массовые доли углерода, а также зольность, при этом массовые доли водорода и кислорода уменьшаются, что соответствует их активному переходу (наряду с углеродом) в компоненты жидких и газообразных продуктов. Из представленных зависимостей (рис. 4, а–в) можно сделать вывод о существенном различии в характере пиролитического разложения Г, Ц и Л.

При температуре пиролиза 350°C отмечается практически полное разложение Г, в то время как элементный состав твердого остатка пиролиза Ц и Л продолжает значительно изменяться при дальнейшем увеличении температуры. С ростом температуры от 350 до 500°C массовая доля углерода в твердом остатке ОД увеличивается с 74 до 92.6%, в то время как в биоугле ЛП — с 74 до 81.7%. Во всем исследуемом температурном диапазоне характер распределения элементов для образцов биомассы и модельных смесей совпадает. Средний разброс для ОД–СМОД составляет 4.8, 1.0, 1.5, 2.2 и 5.4%, для ЛП–СМЛП — 3.6, 0.5, 1.0, 1.3 и 2.6% в значениях С, Н, N, О, Ash соответственно. Исключением является значительно более высокое значение зольности (и, как следствие, углерода) в СМОД по сравнению с ОД (различие достигает 7.2% при температуре пиролиза 575°C), что обусловлено высокой зольностью компонентов

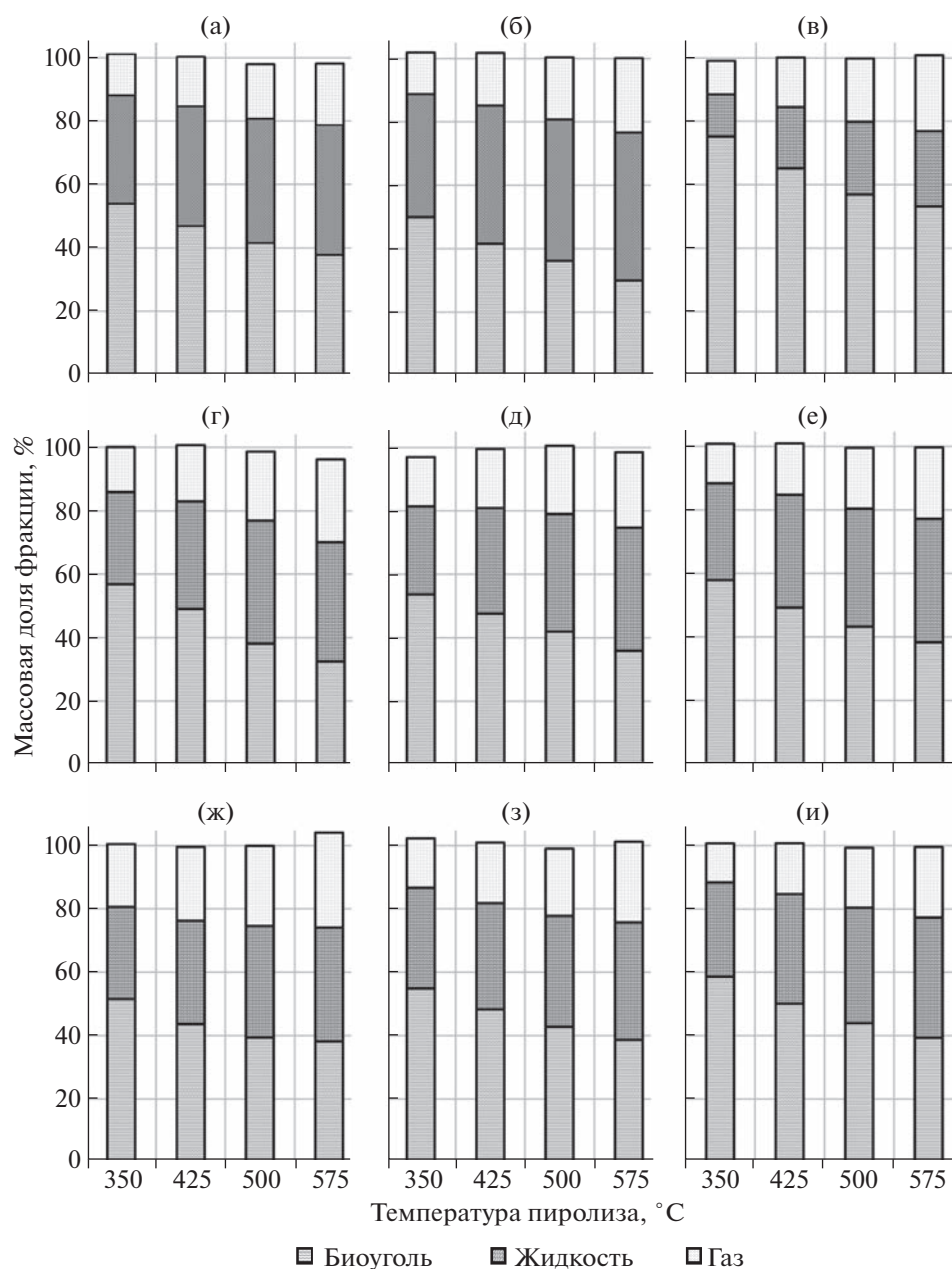


Рис. 3. Влияние температуры на распределение продуктов пиролиза Г (а), Ц (б), Л (в), ОД (г), СМОД (д), ЛП (ж) и СМЛП (з), а также расчетные значения для ОД (е) и ЛП (и).

модельных смесей (Г и Л). Средний разброс между экспериментальными данными для модельных смесей и результатами расчетов не превышает 1.8% для СМОД и 1.3% для ЛП. При этом средний разброс между экспериментальными данными для образцов биомассы и результатами расчетов достигает 5.1% для ОД и 4.5% для ЛП, что говорит о наличии влияния связей компонентов в биомассе на состав получаемого биоугля.

На рис. 5 представлены зависимости соотношения объемных долей компонентов в газе от температуры пиролиза ОД и ЛП, Г, Ц и Л, а также

СМОД и СМЛП. С ростом температуры увеличивается объемная доля водорода, что хорошо согласуется с литературными источниками [21]. Объемная доля СО остается практически неизменной в рассматриваемом интервале температур. Пиролиз Ц сопровождается значительным выделением СО, что связано с крекингом карбонила и карбоксила [11]. Значительное выделение объемной доли CO_2 происходит при пиролизе Г (от 75 до 50% при повышении температуры от 350 до 500°C). Лигнин показывает наибольший выход метана (около 30%), что связано с высоким со-

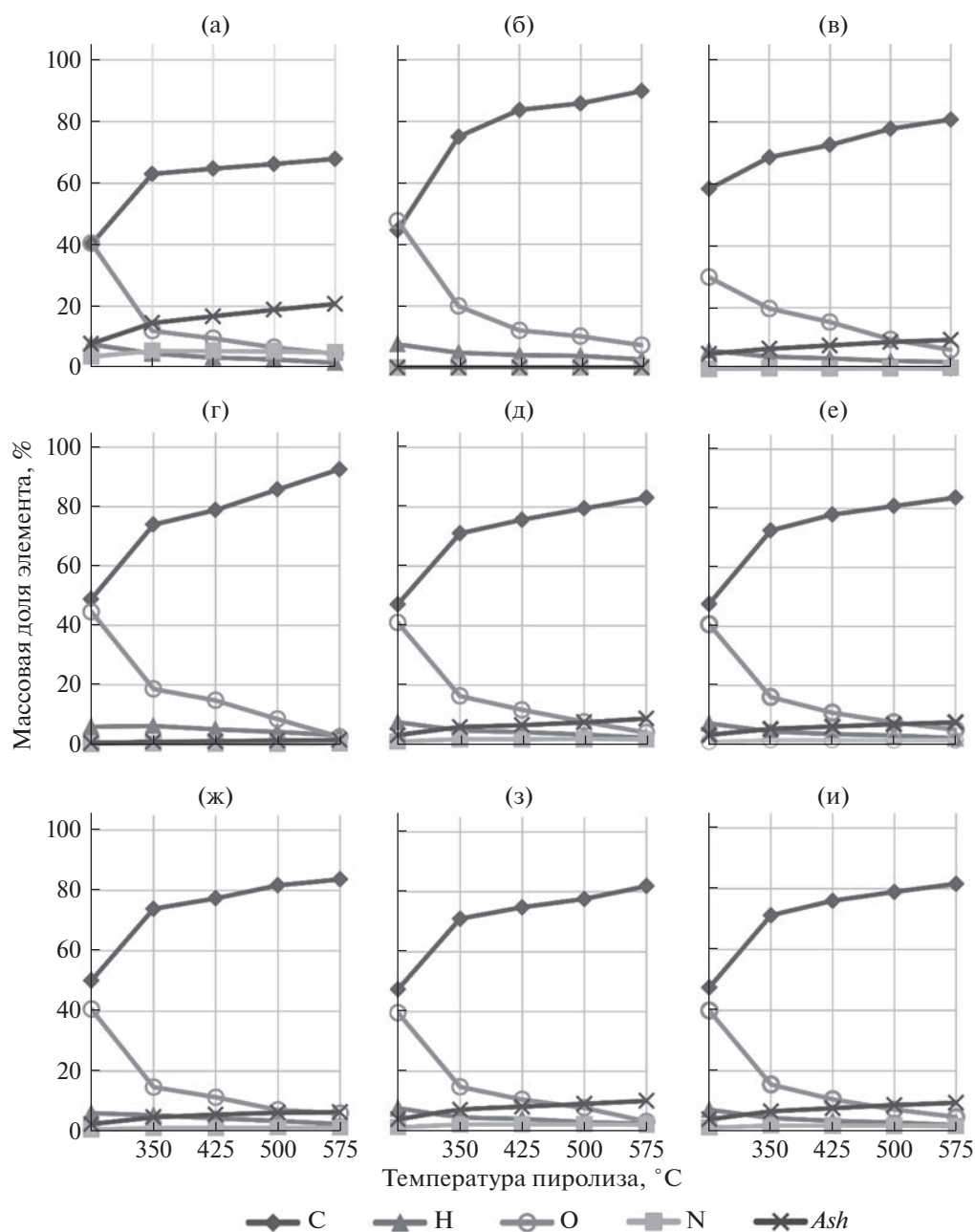


Рис. 4. Влияние температуры на соотношение массовых долей элементов в твердом остатке при пиролизе Г (а), Ц (б), Л (в), ОД (г), СМОД (д), ЛП (ж), СМЛП (з), а также расчетные значения для ОД (е) и ЛП (и).

держанием ароматических колец и метоксила [13]. Из сопоставления графиков (рис. 5, а–в), можно сделать вывод, что для Г характерен наибольший выход CO_2 , для Ц – CO , а для Л – метана. Полученные данные соответствуют проведенным ранее исследованиям пиролиза компонентов [11, 13]. На рис. 5 также представлены расчетные значения состава пиролизного газа для ОД и ЛП, полученные на основе пиролиза отдельных компонентов и их долей в биомассе. Хорошо видно, что расположение расчетных кри-

вых (рис. 5, е, и) практически повторяет расположение кривых, относящихся к модельным смесям (рис. 5, д, з), что особенно заметно по содержанию CO_2 в пиролизном газе. Пиролиз образцов биомассы характеризуется значительно более низким выходом двуокси углерода по сравнению с расчетным составом, а также чем пиролиз модельных смесей.

Экспериментальные данные по выходу H_2 и CH_4 соответствуют расчетным значениям (отклонение менее 1.8%). Суммарная объемная доля уг-

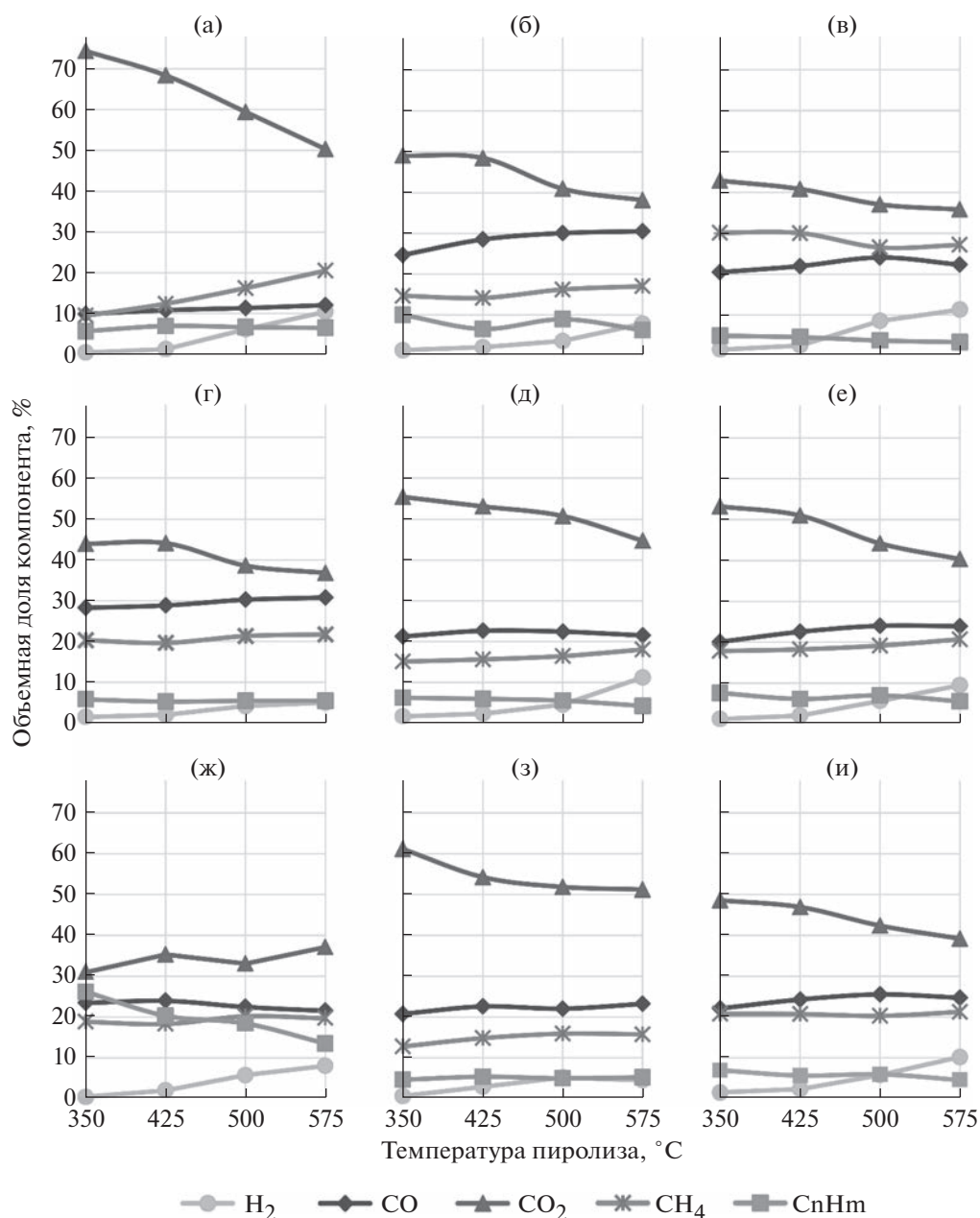


Рис. 5. Влияние температуры на соотношение объемных долей компонентов в газе при пиролизе Г (а), Ц (б), Л (в), ОД (г), СМОД (д), ЛП (ж), СМЛП (з), а также расчетные значения для ОД (е) и ЛП (и).

леводородов более высокого порядка (включающая этан, этилен, пропан и пропилен) для всех образцов, кроме ЛП, остается практически неизменной. В случае ЛП, содержание C_nH_m с ростом температуры от 350 до 500°C снижается почти в два раза (с 26.2 до 13.6%), тогда как расчет прогнозирует изменение в содержании C_nH_m от 7.0 до 4.6%. Пиролиз ОД сопровождается заметно большим выделением CO, чем предполагает расчет (среднее отклонение составляет 6.9%). Из представленных результатов можно сделать вывод о возможности прогнозирования объемных долей

некоторых газов, таких как H_2 и CH_4 . Однако общий состав газовой фракции отличается от расчетных значений, что подтверждает факт влияния межкомпонентных связей в биомассе на состав продуктов пиролиза. Couhert и соавт. [17] также показали, что невозможно предсказать выход газа исходя из компонентного состава биомассы.

На рис. 6 показано влияние температуры пиролиза на соотношение удельного выхода газа (по отношению к массе навески на сухое беззольное состояние) при пиролизе образцов биомассы (ОД, ЛП), модельных смесей (СМОД, СМЛП),

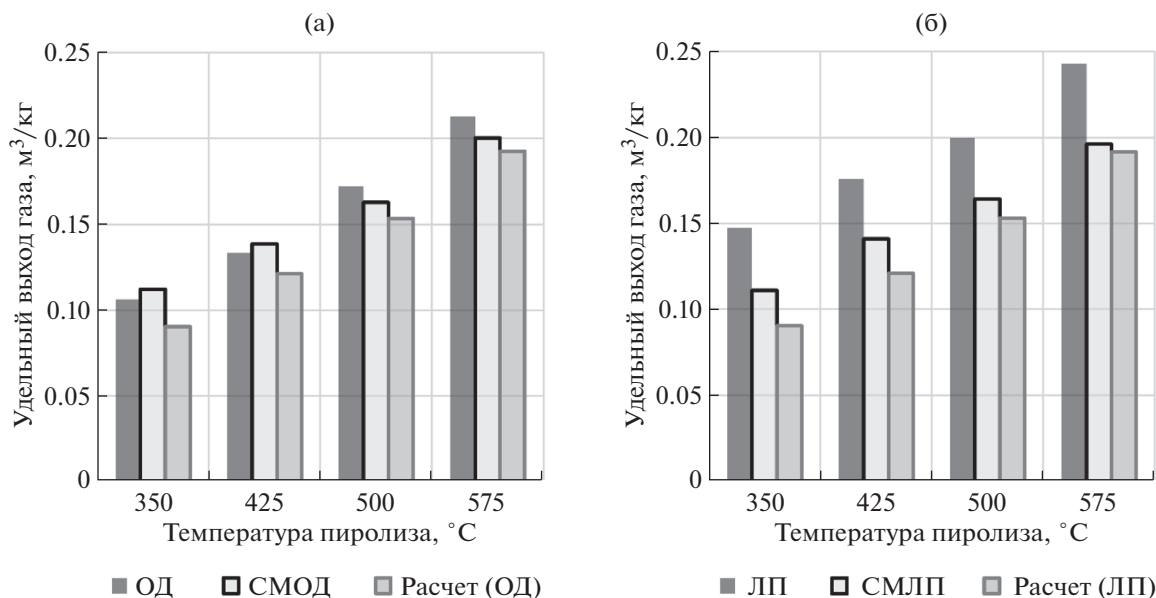


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные значения удельного выхода газа при пиролизе образцов биомассы и модельных смесей ОД, СМОД (а) и ЛП, СМЛП (б) в зависимости от температуры пиролиза.

а также расчетные значения, полученные из пиролиза компонентов по отдельности и их пропорций в биомассе. Значения удельного выхода газа для природных материалов практически во всех случаях больше аналогичных значений для модельных смесей, которые, в свою очередь, больше соответствующих расчетных значений. Полученные данные согласуются с предыдущим исследованием. Zhu и соавт. [20] обнаружили, что взаимодействие между тремя компонентами значительно усиливает реакции декарбоксилирования, что должно способствовать производству газообразных продуктов при пиролизе растительной биомассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение экспериментальных и расчетных данных медленного пиролиза образцов биомассы и модельных смесей целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, имитирующих биомассу, позволили выявить возможность прогнозирования распределения продуктов пиролиза в зависимости от компонентного состава с точностью до 7.7%.

Установлено, что растительная биомасса и модельные смеси в целом имеют схожий характер пиролитического разложения с точки зрения распределения элементов в твердом остатке. Однако прогнозировать состав пиролизных газов невозможно ввиду несоответствия экспериментальных и расчетных значений массовых долей таких основных газов, как CO и CO₂.

Основные отличия в поведении образцов биомассы и модельных смесей при пиролизе обу-

словлены разницей в составе и структуре используемых компонентов в модельных смесях по сравнению с их природными аналогами в составе растительного сырья. Однако полученные данные позволили установить характер межкомпонентного взаимодействия и его влияние на выход и состав продуктов пиролиза. Изменения в выходе различных фракций из природного сырья по отношению к модельным смесям имеют некоторую закономерность, выраженную в незначительном (в пределах 3–4%) снижении выхода твердого остатка и жидкости (у природного сырья), а также увеличении выхода газа. Сделан вывод, что межкомпонентное взаимодействие в природном сырье способствует образованию газообразной фазы при пиролизе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bhattacharjee N., Biswas A.B.J. // Environ. Chem. Eng. 2019. V. 7. № 1. P. 102903. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102903>
2. Diblasi C. // Prog. Energy Combust. Sci. 2008. V. 34. № 1. P. 47. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
3. Wu Y., Gui Q., Zhang H., Li H., Li B., Liu M., Chen Y., Zhang S., Yang H., Chen H. // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2023. V. 173. P. 106039. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106039>
4. Demirbaş A. // Energy Convers. Manag. 2000. V. 41. № 6. P. 633. [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(99\)00130-2](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(99)00130-2)
5. Lam M.K., Khoo C.G., Lee K.T. // Biofuels from Algae. Elsevier, 2019. Ch. 19. P. 475. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64192-2.00019-6>

6. Zhou H., Long Y., Meng A., Li Q., Zhang Y. // *Thermo-chim. Acta*. 2013. № 566. P. 36.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.04.040>
7. Yu J., Paterson N., Blamey J. Millan M. // *Fuel*. 2017. V. 191. P. 140.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.057>
8. Burhenne L., Messmer J., Aicher T., Laborie M.-P. // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2013. V. 101. P. 177.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.012>
9. Chua Y.W., Wu H., Yu Y. // *Proc. Combust. Inst.* 2021. V. 38. № 3. P. 3977.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.08.014>
10. Anwar Z., Gulfranz M., Irshad M. // *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2014. V. 7. № 2. P. 163.
<https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>
11. Raveendran K., Ganesh A., Khilar K.C. // *Fuel*. 1996. V. 75. P. 987.
[https://doi.org/10.1016/0016-2361\(96\)00030-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(96)00030-0)
12. Senneca O., Cerciello F., Russo C., Wütscher A., Muhler M., Apicella B. // *Fuel*. 2020. V. 271. P. 117656.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117656>
13. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. // *Fuel*. 2007. V. 86. № 12–13. P. 1781.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
14. Orfão J.J.M., Antunes F.J.A., Figueiredo J.L. // *Fuel*. 1999. V. 78. № 3. P. 349.
[https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(98\)00156-2](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(98)00156-2)
15. Wu Y., Zhao Z., Li H., He F. // *J. Fuel Chem. Technol.* 2009. V. 37. P. 427.
[https://doi.org/10.1016/s1872-5813\(10\)60002-3](https://doi.org/10.1016/s1872-5813(10)60002-3)
16. Reyes L., Abdelouahed L., Mohabeer C., Buvat J.C., Taouk B. // *Energy Convers. Manag.* 2021. V. 244. P. 114459.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114459>
17. Couhert C., Commandre J.-M., Salvador S. // *Fuel*. 2009. V. 88. № 3. P. 408.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.019>
18. Sun C., Tan H., Zhang Y. // *Renew. Energy*. 2023. V. 205. P. 851.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.015>
19. Gani A., Naruse I. // *Renew. Energy*. 2007. V. 32. № 4. P. 649.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.017>
20. Zhu X., Liu M., Sun Q., Ma J., Xia A., Huang Y., Zhu X., Liao Q. // *Fuel*. 2022. V. 327. P. 125141.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125141>
21. Батенин В.М., Бессмертных А.В., Зайченко В.М., Косов В.Ф., Синельщиков В.А. // *Теплоэнергетика*. 2010. № 11. С. 36. [Thermal Engineering, 2010, vol. 57, no. 11, p. 946.
<https://doi.org/10.1134/S0040601510110066>]