

акции выделения водорода. Идеальный катализатор должен обладать как можно меньшим значением  $b$ , то есть давать прирост по току и, соответственно, по количеству производимого водорода при наименьшем изменении напряжения.

Для получения материала с более высокой электрокаталитической активностью производилась модификация платиной, на выходе получался продукт, с осажженной на поверхности частиц платиной 5 мас. %. Как видно из представленных данных, все полученные образцы после модификации даже 5 мас. % платины становятся сравнимы по своим характеристикам с коммерческим образцом, а по показателю перенапряжения при 100 мА/см<sup>2</sup> ( $\eta_{100}$ ) даже превосходят его. Это свидетельствует о перспективности использования разработанного способа плазмодинамического синтеза карбида кремния из сельскохозяйственных отходов для получения материалов, которые в качестве сокатализаторов могут быть сопоставимы по своим характеристикам с коммерческими образцами.

### Выводы

1. По итогу работы произведен синтез наноструктурированного карбида кремния из сельскохозяйственных отходов плазмодинамическим методом.
2. Полученный материал может использоваться в качестве катализатора и сокатализатора платины в реакции выделения водорода (HER).
3. Синтезированный материал обладает высокой каталитической активностью, сравнимой с активностью коммерческой платины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р. А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура, свойства // Успехи химии, 2009.
2. Пат. 2431947 РФ. Н05Н 11/00, F41В 6/00. Коаксиальный ускоритель / Сивков А.А., Пак А.Я.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРАТА МЕТАНА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА

**П.С. Нагибин, Н.Е. Шлегель**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ33*

Научный руководитель: Н.Е. Шлегель, к.т.н., инженер-исследователь, ИШФВП ТПУ

Несмотря на активное развитие систем получения энергии из возобновляемых источников, потребление ископаемых ресурсов составляет более 80 % [1]. Одними из наиболее вредных факторов использования ископаемых топлив являются выбросы парниковых газов, которые влекут за собой увеличение темпов глобального потепления. Добыча угля открытым способом приводит к загрязнению близлежащих территорий мелкодисперсной пылью, транспорт нефти и нефтепродуктов нередко сопровождается их утечкой в лито- и гидросферу, а утечки природного газа в атмосферу оказывают существенное влияние на темпы глобального потепления [2]. Другой проблемой, связанной с использованием ископаемых топлив, является их интенсивная исчерпаемость. Решением данных проблем служит вовлечение угольных, промышленных и коммунальных отходов, биомассы и других горючих компонентов в энергетический сектор путем создания композиционных жидких топлив [3]. Объемы таких отходов, ежегодно формирующихся во всем мире, значительно превышают возможности существующих технологий по их переработке и утилизации [4].

В [5] показано, что использование композиционных жидких топлив сопровождается меньшими, по сравнению с традиционными видами топлив, значениями антропогенных газовых выбросов. Помимо этого, использование высокорекреационных компонентов (например, отработанные масла, нефтепродукты и др.) позволяет добиться схожих, а иногда и более высоких энергетических характеристик, по сравнению с традиционными котельными топливами (уголь, мазут) [5]. Использование композиционных жидких топлив на основе отходов зачастую сопровождается высокой инерционностью зажигания, особенно при использовании топлив с повышенным содержанием воды или высоковлажных отходов [6]. Для интенсификации зажигания таких топлив можно использовать подсветку факела при помощи гидрата метана, формирующегося в зонах пониженных температур при добыче углеводородов. Прямое сжигание газового гидрата осложняется нестабильной скоростью диссоциации горючего газа и самоконсервацией поверхности гидрата [7]. Поэтому для успешной реализации условий совместного сжигания газовых гидратов и композиционных жидких топлив необходимо диссоциировать горючий газ из кристаллической решетки кристаллогидрата. Помимо горючего газа побочным продуктом данного процесса является вода с высокой степенью очистки [8], пригодная для использования в бытовых и промышленных целях.

В качестве основного компонента композиционного жидкого топлива использован шлам коксующегося каменного угля, представляющий типичный отход углеобогащения. Шлам состоит из угольных и минеральных частиц разной дисперсности (до 100 мкм). Для создания композиционного жидкого топлива с повышенной реакционной способностью использовалась добавка отработанного турбинного масла, которое принято от поставщика тепловой и электрической энергии в Томской области.

Схема стенда, используемого для определения состава газа после диссоциации гидрата, времен задержки зажигания и длительности горения исследуемых топлив представлена на рис. 1.

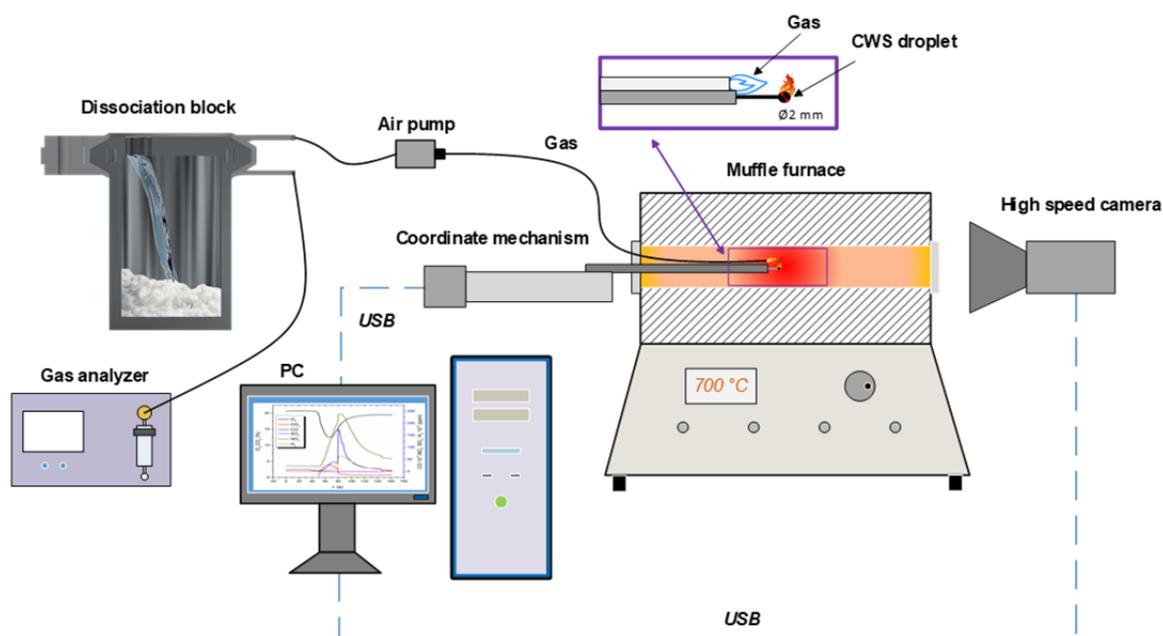


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

На рис. 2, а представлены видеок cadры, полученные при зажигании и горении капли композиционного жидкого топлива «50 % угольный шлам, 50 % вода» в факеле диссоциирующего из газового гидрата метана. На первом кадре представлен момент зажигания метана при вводе образцов в высокотемпературную среду. На втором кадре показан момент зажига-

ния капли топлива, сопровождающийся образованием парогазовой смеси на основе паров, выделяющихся с поверхности композиционного жидкого топлива, и инициированием горения. На третьем кадре видны две пламенные зоны, соответствующие газофазному горению капли топлива и диссоциирующего с поверхности гидрата метана. На четвертом кадре представлен процесс гетерогенного горения твердых компонентов топлива в факеле метана. При сравнении данных кадров с полученными при зажигании и горении композиционного жидкого топлива «40 % угольный шлак, 50 % вода, 10 % отработанное турбинное масло» (рис. 2, б), выделены несколько отличий. На этапе зажигания метана и газофазного зажигания капли топлива (рис. 2, б, 1 и 2 кадры соответственно) регистрировался эффект микро-взрывного дробления, вызванный наличием масла в составе композиционного жидкого топлива.

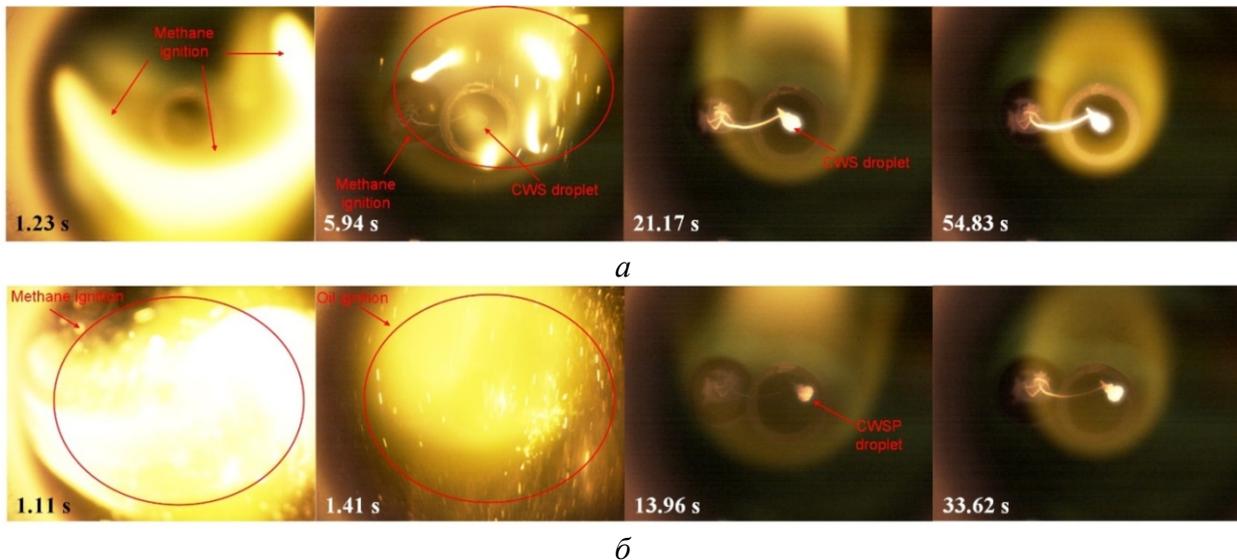


Рис. 2. Кадры зажигания и горения капель КЖТ в факеле метана при  $T_g=800$  °С:  
 а – 50 % угольный шлак, 50 % вода; б – 40 % угольный шлак, 50 % вода,  
 10 % отработанное турбинное масло

На рис. 3 показаны установленные в экспериментах времена задержки зажигания топливных композиций. Использование гидрата метана в опытах с композиционным жидким топливом «50 % угольный шлак, 50 % вода» интенсифицирует зажигание во всем исследуемом диапазоне температуры. Так, в зависимости от температуры в камере сгорания, время задержки зажигания снизилось в 1,1–4,3 раза. В свою очередь, при сжигании композиционного жидкого топлива с добавкой турбинного масла совместно с газовым гидратом регистрировалось увеличение времени задержки зажигания при температуре 700 °С в камере сгорания. Дальнейшее увеличение температуры в камере сгорания приводит к существенно нелинейному снижению времени задержки

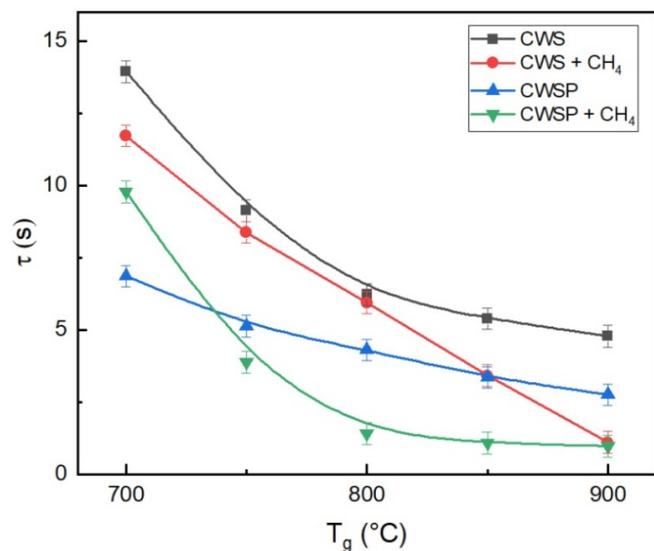


Рис. 3. Времена задержки зажигания исследуемых топлив

зажигания вследствие нескольких причин. Во-первых, возрастают скорости прогрева топлива, выхода влаги, паров горючей жидкости и летучих компонентов с поверхности твердых компонентов. Во-вторых, рост температуры в камере сгорания интенсифицирует горение метана, что также приводит к увеличению теплового потока к капле композиционного жидкого топлива. При температуре в камере сгорания около 900 °С времена задержки зажигания композиционных жидких топлив с добавкой отработанного турбинного масла и без него сопоставимы. Они составляли 0,97 и 1,11 с, соответственно. Без использования газового гидрата времена задержки зажигания составили 2,76 с для КЖТ с добавкой отработанного турбинного масла и 4,78 с для КЖТ без турбинного масла.

Данный эффект позволил сформулировать заключение о том, что использование высокореакционных добавок для интенсификации зажигания композиционных топлив из отходов совместно с газовым гидратом целесообразно лишь при относительно невысоких температурах в камере сгорания. Эти условия соответствуют так называемому низкотемпературному режиму горения топлив, реализуемому в топках энергетических котлов для сдерживания концентраций формирующихся антропогенных выбросов.

### Вывод

Установлены интегральные характеристики процессов зажигания и горения композиционных жидких топлив различного состава совместно с гидратом метана. Установлено, что добавка турбинного масла в состав композиционного жидкого топлива приводит к микровзрывному дроблению, тем самым интенсифицируя ее зажигание на величину до 2.1 раза. Обосновано, что использование газового гидрата позволяет интенсифицировать процессы зажигания композиционных жидких топлив.

Коэффициенты эффективности совместного сжигания композиционного жидкого топлива с гидратом метана выше на 34–48 % по сравнению с аналогичными коэффициентами при их моносжигании.

*Исследование выполнено при поддержке программы Национального исследовательского Томского политехнического университета (проект Приоритет-2030-НИП/ЭБ-006-375-2023).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., Strizhak P.A. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels // *Sci Total Environ.* – 2021. – Vol. 772. – P. 144909. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144909>.
2. Xie G. Zhi, Zhang L. Peng, Li C. Ying, Sun W. Dong. Accelerated methane emission from permafrost regions since the 20th century // *Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap.* – 2023. – Vol. 195. – P. 103981. <https://doi.org/10.1016/J.DSR.2023.103981>.
3. Vershinina K., Shevyrev S., Strizhak P. Coal and petroleum-derived components for high-moisture fuel slurries // *Energy.* – 2021. – Vol. 219. – P. 119606. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.119606>.
4. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.* Washington, DC: The World Bank, 2018. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
5. Zou H, Liu C, Evrendilek F, He Y, Liu J. Evaluation of reaction mechanisms and emissions of oily sludge and coal co-combustions in O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> atmospheres // *Renew Energy.* – 2021. – Vol. 171. – P. 1327–1343. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.02.069>.
6. Romanov D.S., Vershinina K.Y., Dorokhov V.V., Strizhak P.A. Rheology, ignition, and combustion performance of coal-water slurries: Influence of sequence and methods of mixing // *Fuel.* – 2022. – Vol. 322. – P. 124294. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.124294>.
7. Misyura S.Y. et al. The influence of key parameters on combustion of double gas hydrate // *J Nat Gas Sci Eng.* – 2020. – Vol. 80. – P. 103396. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2020.103396>.
8. Nallakukkala S., Lal B. Seawater and produced water treatment via gas hydrate: Review // *J Environ Chem Eng.* – 2021. – Vol. 9. – P. 105053. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105053>.