

УДК 620.9:662.6/004.1

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ГАЗИФИКАТОРА МЕТОДАМИ ТАГУЧИ

© 2020 г. А. Бонасер<sup>1,\*</sup>, Л. П. Готеро<sup>1,\*\*</sup>, В. Шамбер<sup>1,\*\*\*</sup>, Г. Тувэ<sup>1,\*\*\*\*</sup>, К. Шонненбек<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>,  
А. И. Кангаш<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>, П. А. Марьяндышев<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Университет Верхнего Эльзаса, Лаборатория управления рисками и защиты окружающей среды,  
68200 Мюлуз, Франция

<sup>2</sup> Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
Кафедра теплоэнергетики и теплотехники, 163000 Архангельск, Россия

\*e-mail: arezki.bounaceur@univ-lorraine.fr

\*\*e-mail: leopaul.gautherot@gmail.com

\*\*\*e-mail: valerie.tschamber@uha.fr

\*\*\*\*e-mail: gwenaelle.trouve@uha.fr

\*\*\*\*\*e-mail: cornelius.schoennenbeck@uha.fr

\*\*\*\*\*e-mail: a.kangash@narfu.ru

\*\*\*\*\*e-mail: p.marjandishev@narfu.ru

Поступила в редакцию 08.12.2019 г.

После доработки 24.01.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2020 г.

Представлены параметрические исследования с использованием методов Тагучи для оптимизации экспериментального процесса, а также результаты работы по созданию вертикального лабораторного газификатора с неподвижным слоем. Доказано, что процесс газификации в лабораторных масштабах надежный и его результаты могут быть использованы в опытно-промышленных установках. Выяснено, что частота ввода образца при постоянной массе, размер частиц биомассы и количество вторичного воздуха оказывают большее влияние на образование СО и Н<sub>2</sub>, чем параметры содержания влаги в биомассе и температуры процесса.

Ключевые слова: газификатор, синтез-газ, древесная биомасса, методы Тагучи

DOI: 10.31857/S0023117720040039

### ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение выбросов парниковых газов — актуальная тема, тесно связанная с развитием производства энергии от возобновляемых источников энергии. В большинстве стран развитие энергетики в последние годы связано с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ).

По оценкам специалистов в 2015 г. возобновляемые источники энергии (биомасса, гидроэнергия, ветер, геотермальная и биотопливо) обеспечили 18% конечного потребления энергии в мире [1]. В 2014 г. в 27 государствах-членах Европейского Союза доля энергии, получаемой из возобновляемых источников, оценивалась в 16% от валового конечного потребления энергии. Для сравнения этот показатель в 2009 г. составлял 11.7 и в 2008 г. — 10.5% [2]. Ожидается, что к 2020 г. Европейский Союз достигнет целевого показателя в 20% от общего потребления энергии из возобновляемых источников [3]. Доля возобновляемых

источников энергии значительно возрастет, достигнув 55% от общего конечного потребления энергии, к 2050 г. Доля ВИЭ в потреблении электроэнергии по сценарию “высокой энергоэффективности” достигнет 64% [4].

Биомасса — возобновляемый источник энергии, который способен обеспечить возрастающую энергетическую потребность для устойчивого развития общества. Биомасса определяется как “зеленый углерод”, под которым понимается органический углерод, присутствующий в растениях, культурах и различных отходах [5]. В настоящее время из биомассы производится 12% первичной энергии, необходимой для нашей планеты, и 4% — для Европейского Союза. Согласно предположениям к 2030–2050 гг. она может обеспечить от 15 до 35% мировой потребности в энергии [3]. Возможны два основных пути производства энергии из биомассы: биохимический и термохимический. Горение, пиролиз и газификация — три основных процесса термохимических пре-

вращений [6], согласно которым биомасса непосредственно превращается в другие возможные энергетические формы, такие как синтез-газ, биотопливо, биогаз и древесный уголь. Газификация – это реакция, которая трансформирует биомассу в горючий газ, называемый синтез-газом, состоящим из водорода ( $H_2$ ), монооксида углерода ( $CO$ ),  $CH_4$ ,  $CO_2$  и разных углеводородов [7]. Синтез-газ обычно используется в газовых двигателях, турбинах и топливных элементах для производства энергии (тепловой или электрической). Процесс газификации включает в себя набор термохимических превращений биомассы: процесс сушки биомассы, сопровождающийся процессом пиролиза в первой стадии в реакторе-газификаторе. Эти процессы ведут к образованию летучих компонентов, смол и биоугля, которые окисляются, разлагаются и газифицируются в наиболее высокотемпературной части реактора [8]. Таким образом, в процессе газификации биомассы образуются смолы – нежелательные и вредные побочные продукты, которые могут повредить реактор. Чтобы уменьшить количество смол и улучшить состав синтез-газа, необходимо оптимизировать множество параметров: содержание влаги в биомассе, ее происхождение [7] и размер древесной биомассы, состав подводимого газа [9, 10], температура реактора [11], структура реактора [12], эквивалентное соотношение [13], соотношение водяного пара к биомассе [14] и катализатор [15]. Большинство научных статей, опубликованных по тематике газификации биомассы, описывают конструкции пилотных газификаторов, на которых изменение условий эксплуатации является непростой задачей. Таким образом, всего несколько исследований описывают влияние указанных параметров на качество производимого синтез-газа. Лишь немногие использовали лабораторный реактор для экспериментов [16]. Однако разработка реактора-газификатора лабораторного масштаба может улучшить понимание процесса газификации и оптимизацию эксплуатационных характеристик. Кроме того, установки меньшего масштаба дешевле, их проще внедрить, появляется возможность лучшего контроля всех параметров газификации и их изменений с высокой точностью. Особенно это касается температуры, которая в лабораторных масштабах контролируется печью, и в то же время температура связана с реакциями, происходящими внутри газификатора. В различных газификаторах было проведено несколько исследований, посвященных влиянию различных экспериментальных параметров. Авторы [11] изучали вертикальный газификатор, совмещенный с небольшим газовым двигателем для производства энергии, и отметили, что во время процесса нагрева (от 700 до 850°C в части ректора, где образуется биоуголь) происходит увеличение концентрации  $H_2$  и ли-

нейное уменьшение концентрации  $CH_4$ . Авторы [17] исследовали соотношения парообразования к массовой доле биомассы (в интервале от 0.4 до 0.85) при газификации различных видов биомасс, проводимой при температуре 800°C в среде водяного пара. Так как данное соотношение возрастало,  $CO$  и концентрации углеводородов уменьшались, так же как и концентрация  $H_2$ . Авторы [18] исследовали эффект образования твердых частиц (размером от 0.2 до 0.9 мм) при газификации древесных опилок при температуре 800°C в газификаторе кипящего слоя в воздушной и пароводяной средах. Их результаты показали, что небольшие частицы образуют большее количество  $CH_4$ ,  $CO$  и  $C_2H_4$  и меньше  $CO_2$ , чем частицы большего размера.

Три основных типа реактора, которые используются для газификации биомассы: реактор неподвижного слоя, кипящего слоя и реактор с газификацией в потоке.

Реактор неподвижного слоя – традиционный метод газификации. Данный реактор, в котором топливо (биомасса) формирует плотный слой, имеет простую и прочную конструкцию. Биомасса вводится в верхнюю часть реактора и падает на решетку или сетку, расположенную в зоне окисления реактора. В зависимости от направления воздушного потока возможны две конфигурации стационарных реакторов: с нисходящим и восходящим потоком. Было установлено, что реакторы нисходящего потока позволяют лучше преобразовывать биомассу в синтез-газ [19], поскольку образуется меньше мелких частиц, большая часть смолы окисляется в газификаторе и минеральные вещества остаются в золе [7], в то время восходящие реакторы имеют недостаток уноса частиц и газов процесса термического разложения [12].

Слой реакторов кипящего типа состоит из частиц инертного материала (песок, доломит, глинозем и др.), на который подается топливо (биомасса). Твердые инертные материалы формируют кипящий слой.

В реакторе с газификацией в потоке подаваемое топливо размельчается до гранулометрического состава (несколько сотен микрон) в потоке газа газификатора [20]. Таким образом, время задержки топлива в реакторе очень мало (порядок менее 1 с) и кинетические процессы проходят очень быстро.

Методы Тагучи широко используются как для оптимизации процесса разработки экспериментов, так и для исследования того, как несколько параметров могут влиять на протекание определенных процессов. Однако данные методы никогда ранее не применялись для исследования процесса газификации биомассы. В этом и заключаются научная значимость и новизна проводимых исследований.

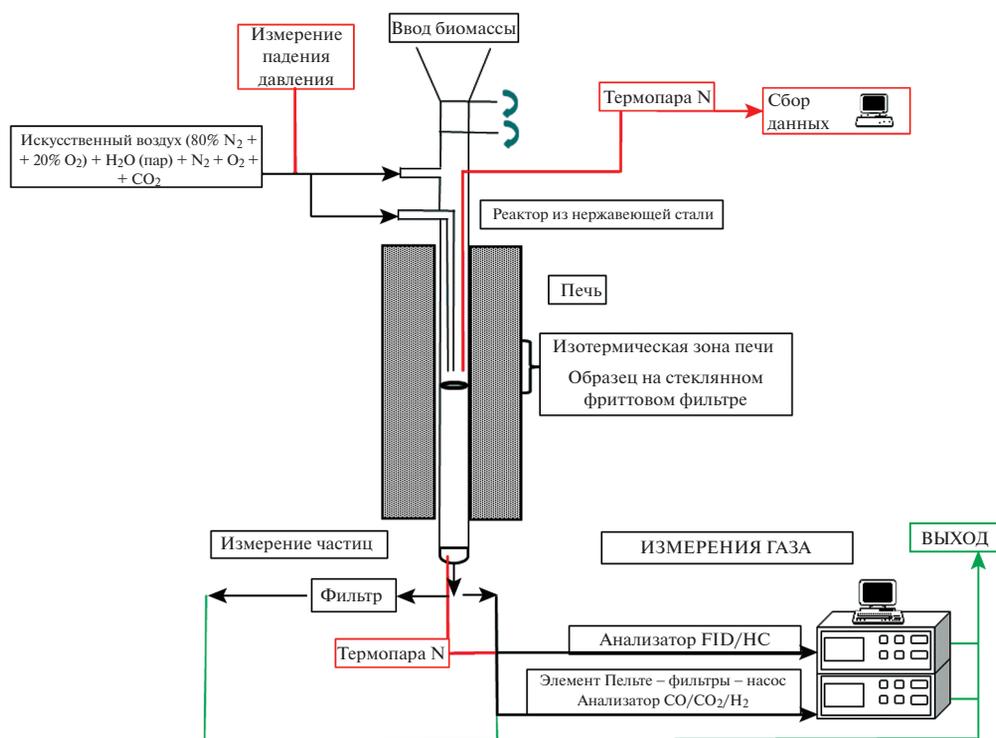


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

В статье представлены результаты разработки экспериментального устройства лабораторного масштаба, предназначенного для оценки влияния различных эксплуатационных параметров, таких как температура и скорость входящего потока, которые трудно контролировать на опытно-промышленных установках. В более крупных масштабах проведение большого количества экспериментов с широким диапазоном параметров затруднительно, поэтому был осуществлен поиск оптимальных параметров с помощью метода Тагути для сокращения количества проводимых экспериментов.

Экспериментальный лабораторный нисходящий реактор неподвижного слоя спроектировали для изучения процесса газификации древесной щепы и влияния различных режимов работы на образование газовых компонентов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  и др.) и твердых частиц. Оценка влияния эквивалентного соотношения (ЭС), количества вторичного воздуха, температуры и размера частиц биомассы и частоты подачи позволила составить рекомендации по использованию реактора данного типа. Результаты, полученные в лабораторных условиях, сравнивались с результатами, полученными в опытно-промышленных установках, перед использованием данной конструкции для проверки эффективности катализаторов крекинга смолы.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*1.1. Экспериментальная установка.* Экспериментальная установка, состоящая из вертикальной печи, внутрь которой помещен реактор из нержавеющей стали марки 310S, представлена на рис. 1. Длина реактора составляет 1 м, внутренний диаметр — 42 мм. Эта установка представляет полупроходной реактор неподвижного типа (открытая часть на выходе из реактора), состоит из трех основных частей: нагревательная печь, основная часть реактора с системой подачи образцов древесной щепы и система отвода дымовых газов с несколькими газоанализаторами. Нагрев реактора проводился с помощью электрических резисторов, находящихся вокруг цилиндрической части реактора. Максимальная температура в реакторе составила  $1100^\circ C$  при скоростях нагрева от  $0.1$  до  $30^\circ C/мин$ .

Образцы биомассы подавались в верхней части реактора, используя систему с двумя задвижками с промежуточной камерой, с целью ограничения подачи воздуха в реактор, во время ввода биомассы. Промежуточная камера ограничивает также попадание углекислого газа в окружающую среду. Образец массой от  $0.5$  до  $0.75$  г древесной щепы подавался на кварцевую решетку из древесного угля (около 4 г), расположенную в изотермической зоне вертикальной печи. Термопара типа *N* расположена над образцом и позволяет постоян-

Таблица 1. Свойства биомассы

Параметр	Значение
Начальная влажность, %	40
Влажность после осушки, %	8
Низшая теплота сгорания, МДж/кг*	17.5
Зольность**, %:	0.23
С	48.2
Н	6.4
О	42.0
N	0.1
S	<0.1

\* На сухую беззольную массу.

\*\* На сухую массу.

но продолжительно контролировать температуру в центре реактора. По такому же принципу датчик давления *KellerPR-41X* измерял все превышения давления в реакторе во время экспериментов.

Воздух в реактор поступал через два отверстия: основной поток, который определяется как первичный воздух, состоит из синтетического воздуха (80% N<sub>2</sub> и 20% O<sub>2</sub>) и подается прямо в центр реактора в место неподвижного слоя по трубе из нержавеющей стали. Второй поток, определяемый как вторичный воздух (синтетический воздух), подается под систему подачи топлива. Роль вторичного воздуха – избежать конденсации смол и задержки частиц в верхней части реактора. Контроль потоков подаваемых газов контролируется расходомерами *Brooks series 5850TR* и задает от 0 до 200 нл/ч. Температура на дне реактора также контролируется термопарой N типа с целью контроля температуры уходящих газов.

На выходе из реактора синтез-газ проходит через горячий фильтр (*M&C, FSS-FW-H350*), нагретый до 280°C, со стекловолокном для улавливания частиц. Поток газов разделялся на два потока для последующего анализа. Метан и все углеводороды анализировались на пламенно-ионизационном детекторе в первом потоке. Во втором потоке анализировались оксиды углерода (CO, CO<sub>2</sub>, водород). Газы проходят через два охлаждающих конденсатора *Peltier (M&C, ECP)*, универсальный фильтр (*M&C, FS-2T*) и последний фильтр (*M&C, LB-10*) для удаления воды, смол и любых частиц, которые попали из синтез-газа, до ввода для анализа в газоанализатор. Молярные соотношения CO и CO<sub>2</sub> в синтез-газе анализировали, используя инфракрасный анализатор *Rosemount Xstream XEGK*. Детектор термической проводимости *Rosemount Xstream X2GC* использовали для измерения фракции H<sub>2</sub> в синтез-газе. Когда эксперименты были

сделаны, с целью анализа содержания частиц в синтез-газе, система ввода частиц была установлена на выходе из реактора до горячего фильтра. Измерение количества частиц осуществлялось гравиметрическим методом. Частицы собирались на тканевых фильтрах *Whatmann EPM2000*, снижение точности до 99.95% при задержке аэрозоли 0.3 микрометра. Поток синтез-газа контролировался и устанавливался в размере 30 нл/ч. Масса частиц, собираемая на фильтре, рассчитывалась из разницы масс фильтра до и после эксперимента, используя лабораторные весы с точностью 0.1 мг.

Качественный анализ смол, отложившихся в конденсаторе (водяной образец) и оставшихся в реакторе на пути к газоанализатору, проводился с помощью газовой хроматографии, совмещенной с масс-спектрометрией (ГХ/МС). Смолы из конденсатора в объеме 1 мл растворялись в 1 мл изопропанола и затем очищались в фильтре до ввода в ГХ/МС с использованием бесщелевого метода. Смолы из реактора и трубок до газоанализатора растворялись в хлористом метиле, достигая нужной концентрации испарением растворителя, используя контролируемый поток азота до достижения точно 1 мл, и затем фильтровались до ввода в газоанализатор. Разделение было произведено на колонке *CPSIL 5-CB* (длина 50 м, толщина 0.25 мкм, внутренний диаметр 0.25 мм, наружный диаметр 0.39 мм). Образец объемом 1 мкл вводили в хроматограф, использовали систему распределения в соотношении 10 и следующую программу задания температуры: 50°C за 3 мин, 300°C при 3°C/мин и 300°C за 15 мин. Четырехполюсный детектор работал в режиме сканирования в массовом соотношении между 45 и 300.

**1.2. Древесная биомасса.** Образцы биомассы состояли из механически спрессованной древесной щепы фирмы *Sägewerk Bohnert (Seebach, Германия)*. Свойства биомассы приведены в табл. 1. Элементный анализ проводили в центре *Commun des Mesures* университета *Littoral Côte d'Opale (Dunkerque, Франция)*.

Начальная влажность биомассы, полученной из древесной щепы, составляла 40%. Для изучения влияния содержания влажности этот параметр был уменьшен до 8% естественным хранением образцов. Высшая теплота сгорания определялась на калориметрической бомбе *IKA® C200*, низшая – рассчитывалась с учетом относительной влажности и содержания водорода в топливе. Биомасса с одинаковыми свойствами использовалась для всех экспериментов. Размол частиц биомассы осуществлялся на мельнице *Retisch SM300* при 1500 об./мин. Мельница имеет направляющие квадратной формы размером 1 см, которые до размола просеивают образцы на фильтре *Retisch AS200*, используя фильтры размером 3.15; 2.5; 1.6

**Таблица 2.** Экспериментальные параметры процесса газификации биомассы

Факторы, оказывающие воздействие на процесс		Диапазон исследований
Основные	Тип газификатора	С нисходящим потоком воздуха
	Режим впрыска первичного воздуха	Нормальный по отношению к слою биомассы
	Элементный состав биомассы	Выполнен
Группа 1	Частота ввода биомассы	40–60 ч <sup>-1</sup>
	Температура в печи	900–1000 °С
	Содержание вторичного воздуха	5–20%
	Влажность биомассы	8–40%
	Размер образцов биомассы	1.0–3.5 мм
Группа 2	Расход воздуха	60 нл/ч
	Скорость ввода биомассы	30 г/ч
	Состав вводимого газа	80% N <sub>2</sub> + 20% O <sub>2</sub>

**Таблица 3.** Факторы и изучаемые размеры

Параметр	Обозначение	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4
Влажность биомассы, %	A	8	40	–	–
Частота ввода биомассы, ч <sup>-1</sup>	B	40	60	–	–
Содержание вторичного воздуха, %	C	5	20	–	–
Температура в печи, °С	D	900	1000	–	–
Размер биомассы, мм	E	3.1 ≥ d ≥ 1.06	2.5 ≥ d ≥ 1.0	3.1 ≥ d ≥ 2.5	1.6 ≥ d ≥ 1.0

и 1 мм (сертифицированы *Prolabo Paris AFNOR*). Древесная щепа, имеющая диаметр больше 3.15 мм или меньше 1 мм, не использовалась. Из табл. 1 видно, что массовые соотношения различных элементов и термические характеристики имеют тот же размер, что и необработанные образцы биомассы и лигноцеллюлозные образцы, описанные в [21].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**2.1. Применение экспериментального плана.** Газификация – процесс, протекающий при различных экспериментальных параметрах. В данной работе экспериментальная установка спроектирована и для оценки параметров эффективности производства синтез-газа. Основные экспериментальные параметры разделены на три основные группы и представлены в табл. 2. При проектировании экспериментальной установки учитывались параметры табл. 2. Был разработан экспериментальный план с использованием методов Тагучи для изучения первой группы параметров. Влияние параметров, относящихся ко второй группе, на производство синтез-газа изучалось в конце первой стадии (см. раздел “Влияние эквивалент-

ного соотношения на состав синтез-газа”). Методы Тагучи – часть логического улучшения качества и уменьшения исследовательских затрат. Определение влияния некоторых факторов привносит существенное усовершенствование в полные и частичные факториалы, которое состоит в упрощении экспериментального протокола и уменьшении числа экспериментов, в то время как точность остается на довольно высоком уровне благодаря вероятностной модели [22]. На этой стадии параметры второй группы поддерживались на средних значениях для потоков воздуха и биомассы во время эксплуатации газификатора. Газ-носитель – искусственный воздух. Два уровня тестировались для четырех из пяти параметров первой группы. Четыре размера древесной щепы были протестированы (результаты представлены в табл. 3).

Для помощи в построении матриц Тагучи был разработан принцип линейных графиков, который помогает в распределении факторов по столбцам, особенно в тех случаях, когда необходимо учитывать взаимодействия факторов. В [20] подробно описан этот подход к построению матриц Тагучи.

**Таблица 4.** Матрица проводимых экспериментов

Номер эксперимента	Параметр				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	2	1	2	3
4	1	2	2	1	4
5	2	2	2	2	1
6	2	2	1	1	2
7	2	1	2	1	3
8	2	1	1	2	4

Математическая модель Тагучи была основана экспериментах с ортогональными матрицами. Матрица построена таким образом, что количество строк равно количеству экспериментов, которые должны быть выполнены, а количество столбцов эквивалентно максимальному количеству факторов, которые могут быть изучены с помощью такой матрицы. Если в [22, гл. 9] использован подход “минус–плюс” для двухуровневых ортогональных матриц [22], то Тагучи выбрал систему 1/2, где 1 относится к низкому уровню, а 2 – к высокому. Влияние параметров на эксплуатационные характеристики может быть исследовано с помощью ортогональных матриц Тагучи. После определения параметров, влияющих на контролируемый процесс, необходимо определить уровни, на которых эти параметры должны изменяться. Определение уровней параметров, необходимых для исследования, требует глубокого понимания процесса, включая знание мини-

мального, максимального и текущего значений параметра.

Используя приведенную выше информацию, была составлена матрица на основе методов Тагучи (табл. 4), из которой видно, что для определения оптимального соотношения пяти тестируемых параметров необходимо провести восемь экспериментов.

Концентрации CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и углеводородов в уходящих газах измерялись постоянно. Каждый эксперимент проводился при постоянном ЭС (равном 0.4), который относится к соотношению объема воздуха, необходимого для 1 кг биомассы, к стехиометрическому. Из элементного анализа (табл. 1) стехиометрическое соотношение воздуха к расходу биомассы рассчитывалось как 5 нм<sup>3</sup> воздуха/кг биомассы. Каждый эксперимент повторялся как минимум дважды для уточнения экспериментальных значений CO, H<sub>2</sub> и углеводородов. В табл. 5 представлены состав газа и его низшая теплота сгорания, рассчитанная исходя из концентраций горючих газов (CO, углеводороды и H<sub>2</sub>), и их энергетическое содержание.

Количество H<sub>2</sub> и CO, получаемого из кг биомассы, подаваемой в газификатор, – индикаторы эффективности производительности синтез-газа. В соответствии с методами Тагучи  $XaY$  определяется как среднее значение от  $Y$ , производимого во время всех экспериментов, когда значение  $X$  находится на уровне  $A$  (табл. 6). В соответствии с табл. 4 и 5  $A1CO$  – среднее значение CO, измеряемого во время экспериментов № 1–4. Для примера, эксперименты, при которых параметр  $A$  – влажность биомассы, равны уровню 1–8%. В итоге,  $T_{CO}$  и  $T_{H_2}$  – средние значения получаемого количества CO и H<sub>2</sub>, относительно эксперимен-

**Таблица 5.** Состав газов и его низшая теплота сгорания

Номер эксперимента	CO	H <sub>2</sub>	Углеводороды	Низшая теплота сгорания, кДж/нм <sup>3</sup>
	(моль/кг биомассы)			
1	25.93	12.13	0.45	3153
2	27.60	15.00	1.01	3522
3	29.33	14.40	1.13	3843
4	31.53	17.60	0.80	3969
5	34.60	20.53	1.01	4281
6	22.40	11.60	0.73	3143
7	21.40	11.07	0.60	2881
8	21.20	10.47	1.00	2972

**Таблица 6.** Среднее количество CO и H<sub>2</sub> из 1 кг биомассы, подаваемой в реактор во время всех проводимых экспериментов

Y	a	X, моль/кг биомассы					T <sub>y</sub> , моль/кг биомассы
		A	B	C	D	E	
H <sub>2</sub>	Уровень 1	14.80	12.13	12.13	13.07	16.33	14.07
	Уровень 2	13.40	16.00	16.07	15.07	13.33	
	Уровень 3					12.73	
	Уровень 4					14.07	
CO	Уровень 1	28.60	20.07	24.73	25.33	30.27	26.73
	Уровень 2	24.93	29.47	28.80	28.20	25.00	
	Уровень 3					25.40	
	Уровень 4					26.40	

**Таблица 7.** Сравнение теоретических и экспериментальных значений низшей теплоты сгорания газа и состава газа, получаемого при оптимальных параметрах

Параметр	Единица измерения	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
H <sub>2</sub>	моль/кг биомассы	22.00	23.93
CO		38.40	38.53
Углеводороды		–	1.20
Низшая теплота сгорания	кДж/нм <sup>3</sup>	–	4755

тальных условий представлены в табл. 6. Это можно выразить уравнением

$$T_i = \frac{A1i + A2i}{2} = \frac{B1i + B2i}{2} = \frac{C1i + C2i}{2} = \frac{D1i + D2i}{2} = \frac{E1i + E2i + E3i + E4i}{4}$$

Для определения параметра X наибольшее значение XaY было для значения Y (CO и H<sub>2</sub>). В соответствии с экспериментальным планом, проводимым согласно методам Тагучи, оптимальная комбинация параметров первой группы, при которой производилось наибольшее количество синтез-газа, относится к A<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, E<sub>1</sub> (табл. 6). Это относится к следующим экспериментальным условиям: влажность биомассы 8%, частота подачи биомассы 60 ч<sup>-1</sup>, поток вторичного воздуха 20%, температура печи 1000°C и размер биомассы 3.15 мм ≥ d ≥ 1.6 мм.

Для того, чтобы подтвердить правильность результатов, проводился еще один эксперимент при указанных условиях и количество CO и H<sub>2</sub>, полу-

чаемое из теоретических значений с помощью уравнения, равно

$$Theo(Y) = T_y + Ef(A1Y) + Ef(B2Y) + Ef(C2Y) + Ef(D2Y) + Ef(E1Y),$$

где Ef(XaY) = XaY – T<sub>y</sub>.

Количество CO и H<sub>2</sub>, получаемое при оптимальных экспериментальных условиях, определялось из экспериментального плана и было близко к теоретическим значениям (табл. 7). Эти результаты могут фиксировать пять параметров первой группы.

**2.2. Применение методов Тагучи для экспериментов в газификаторе.** В экспериментальных условиях содержание влаги в биомассе оказывает негативное влияние на получение CO (28.6 моль/кг биомассы при 8% влажности и 24.93 при 40% влажности) и H<sub>2</sub> (14.80 моль/кг биомассы при влажности 8% и 13.40 при влажности 40%), что приводит к снижению доли основных компонентов синтез-газа. Этот результат прекрасно согласуется с литературными данными [23, 24]. Авторы [24] подчеркнули влияние влаги на состав

синтез-газа в нисходящем газификаторе. В этот газификатор подавалась древесная щепа как топливо и воздух как газифицирующий агент. С уменьшением влажности биомассы с 21.1 до 12% количество CO в синтез-газе возросло с 13.6 до 21.3% (на сухую массу), в то время как количество H<sub>2</sub> увеличилось с 18.5 до 19.1% (на сухую массу). Авторы [25] обнаружили, что чем выше значение влажности образца биомассы, тем ниже расход биомассы и поток синтез-газа [25]. В [17], изучая процесс газификации различных образцов биомассы лесного происхождения, авторы установили, что при увеличении соотношения пар/биомасса (от 0.4 до 0.85) производство H<sub>2</sub> достигает максимума при соотношении пар/биомасса, равном 0.6–0.7. Согласно утверждениям авторов, более высокое соотношение пар/биомасса благоприятствует протеканию реакции, приводящей к образованию CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> и, как следствие, реакции метанизации. С другой стороны, можно ожидать, что большое количество водяного пара приводит к снижению температуры в реакторе и, как следствие, к ухудшению качества выбросов.

Действительно, значительное количество влаги в биомассе может снизить мощность реактора за счет энергии, необходимой для испарения этой влаги. Для испарения 1 кг влаги в биомассе требуется 2260 кДж дополнительного тепла из газификатора [23]. Результаты, полученные в этой работе, указывают на важность предварительной сушки биомассы до показателя влажности на уровне 8% (в зависимости от характера используемой биомассы).

Частота поступления биомассы оказывает положительное влияние на производство CO и H<sub>2</sub>. Результаты показали, что 20.07 моль/кг биомассы CO и 12.13 моль/кг биомассы H<sub>2</sub> были получены при частоте подачи биомассы 40 ч<sup>-1</sup>, в то время как 29.47 моль/кг биомассы CO и 16.00 моль/кг биомассы H<sub>2</sub> были получены при частоте подачи биомассы 60 ч<sup>-1</sup>. Важно отметить, что в обоих случаях количество вводимой в течение 1 ч биомассы было одинаковым (30 г древесной биомассы за 1 ч), поэтому масса проб, вводимых регулярно в газификатор, выбиралась в соответствии с этим. Когда частота подачи увеличивается, количество биомассы, содержащийся в каждой пробе, соответственно уменьшается, а следовательно, объем газа, доступный для реакции с единичным объемом (или поверхностью) частиц, увеличивается, что приводит к увеличению производства синтез-газа.

Ранее в разделе “Экспериментальная установка” было указано, что вторичный воздух закачивается из верхней части реактора. Этот воздух смешивается с биомассой во время ее прохождения через реактор. Скорость подачи вторичного

воздуха положительно влияет на количество вырабатываемого CO и H<sub>2</sub>. При наличии 5% вторичного воздуха производится 24.73 моль/кг биомассы CO и 12.13 моль/кг биомассы H<sub>2</sub>. Увеличение содержания вторичного воздуха до 20% позволяет увеличить производство CO до 28.80 моль/кг биомассы и H<sub>2</sub> до 16.07 моль/кг биомассы. Авторы [26] изучили влияние двухуровневого притока воздуха на состав синтез-газа, произведенного из продуктов переработки эвкалиптовой древесины с относительной неоднородностью размера частиц. Синтез-газ получен в двухуровневом газификаторе с нисходящим потоком воздуха, работающим при номинальной мощности 50 кВт. Они проводили исследования при изменении соотношения первичного воздуха ко вторичному воздуху от 0 до 80%. Количество первичного воздуха на первой ступени изменялось от 0 до 10.67 нм<sup>3</sup> ч<sup>-1</sup>, а вторичного — от 10 до 24 нм<sup>3</sup> ч<sup>-1</sup>. В газификаторе был получен горючий газ, содержащий CO, CH<sub>4</sub> и H<sub>2</sub>, максимальные концентрации которых составили 19.04; 0.89 и 16.78% соответственно. Общий расход воздуха был равен 20 нм<sup>3</sup> ч<sup>-1</sup>, что соответствует соотношению воздуха 80%. В результате соотношение топлива и воздуха в этих условиях составило около 0.35. Авторами выявлен значительный эффект от притока вторичного воздуха на снижение концентрации CH<sub>4</sub>, связанный с уменьшением содержания смолы в производимом газе. Эти условия благоприятно влияют на распад летучих веществ биомассы в зоне пиролиза, что приводит к значительному облегчению молекул, которые легче расщепляются при прохождении потока газа через зону горения. Эти наблюдения также подтверждаются авторами работы [27], как и влияние этого параметра на формирование смолы.

Повышение температуры способствует производству синтез-газа. Результаты экспериментов доказывают, что температура газификации положительно влияет на количество H<sub>2</sub> и CO, увеличивая их количество с 13.07 моль/кг биомассы и 25.33 моль/кг биомассы до 15.07 моль/кг биомассы и 28.20 моль/кг биомассы соответственно. Эта закономерность хорошо известна и описана в литературе. Авторы [28] выяснили, что доля CO и H<sub>2</sub> в синтез-газе (образующемся при газификации воздуха и водяного пара) увеличивается с 18.7 до 31.3 и с 6.8 до 18.6% соответственно за счет повышения температуры с 750 до 950°C и также обнаружили, что доля CO<sub>2</sub> в синтез-газе снизилась с 11.4 до 10.4%, как и доля углеводородов — с 8.1 до 4.6%. Согласно [17], рабочая температура оказывает сильное влияние на содержание H<sub>2</sub>, которое увеличивается на 10–20% в диапазоне температур 730–900°C, в то же время немного снижается в диапазоне от 730 до 850°C и затем остается неизменным выше 850°C.

**Таблица 8.** Степень влияния изучаемых экспериментальных параметров

Экспериментальный параметр		Влажность биомассы, А	Частота ввода биомассы, В	Содержание вторичного воздуха, С	Температура в печи, D	Размер биомассы, E
Моль H <sub>2</sub> на кг биомассы	Максимум	14.80	16.00	16.07	15.07	16.33
	Минимум	13.40	10.13	12.13	13.06	12.73
	Изменение (%)	10	32	32	15	28
Моль CO на кг биомассы	Максимум	28.60	29.47	28.80	28.20	30.27
	Минимум	24.93	24.07	24.73	25.33	25.40
	Изменение (%)	15	22	16	11	19

Данное исследование показывает, что размер образцов биомассы влияет на количество производимого CO и H<sub>2</sub>, что согласуется с результатами работ [18, 29]. В [18] были проведены испытания по газификации сосновых опилок диаметром от 0.3 до 0.9 мм при паровоздушной газификации в кипящем слое. Максимальные концентрации CO и H<sub>2</sub> были получены для образцов биомассы меньшего размера. Авторы работы [29] провели исследования безспиртового виноградного жмыха диаметром от 0.5 до 8 мм в реакторе с газификацией в потоке для оценки влияния размера частиц. Полученные результаты показали, что уменьшение размера частиц биомассы приводит к улучшению качества газа, что выражается в увеличении количества горючих веществ. В обоих исследованиях [18, 29] авторы наблюдали, что частицы биомассы с меньшими размерами обеспечивают самые высокие значения преобразования углерода и теплотворной способности получаемого синтез-газа. Для больших частиц характерны ограничения внутренней теплопередачи, поэтому они имеют меньшие скорости нагрева по сравнению с небольшими частицами. Однородность размера биомассы также влияет на производительность газификатора. Эффективность газификатора увеличивается по мере повышения уровня однородности размера биомассы. Авторы работы [30] также доказали это утверждение. Для более крупных частиц в их исследовании были характерны меньшие скорости фронта пламени и горения, в то время как большее количество угля оставалось за фронтом пламени, а период окисления угля длился дольше. В нашем исследовании представлены данные, несколько отличающиеся от литературных. Наибольшие количества CO и H<sub>2</sub> были получены для биомассы размером от 1.6 до 3.15 мм, что соответствует более неоднородному распределению биомассы. Однако размерный диапазон, изученный в данной работе (от 1.0 до 3.1 мм), меньше приведенного в литературе и, возможно, слишком мал, чтобы выделить влия-

ние этого параметра. Кроме того, большая часть литературных данных относится к экспериментам, проведенным с использованием опытно-промышленных установок. Это исследование проводилось в лабораторных масштабах при очень низких скоростях подачи по сравнению с опытно-промышленными установками, что может объяснить отличие полученных результатов.

В табл. 8 показана степень влияния изучаемых параметров на полученное количество CO и H<sub>2</sub>, а также, что исследуемые параметры, за исключением содержания влаги в биомассе, оказывают большее влияние на количество образующегося H<sub>2</sub>, чем на количество CO.

В соответствии с выбранным порядком величин частота внесения пробы биомассы, размер биомассы и отношение вторичного воздуха, по-видимому, являются важными параметрами, которые необходимо контролировать для оптимизации газификации биомассы. Два других параметра имеют большое значение.

*2.3. Влияние эквивалентного соотношения на состав синтез-газа.* Что касается элементного анализа древесной щепы, то для расчета эквивалентного соотношения стехиометрических условий в уравнении горения была установлена исходная формула для используемой биомассы. Для изменения эквивалентного соотношения выбирались различные значения показателей подачи биомассы или расхода синтетического воздуха на входе. Изменение показателя подачи биомассы осуществлялось более сложно, чем изменение скорости потока синтетического воздуха. Для изменения подачи биомассы необходимо наличие нескольких образцов древесной щепы с разными массами, что требует проработки еще до начала эксперимента. В то время как регулировать расход синтетического воздуха на входе, можно осуществлять на протяжении всего эксперимента без предварительной подготовки. Таким образом, было решено поддерживать постоянную подачу биомассы в объеме 30 г/ч при расходе воздуха на

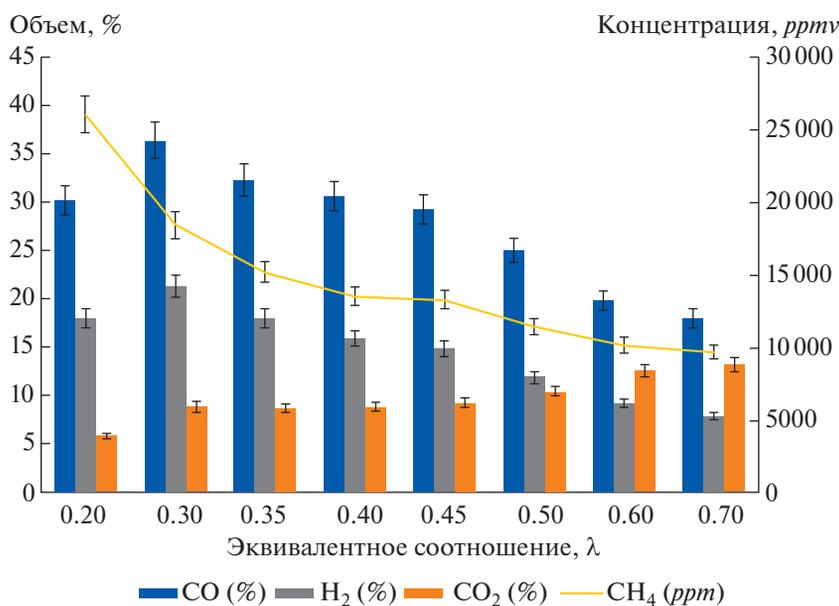


Рис. 2. Состав синтез-газа при изменении эквивалентного соотношения.

входе в диапазоне от 30 до 105 нл/ч для достижения значений эквивалентного соотношения,  $\lambda$  от 0.2 до 0.7. Поток вторичного воздуха остался равным 20%. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

Концентрации H<sub>2</sub> и CO превышают максимальные значения на 21 и 36% соответственно для эквивалентного соотношения, близкого к 0.3. Для значений эквивалентного соотношения выше 0.3, их соответствующие концентрации в син-

тез-газе снижаются, достигая 7 и 17% для эквивалентного соотношения, равного 0.7. Объемная концентрация метана снижается с 25000 до 10000 ppmv, при этом доля CO<sub>2</sub> в синтез-газе увеличивается с поступлением кислорода. Такое поведение было хорошо описано в статье, посвященной газификации с использованием химического механизма [31]. Обычно оптимальное значение эквивалентного соотношения для газификатора с нисходящим потоком составляет около 0.25, но может варьироваться от 0.2 до 0.3 в зависимости от таких параметров, как биомасса, температура [8].

Таблица 9. Концентрация твердых частиц в отходящих газах

Время выборки, мин	Концентрация твердых частиц, мг/нм <sup>3</sup>
15	933
10	1102
10	1342
10	1144
10	1134
10	1108
10	1062
9	1193
8	1060
Среднее значение	1100
Среднеквадратичное отклонение	100

2.4. Измерения содержания твердых частиц. При измерении содержания частиц использовались те же условия газификации, что и при исследовании воздействия эквивалентного соотношения 0.3. Как видно из табл. 9, продолжительность времени выборки отличается для различных анализов. Большую часть времени фильтр засорялся примерно через 10 мин. Образование частиц представляет собой сложное явление, трудно контролируемое и зависящее от многих факторов [32]. Авторы [7] вычислили значения коэффициентов выбросов частиц, показывая, что газификатор биомассы может производить от 100 до 8000 мг/нм<sup>3</sup> тонкодисперсных частиц большого диапазона. Как показано в табл. 9, в результате экспериментов нами были получены значения  $1100 \pm 100$  мг/нм<sup>3</sup> частиц, которые находятся в диапазоне, полученном в работе [7].

Авторы [33] разработали систему очистки синтез-газа. Синтез-газ был получен с помощью газификатора с использованием твердых бытовых

отходов (первоначально в атмосферу выделялось  $1410 \pm 210$  мг/нм<sup>3</sup> частиц). Разработанная система очистки позволяет получить синтез-газ, содержащий в выхлопных газах менее 1.21 мг/нм<sup>3</sup> частиц. Это означает, что из синтез-газа было удалено более 99.95% частиц. Устройство очистки является важной частью системы газификации, так как для регенерации синтез-газа в двигателях внутреннего сгорания максимальным показателем является 50 мг/нм<sup>3</sup>, а для турбин предел выбросов составляет 30 мг/нм<sup>3</sup> для частиц диаметром менее 10 мкм [34].

*2.5. Химическая характеристика смол.* Характеристика смол, конденсированных на элементе Пельтье, была выполнена методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии. Основной целью данного анализа было выяснить, какие компоненты были конденсированы, чтобы оценить токсичность конденсированных продуктов, а также возможность сокращения образования этих компонентов в будущем.

Во-первых, было обнаружено небольшое количество соединений с преобладанием фенольной структуры, с последующим образованием крезола и метенамина. Появление этих молекул ожидалось, потому что они растворимы в воде. Образование метенамина уже наблюдалось в процессе газификации [35]. Метенамин образуется при реакции конденсации с формальдегидом и аммиаком [36]. Этот компонент может присутствовать в нашем газификаторе, что может объяснить присутствие этой молекулы. В [35] также были обнаружены фенол и крезол, которые хорошо известны как основные компоненты смолы. Проводя аналогичные эксперименты на опытно-промышленной установке на номинальной мощности 200 кВт, авторы [37] также обнаружили пропионовую и уксусную кислоту, крезол и фенол в образцах твердых частиц и смол. Анализ был выполнен путем растворения твердых частиц и смол в ацетоне перед проведением газовой хроматографии и масс-спектрометрии, однако метенамин не был обнаружен из-за различий в древесном сырье, масштабах экспериментальной установки и условиях газификации.

Также была выполнена характеристика химических веществ смол, конденсированных внутри реактора на выходе из газификатора и в линии подачи на анализаторы. Основные химические вещества представлены в табл. 10.

Сотни молекул входят в состав смол. В качестве следов уксусной и пропионовой кислот были обнаружены две легкие молекулы. Основные молекулы принадлежат к моно- и полиароматическим семействам: фенолы, метилфенолы, дибензофуран, полициклические ароматические углеводороды и алкил-полициклические ароматические углеводороды (в табл. 10 представлено

только 20 основных соединений). В ходе исследования все эти соединения были также обнаружены на выходе из газификатора. Химический состав смол был постоянным для всех экспериментов, проведенных в рамках данного исследования. Оптимизация параметров процесса газификации не влияет на химический состав смол. Схожие результаты двух исследований подтверждают, что процесс газификации в лабораторных условиях достоверен и схож с установками большего масштаба. Независимо от некоторых параметров газификации биомассы, таких как конструкция, масштаб установки, тип древесного топлива (щепа или пеллеты), выделяемые смолы имеют одинаковый химический состав.

## ВЫВОДЫ

Был разработан экспериментальный газификатор биомассы. Данное устройство позволяет изучать и оптимизировать различные экспериментальные параметры с помощью методов Тагучи с целью увеличения производства таких газов, как H<sub>2</sub>, CO и CH<sub>4</sub>. В связи с этим были изучены физико-химические и тепловые явления, влияющие на процесс газификации биомассы. Количество CO и H<sub>2</sub> на килограмм биомассы, полученных при оптимальных условиях, определенных в ходе экспериментов, очень близко к теоретическим значениям, рассчитанным с помощью методов Тагучи при эквивалентном отношении 0.4. Во время всех испытаний концентрация CO всегда преобладала над концентрацией H<sub>2</sub>. Оптимальными экспериментальными параметрами, выведенными из методов Тагучи, являются: подача вторичного воздуха – 20%, частота подачи биомассы – 60 ч<sup>-1</sup>, постоянное количество подаваемого топлива в течение 1 ч – 30 г, содержание влаги 8% и размер образцов биомассы от 1.6 до 3.15 мм. Частота подачи биомассы, размер частиц биомассы и соотношение вторичного воздуха являются параметрами, оказывающими наибольшее влияние на количество образующихся CO и H<sub>2</sub>. Затем было проведено исследование влияния эквивалентного соотношения на состав синтез-газа. Оптимальное значение 0.3 соответствует литературным данным. Значения полученных параметров позволяют получать синтез-газ, состоящий из 21% H<sub>2</sub> и 36% CO.

Химический состав смолы был определен с помощью методов газовой хроматографии и масс-спектрометрии. Полученные данные согласуются с ранее опубликованными данными других ученых. В составе преобладают семейства фенолов, алкилфенолов, полициклических ароматических углеводородов и алкил-полициклических ароматических углеводородов. Состав и оптимальные параметры не изменялись при применении мето-

Таблица 10. Качественный состав смол, сконденсированных в реакторе и линиях подачи

Продукт		Продукты, представленные в [37]	
соединение	формула	соединение	формула
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$
Фенол	$C_6H_6O$	Бутиролактон	$C_4H_6O_2$
		Фенол	$C_6H_6O$
Метилфенол	$C_7H_8O$	Метилциклопентенон	$C_6H_8O$
		Метилфенол	$C_7H_8O$
		Метоксикрезол	$C_8H_{10}O_2$
		Диметилфенол	$C_8H_{10}O$
		Инден	$C_9H_8$
Нафталин	$C_{10}H_8$	Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$
		Нафталин	$C_{10}H_8$
		Метилинден	$C_{10}H_{10}$
Метилнафталин	$C_{11}H_{10}$	Изопропилметилфенол	$C_{10}H_{14}O$
		Метилнафталин	$C_{11}H_{10}$
Аценафтенбифенил	$C_{12}H_{10}$	Аценафтенбифенил	$C_{12}H_{10}$
Аценафтилен	$C_{12}H_8$	Аценафтилен	$C_{12}H_8$
Дибензофуран	$C_{12}H_8O$	Дибензофуран	$C_{12}H_8O$
		Диметилнафтелин	$C_{12}H_{12}$
		Этилнафталин	$C_{12}H_{12}$
Флуорен	$C_{13}H_{10}$	Флуорен	$C_{13}H_{10}$
		Фенален	$C_{13}H_{10}$
		Метилбифенил	$C_{13}H_{12}$
		Изопропилнафталин	$C_{13}H_{14}$
		Триметилнафталин	$C_{13}H_{14}$
		Метилдибензофуран	$C_{13}H_{10}O$
		Антрацен	$C_{14}H_{10}$
Фенантрен	$C_{14}H_{10}$	Фенантрен	$C_{14}H_{10}$
		Метилфлюорен	$C_{14}H_{18}$
Фенантридин	$C_{15}H_{10}$		
6Нциклопента[def]фенантрен	$C_{15}H_{10}$		
6Нциклобута[jk]фенантрен	$C_{15}H_{10}$		
Полициклические ароматические углеводороды	$C_{15}H_{12}$	Метилантрацен	$C_{15}H_{12}$
		Метилфенантрен	$C_{15}H_{12}$
Полициклические ароматические углеводороды	$C_{16}H_{12}$	Фенилнафталин	$C_{16}H_{12}$
Флюорантен	$C_{16}H_{10}$	Флюорантен	$C_{16}H_{10}$
Пирен	$C_{16}H_{10}$	Пирен	$C_{16}H_{10}$
		Этилфенантрен	$C_{16}H_{14}$
		Диметилфенантрен	$C_{16}H_{14}$
		Бензонафтофуран	$C_{16}H_{10}O$

Таблица 10. Окончание

Продукт		Продукты, представленные в [37]	
соединение	формула	соединение	формула
Метилпирен	$C_{17}H_{12}$	Метилпирен	$C_{17}H_{12}$
Полициклические ароматические углеводороды	$C_{17}H_{12}$	Бензо[с]флюорен	$C_{17}H_{12}$
Полициклические ароматические углеводороды	$C_{18}H_{12}$	Триметилфенантрен	$C_{17}H_{16}$
Циклопента[сd]пирен Антрацен1,8-диэтил	$C_{18}H_{10}$	Бензо[а]антрацен	$C_{18}H_{12}$
Бензо[ghi]флуорантен	$C_{18}H_{10}$	Бензо[с]фенантрен	
М-терфинил	$C_{18}H_{14}$	Бензо[ghi]флуорантен	$C_{18}H_{10}$
Р-терфинил		5,6- дигидрохризен	$C_{18}H_{14}$
Пирен1,3-диметил		Тетраметилфенантрен	$C_{18}H_{18}$
Бензо(б)флуорантен	$C_{20}H_{12}$	Метилхризен	$C_{19}H_{14}$
Бензо (j)флуорантен		Бензо(б)флуорантен	
Бензо(е)пирен		Бензо (j)флуорантен	
Бензо(а)пирен		Бензо(к)флуорантен	$C_{20}H_{12}$
Перилен		Бензо(е)пирен	
Бензо(е)ацефенантрен	$C_{20}H_{12}$	Перилен	
		Бензо[ghi]перилен	$C_{22}H_{12}$
		Индено[1,2,3-сd]пирен	
		Дибензо[а,j]антрацен	$C_{22}H_{14}$
		Коронен	$C_{24}H_{12}$
		Дибензопирен	$C_{24}H_{14}$

дов Тагучи. Дальнейшие эксперименты будут проведены при оптимальных параметрах с целью детального изучения различных фракций твердых частиц (мелкие и ультратонкие частицы  $PM_{0.1}$ – $PM_{2.5}$ ), выделяющихся с выхлопными газами.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Эта работа проводилась в рамках проекта “*EBIPREP*” (Эффективное использование биомассы для производства возобновляемой энергии и биотехнологической продукции с низким уровнем выбросов) программы “*INTERREG IV Rhin Supérieur*”. Проект профинансирован Европейским сообществом (*The Science Offensive of the Trinational Metropolitan Upper Rhine Regio, the French Region Grand Est, the Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg, the Ministe-*

*rium für Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz, the Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg, the Hochschule Karlsruhe, the Université de Strasbourg, the Université de Haute-Alsace*) – номер гранта 3.6.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The World Bank. Indicators Data Base [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.worldbank.org/indicator>. (Дата обращения: 20.10.2019).
2. Eurostat [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ec.europa.eu/eurostat>. (Дата обращения: 20.10.2019).
3. Renewable energy policy network for the 21st century [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21\\_GSR2016\\_KeyFindings\\_fr\\_09.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/REN21_GSR2016_KeyFindings_fr_09.pdf). (Дата обращения: 20.10.2019).

4. The Commission's Energy Roadmap 2050. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-11-914\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-11-914_en.htm). (Дата обращения: 20.10.2019).
5. *Basu P.* Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: practical design and theory. Amsterdam: Acad. Press, Elsevier, 2013. 548 p.
6. Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.e4tech.com/wp-content/uploads/2016/01/gasification2009.pdf>. (Дата обращения: 20.10.2019).
7. *Couto N., Rouboa A., Silva V., Monteiro E., Bouziane K.* // Energy Procedia. 2013. V. 36. P. 596.
8. *Sikarwar V.S., Zhao M., Clough P., Yao J.* // Energy & Environmental Sci. 2016. V. 9. P. 2939.
9. *Prabowo B., Umeki K., Yan M., Nakamura M.R.* // Appl. Energy. 2014. V. 113. P. 670.
10. *Wiinikka H., Wennebro J., Gullberg M., Pettersson E., Weiland F.* // Appl. Energy. 2017. V. 191. P. 153.
11. *Son Y.-I., Yoon S.J., Kim Y.K., Lee J.-G.* // Biomass and Bioenergy. 2011. V. 35. P. 4215.
12. *Susastriawan A.A.P., Saptoadi H., Purnomo* // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2017. V. 76. P. 989.
13. *Zainal Z.A., Rifau A., Quadir G.A., Seetharamu K.N.* // Biomass and Bioenergy. 2002. V. 23. P. 283.
14. *Jia J., Xu L., Abudula A., Sun B.* // Energy Conversion and Management. 2018. V. 155. P. 138.
15. *Niu Y., Han F., Chen Y., Lyu Y., Wang L.* // J. Energy Inst. 2017. V. 90. P. 715.
16. *Vriesman P., Heginuz E., Sjöström K.* // Fuel. 2000. V. 79. P. 1371.
17. *Franco C., Pinto F., Gulyurtlu I., Cabrita I.* // Fuel. 2003. V. 82. P. 835.
18. *Ly P.M., Xiong Z.H., Chang J., Wu C.Z.* // Bioresource Technol. 2004. V. 95. P. 95.
19. *Saravanakumar A., Haridasan T.M., Reed T.B., Bai R.K.* // Fuel. 2007. V. 86. P. 2846.
20. *Karna S.K.* // Int. J. Eng. and Math. Sci. 2012. V. 1. P. 11.
21. *Verma V.K., Bram S., Delattin F., Laha P.* // Appl. Energy. 2012. V. 90. P. 17.
22. *Gardiner W.P., Gettinby G.* // Woodhead Publishing. 1998. P. 289.
23. *Kaupp A., Goss J.R.* State-of-the-art report for small scale (to 50 kw) gas producer – engine systems. USA: California Univ., Davis, Dept. of Agricultural Engineering, 1981. 278 p.
24. *Kirsanovs V., Blumberga D., Veidenbergs I., Rochas C.* // Energy Procedia. 2017. V. 128. P. 332.
25. *Sheth P.N., Babu B.V.* // Bioresource Technol. 2009. V. 100. P. 3127.
26. *Martínez J.D., Silva Lora E.E., Andrade R.V., Jaén R.L.* // Biomass and Bioenergy. 2011. V. 35. P. 3465.
27. *Bhattacharya S.C., Mizanur Rahman Siddique A.H.M., Pham H.-L.* // Energy. 1999. V. 24. P. 285.
28. *Li S., Xu S., Liu S., Yang C., Lu Q.* // Fuel Proc. Technol. 2004. V. 85. P. 1201.
29. *Hernández J.J., Aranda-Almansa G., Bula A.* // Fuel Proc. Technol. 2010. V. 91. P. 681.
30. *Ryu C., Yang Y.B., Khor A., Yates N.E.* // Fuel. 2006. V. 85. P. 1039.
31. *Kuo J.-H., Wey M.-Y., Lian Y.-H., Samaksaman U.* // Fuel Proc. Technol. 2014. V. 128. P. 104.
32. *Wiinikka H., Toth P., Jansson K., Molinder R.* // Combustion and Flame. 2018. V. 189. P. 240.
33. *Shiota K., Tsujimoto Y., Takaoka M., Oshita K., Fujimori T.* // J. Environmental Chem. Eng. 2017. V. 5. P. 1703.
34. *Asadullah M.* // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2014. V. 29. P. 201.
35. *Sarker S.* Thermochemical gasification of local lignocellulosic biomass via fixed-bed and fluidized-bed reactors: Doctoral dissertation. Norway: University of Agder Faculty of Engineering and Science, 2016. 205 p.
36. *Sáiz J., Ferrando J.-L., Atoche J.-C., García-Ruiz C.* // Forensic Sci. Internat. 2012. V. 216. P. 183.
37. *Simone M., Barontini F., Nicoletta C., Tognotti L.* // Bioresource Technol. 2012. V. 116. P. 403.