

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ГРУППЫ КАПЕЛЬ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ УГОЛЬНОГО ШЛАМА

Д.С. Романов

Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-44

Введение. Суспензии на основе отходов могут эффективно сжигаться как в кипящем слое, так и при распылении в топке котла. Возможны условия, при которых поток разогретого воздуха препятствует быстрому и стабильному зажиганию капель, особенно при их низкой плотности в облаке и невысокой температуре окислительной среды (близкой к критической температуре зажигания). В [1] рассмотрено зажигание в потоке воздуха нескольких соседних капель композиционного суспензионного топлива на основе высоковлажного угольного отхода, отработанного турбинного масла и пластификатора. В исследовании рассматриваются случаи с двумя, тремя, четырьмя и пятью каплями. Взаимное расположение капель значительно влияло на зажигание топлива. Результаты показали [1], что время задержки зажигания может различаться примерно на 70 % для капель в группе.

Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование взаимного влияния группы капель и частиц низкосортных топлив при их зажигании и горении в потоке нагретого воздуха. Были рассмотрены топливные суспензии на основе воды и угольного шлама. Исследование имеет следующие оригинальные особенности: проанализировано влияние функциональной добавки (отработанное турбинное масло с долей 5 % масс.) на зажигание группы капель суспензии; определен масштаб взаимного влияния капель при их зажигании и горении в потоке низкотемпературного воздуха. Результаты актуальны для развития технологий сжигания отходов в составе топливных суспензий. Основной областью приложения полученных данных является стадия пуска котла, конструирование форсунок и горелок, выбор габаритов котла и разработка мероприятий, направленных на обеспечение стабильного воспламенения и качественного выгорания низкосортного топлива.

Экспериментальное исследование. Рисунок 1а иллюстрирует схему стенда, используемого для изучения зажигания и горения группы капель/частиц топлива. Система нагрева состояла из вентилятора-нагревателя и муфельной печи. Поток воздуха с помощью гофротрубы подавался в разогретую до 980 °С муфельную трубчатую печь и дополнительно прогревался. Температура потока воздуха на выходе трубки муфельной печи составляла около 600–620 °С. Скорость потока воздуха варьировалась путем изменения производительности вентилятора. Измерение скорости движения потока воздуха на выходе муфельной печи (V , м/с) осуществлялся анемометром ИСП-МГ4 (AtlasInvest). Анемометр имеет диапазон измерения 0,1–30 м/с; основную погрешность измерения скорости потока 0,05 м/с. В настоящей работе величина V варьировалась в диапазоне 0,1–1,2 м/с, характерном для предтопочных устройств, камер сгорания энергетических установок и реакторов.

Для размещения капель топлива использовалась конструкция на основе нихромовых проволок. Каждая капля и частица топлива фиксировалась двумя проволоками толщиной 0,2 мм. Проволоки крепились на металлический каркас, позволяющий передвигать их и тем самым варьировать расстояние между каплями/частицами топлива. Все эксперименты проводились с тремя каплями, расположенными соосно (рисунок 1б). В процессе экспериментов температура в окрестности капель или частиц топлива измерялась с помощью термопар (хромель-копель) в точках, указанных на рисунок 1б. Средний размер капель/частиц составлял около 2 мм. Расстояние от выхода муфельной печи до первой капли составляло около 30 мм.

Под ВУТ в работе подразумевается топливная смесь, состоящая из частиц угольного шлама и воды. Под ОВУТ подразумевается топливная смесь, состоящая из угольного шлама, воды и отработанного турбинного масла.

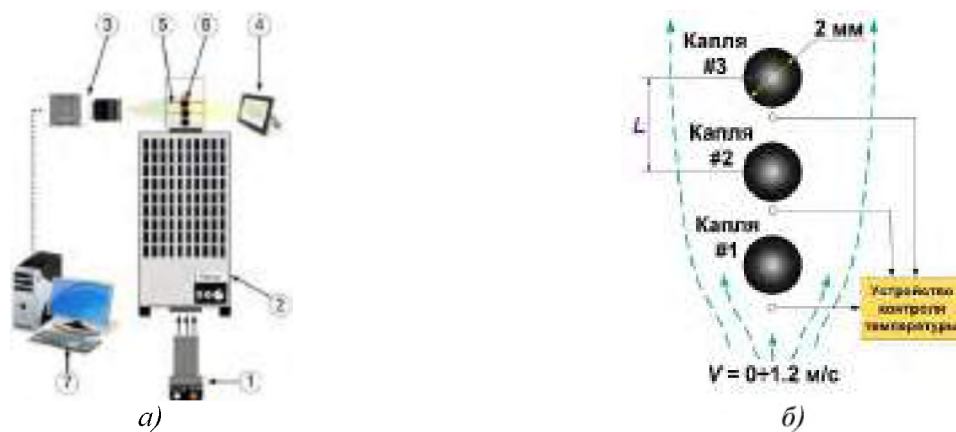


Рис. 1. Схема проведения экспериментальных исследований:

а) схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор-нагреватель; 2 – муфельная печь; 3 – видеочкамера; 4 – прожектор; 5 – нихромовая проволока; б) капля суспензии / частица угольного шлама; 7 – компьютер; б) схема расположения капель/частиц топлива с указанием точек измерения температуры

Результаты и обсуждение. На рисунках 2 и 3 представлены установленные зависимости времени задержки газофазного и гетерогенного зажигания капель суспензий от скорости движения потока нагретого воздуха. Поскольку капли в группе располагались на разном расстоянии от источника тепла, то температура в окрестности капель отличалась. Рисунок 3 снабжен температурными метками, которые указывают температуру, измеренную термопарой под каждой из капель (рисунок 1б), до ее зажигания. Как показали измерения, температуры в окрестности первой и третьей капли отличались, в среднем, на 25–30 °С. Эксперименты показали, что длительность предпламенной стадии неодинакова для капель в группе. Но это различие можно считать достаточно ограниченным. Выявленная разница значений τ_{d1} составила 10–15 % для капель суспензии на основе угольного шлама и 7–10 % для капель суспензии с добавкой отработанного масла. Несмотря на это, однозначно имела место тенденция более быстрого зажигания капли №1. Первая капля находилась в более высокотемпературной среде и именно это являлось доминирующим фактором для ее ускоренного зажигания. Длительность предпламенной стадии во многом также определяется содержанием летучих в топливе и скоростью формирования газо-воздушной смеси с концентрацией горючего, достаточной для воспламенения. При расположении капель, как в настоящих экспериментах (рисунок 1б), имел место отток продуктов термического разложения от капель/частиц топлива по направлению от первой к третьей. Проведенные эксперименты показали, что падение температуры, которое происходит в том же направлении, имеет большее значение для выполнения условий газофазного зажигания.

Для капель ВУТ зарегистрирован значительный рост (в 1,4–1,6 раза) времени задержки газофазного зажигания при увеличении скорости движения нагретого воздуха (рисунок 4а). Рост скорости потока от 0,1 м/с до 1,2 м/с приводил к снижению температуры в окрестности капель на 15–20 °С. Падение температуры происходило из-за недогрева воздуха в нагревательном элементе из-за большей скорости потока. На основе результатов ранних исследований (например, [1, 2]), можно сделать вывод о том, что указанное снижение температуры не могло быть главной причиной существенного изменения времени задержки зажигания. Очевидно, что влияние скорости движения потока воздуха в этих условиях доминирует.

Увеличение скорости потока усиливает эффект уноса выделившихся продуктов термического разложения.

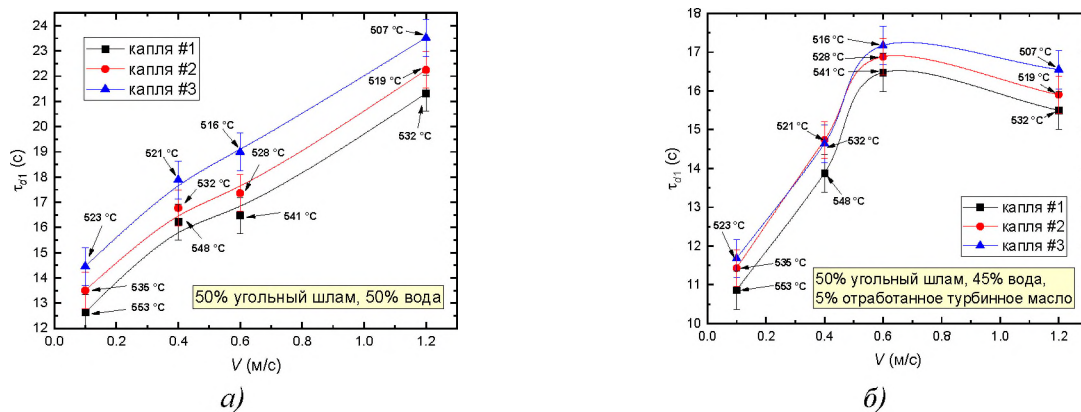


Рис. 2. Влияние скорости потока воздуха на времена задержки газофазного зажигания капель топливных смесей при $L \approx 5$ мм:
(а) ВУТ; (б) ОВУТ

Отток газов от топливного образца приводит к тому, что требуется больше времени для достижения условий зажигания в газовой фазе. Этот фактор особенно важен при невысокой температуре нагрева и недостатке летучих в топливе (например, когда используется смесь высокозольных отходов или даже каменный уголь или антрацит). Поэтому при распылении каплевоздушной смеси возможен сценарий, когда поток нагретого воздуха будет препятствовать быстрому зажиганию капель суспензионного топлива, особенно при низкой плотности капель в облаке и низкой температуре окислительной среды (близкой к температуре зажигания).

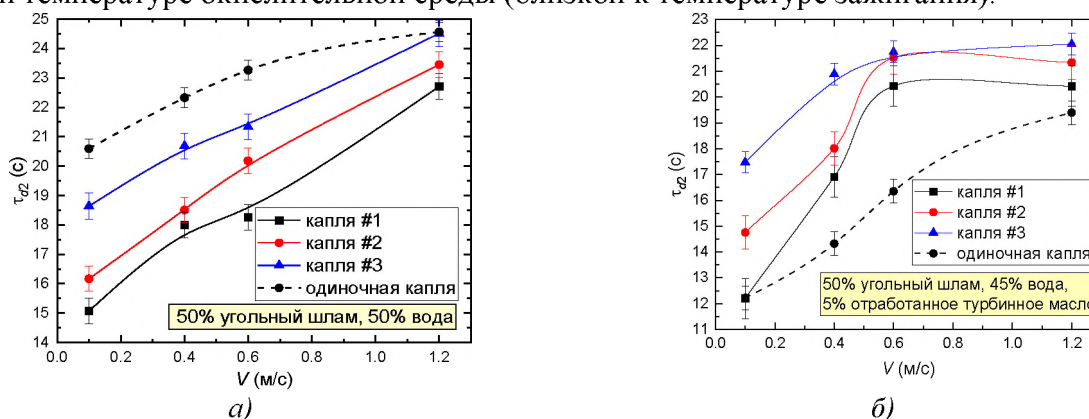


Рис. 3. Влияние скорости потока воздуха на время задержки гетерогенного зажигания капель топливных смесей при $L \approx 5$ мм:
(а) ВУТ; (б) ОВУТ

Несмотря на малое отличие длительности предпламенной стадии для капель в группе (при $L \approx 5$ мм), между ними определенно возникало взаимодействие. Это подтверждается тем, что в аналогичных условиях нагрева газофазное зажигание одиночной капли не происходило. Одиночная капля зажигалась в гетерогенном режиме. Времена задержки гетерогенного зажигания группы капель при разных скоростях потока воздуха показаны на рисунке 4. Приведены также данные для одиночной капли, положение которой соответствовало капле #1 на рисунке 1б. Группа капель ВУТ зажигались гетерогенно быстрее, чем одиночная. При этом группа капель суспензии с добавкой турбинного масла (ОВУТ) зажигалась гетерогенно позже, чем одиночная (рисунок 4б) из-за достаточно длительной стадии пламенного горения. В течение этого времени (около 3–5 с) коксовый остаток недостаточно снабжается окислителем для устойчивого гетерогенного зажигания.

Закключение. Рост скорости потока активизировал пламенное горение и также способствовал появлению объединенной пламенной зоны. Одновременно с этим увеличение скорости низкотемпературного потока приводило к значительному увеличению задержек воспламенения капель суспензии (в 1,2–1,6 раза) за счет уменьшения температуры в зоне теплообмена

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. Пурин¹, Ж.А. Косторева²
Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова ¹группа А0-44, ²к.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 NO_x , что обусловлено окислением синильной кислоты. Исходя из этого целесообразным является предварительный пиролиз угля, в ходе которого удаляются наиболее антропогенные продукты пиролиза.