

и уноса из нее горючих продуктов. В отличие от ВУТ, эффект уноса продуктов сгорания и конвективного охлаждения потоком воздуха менее значительно влияет на время задержки зажигания группы капель ОБУТ. Отличия между каплями сильнее проявлены на стадии гетерогенного горения. Изменение времени горения для капель в группе было нелинейным и немонотонным вследствие неравномерности диффузионных и теплообменных процессов, усиливающихся из-за действия потока воздуха. При увеличении расстояния между центрами капель от 3 до 15 мм отличия времени задержки газофазного зажигания двух максимально удаленных друг от друга капель возрастали до 3,5 раз. Среди внешних факторов скорость потока воздуха имеет доминирующее влияние на зажигание топлива в условиях относительно низкой температуры.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Glushkov D.O., Kuznetsov G. V. and Strizhak P.A. Simultaneous ignition of several droplets of coal–water slurry containing petrochemicals in oxidizer flow // Fuel Process. Technol. Elsevier, 2016. Vol. 152. P. 22–33.
2. Valiullin T.R., Vershinina K.Y., Kuznetsov G. V., et al. An experimental investigation into ignition and combustion of groups of slurry fuel droplets containing high concentrations of water // Fuel Process. Technol. Elsevier B.V., 2020. Vol. 210. P. 106553.

Научный руководитель: д. ф-м. н. П.А. Стрижак, профессор НОЦ И.Н. Бутакова.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ КАМЕННОУГОЛЬНОГО ПОЛУКОКСА

М.В. Пурин<sup>1</sup>, Ж.А. Косторева<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова <sup>1</sup>группа А0-44, <sup>2</sup>к.т.н., ассистент

**Введение.** Известно, что в последнее время фокус внимания мировой энергетики сместился от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) к традиционным источникам, в первую очередь – к углю. Обусловлено это целым рядом факторов. Тенденция обширного внедрения ВИЭ в энергетику, отмечавшаяся в США и Европе в последние десятилетия, столкнулась с серьезной проблемой – существенной нестабильностью генерации, обусловленной природными явлениями, на которые человек повлиять не в силах (например, длительной безветренной погодой, значительной облачностью, резким похолоданием). В таких условиях высокую актуальность имеет традиционная энергетика, и в первую очередь – угольная. Связано это с относительной дешевизной производства тепло- и электроэнергии на тепловых электростанциях (в сравнении с атомными и гидроэлектростанциями ввиду высокой дороговизны их строительства и эксплуатации).

**Проблематика работы.** Основной проблемой использования угля в качестве энергетического топлива является экологический аспект. Известно, что при сжигании угля образуется значительное количество вредных веществ: оксиды азота и серы, оксиды тяжелых металлов, бенз(а)пирен, зольные частицы. Решением в данном случае может выступить сжигание угля в виде водоугольных суспензий или водоугольного топлива (ВУТ) – смеси измельченного угля, воды и пластификатора. Известно, что при таком способе организации сжигания угля снижается число образующихся оксидов азота и серы [1]. Однако при этом в продуктах сгорания достаточно высоко содержание оксидов азота  $\text{NO}_x$ , что обусловлено окислением синильной кислоты. Исходя из этого целесообразным является предварительный пиролиз угля, в ходе которого удаляются наиболее антропогенные продукты пиролиза.

Стоит отметить, что к настоящему времени практически не изучены энергетические аспекты сжигания каменноугольного кокса в составе водоугольных топлив, также существует мало работ, посвященных сравнительному анализу сжигания ВУТ на основе природного угля и полукокса тех же марок. Среди таких можно отметить работу [2].

Математические модели, описывающие горение ВУТ на основе полукокса, весьма сложны. Они основываются на системах дифференциальных уравнений в частных производных. Использование же полукокса, воспламеняющегося в гетерогенном режиме (или в газофазном режиме на поверхности частицы), позволяет значительно упростить задачу.

**Методика проведения эксперимента.** В работе рассматривались тощие и бурые угли угля марок Т и БЗ, подготовка которых проводилась согласно методике [3], а также каменноугольный кокс углей этих же марок. Твердые продукты разложения углей (кокс) получались методом торрефикации в условиях недостатка окислителя.

Экспериментальный стенд, использованный в работе, аналогичен описанному в [4]. Температура в экспериментах варьировалась от 873 до 1273 К. Для определения временных характеристик процесса воспламенения проводились серии экспериментов, состоящие не менее чем из 15 опытов, для каждого из значений температур окружающей среды. В результате получен ряд экспериментальных зависимостей (рисунок 1), подробно описанных в работе [5].

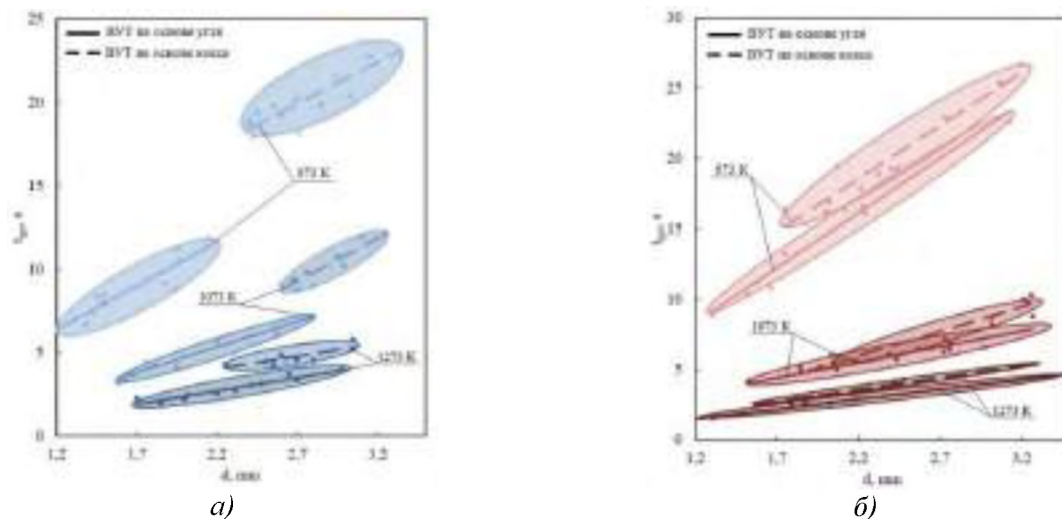


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания каплей водоугольных топлив от начального размера капли:

а) суспензии на основе угля 2Б и его производных; б) суспензии на основе угля Т и его производных

**Аналитическое решение задачи воспламенения каплей топлива на основе угля и полукокса.** Исследования показали [5], что воспламенение каплей водоугольного топлива на основе полукокса происходит, как правило, на поверхности каплей. Это обусловлено относительно малым содержанием летучих в полукоксе при высоком содержании углерода. Исходя из этого, можно существенно упростить математическую модель зажигания каплей ВУТ за счет рассмотрения только гетерогенного зажигания без учета процессов тепло- и массопереноса в пристенной области частицы в её малой окрестности.

Предполагалось, что в начальный момент времени частица ВУТ попадала в высокотемпературную среду и нагревалась за счет конвективно-радиационного нагрева. Фронт испарения с течением времени двигался вглубь частицы, в результате чего формировался сухой углеродный каркас. Водяные пары, фильтрующиеся через него наружу частицы, вступали в термохимическое взаимодействие с углеродом с образованием горючих газов  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . При этом предполагалось, что эти реакции протекали в малом по толщине приповерхностном слое частицы.

По результатам исследований получен ряд теоретических зависимостей, представленный на рисунке 2 и подробно описанный в [5].

Сравнительный анализ полученных экспериментальных и теоретических значений показывает их хорошее соответствие друг другу. Можно отметить линейный характер зависимостей времени задержки зажигания частиц ВУТ от их размеров в заданном диапазоне значений их размеров.

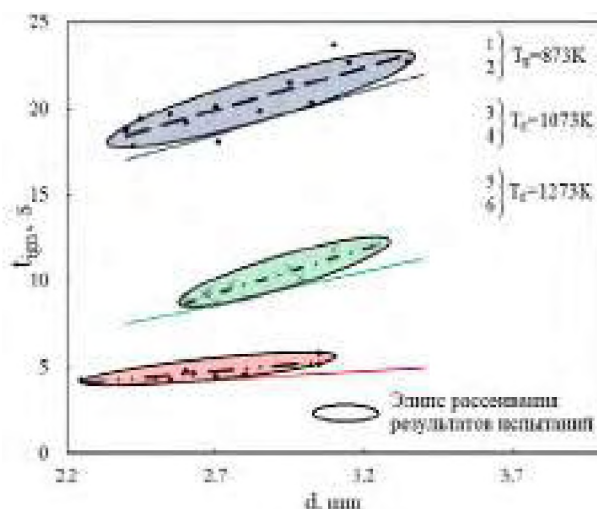


Рис. 2. Зависимости теоретических и экспериментальных значений времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненной на основе полукокса бурого угля:

1, 3, 5 – экспериментальные значения; 2, 4, 6 – расчетные значения времен задержки зажигания

**Заключение.** В работе показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований, их хорошее соответствие.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels, A.D. Nikitin, G.S. Nyashina, A.F. Ryzhkov, P.A. Strizhak // Science of The Total Environment. – 2021. – V. 772.
2. Experimental study of ignition sources of pre-coal fuels based on coke and semi-coke, K.Y. Vershinina, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // Koks I Chemistry. – 2017, V. 1. – pp. 29-38.
3. Flame Propagation Characteristics in the Boundary Layer of the Bio-Water-Coal Fuel Particle During its Ignition, S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, D.Yu Malyshev, Zh.A. Kostoreva, M.V. Purin // Combustion Science and Technology. – 2022.
4. The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals of different degree metamorphism, G.V. Kuznetsov, D. Yu Malyshev, Zh.A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva // Energy. – 2020. – V. 201.
5. Ignition and combustion characteristics of coal – water fuels based on coal & semi-coke, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // Combustion and Flame/ – 2022. – V. 246.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 2.0047.РНФ.2022 (РНФ 22-79-00223).

Научный руководитель: к.т.н. Д.Ю. Малышев, ассистент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.