

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПА И КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСЕЙ В КАПЛЯХ ЖИДКОСТИ  
КОМБИНИРОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ РЕГИСТРАЦИИ

Волков Р.С., Керимбекова С.А.

Научный руководитель профессор П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Большинство известных работ в области энергетики посвящены вопросам минимизации антропогенных выбросов [4], перспективам использования альтернативных, в том числе и возобновляемых источников энергии [2,4], а также разработке новых типов накопителей электрической энергии [3]. Не менее перспективным направлением, с точки зрения решения экологических проблем и утилизации отходов, а также производства электрической энергии, является использование суспензий на основе отходов углеобогащения [5-7]. Вопросы вовлечения отходов углеобогащения в энергетику как альтернативного топлива все чаще изучаются различными группами исследователей [5-7]. Как правило, определяется совокупность характеристик распыления [8-10]: размеры и скорости движения капель, угол раскрытия струи и ее отклонения. В ранее упомянутых исследованиях [5-10] рассматриваются равномерно перемешанные составы. Однако при распылении суспензионных топлив может реализовываться их разделение на отдельные компоненты (жидкие и твердые). По этой причине актуальны исследования в области идентификации отдельных твердых (фильтр-кек, опилки) и жидких (вода, рапсовое масло) компонентов в аэрозольном потоке. Для реализации экспериментов предложен подход, согласно которому бесконтактные панорамные оптические техники (плоскостная лазерная индуцированная флуоресценция – LIF, интерферометрическая техника – IPI, теневая макросъемка – SP) адаптированы под цели идентификации примесей в каплях жидкостей.

Для приготовления суспензий в экспериментах в качестве основного компонента использовался типичный отход углеобогащения – фильтр-кек длиннопламенного каменного угля (далее – кек). Твердый компонент предварительно измельчался в быстроходной роторной мельнице «Pulverisette 14» и затем просеивался с применением группы сит. Размеры твердых частиц кека не превышали  $d_p \approx 80$  мкм. В качестве дополнительных компонентов использовались древесные опилки (материал – сосна, размеры частиц 120–140 мкм), а также рапсовое масло. На рис. 1 приведен внешний вид стенда, использовавшегося для определения характеристик распыления суспензий. Для подсветки аэрозольного потока в верхней части стенда дополнительно устанавливался комплект оборудования (рис. 2): непрерывный DPSS лазер «KLM-532A» (длина волны 532 нм, максимальная мощность 5 В) для генерации светового пучка; коллиматор (угол раскрытия  $22^\circ$ ) для преобразования пучка лазера в плоский лазерный нож; оптическое зеркало для позиционирования направления лазерного ножа.

На рис. 3 показано, что на периферии аэрозольного потока суспензии интенсивность свечения капель почти в 2 раза выше, чем в ядре (вблизи оси симметрии форсуночного устройства). Такой результат свидетельствует о том, что по мере удаления от оси симметрии факела распыления концентрация воды в отдельных каплях суспензии возрастает. При этом необходимо отметить, что снижение интенсивности свечения потока в центральной части не связано с существенным поглощением каплями лазерного излучения, так как по мере движения ножа лазера ближе к нижней кромке потока) интенсивность свечения также возрастает.

Таким образом можно сделать вывод о том, что метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) позволяет выделить в общем аэрозольном потоке ВУТ и ОВУТ как отдельные капли жидкостей (вода, рапсовое масло), входящих в исходный состав суспензионных топлив, так и оценить среднюю концентрацию твердой компоненты (кек) в каплях аэрозоля.



Рис. 1. Внешний вид стенда: 1 – шток для выдавливания суспензии; 2 – форсунки; 3 – камера для распыления; 4 – струя топлива; 5 – прожекторы; 6 – видеокамера; 7 – емкость для сбора топлива; 8 – воздушный компрессор; 9 – компьютер; 10 – объектив; 11 – канал подачи воздуха

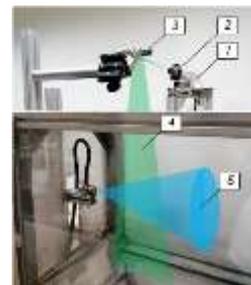


Рис. 2. Схема подсветки аэрозольного потока: 1 – DPSS лазер; 2 – оптика лазера (коллиматор); 3 – оптическое зеркало; 4 – лазерный нож; 5 – струя

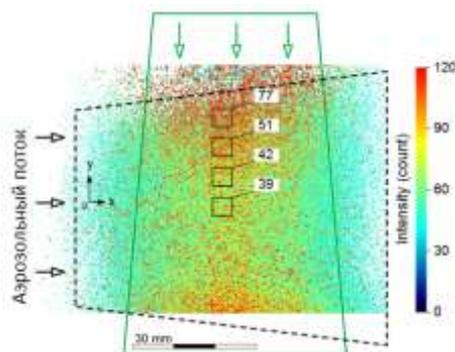


Рис. 3. Усредненная видеодиаграмма (после обработки) потока ВУТ

В ходе обработки результатов установлены четыре вида интерференционных картин каплей: 1 – нормальная (характеризуется вертикально расположенными полосами); 2 – угловая (интерференционные полосы расположены под углом к вертикали); 3 – кривая (характеризуется искривленными или невыраженными полосами); 4 – гексагональная (имеет ярко выраженные ромбы или многоугольники, равномерно заполняющие весь образ). Анализ выполнялся аналогично [9]. Согласно результату (рис. 4), можно утверждать, что интерферометрический метод (IPI) позволяет косвенно определить средний размер частиц примеси в каплях аэрозольного суспензионного потока.

Для определения размеров капель суспензий использовался метод «Shadow Photography» (SP) [8]. Регистрация размеров капель суспензий осуществлялась в трех различных областях (на оси симметрии потока, на 30 мм выше и ниже оси симметрии, соответственно) на удалении около 150 мм от сопла распылительной форсунки. Использование такого подхода обусловлено неоднородностью генерируемой струи – размеры капель в каждой точке ее вертикального сечения существенно отличались.

Комбинированное применение трех оптических методик (LIF, IPI, SP) позволяет установить экспериментально компонентный состав отдельных капель, а также распределения компонент (твердые и жидкие) в аэрозольном потоке. С использованием метода LIF определяются концентрации кека в отдельных каплях, средние концентрации кека в аэрозольном потоке, распределения водной компоненты по сечению потока, а также выделяются отдельные капли рапсового масла в потоке. Метод IPI может быть использован для определения среднего размера частиц примеси в аэрозольном потоке, а также для оценки количественной доли капель воды без примесей в аэрозольном потоке. При этом преимуществом метода IPI является возможность регистрации очень малых (с характерным размером менее 10 мк) капель. Применение метода SP позволяет эффективно определить долю несферичных капель суспензии в общем аэрозольном потоке. Это дает возможность оценки объемной доли капель, содержащих крупные (более 100 мк) частицы.

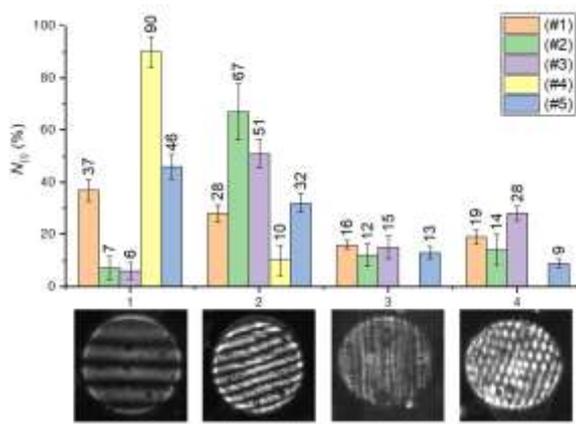


Рис. 4. Содержание  $N(i)$  образов четырех выделенных типов в аэрозольном потоке для пяти рассмотренных составов (при  $Ga \approx 50$  кг/ч)

#### Литература

1. Dogaru, L. The main goals of the fourth industrial revolution. Renewable energy perspectives // Procedia Manufacturing. – 2020. – P. 397-401. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.058.
2. Erdiwansyah, H. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies/ Erdiwansyah, Mahidin, H. Husin, Nasaruddin, M. Zaki, Muhibbuddin / Protection and Control of Modern Power Systems. – 2021. – V. 6 (3). DOI:10.1186/s41601-021-00181-3.
3. Lee, P.-Y. Vibration-based degradation effect in rechargeable lithium ion batteries having different cathode materials for railway vehicle applicatio / P.-Y. Lee, S. Park, I. Cho, J. Kim // Engineering Failure Analysis. – 2021. – V.124. –105334. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105334.
4. Nyashina, G. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion / G. Nyashina, K. Vershinina, P. Strizhak // Fuel Processing Technology. – 2020. – 106334. DOI:10.1016/j.fuproc.2019.106334. Dogaru, L. The main goals of the fourth industrial revolution. Renewable energy perspectives // Procedia Manufacturing. – 2020. – P. 397-401. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.03.058.
5. Pinchuk, V.A. Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment / V.A. Pinchuk, T.A. Sharabura, A.V. Kuzmin // Fuel Processing Technology. – 2017. – V.167. – P. 61-68. DOI: 10.1016/j.fuproc.2017.06.014.
6. Sharypov, O.V. Investigating the gas-droplet flow generated by a pneumatic nozzle for a coal-water slurry/ I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, L.I. Maltsev, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V.1367. –012031. DOI:10.1088/1742-6596/1369/1/012031.
7. Shlegel, N.E. Recovery of waste-derived and low-grade components within fuel slurries/ K.Y. Vershinina, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak // Energy. – 2019. – V. 183. – P. 1266-1277. DOI: 10.1016/j.energy.2019.07.031.
8. Strizhak, P.A. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin, R.S. Volkov //Fuel Processing Technology. – 2022. – V.225. – 107037. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.107037.
9. Volkov, R.S. Diagnostics of the presence of solid particles in aqueous aerosol droplets by their interference pattern / R.S. Volkov, S.V. Chvanov, D.D. Andriyanov // Technical Physics Letters. – 2019. – V.45. – P.605-608. DOI: 10.1134/S1063785019060324.
10. Wang, H., Ignition and Combustion Behaviors of Coal Slime in Air / H. Wang, S. Liu, X. Wang, Y. Shi, X. Qin, C. Song // Energy Fuels. – 2017. – V. 31(10). – P. 11439-114447. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01960.
11. Wiinikka, H. Particle formation during suspension combustion of different biomass powders and their fast pyrolysis bio-oils and biochars / Fuel Processing Technology // Fuel Processing Technology. – 2021. – V.218. – 106868. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106868.