

2. Электромагнитные поля промышленной частоты электроустановок, размещенных в зданиях / Никитина В.Н., Калинина Н.И., Ляшко Г.Г. [и др.] // *Здоровье населения и среда обитания*. – 2021. – Т. 29. – № 9. – С. 56–61.
3. Белов А.А. Влияние электромагнитных полей на систему кровообращения человека / А.А. Белов, Е.Ю. Савченко // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2022. – № 5. – С. 255–265.
4. Электромагнитная безопасность населения. Национальные и международные нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона / О.А. Григорьев, В.Н. Никитина, В.Н. Носов и др. // *ЗНиСО*. – 2020. – № 10 (331). – С. 28–33.
5. Морфофункциональные изменения органов при воздействии искусственных электромагнитных полей / В.Л. Загребин, А.И. Краюшкин, Л.И. Александрова и др. // *Волгоградский научно-медицинский журнал*. – 2018. – № 3. – С. 19–24.
6. Никольский О.К. Экологическое влияние сельских электрических сетей 10–0,4 кВ на окружающую среду / О.К. Никольский, Н.И. Черкасова // *Ползуновский вестник*. – 2012. – № 4. – С. 55–58.
7. Влияние промышленных электромагнитных полей на хаотическую динамику параметров сердечно-сосудистой системы работников нефтегазовой отрасли / А.В. Болтаев, Г.В. Газя, А.А. Хадарцев и др. // *Экология человека*. – 2017. – № 8. – С. 3–7.
8. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.1.2.1002-00 «Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям» – М.: Минздрав России, 2001.
9. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях» – М.: Минздрав России, 2003.
10. Свиридова Е.Ю. Методы снижения уровней электромагнитных полей линий электропередач при строительстве и реконструкции объектов / Е.Ю. Свиридова // *Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова*. – 2010. – № 3. – С. 140–142.

## **ТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ СМЕСЕВЫХ ТОРФО-ДРЕВЕСНЫХ ТОПЛИВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ПОЛЕЗНЫХ ПРОДУКТОВ**

**А.К. Берикболов, А.Д. Мисюкова, С.А. Янковский**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. АЗ-44*

Научный руководитель: А.С. Заворин, профессор, д.т.н, НОЦ И.Н. Бутакова

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов термической конверсии смесевых твердых топлив на основе торфа и древесных отходов с учетом изменения их концентрации с целью получения полезных продуктов. В исследованиях применялась методика приготовления топливных смесей, включающая торф и отходы переработки деловой древесины, путем их смешивания для последующей термической конверсии. Эксперименты были проведены на экспериментальном стенде при температуре 600 °С. Получены три полезных энергетических продукта: синтез-газ, твердый углеродный остаток и жидкие углеводороды. Установлено, что при термическом разложении смеси торфа и древесных опилок в соотношении по массе 50 % торфа и 50 % древесных опилок был достигнут наивысший выход горючих газовых компонентов, качественный углеродный остаток и жидкие углеводороды.

### **Введение**

Многие ученые и энергетики уже несколько десятилетий занимаются поиском альтернативных источников энергии и среди потенциальных вариантов выделяется торф и древесные отходы. Россия обладает огромными резервами торфа, которые, по данным Всероссийского научно-исследовательского института торфяной промышленности (ВНИИТП), оцениваются как 175,6 млрд т, что составляет более 35 % мировых запасов [1]. Увеличение использования местных видов топлива и источников энергии, а также повышение уровня утилизации и пе-

переработки отходов – это ключевые цели и приоритеты Экологической стратегии и энергетического плана Российской Федерации на период до 2030 года.

Кроме того, в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 20.01.2023 г. № 50, законодательно установлено, что древесина, оставшаяся после производственных процессов, не может быть утилизирована, а должна быть направлена на переработку. Согласно этому закону, все остатки древесины должны быть использованы для производства готовой продукции, компонентов для других товаров, производства тепловой энергии или мульчирования почвы. Одним из потенциальных решений этой задачи является формирование смесевых топлив на основе торфа и древесных отходов и их последующая глубокая переработка с получением энергетически полезных продуктов.

Цель настоящего исследования заключается в проведении анализа процессов термической конверсии комбинированных твердых топлив, используя торф и древесные отходы лесопиления, при изменении концентрации древесных отходов в смеси, с мониторингом одного из значимых продуктов этого процесса – синтез-газа.

### **Методика экспериментальных исследований**

Смесевое топливо формировалось на основе торфа месторождения «Суховское», Россия, и отходов лесопиления от ООО «Дзержинский ЛПК». Процедура приготовления компонентов топливной смеси осуществлялась по методике, описанной ранее в работе [2].

Исследования проводились для смесей на основе торфа и древесных отходов в следующих пропорциях с добавлением последней от 10 до 50 %. С целью обеспечения равномерного распределения частиц в топливе и создания однородной смеси в различных массовых пропорциях, проводилась процедура перемешивания в течение 7 минут в шаровой барабанной мельнице. Полученная однородная смесь, подготовленная в разных пропорциях по массе, помещалась в тигель для перемещения в печь и проведения термической конверсии и непрерывной регистрации формируемой газовой составляющей.

### **Результаты экспериментальных исследований**

Навески для экспериментальных исследований смеси торфа и древесных опилок были взвешены перед исследованиями с использованием аналитических весов. Проба массой  $30 \pm 0,2$  г. помещалась в специальный термостойкий тигель (1) и далее перемещалась в муфельную печь (2), которая нагревалась до температуры  $600$  °С со скоростью  $10$  °С/мин, и эта температура поддерживалась в течение 35–40 минут до завершения эксперимента.

На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда, разработанного для исследования процессов пиролиза топливных композиций.

В процессе совместного пиролиза древесных опилок и торфа, при постепенном увеличении доли последних в смеси, отмечается постепенное снижение выхода полукокса, но при этом существенное увеличение выхода газовых горючих компонент по сравнению с пиролизом однородного торфа. Установленный эффект является синергетическим взаимодействием газовых компонент двух видов низкосортных топлив. При температуре  $560$  °С наблюдается постепенное увеличение выхода газа, что обусловлено повышением температуры процесса термического разложения топливной смеси.

В температурном диапазоне  $540$ – $560$  °С неорганические минералы и летучие компоненты в торфе разлагаются, а из древесных опилок выделяются также летучие компоненты, что приводит к образованию торфяно-древесного биоугля. Анализ остаточного углерода показал значительное изменение в массе 28–30 % от исходной топливной смеси. Результаты исследования газовых компонент в процессе разложения топливных смесей приведены на рис. 2.

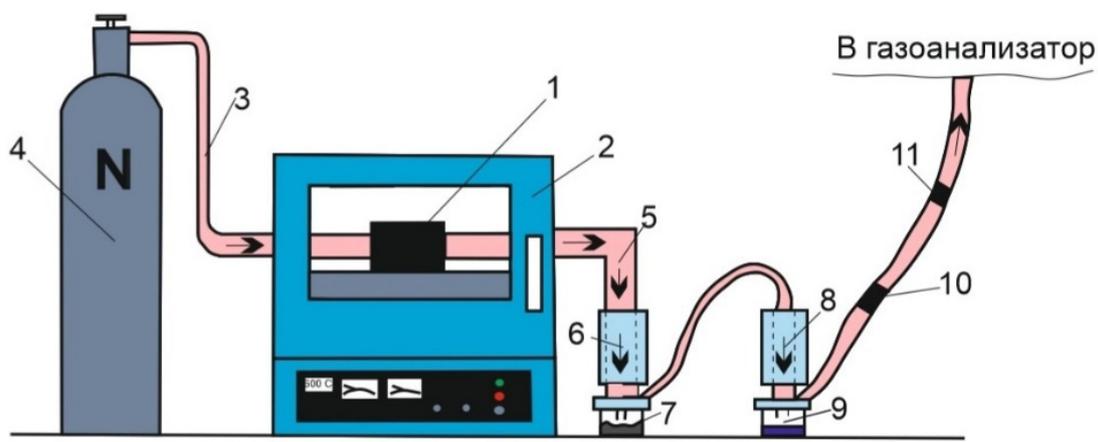


Рис. 1. Схема экспериментального стенда по глубокой переработке смесевых топлив с продувкой инертным газом для получения синтез-газа, жидких углеводородов и углерода:

- 1 – тигель с топливной композицией; 2 – муфельная печь; 3 – канал с подводом азота;
- 4 – баллон с азотом; 5 – продукто-отводящий канал; 6 – холодильный теплообменник;
- 7 – первый конденсатосборник (влагоотделитель); 8 – водяной охладитель газов;
- 9 – второй конденсатосборник (влагоотделитель);
- 10, 11 – фильтры очистки газа от пыли и смол

Пиролиз представляет собой один из множества химических процессов, которые происходят при повышенных температурах с недостаточным содержанием активного кислорода. Эти условия приводят к разложению сложных органических материалов на более простые соединения [3]. В ходе пиролиза уровень кислорода в газовой фазе продуктов снижается, так как он используется для окисления углерода и других элементов, входящих в состав органических материалов. Как показано на рис. 2, этот процесс естественным образом приводит к образованию газов, таких как диоксид углерода, водород, метан и монооксид углерода.

Из анализа рис. 2 можно сделать вывод, что повышение температуры в печи до 600 °С сопровождается увеличением интенсивности выделения водорода (см. рис. 2, б). Торф, в основном, состоит из гуминовой кислоты, асфальтена, частиц целлюлозы и гемицеллюлозы, в то время как древесные опилки, в основном, состоят из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина [4]. С увеличением доли древесных опилок в исследуемых смесевых композициях наблюдается постепенное увеличение выхода водорода. Максимальная подынтегральная площадь определена для сформированных газовых компонент при разложении топливной смеси, где доля древесной компоненты составляла 50 % по массе. Дальнейшее увеличение доли древесных опилок не приводит к дополнительному увеличению синергетического эффекта. Например, образец ТО\_50 % / ДО\_50 % показал большую подынтегральную площадь 24,553 % при температуре пиролиза 600 °С, в то время как содержание водорода в образце ТО\_100 % определено на уровне 5,44 %, при соотношении массовых компонент ТО\_25 % / ДО\_75 % содержание водорода составило 18,02 %, а для навески с топливом в соотношении по массе компонент ТО\_75 % / ДО\_25 % – 23,99 %.

На рис. 2, г и д наблюдается аналогичный синергетический эффект, приводящий к увеличению выхода монооксида углерода при равном по массе соотношении компонент в смеси с высоким выходом  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , составляющими 25,954 и 35,436 % объема соответственно. В процессе разложения карбоксильной и гуминовой кислот в макромолекулярной структуре торфа образуется большое количество диоксида углерода. Однако основными источниками  $\text{CO}$  являются различные процессы, такие как распад фенольных гидроксильных и карбонильных групп, а также распад эфирных связей, окисгенированных гетероциклов и разложение короткоцепочечных алифатических углеводородов, которые также могут образовывать  $\text{CO}$  [4].

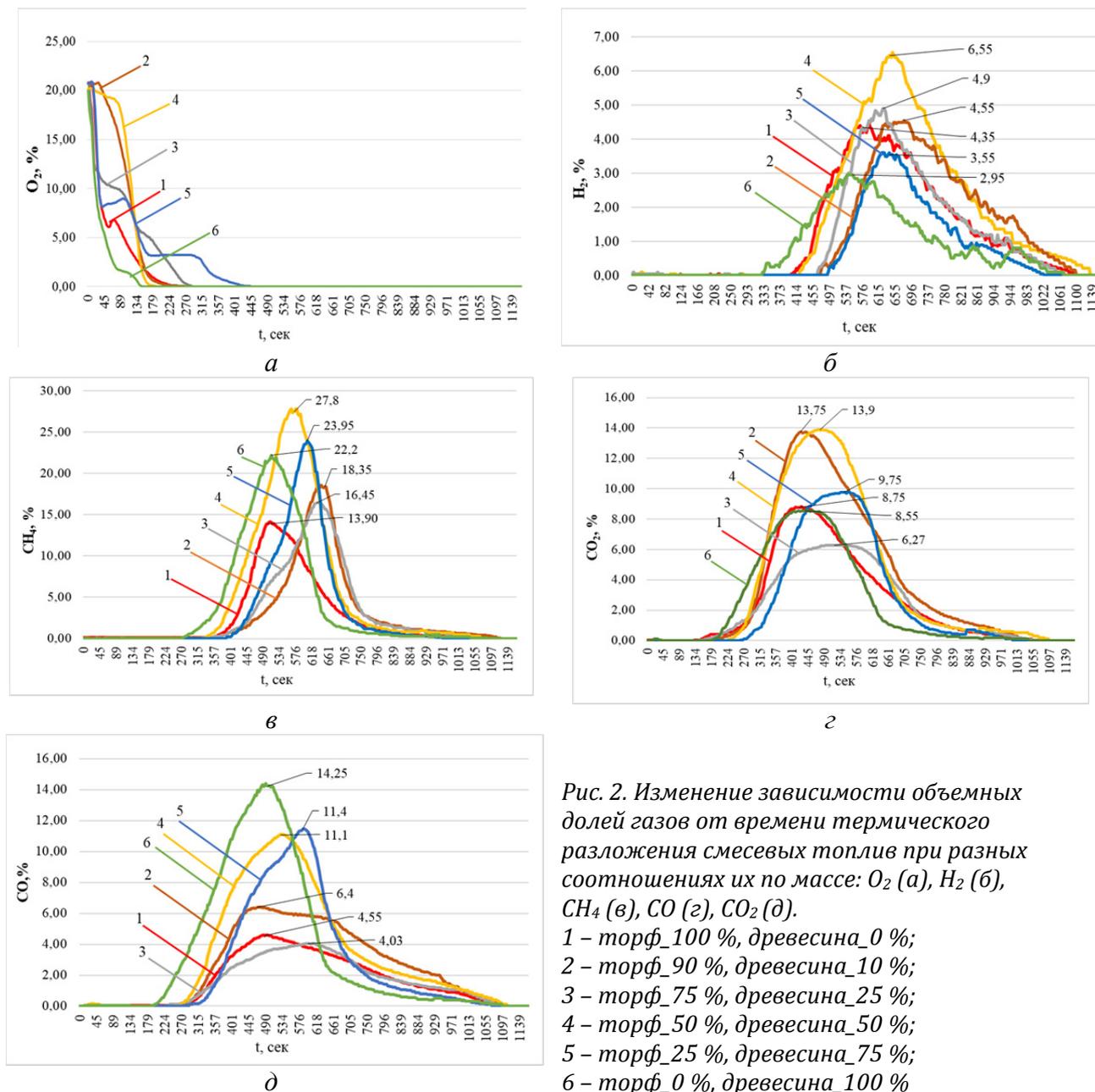


Рис. 2. Изменение зависимости объемных долей газов от времени термического разложения смесевых топлив при разных соотношениях их по массе: O<sub>2</sub> (а), H<sub>2</sub> (б), CH<sub>4</sub> (в), CO (г), CO<sub>2</sub> (д).

1 – торф\_100 %, древесина\_0 %;  
2 – торф\_90 %, древесина\_10 %;  
3 – торф\_75 %, древесина\_25 %;  
4 – торф\_50 %, древесина\_50 %;  
5 – торф\_25 %, древесина\_75 %;  
6 – торф\_0 %, древесина\_100 %

При постепенном увеличении содержания древесных опилок в образцах, подвергаемых совместному пиролизу, наблюдается постепенное увеличение выхода метана (CH<sub>4</sub>) при равной концентрации компонент в смеси, равно 22,99 % (см. рис. 2). Эти исследования подтверждают существенное влияние температуры процесса пиролиза на образование метана. При более высоких температурах пиролиза метиловая гр. и ароматические органические соединения, состоящие из сопряженных плоских кольцевых структур в макромолекулярных структурах торфа, более легко взаимодействуют с водородом, образуя метан. Кроме того, повышение температуры в печи способствует более эффективному связыванию каталитически активных участков и летучих веществ в полукоксе, что способствует каталитическому разложению смолы на маломолекулярные газообразные продукты, включая метан [4].

### Заключение

На основе результатов выполненных экспериментальных исследований по термической конверсии смесевых твердых топлив с изменением пропорций компонент торф/древесина с целью увеличения формирования синтез-газа, можно сделать следующие выводы:

Увеличение содержания древесной биомассы в смесевом топливе до 50 % в сочетании с торфом существенно усиливает синергетический эффект и способствует повышенному образованию горючих газов, включая водород, метан и монооксид углерода. Однако дальнейшее увеличение доли древесной биомассы в смеси не усиливает этот эффект, а, наоборот, его ослабляет. Это позволяет сделать вывод о том, что оптимальное соотношение компонентов в смесевом топливе на основе торфа и биомассы (отходы лесопиления) достигается при равных по массе соотношениях компонент.

Результаты непрерывного анализа синтез-газа показали, что увеличение скорости нагревания положительно влияет на пиковую температуру, соответствующую максимальной скорости потери массы. Исходя из анализа экспериментов, можно сделать вывод, что температура пиролиза имеет значительное влияние на образование метана (CH<sub>4</sub>). При более высоких температурах метиловые группы, связанные с ароматическими соединениями в макромолекулярных структурах торфа и биомассы, более активно взаимодействуют с водородом, что способствует образованию метана.

Полученные результаты исследований подтверждают потенциал формирования эффективных смесевых топлив равных по массе на основе торфа и отходов лесопиления, в результате их совместного пиролиза формируется постоянный состав синтез-газа с увеличением выхода горючих газовых компонент.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2021-0008.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахманкулов, Д.Л. Мировые запасы угля и перспективы его использования / Д.Л. Рахманкулов, С.В. Николаева, Ф.Н. Латыпова, Ф.Ш. Вильданов., С.Ю. Шавшукова // Башкирский химический журнал. – 2009. – Т. 16. – № 2. – С. 21–28.
2. Янковский С.А. Обоснование снижения выхода оксидов серы при пиролизе углей с добавкой отходов лесопиления / С.А. Янковский, Г.В. Кузнецов, А.Д. Мисюкова // Химия твердого топлива. – 2022. – № 1. – С. 57–65.
3. Demirbas A. An overview of biomass pyrolysis / A. Demirbas, G. Arin // Energy sources. – 2002. – Vol. 24. No. 5. – P. 471–482.
4. Li Y. et al. Studies on individual pyrolysis and co-pyrolysis of peat–biomass blends // Thermal decomposition behavior, possible synergism, product characteristic evaluations and kinetics. – 2022. – Vol. 310. – P. 14.