

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОНКОРАСПЫЛЕННЫХ ВОДО-УГОЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

П.П. Ткаченко

Научный руководитель - научный сотрудник Р.И. Егоров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Несмотря на непрерывный прогресс топливных технологий, уголь до сих пор является одним из основных видов промышленного топлива. Горение углей сопряжено с высоким уровнем выбросов вредных газов, что и обусловило стойкий интерес к разработке технологий экологичного сжигания углей. Результаты экспериментальных исследований по изучению оптимальных способов применения водо-угольных топлив (ВУТ) в течение последних нескольких лет [5-8] показали возможность их низкотемпературного зажигания и горения (800-1000 К) со сниженным уровнем вредных выбросов. Возможность использования отходов углеобогащения в составе ВУТ позволяет получить дешевое и эффективное котельное топливо, обладающее низкой пожароопасностью при хранении и применении в сравнении с высокорекреационной угольной пылью [1]. Одной из основных проблем при использовании ВУТ является длительное время задержки зажигания, обуславливающее существенный рост габарита камер сгорания [2]. Ускорение зажигания топлив при заданных температурах возможно с помощью более тонкого их распыления при впрыске в топку. Однако, особенности распространения многокомпонентных суспензий в объеме камеры сгорания исследованы недостаточно, чтоб эффективно оценить оптимальную дисперсность топливного аэрозоля, а также выяснить оптимальный дизайн камеры сгорания.

В связи с вышесказанным представляет интерес исследование особенностей распространения тонкораспыленных (характерный размер капель до 500 мкм) аэрозолей ВУТ, анализ зависимостей размеров и скоростей капель по мере их удаления от форсунки. Проводить такие исследования на действующих энергетических установках затруднительно. Нами был разработан стенд (Рис.1), позволяющий наблюдать эволюцию параметров аэрозоля при низких температурах, на начальных этапах его прогрева. На данном стенде была проведена серия экспериментов по распылению водо-угольных суспензий с помощью радиальной форсунки, имитирующей систему впрыска топлива в топочную камеру. Экспериментальный стенд состоит из объемного макета топочной камеры (4), в стенку которой установлена форсунка (3), системы подачи топлива (1), и системы оптической диагностики параметров аэрозольных потоков методом «теневого фотоаграфии» («Shadow Photography»), состоящей из скоростной видеокамеры Photron Fastcam SA1 (5) и мощного источника света (6). Макет топочной камеры сделан в виде жесткой рамной конструкции размером 900x600x900 мм. Топливо в форсунку подается под давлением порядка 2 атм., создаваемым с помощью компрессора (2).

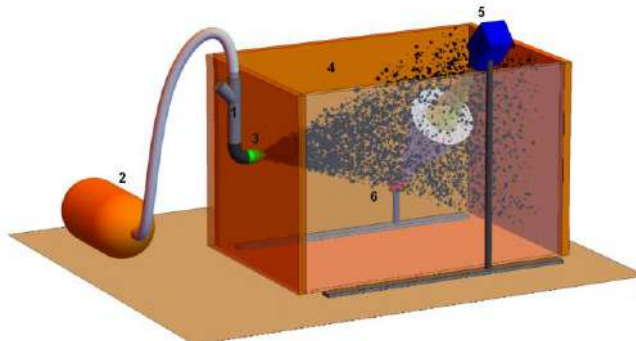


Рис.1 Схема экспериментального стенда. На схеме показаны 1 – система подачи топлива; 2 – компрессор; 3 – форсунка; 4 – объемная модель топочной камеры; 5 – высокоскоростная камера; 6 – светодиодный осветитель.

В ходе экспериментов топливная суспензия заливалась в емкость системы подачи (1), объем заливаемой суспензии в каждом эксперименте варьировался в диапазоне 80-100 мл. При подаче воздуха под давлением на столб ВУТ, суспензия распылялась в объеме стенда при комнатной температуре. Топливные суспензии готовились из порошков угля марок СС и антрацита с содержанием твердой части ~20 вес.% и размером частиц не более 200 мкм. Форсунка обеспечивала распыление ВУТ с требуемым уровнем дисперсности, однако не позволяла распылять более густые суспензии. В рамках задачи исследования распространения тонкораспыленного аэрозольного потока ВУТ использованная концентрация твердой части суспензии позволяет сделать основные заключения.

Полет аэрозольных частиц в различных сечениях объема стенда (на расстояниях 20, 40 и 60 см от форсунки) наблюдался с помощью видеокамеры, оборудованной высокоразрешающей оптикой (порядка 4 мкм/пикс) на скорости в 20000 кадров/сек. Обработка кадров видеозаписи с помощью оригинальной программы позволяла с высокой точностью оценить распределение частиц аэрозоля по размерам (метод теневой фотографии) и скоростям (метод PTV) подобно подходу, примененному в [3-4].

На Рисунках 2а и 2б представлены распределения частиц топливного аэрозоля по размерам и по скоростям, нормированные на общее число частиц, наблюдавшееся в данном сечении потока. По мере удаления от форсунки плотность потока частиц падает за счет поперечного расплывания потока и нормировочные

множители соотносятся как 1:10:44 для сечений на расстоянии 20, 40 и 60 см от форсунки. Из графиков видно, что по мере удаления от форсунки растет наивероятнейший размер частиц со 100 мкм до 280 мкм. Однако в среднем сечении (40 см) видно наличие очень большого числа мелких (менее 20 мкм) частиц, которые исчезают при дальнейшем распространении. Полуширина пиков распределения по размерам в начальном и конечном сечениях очень близка, а в среднем сечении существенно меняется.

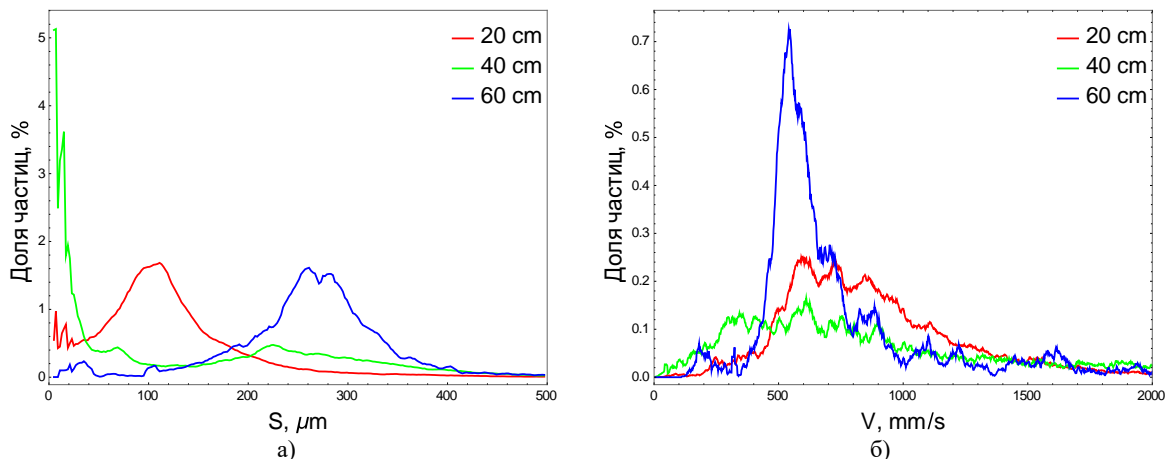


Рис. 2 Распределение частиц водо-угольной суспензии по размерам (а) и скоростям (б) для поперечных сечений аэрозольного потока на расстоянии 20, 40 и 60 см от форсунки.

Распределение по скоростям показывает, что наивероятнейшие скорости частиц аэрозоля падают по мере удаления от форсунки с 800-900 мм/с до 550-600 мм/с. При этом полуширина пика сначала растет, а потом резко сужается.

Проведенный дополнительно мониторинг температуры аэрозольного потока с помощью высокоскоростной тепловизионной съемки показал, что при распространении аэрозоля от начального до конечного обзорных сечений происходит снижение температуры частиц ВУТ на ~2 градуса.

Все показанное позволяет сделать вывод, что по мере удаления от форсунки аэрозольный поток водо-угольной суспензии испытывает существенные изменения своего компонентного состава. Расположение размерного пика в среднем сечении (40 см) с резким скачком доли мелких фракций однозначно свидетельствует об испарении воды с уменьшением размера частиц, содержащих уголь, резким уменьшением размеров «пустых» капель воды, а также их полным высыханием (в дальнем сечении доля мелких фракций очень мала). Сужение пика распределения по скоростям говорит о том, что поток становится более однородным по скорости, испытывая замедление после сушки.

Область камеры стенда на расстоянии от 20 до 60 см от форсунки представляет собой зону максимально насыщенную водяным паром, тогда как после 60 см распространения аэрозоль представляет собой угольную пыль, с влажностью многократно ниже изначальной.

Полученные результаты позволяют заключить, что при впрыске ВУТ в реальную топку с высокой температурой будет происходить быстрое испарение воды на начальных этапах распространения аэрозольного потока. Таким образом, области зажигания поток ВУТ достигнет сильно обезвоженным, что приведет к резкому падению экологических показателей. С другой стороны, зона вблизи форсунки будет содержать большое количество водяного пара, что приведет к росту неравномерности прогрева камеры сгорания. Таким образом, сжигание ВУТ более выгодно производить в виде раздельного впрыска тонкодисперсного угольного аэрозоля с небольшим количеством воды, с отдельным каналом подачи водяного пара (или аэрозоля) непосредственно в окрестности области зажигания топлива.

Литература

1. Coal Facts 2014. Based on data provided by the International Energy Agency and the BP Statistical Review of World Energy. London: World Coal Association, 2014. – 3 P.
2. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Mathematical simulation of the ignition of coal particles in airflow // Solid Fuel Chemistry. – 2015. – V. 49, № 2. – P. 73–79.
3. Jing J., Xiao F., Yang L., Wang S., Yu B. Measurements of velocity field and diameter distribution of particles in multiphase flow based on trajectory imaging // Flow Measurement and Instrumentation. – 2018. – V. 59. – P. 103-113.
4. Lamadie F., Charton S., De Langlard M., Ouattara M., Sentis M.P.L., Debayle J., Onofri F.R.A. // Development of optical techniques for multiphase flows characterization. – Proceedings of the ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting. – 2017. – FEDSM2017-69188.
5. Lishtvan I.I., Falyushin P.L., Smolyachkova E.A., Kovrik S.I. Fuel suspensions based on fuel oil, peat, waste wood, and charcoal // Solid Fuel Chemistry. – 2009. – V. 43. – P.1–4.
6. Red'kina N.I., Khodakov G.S., Gorlov E.G. Coal fuel slurry for internal combustion engines // Solid Fuel Chemistry. – 2013. – V. 47. – P. 306–314.
7. Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. Анализ антропогенных выбросов при сжигании угольных топлив и отходов углепереработки // Кокс и химия. – 2017. – № 4. – С. 40–46.
8. Ходаков Г. С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35-45.