

УДК 532.5

Р.М. ФЕДОРЕНКО, аспирант гр. А1-44 (ТПУ), Д.В. АНТОНОВ, аспирант
гр. А0-11 (ТПУ), Р.С. ВОЛКОВ, к.т.н., доцент (ТПУ)
Научный руководитель П.А. СТРИЖАК, д.ф.-м.н., профессор (ТПУ)
г. Томск

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ ФРАГМЕНТОВ, ПОЛУЧАЕ- МЫХ ПРИ МИКРО-ВЗРЫВНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ОРГАНОВОДО- УГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Микро-взрывное измельчение топливных композиций в процессе нагрева приводит к образованию большого числа вторичных фрагментов, размеры (диаметры) которых зачастую не превышают нескольких десятков микрон. При этом такие капли имеют скорости движения после микро-взрыва, как правило, от 0,5 до 5 м/с. Как следствие, их принято считать быстро перемещающимися и, соответственно, интенсивно испаряющимися в высокотемпературной газовой среде. Такие эффекты позволяют многократно увеличить площадь поверхности жидкости и скорости фазовых превращений, интенсифицировать смешение паров горючего с окислителем при формировании парогазовой смеси, снизить инерционность зажигания, повысить полноту выгорания топлива, уменьшить недожег, а также способствуют снижению антропогенных выбросов [1–4].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование влияния размеров и концентрации твердых частиц в исходных каплях на распределения по размерам вторичных фрагментов, получаемых при микро-взрывной фрагментации органоводоугольных суспензий.

Методика проведения экспериментов аналогична использованной в [5] при конвективном нагреве. В проведенных экспериментах в качестве низкокипящей жидкости использовалась дистиллированная вода, соответствующая ГОСТ 6709-72. В качестве горючей жидкости использовано рапсовое масло. Выбор данного типа горючей жидкости обусловлен тем, что при его применении возможен максимальный эффект микро-взрывного распада капель в соответствии с результатами сравнительного анализа, приведенными в [1,2]. Рапсовое масло является перспективным биотопливом [6] и существенно повышает относительные экологические показатели [7] работающих двигателей и энергоустановок. Относительные объемные концентрации рапсового масла в объединенной капле η составляли 70 об% для получения топливных композиций с максимальным эффектом микро-

взрыва. Для генерации капель органоводоугольных суспензий использовались электронные дозаторы Finnpiquette Novus с шагом варьирования генерируемого объема 0,01 мкл. Методика генерации капель органоводоугольных суспензий аналогична, использованной в [8]. Начальный размер капли R_{d0} вычислялся при анализе кадров видеogramм перед началом нагрева. С использованием масштабного коэффициента вычислялись четыре диаметра капли в разных сечениях и усреднялись. Из значения среднего диаметра капли определялся R_{d0} . С учетом разрешения камеры и масштабного коэффициента погрешность вычисления R_{d0} не превышала 0,001 мм.

В качестве твердых примесей выбраны бурый и каменный угли для того, чтобы гидрофобность и гидрофильность твердых частиц существенно отличались. Составы с бурым углем имели существенно большую вязкость по сравнению с композициями на основе каменного угля. Для изучения влияния размеров твердых частиц в составе органоводоугольных суспензий на процессы микро-взрывного измельчения приготавливалась угольная пыль с различной тониной помола Δ (40; 100; 140 мкм). Использовались роторная мельница (Pulverisette 14 Fritsch), сита (для выделения необходимой фракции) и устройство рассева. Методика измельчения исходного угля аналогична использованной в [9]. Далее полученные составы перемешивались в течение 15 минут с помощью миксера до создания однородной массы. Контроль последней выполнялся с помощью световой системы и высокоскоростной видеокамеры. Массовая концентрация твердых частиц в воде μ при проведении экспериментов варьировалась в диапазоне от 0 до 5 мас%.

Для вычисления числа (N_{cd}) и размеров (r_{cd}) вторичных фрагментов использовался авторский программный код в Mathematica. Его описание и соответствующие пояснения приведены в [10]. На полученных в ходе экспериментов видеокадрах определялись моменты распада исходных капель с образованием вторичных фрагментов, которые затем конвертировались в формат tiff и загружались в Mathematica. Программа для анализа последствий распада топливных композиций состояла из двух частей: 1 – поиск порога бинаризации; 2 – основной обработчик (выделение элементов, вычисление их числа и размеров с учетом масштабного коэффициента). В рамках каждой части реализовывалось вычитание фона. С помощью главных функций основного обработчика (MorphologicalBinarize и Median filter) осуществлялось выделение контрастных объектов – вторичных фрагментов на светлом фоне. Каждый ограниченный объект представлялся в виде сферической капли, имеющей размер ограниченного объекта. Далее происходил расчет количества жидкостных фрагментов и их определение размеров. Погрешности определения размеров вторичных фрагментов с использованием первого подхода не превышали 4%.

На рис. 1 представлены зависимости среднего размера вторичных фрагментов от температуры греющей среды при варьировании концентрации твердых частиц в капле для составов на основе: *а* – бурого угля, *б* – каменного угля. Минимальные температуры на рис. 1 соответствуют температурам, при которых в результате распада исходных капель топливных композиций образуются вторичные фрагменты. Характер кривых для всех составов идентичный – с ростом температуры средний размер вторичных фрагментов нелинейно уменьшается. Это связано с нелинейными (экспоненциальными) скоростями испарения горючих и негорючих жидкостей. Размеры вторичных фрагментов также уменьшаются при снижении концентрации твердых частиц в капле. Это может быть связано с агломерацией частиц внутри капли в процессе нагрева, чем выше концентрации твердых примесей, тем более крупные частицы образуются в капле. Из-за того, что более крупные частицы адсорбируют большее количество жидкости, то при распаде образуются более крупные вторичные фрагменты. Максимальное изменение размера не превысило 15%. С увеличением температуры влияние концентрации твердых частиц на размеры вторичных фрагментов снижается. Полученный результат может быть обусловлен повышением интенсивности фрагментации с ростом температуры.

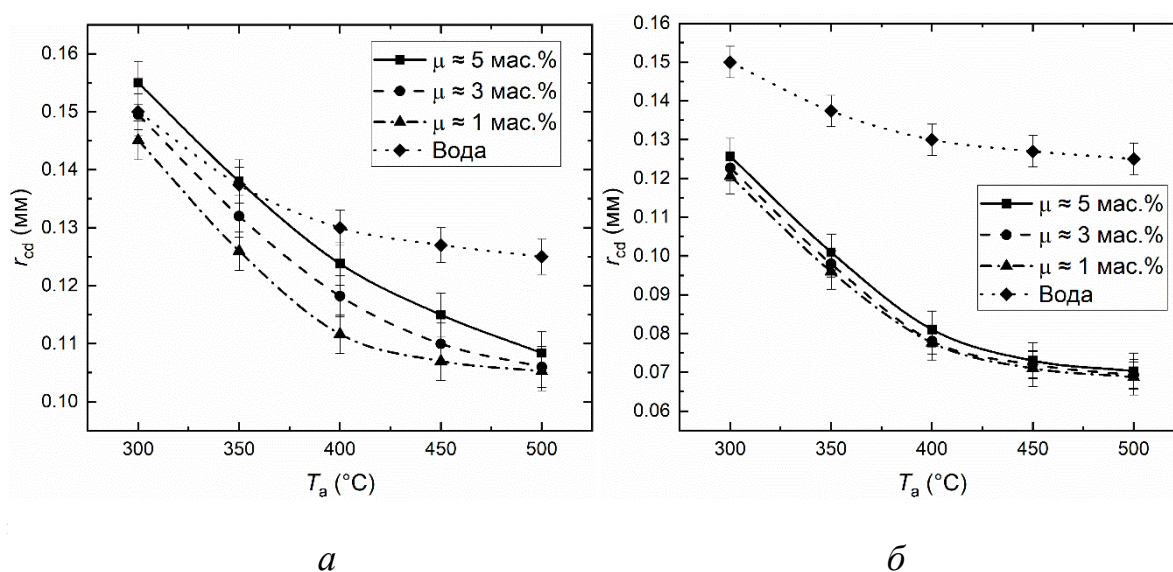


Рис. 1. Зависимости среднего размера вторичных фрагментов от температуры воздушного потока T_a при варьировании концентрации твердых частиц μ в капле ($U_a \approx 3$ м/с, $R_{d0} \approx 1,21$ мм, $\eta \approx 70$ об%, $\Delta \approx 100$ мкм): *а* – на основе бурого угля, *б* – на основе каменного угля

На рис. 2 представлены зависимости средних размеров вторичных фрагментов от температуры воздушного потока при варьировании размеров твердых частиц для составов на основе: *а* – бурого угля, *б* – каменного угля. Общей тенденцией является то, что средний размер вторичных фрагментов

уменьшается с ростом температуры воздушного потока для обоих составов, что связано с тем, что распад капель при повышении температуры происходил более интенсивно. Также важную роль играл фактор испарения, т.е. мелкие вторичные фрагменты быстро испарялись сразу после микро-взрывного распада родительской капли. Полученные результаты демонстрируют, что средний размер вторичных фрагментов снижается с уменьшением размеров угольных частиц. Вторичные фрагменты с минимальными размерами (радиусами) образуются при фрагментации капель, в составе которых находятся частицы угля с наименьшим размером (60 мкм). Это связано с тем, что крупные частицы уносят с собой большее количество жидкости при распаде. Также важную роль играет фактор, обусловленный тем, что мелкие твердые частицы угля при агломерации формируют малопористую структуру приповерхностных слоев капли по сравнению с крупными частицами. Как следствие, чем крупнее частицы, тем длительнее нагрев капли. Максимальное изменение размеров вторичных фрагментов при варьировании данного фактора не превысило 40%.

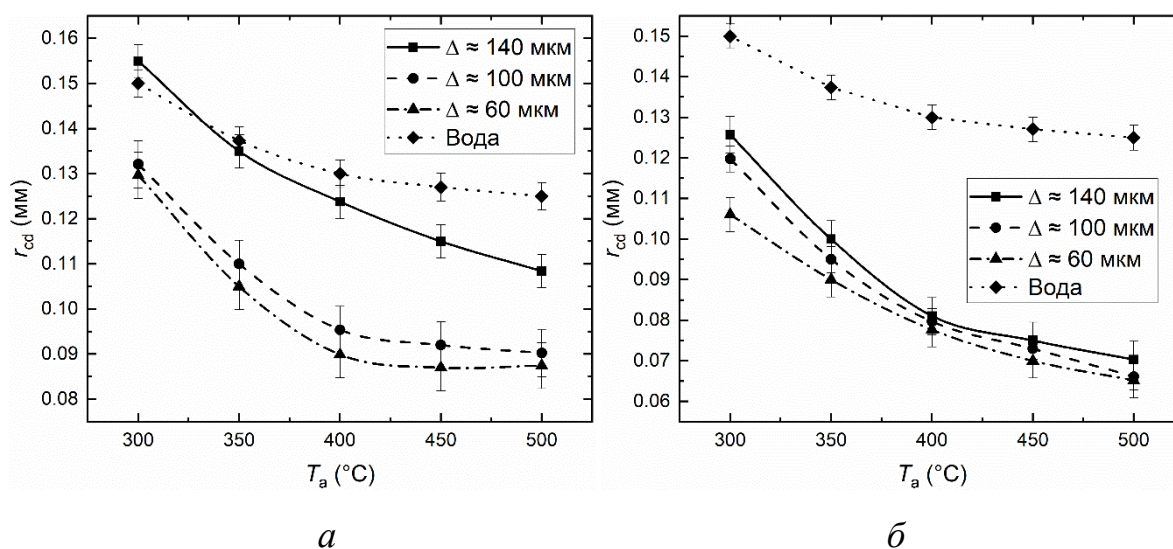


Рис. 2. Зависимости среднего размера вторичных фрагментов от температуры воздушного потока T_a при варьировании размеров твердых частиц Δ в капле ($U_a \approx 3$ м/с, $R_{d0} \approx 1,21$ мм, $\eta \approx 70$ об%, $\mu \approx 5$ мас%): *a* – на основе бурого угля, *b* – на основе каменного угля

Проанализировано влияние размеров твердых частиц и их концентрации на средний размер вторичных фрагментов. Полученные результаты показали существенное снижение средних размеров вторичных фрагментов при уменьшении размеров твердых частиц угля в исследованном диапазоне. Так, при снижении размеров твердых частиц (от 140 мкм до 60 мкм) в капле возможно снижение средних размеров вторичных фрагментов до 40%. Мак-

симальное снижение среднего размера вторичных фрагментов при уменьшении концентрации твердых частиц в капле от 5 масс% до 1 масс% составляет не более 20%.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 21-71-10008).

Список литературы:

1. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Characteristics of the Aerosol Cloud Formed during Microexplosive Fragmentation of a Two-Component Liquid Drop // Tech. Phys. Lett. 2019. Vol. 45, № 8. P. 805–808.
2. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // Acta Astronaut. Pergamon, 2019. Vol. 160. P. 258–269.
3. Sazhin S.S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems // Fuel. Elsevier, 2017. Vol. 196. P. 69–101.
4. Seifi M.R. et al. Statistical evaluation of the effect of water percentage in water-diesel emulsion on the engine performance and exhaust emission parameters // Energy. Pergamon, 2019. Vol. 180. P. 797–806.
5. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Child droplets produced by micro-explosion and puffing of two-component droplets // Appl. Therm. Eng. 2020. Vol. 164. P. 114501.
6. Sudan Reddy Dandu M., Nanthagopal K. Tribological aspects of bio-fuels – A review // Fuel. Elsevier, 2019. Vol. 258. P. 116066.
7. Vershinina K. et al. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state // Appl. Therm. Eng. Pergamon, 2019. Vol. 156. P. 51–62.
8. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Breakup and explosion of droplets of two immiscible fluids and emulsions // Int. J. Therm. Sci. Elsevier Masson, 2019. Vol. 142. P. 30–41.
9. Vershinina K., Shabardin D., Strizhak P. Burnout rates of fuel slurries containing petrochemicals, coals and coal processing waste // Powder Technol. Elsevier, 2019. Vol. 343. P. 204–214.
10. Antonov D. et al. Analysis of statistical data on drop collisions in an aerosol flow during experiments // EPJ Web Conf. / ed. Markovich D.M., Kuibin P.A., Vorobyev M.A. 2019. Vol. 196. 00013.

Информация об авторах:

Федоренко Роман Михайлович, аспирант гр. А1-44, ТПУ, 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, vfedrm@gmail.com

**VI Всероссийская научно-практическая конференция
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»
147-6 8-10 декабря 2021г.**

Антонов Дмитрий Владимирович, аспирант гр. А0-11, ТПУ, 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, antonovdv132@gmail.com

Волков Роман Сергеевич, к.т.н., доцент, ТПУ, 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, romanvolkov@tpu.ru

Стрижак Павел Александрович, д.ф.-м.н., профессор, ТПУ, 634034, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, pavelspa@tpu.ru