
УДК 532

П.П. ТКАЧЕНКО, аспирант ИШЭ (ТПУ), С.С. КРОПОТОВА, аспирант
ИШЭ (ТПУ), Н.Е. ШЛЕГЕЛЬ, аспирант ИШЭ (ТПУ)
Научный руководитель П.А. СТРИЖАК, д.ф.-м.-н., профессор ИШЭ (ТПУ)
г. Томск

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ КОМПОНЕНТОВ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОДОМАСЛЯНЫХ СУСПЕНЗИЙ С
УГОЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Экономические показатели технологий, базирующихся на пиролизе и газификации углей, пока сложно считать высокими [1]. Это сдерживает их широкое применение в реальном секторе экономики государств [1, 2]. Однако при реализации технологий сжигания композиционных топлив, содержащих частицы угля, имеются определенные сложности, которые до настоящего времени не решены в полной мере. Одной из таких сложностей является стабильное распыление суспензий форсуночными устройствами [3, 4]. Вся связи с этим актуальна задача экспериментального изучения режимов и последствий соударений капель и частиц перспективных компонентов суспензионных топлив. Анализ результатов [5, 6] показывает, что основными компонентами являются угли разных марок, вода и жидкий горючий компонент (на примере различных отработанных масел).

Цель настоящей работы – построение карт режимов соударений капель и твердых частиц, представляющих перспективные компоненты водомасляных суспензий при разной последовательности и различных условиях, соответствующих топливным технологиям. Новизна исследования состоит в изучении условий агломерации и разделения частиц угля и капель воды и масла при разной последовательности их взаимодействия и варьировании параметров соударений в широких диапазонах.

При проведении экспериментов в качестве основных жидкостей использовались дистиллированная вода и отработанное моторное масло. В качестве твердых фрагментов выбирались марки углей, наиболее часто используемые при изготовлении композиционных жидких топлив [3, 7]: бурый уголь, коксующийся уголь (марка «К»), фильтр-кек коксующегося угля (марки «К») и антрацит.

Для изучения взаимодействия капель и частиц перспективных компонентов водомасляных эмульсий использовался стенд, представленный на рис. 1. Экспериментальный стенд включал в себя

вакуумный держатель твердых частиц, дозатор жидких капель и системы регистрации.

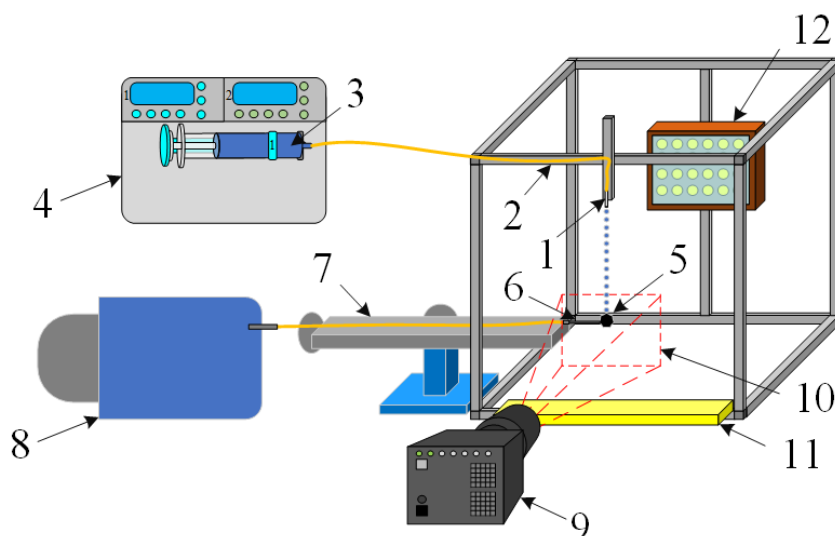


Рисунок 1 – Схема стенда с основными элементами: 1 – сменные сопла различного диаметра; 2 – силиконовые трубки; 3 – шприц с жидкостью; 4 – шприцевой насос; 5 – углеродистая частица; 6 – держатель частицы; 7 – трехосевой координатный механизм; 8 – вакуумный насос; 9 – высокоскоростная видеокамера; 10 – область регистрации; 12 – прожектор; 11 – емкость для сбора жидкости.

Рассматривались столкновения капель масла с угольными частицами, имитирующие первичное столкновение в топочной камере, и столкновения с пропитанными маслом частицами. В первом случае между закрепленной на вакуумном держателе угольной частицей и свободно падающими каплями масла устанавливалась заслонка с емкостью для сбора масла. После начала записи на высокоскоростной видеокамере заслонка открывалась и регистрировалось столкновение капли масла с сухой угольной частицей. Во втором случае на угольную частицу перед началом видеорегистрации капельным дозатором наносилась 1 капля моторного масла объемом 5 мл.

При обработке видеок кадров выделялось 2 основных режима взаимодействия: агломерация (оседание капли на угольной частице) и разделение растяжением (разделение капли жидкости и угольной частицы с формированием одного или нескольких вторичных фрагментов). Рассчитывался безразмерный линейный параметр взаимодействия $B = b / (R_{d1} + R_{d2})$ (b – расстояние между центрами масс капель, R_{d1} – радиус первой капли, R_{d2} – радиус второй капли) число Вебера $We = 2 \cdot \rho \cdot R_d \cdot U_d^2 / \sigma$ (ρ – плотность жидкости, U_d – скорость капли, σ – поверхностное натяжение жидкости), а также соотношение размеров капель и частиц Δ .

На рис. 2 приведены типичные видеограммы процесса соударения капель дистиллированной воды и отработанного моторного масла различных размеров с углеродистыми частицами фильтр-кека марки «К» размером 1,5–3 мм при варьировании размеров капель. Из видеограмм видно, что основным параметром, влияющим на реализацию режима разделения растяжением и формирование вторичных капель при постоянной скорости, является отношение размера частицы к капле. Как видно из рис. 2 при размере капли жидкости 2,9 мм после столкновения с углеродистой частицей размером 1,5–1,8 мм гарантировано реализуется режим разделения растяжением. При столкновении с сухой частицей формировалось более 1 вторичного фрагмента. При уменьшении размеров капель до 2,2 мм регистрировался режим агломерации, характеризующийся налипанием капли на углеродистую частицу. При этом реализация режима агломерации не зависела от смоченности частицы, он зарегистрирован как для сухих, так и для предварительно смоченных частиц.

Из рис. 2а наглядно прослеживается зависимость режимов взаимодействия и формирование вторичных фрагментов от свойств жидкости. В случае взаимодействия капель воды с угольными частицами жидкость после падения стекала или скатывалась с поверхности в большинстве случаев. Это явление зарегистрировано для всех $\Delta < 2$. Из этого следует, что для устойчивой агломерации воды и угольной частицы последняя должна быть не менее чем в 2 раза больше капли. Такие закономерности справедливы для низкой скорости движения капель. При увеличении скорости их движения путем увеличения высоты сброса капель регистрировался режим разделения растяжением. Капли отработанного моторного масла с высокой вязкостью налипали на сухие угольные частицы (рис. 2б), образуя на их поверхности локальные скопления жидкости. Однако высокая вязкость и относительно малый объем масла не позволял сформировать равномерную пленку. При соударении капель отработанного моторного масла со смоченными угольными частицами вследствие уже имеющейся пленки масла капля растекалась по частице равномерно, создавая плотную оболочку на частице. В таком случае при попадании в высокотемпературную газовую среду, соответствующую топочным камерам сгорания, сначала произойдет зажигание масла и только после его частичного выгорания угольные частицы получают доступ окислителя.

Для решения некоторых проблем, возникающих при использовании водоугольных и органо-водоугольных топлив [1, 4, 7] может быть использован подход раздельной подачи их компонентов в топочные камеры. В таком случае необходимо четко идентифицировать предельные

условия для коагуляции и агломерации жидкостей и твердых частиц композиционных топлив.

Карты режимов взаимодействия капель перспективных компонентов водомасляных суспензий с углеродистыми частицами при варьировании отношения размеров частицы к капле приведены на рис. 3.

При $\Delta = 1$ (рис. 3) очевидно преобладание режима разделения растяжением над режимом агломерации при $We = 8-40$ для всех случаев столкновения капли воды с угольной частицей.

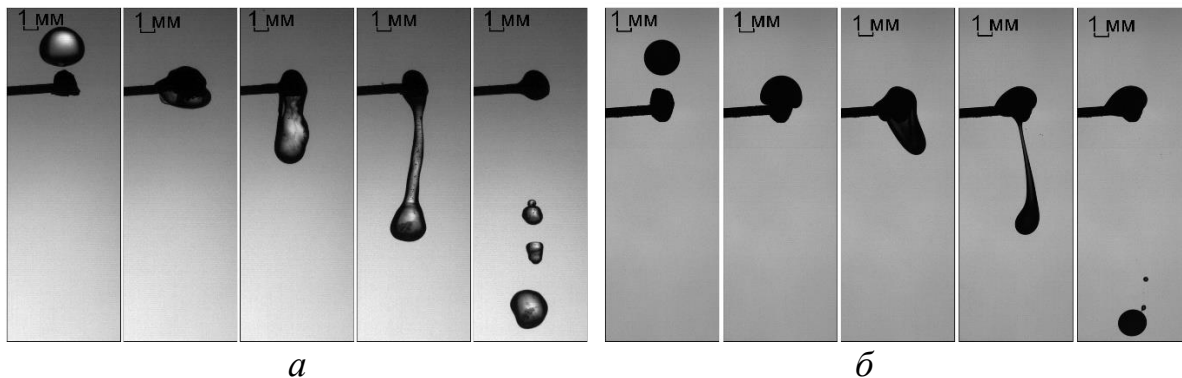


Рисунок 2 – Кадры видеозаписей взаимодействия капель жидкости с углеродистыми частицами фильтр-кека коксующегося угля (марка «К») при $\Delta \approx 0,5$: *a* – вода; *б* – отработанное моторное масло.

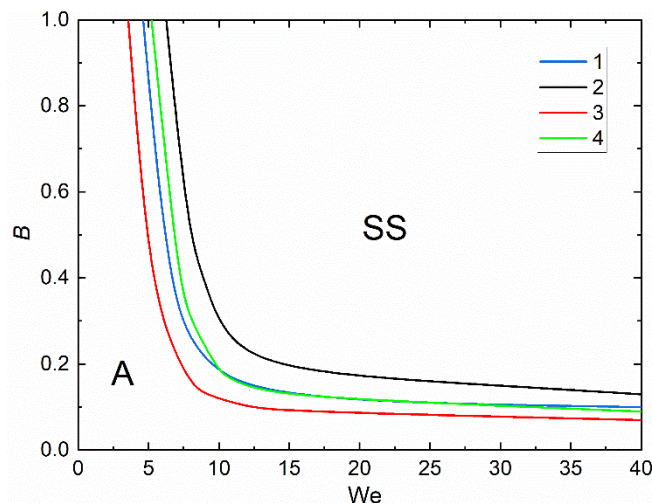


Рисунок 3 – Карта режимов взаимодействия капель дистиллированной воды с углеродистыми частицами различных марок углей при $\Delta \approx 1$: 1 – сухая частица фильтр-кека коксующегося угля (марка «К»); 2 – смоченная частица фильтр-кека коксующегося угля (марка «К»); 3 – сухая частица антрацита; 4 – смоченная частица антрацита.

Режим агломерации зарегистрирован только при $B < 0,2$ для всех типов углей вне зависимости от смоченности их поверхности. При этом

дополнительные эксперименты с увеличением значения числа Вебера до 60–80 установили наличие только режима разделения растяжением. Данный факт объясняется большим преобладанием сил инерции над силами поверхностного натяжения. Данные пороговые значения дают представление, что для устойчивой агломерации капли воды и угольной частицы необходима низкая относительная скорость движения. В случае движения и частицы и капли низкая относительная скорость движения может быть достигнута за счет изменения угла столкновения.

Результаты исследований представляют интерес для развития технологий вторичного измельчения капель жидкостей и, наоборот, агломерации частиц и капель. С их использованием можно решить проблемы налипания композиционных топлив на форсунки из-за активного испарения воды при высокой температуре и проблему разделения компонентов органо-водоугольных топлив после первичного измельчения форсунками и соплами.

Список литературы

1. Adnan M.A., Hidayat A., Hossain M.M., Muraza O. Transformation of low-rank coal to clean syngas and power via thermochemical route // *Energy*. - 2021.- N 236. -121505.
2. Zeng S., Zhou H., Qian Y. Review and techno-economic analysis of coal pyrolysis to liquid and oil shale to liquid processes // *Huagong Xuebao/CIESC J.* - 2017.- 68.- P.3658–68.
3. Shadrin E.Y., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*.- 2021.- N 303.- 121182.
4. Egorov R.I., Tkachenko P.P., Taburchinov R.I., Chulkov A.O. The propagation and ignition of the finely dispersed coal-water aerosol // *Fuel*.- 2020.-263.
5. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // *Energy*.- 2021.- N 230.-120900.
6. Zhu M., Zhang Z., Zhang Y., Setyawan H., Liu P., Zhang D. An experimental study of the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar-glycerol-water slurry fuels. // *Proc Combust Inst*.- 2017.-N 36.- P. 2475–82.
7. Wu X., Gong Y., Guo Q., Xue Z., Yu G. Experimental study on the atomization and particle evolution characteristics in an impinging entrained-flow gasifier // *Chem Eng Sci*.- 2019.- N 207.- P. 542–55.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-71-10002-П
(<https://rscf.ru/en/project/21-71-03001/>)

Ткаченко Павел Петрович, аспирант, ТПУ, 634050, г. Томск, ул.
Ленина, д. 30, ppt1@tpu.ru

Кропотова Светлана Сергеевна, аспирант, ТПУ, 634050, г. Томск, ул.
Ленина, д. 30, ssk22@tpu.ru

Шлегель Никита Евгеньевич, аспирант, ТПУ, 634050, г. Томск, ул.
Ленина, д. 30, nes6@tpu.ru

Стрижак Павел Александрович, д.ф.-м.-н., профессор ТПУ, 634050,
г. Томск, ул. Ленина, д. 30, pavelspa@tpu.ru