

Реализованная математическая модель с допустимой степенью адекватности воспроизводит ВАХ СП. ВАХ двухдиодной математической модели практически совпадает с ВАХ СП в точках ХХ и КЗ. В дальнейших исследованиях будем полагать, что данная модель является эталонной.

Литература

1. Eftekharijad S. et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems // IEEE transactions on power systems. – 2012. – Т. 28. – № 2. – С. 893-901.
2. Nema S. et al. Matlab/simulink based study of photovoltaic cells/modules/array and their experimental verification // International journal of Energy and Environment. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 487-500.
3. Renewables 2019 Global Status Report // Ren21.Renewables now [Электронный ресурс]. URL: https://www.ren21.net/gsr2019/chapters/chapter_03/chapter_03/ (01.11.2023).
4. Shannan N. M. A. A., Yahaya N. Z., Singh B. Single-diode model and two-diode model of PV modules: A comparison // 2013 IEEE international conference on control system, computing and engineering. – IEEE, 2013. – С. 210-214.
5. Российский союз промышленников и предпринимателей/Программа поддержки ВИЭ на период 2025-2035гг. Руководитель инвестиционного дивизиона ВИЭ ООО «УК «РОСНАНО» А.Б. Каланов: Available from: file: // C:/Users/%D0%90%D0%BB%D0%B5%D0

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ
ПУТЕМ ДОБАВЛЕНИЯ БИОМАССЫ**

Емельянов С.Г., Плешко А.О., Паномарев Д.А.

Научный руководитель профессор Д.О. Глушков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В настоящее время возрастает потребность в развитии топливно-энергетического комплекса за счет вовлечения и использования новых видов твердого топлива. Это связано с тем, что производство тепловой и электрической энергии в большинстве случаев осуществляется путем сжигания твердого органического топлива, что оказывает негативное воздействие на окружающую среду [6]. Одним из перспективных видов топлива является смесь на основе твердых горючих компонентов (например, биомассы и угля). Состав таких топливных смесей может быть адаптирован для решения конкретных задач, таких как утилизация древесных отходов, улучшение процесса сжигания углей с высоким и средним метаморфизмом, снижение вредных выбросов и уменьшение углеродного следа. При сжигании угля с низким метаморфизмом можно добавлять биомассу для снижения содержания золы и токсичных газовых компонентов в дымовых газах [2,4,5].

Целью данной работы является определение характеристик зажигания и горения каменного угля с добавлением биомассы, а также определение состава дымовых газов. Результаты данного исследования могут быть использованы при проектировании энергетических установок, работающих на твердом топливе.

В экспериментальных исследованиях использовались различные виды твердого топлива. Одним из них является черногорский каменный уголь марки Д (далее «У»), добываемый на Черногорском месторождении в Республике Хакасия (Россия). Дополнительно в экспериментах были использованы опилки лиственницы (далее «Б») из деревообрабатывающего предприятия Красноярска (Россия).

Для анализа характеристик зажигания и горения отдельных компонентов топлива и топливных смесей использовался хорошо апробированный экспериментальный стенд [3]. Одними из основных компонентов являются воздушный вентилятор высокого давления ROBUST, воздухонагреватель LEISTER LE 5000 HT и трубчатая муфельная печь General Therm RT 1000.1100 SP. Воздушный вентилятор и воздухонагреватель подают разогретый воздух в кварцевый цилиндр длиной 1 м со скоростью 5 м/с. Муфельная печь поддерживает температуру в диапазоне от 20 до 850 °С, равномерно распределяя температуру по длине цилиндра и минимизируя потери тепла в окружающую среду. Вдоль оси симметрии воздушного потока располагались термопары. Регистрация температуры осуществлялась с помощью многоканального регистратора РМТ-59 и четырех термопар на входе, в середине и на выходе из кварцевого цилиндра. Для снижения температуры воздушного потока и уходящих газов до 150 °С использовался воздухоохладитель. Топливо массой около 5 мг вводилось в воздушный поток с помощью автоматического механизма через отверстие диаметром 6 мм в стенке кварцевой трубки. Через смотровую щель муфельной печи регистрировались процессы зажигания и горения с помощью цветной высокоскоростной видеокамеры Phantom V411, которая располагалась перпендикулярно трубчатой муфельной печи на расстоянии около 2 м от смотровой щели.

Для анализа состава дымовых газов использовался хорошо апробированный экспериментальный стенд [1]. Муфельная печь Nabertherm R 50/250/13 прогревалась до заданной температуры T_g . Далее, при помощи координатного механизма, в камеру сгорания подавалась небольшая порция топлива массой около 0,2 г. С другой стороны муфельной печи был расположен зонд газоанализатора Test 1. Во время эксперимента оба отверстия трубки муфельной печи были закрыты изоляцией из стекловолокна. В процессе горения газообразные вещества, проходя через зонд, попадали в корпус газоанализатора. В одной серии проводилось от пяти до десяти экспериментов при идентичных начальных условиях. Для определения средней концентрации газа во времени использовался метод трапеций, подробно описанный авторами в работе [1].

В условиях нагрева топлив в потоке разогретого воздуха при температурах 500–800 °С с помощью программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов установлены времена задержки зажигания. По результатам проведенных экспериментов установлено, что времена задержки зажигания варьируются в пределах от 0,02 до 0,22 с, а добавление 10–30 % биомассы к углю снижает времена

задержки зажигания топливных смесей до 50 %. На рисунках 1–4 представлены типичные кадры видеogramм зажигания и горения индивидуальных топлив и их смесей (У 70 % + Б 30 %; У 80 % + Б 20 %; У 90 % + Б 10 %).

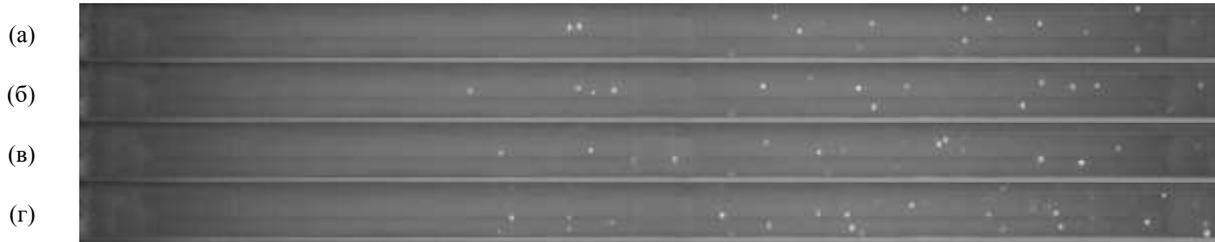


Рис. 1. Кадры видеogramмы зажигания и горения частиц черногорского каменного угля размерами 100–200 мкм в условиях движения в потоке разогретого воздуха при $T_a = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta t = 0,01\text{ с}$):
 $t_d = 0,095\text{ с}$ (а); $t = t_d + \Delta t$ (б); $t = t_d + 2\Delta t$ (в); $t = t_d + 3\Delta t$ (г)

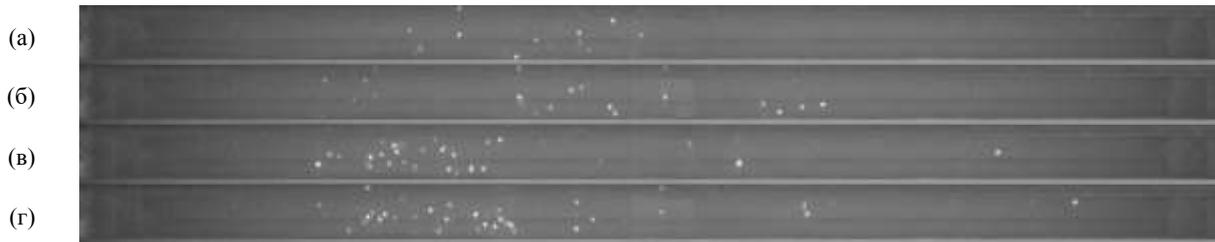


Рис. 2. Кадры видеogramмы зажигания и горения частиц древесины лиственницы размерами 100–200 мкм в условиях движения в потоке разогретого воздуха при $T_a = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta t = 0,01\text{ с}$):
 $t_d = 0,043\text{ с}$ (а); $t = t_d + \Delta t$ (б); $t = t_d + 2\Delta t$ (в); $t = t_d + 3\Delta t$ (г)

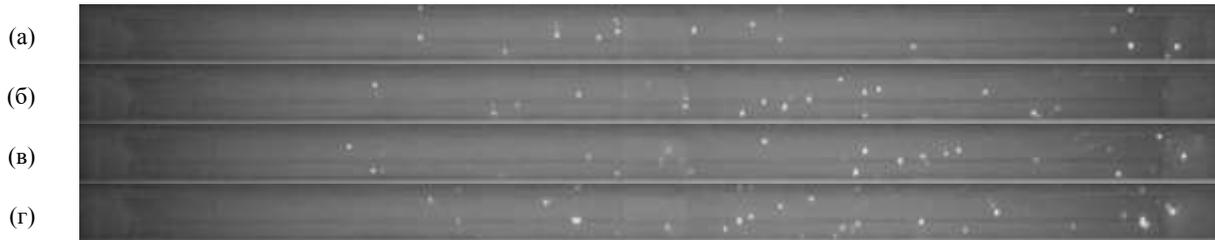


Рис. 3. Кадры видеogramмы зажигания и горения частиц смеси У 90 % + Б 10 % размерами 100–200 мкм в условиях движения в потоке разогретого воздуха при $T_a = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta t = 0,01\text{ с}$):
 $t_d = 0,079\text{ с}$ (а); $t = t_d + \Delta t$ (б); $t = t_d + 2\Delta t$ (в); $t = t_d + 3\Delta t$ (г)

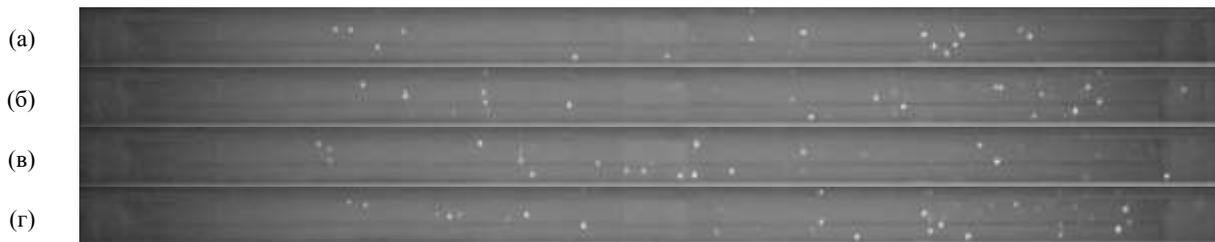


Рис. 4. Кадры видеogramмы зажигания и горения частиц смеси У 80 % + Б 20 % размерами 100–200 мкм в условиях движения в потоке разогретого воздуха при $T_a = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta t = 0,01\text{ с}$):
 $t_d = 0,063\text{ с}$ (а); $t = t_d + \Delta t$ (б); $t = t_d + 2\Delta t$ (в); $t = t_d + 3\Delta t$ (г)

В результате экспериментальных исследований для опилок лиственницы, черногорского каменного угля и смесей на их основе (У 70 % + Б 30 %; У 80 % + Б 20 %; У 90 % + Б 10 %) был определен состав уходящих дымовых газов. Анализ состава дымовых газов показал, что содержание CO , CO_2 , NO_x , H_2S + SO_2 для черногорского каменного угля составляет 0,6 %, 2,30 %, 54,0 ppm, 3,30 ppm, соответственно, а для опилок лиственницы 2,10 %, 1,64 %, 11,30 ppm, 2,00 ppm соответственно. Анализ частиц биомассы с помощью сканирующей электронной микроскопии показал наличие многочисленных крупных пор и канавок, в отличие от частиц угля. Их наличие положительно влияет на процессы зажигания и горения биомассы. Теплота сгорания такого состава (У 80 % + Б 20 %) немного ниже, чем у исходного угля, но дальнейшее увеличение доли биомассы в смеси снижает теплоту сгорания более чем на 10 %. Снижается содержание оксидов азота, диоксида углерода и сернистых

соединений ($H_2S + SO_2$) в дымовых газах на 19,7 %, 8,3 %, и 24,2 % соответственно. Из рассмотренных топливных смесей наибольший потенциал для практического применения наряду с традиционным твердым топливом имеет топливо с содержанием биомассы 20 %.

Таким образом, добавление биомассы к углю способствует снижению концентраций выбросов диоксида углерода, оксидов азота, соединений серы. Результаты позволяют сделать вывод о экологической перспективности развития технологий сжигания топливных смесей на основе широко распространенных углей с добавлением биомассы в небольших количествах. При этом добавление биомассы к углю способствует улучшению не только экологических, но и энергетических характеристик процесса горения.

Литература

1. Akhmetshin M. R., Nyashina G. S., Strizhak P. A. Normalizing anthropogenic gas emissions from the combustion of industrial waste as part of fuel slurries // Fuel. – 2022. – Т. 313. – С. 122653.
2. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace // Journal of the Energy Institute. – 2022. – Т. 100. – С. 55-65.
3. Glushkov D. O. et al. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement // Fuel Processing Technology. – 2021. – Т. 223. – С. 106986.
4. Roni M. S. et al. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Т. 78. – С. 1089-1101.
5. Xia Y. et al. Research and application of online monitoring of coal and biomass co-combustion and biomass combustion characteristics based on combustion flame // Journal of the Energy Institute. – 2023. – Т. 108. – С. 101191.
6. Yang W. et al. An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors // Fuel Processing Technology. – 2021. – Т. 213. – С. 106657.

ВИРТУАЛЬНЫЙ синхронный генератора на базе СНЭЭ для энергоснабжения объектов нефтегазовой промышленности

Иванов Н.С.

Научный руководитель доцент А.А. Суворов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Для нефтегазовых компаний возобновляемая энергия представляет собой важный инструмент для осуществления перехода к более устойчивой энергетике. Инвестирование в возобновляемые источники энергии позволяет им диверсифицировать свой портфель и улучшить свою технологическую, экономическую и экологическую устойчивость. Среди крупнейших международных нефтегазовых компаний, активно инвестирующих в проекты возобновляемой энергии, можно выделить Shell, Equinor, Total, BP и ENI. Говоря об отечественных проектах, у ПАО «Лукойл» введено в эксплуатацию наибольший объем мощностей ВИЭ [1]: тепловые насосы, 84 МВт ветроэлектростанций, 40 МВт солнечных электростанций.

Хотя проекты солнечных и ветряных электростанций в целом имеют низкий уровень риска за счет короткого цикла реализации и масштаба, большинство систем возобновляемых источников энергии (ВИЭ) используют силовые преобразователи для интеграции с сетью. Однако внедрение установок генерации с СП способно значительно изменить динамические свойства сети, так как обладают отличными свойствами от традиционных синхронных генераторов (СГ), в частности система автоматического управления (САУ). Это приводит к влиянию на устойчивость сети. В итоге разработка более совершенной системы управления СП, позволяющей обеспечивать устойчивость и быть надежной как традиционная СГ, становится все более актуальной. Имитация статических и динамических характеристик традиционных СГ возможна за счет особой системы автоматического управления, которая получила название «виртуальный синхронный генератор». Это направление считается одним из самых перспективных, так как позволяет присвоить установкам с СП свойства, обеспечивающие традиционные СГ для надежной работы сети. В связи с этим данный доклад посвящен разработке системы ВСГ на основе модели системы накопления электроэнергии (СНЭЭ).

В данном докладе проводится обзор и результаты модели виртуального синхронного генератора (ВСГ) на базе СНЭЭ (рисунок 1).

В данной модели построена трехфазная система накопления электроэнергии (СНЭЭ), которая с помощью силовых преобразователей (СП) способна заряжаться и разряжаться в зависимости от режима работы.

Системы ВСГ построены по принципу подчиненного управления и включают в себя контуры системы: внутренний и внешний контур управления, модель СГ. Внешний контур управления может выполнять управление по частоте и мощности (автоматический регулятор частоты и мощности (АРЧМ)) или напряжению (автоматический регулятор напряжения (АРН)). В рассматриваемой модели рассматривается АРН, в контуре которой осуществляется регулирование реактивной мощности/напряжения при помощи ПИ-регулятора.