Таким образом, полученные в ходе численных исследований данные вносят вклад в понимание физических механизмов, лежащих в основе нестационарных течений в пористых средах. Этот опыт может быть использован при проектировании и оптимизации широкого круга энергетических, технологических и других систем, включающих пористые материалы и структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ju Y.L., Wang C., Zhou Y. Numerical simulation and experimental verification of the oscillating flow in pulse tube refrigerator // Cryogenics. – 1998. – Т. 38. – № 2. – С. 169–176.
2. Nam K., Jeong S. Experimental study on the regenerator under actual operating conditions //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2002. – Т. 613. – № 1. – С. 977–984.
3. Cha J.S. et al. Multi-dimensional flow effects in pulse tube refrigerators //Cryogenics. – 2006. – Т. 46. – № 9. – С. 658–665.
4. Wang W. et al. Influence of the water-cooled heat exchanger on the performance of a pulse tube refrigerator //Applied Sciences. – 2017. – Т. 7. – № 3. – С. 229.
5. Richardson R. N., Evans B. E. A review of pulse tube refrigeration //International journal of refrigeration. – 1997. – Т. 20. – № 5. – С. 367–373.
6. Seume J., Friedman G., Simon T.W. Fluid mechanics experiments in oscillatory flow. Report. vol. 1, Final Report Minnesota Univ. Minneapolis. Dept. of Mechanical Engineering; 1992.
7. Chen S. et al. Numerical study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators //Cryogenics. – 2018. – Т. 96. – С. 99–107.
8. Ghafarian M., Mohebbi-Kalhori D., Sadegi J. Analysis of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with metal foam using computational fluid dynamics // International Journal of Thermal Sciences. – 2013. – Vol. 66. – P. 42–50.
9. Dai Q., Yang L. LBM numerical study on oscillating flow and heat transfer in porous media // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 54, № 1. – P. 16–25.
10. Kim S.-M., Ghiaasiaan S.M. Numerical Modeling of Laminar Pulsating Flow in Porous Media // Journal of Fluids Engineering. – 2009. – Vol. 131, № 4. – P. 041203.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ К БАЗОВОМУ ТОПЛИВУ НА МЕХАНИЗМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНОГО РАСПАДА КОМПОЗИЦИОННЫХ КАПЕЛЬ

Д.И. Волокитин

Томский политехнический университет, ИШЭ, группа А4-13

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ

Добавление в жидкие топлива высокоэнергетических добавок применяют для повышения эффективности сжигания топливной композиции [1–3]. Наличие высокоэнергетических добавок повышает температуру горения и общее тепловыделение процесса. Добавки с высокой плотностью энергии часто используют в композициях с керосином, дизельным топливом, спиртами. Значения объемной и массовой плотностей энергии, выделяющейся при сгорании борсодержащей добавки, в сравнении с керосином представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения плотности энергии компонентов топлива

	Керосин	Бор
Q_m, Дж/г	27	58
Q_v, Дж/см^3	34	136

Использование композиционных капель, содержащих несмешивающиеся водяное ядро и топливную оболочку, потенциально может положительно влиять на полноту использования энергии твердых добавок как за счет микро-взрыва, так и за счет использования образовавшегося водяного пара в роли катализатора реакции окисления [4].

Целью данной работы является исследование влияния борсодержащей добавки на механизмы и характеристики вторичного распада композиционных капель.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, общая схема которого представлена на рис. 1.

Для создания высокотемпературной среды применялась система с известной по размерам и температурному распределению пламенной зоной над горелкой с жидким топливом (этиловый спирт, максимальная температура пламени около 1200 K). Неоднородные капли подвешивались на нихромовой проволоке сечением 0,2 мм (рис. 2).

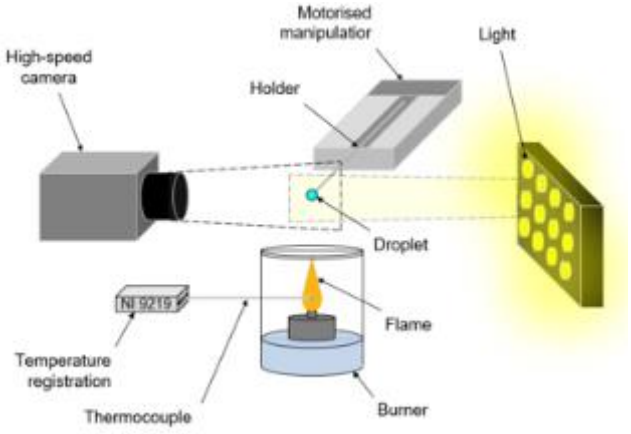

Рис. 1. Схема экспериментального стенда

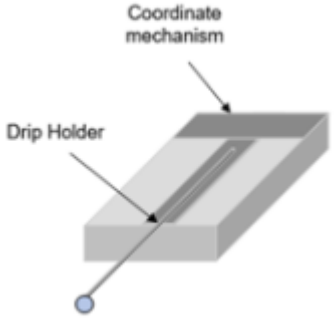

Рис. 2. Схема закрепления капли на держателе

При проведении экспериментов варьировалась высота размещения держателя с неоднородной каплей относительно нижней части горелки (металлического диска спиртовой горелки). В предварительных экспериментах на основе термопарных измерений получены значения температуры газовоздушной смеси (пламени и продуктов сгорания) на разном удалении от основания горелки. Экспериментальные исследования проводились при температурах $T_g \approx 650$, 750, 900, 1050 K. Измерение температуры газовоздушной смеси в экспериментах обеспечивалось комплексом сбора данных (погрешность измерений ±1 K, частота регистрации 10 Hz) в комплекте с термопарой типа K (диапазон измерения температуры от 73 K до 1623 K, инерционность 0,1 с). Выбор размеров и положения области регистрации осуществлялись для наиболее полного захвата области протекания процесса микро-взрывной фрагментации капель. Область регистрации дополнительно освещалась светодиодным прожектором (мощность 100 Вт, напряжение 220–240 В). Особенности и характеристики микро-взрывной фрагментации неоднородных капель регистрировались при помощи высокоскоростной видеокамеры (устанавливались параметры съемки: разрешение 512×512 пикс; частота съемки – 1000 кадров/с; время экспозиции – 1 мкс) совместно с объективом 200 мм.

В качестве основного топливного компонента композиционных капель использовался керосин марки ТС-1. Предварительно подготавливались двухкомпонентные топливные смеси, массовая доля высокоэнергетической добавки в которых составляла 0.5, 1, 5 %. Формирование неоднородных капель осуществлялось в два этапа. На первом этапе формировалась капля воды (водяное ядро) и подвешивалась на держатель. Затем формировалась внешняя топливная оболочка неоднородной капли, состоящая из предварительно подготовленной топливной смеси. Использовались дозаторы с диаметром сопла 0,3 мм. При формировании неоднородных капель обеспечивалось формирование внутренней границы раздела воды и топлива. После формирования неоднородной капли держатель перемещался в пламенную высокотемпературную зону с помощью автоматизированного координатного механизма.

Исследованные борсодержащие топливные композиции фрагментировали в режиме паффинга. При этом процесс паффинга характеризовался большим количеством последовательных стадий (не менее 10) отрыва вторичных фрагментов от родительской капли. В качестве основных отличительных (в сравнении с водотопливной композицией без борсодержащей добавки) особенностей фрагментации можно выделить следующие. При нагреве композици-

онных капель с добавлением бора, в отличие от состава «Керосин 90 %+вода 10 %» не зарегистрировано формирование паровых пузырей. Отделение вторичных фрагментов от родительской капли происходило во всей окрестности ее внешней границы, в то время как капли без добавления бора фрагментировали в режиме паффинга с выбросом вторичных капель в виде цепочек или струй только в окрестности разрыва парового пузыря.

Число стадий фрагментации в режиме паффинга борсодержащих капель превышало аналогичную характеристику при фрагментации капель, не содержащих бор. При этом на последних этапах существования композиционные капли с борсодержащей добавкой фрагментировали в режиме паффинга практически непрерывно, и разделить последовательные стадии фрагментации не представлялось возможным. Вследствие непрерывного выброса вторичных фрагментов родительские капли начинали вращаться вокруг своей оси, что дополнительно усиливало эффект формирования равномерного облака вторичных фрагментов вокруг родительской капли.

Зажигание композиционных капель, содержащих бор, сопровождалось формированием более обширной относительно керосина без примесей зоной пламени. При этом цвет пламени также отличался от горения керосина за счет желто-зеленого свечения.

На рис. 3 приведены значения времени задержки распада композиционных капель исследованных составов. В качестве основных характеристик вторичной фрагментации регистрировались времена задержки распада $\tau_{p/m}$ (время от начала нагрева до момента отделения от родительской капли первого вторичного фрагмента), времена существования капель τ_h (время от начала нагрева до полного исчезновения капли).

Фрагментация борсодержащих капель во всем экспериментальном диапазоне температуры нагрева T_g начиналась быстрее относительно композиционных капель на базе керосина без добавок. Это связано с наличием и распределением по всему объему топливной оболочки композиционных борсодержащих капель твердых частичек и их агломератов, которые являлись центрами парообразования и интенсифицировали вторичную фрагментацию. Кроме того, твердые частицы за счет поглощения теплового излучения интенсивно прогревались, создавая дополнительные зоны локального перегрева во всей топливной оболочке. Этим объясняется формирование вторичных фрагментов во всей области вокруг поверхности родительской капли, в отличие от капель состава «Керосин/вода», фрагментация которых происходила только за счет испарения воды в центральной части капли и выброса фрагментов в области разрыва парового пузыря.

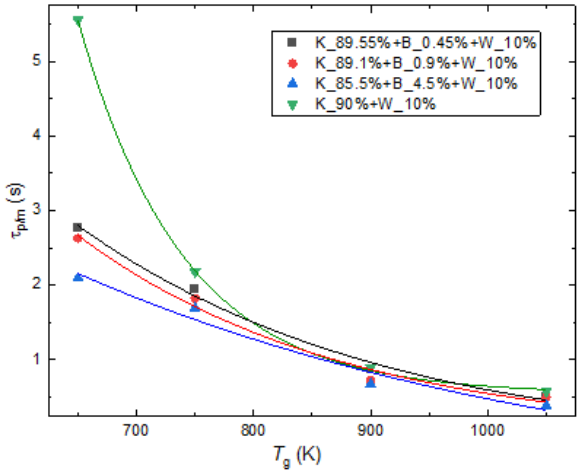

Рис. 3. Значения времени задержки вторичного распада композиционных капель при начальных размерах родительских капель $D_{d0} \approx 1{,}6$ мм и разных температурах нагрева T_g.

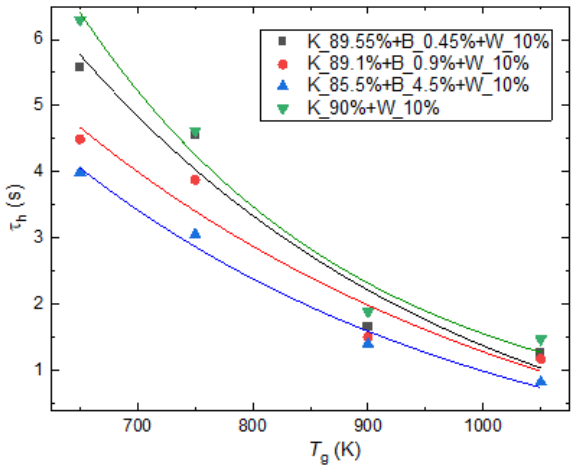

Рис. 4. Значения времени существования композиционных капель при начальных размерах родительских капель $D_{d0} \approx 1{,}6$ мм и разных температурах нагрева T_g.

Рис. 4 иллюстрирует зависимости времен существования композиционных капель от температуры нагрева. Времена жизни борсодержащих композиционных капель также характеризовались пониженными значениями. При фрагментации борсодержащих капель регистрировалось большее число стадий и большее количество вторичных фрагментов, что сокращало время жизни родительских капель.

По результатам выполненных экспериментов можно сформулировать вывод, что наилучшие показатели вторичного распада среди исследованных составов соответствуют максимальной доле борсодержащей добавки (4,5 %). Составы с меньшими концентрациями борсодержащей добавки также характеризовались лучшими показателями эффективности вторичной фрагментации относительно состава без добавления борсодержащего вещества. Полученный результат позволяет сформулировать вывод о целесообразности использования борсодержащих жидких топлив в режиме вторичного теплового доизмельчения. Применение технологии микро-взрывного распада борсодержащих топливных составов с использованием воды в качестве низкокипящего компонента композиционных капель может повысить полноту использования энергии топлива за счет наличия в зоне окисления водяного пара и присутствующих в нем атомов кислорода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-69-10006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solomon Y., Grinstein D., Natan B. Dispersion of Boron Particles from a Burning Gel Droplet. – 2018. – V. 34. – P. 1586–1596. https://doi.org/10.2514/1.B36872.
2. Chen B., Shan S., Du L., Liu J., Yang Q. Introducing metal oxide as solid oxygen carrier for energy release enhancement of boron suspension fuel // Fuel. – 2023. – V. 351. – P. 128919. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.128919.
3. Wang X., Shi E., Qi C., Yan X., Zhang Z., Yu J. Experimental study on aerosol explosion characteristics and flame propagation behavior of aluminum/ethanol nanofluid fuel // Fuel. – 2023. – V. 352. – P. 129022. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129022.
4. POjha.K., Karmakar S. Boron for liquid fuel Engines-A review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel, and combustion aspects // Prog. Aerosp. Sci. – 2018. – V. 100. – P. 18–45. https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2018.05.003.