

03

Микровзрывная фрагментация капель жидких биотоплив

© Д.В. Антонов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: antonovdv132@gmail.com, pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2022 г.

В окончательной редакции 16 марта 2022 г.

Принято к публикации 16 марта 2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов фрагментации капель жидких биотоплив на основе воды, рапсового масла и биомассы при нагреве в высокотемпературной газовой среде в режимах микровзрыва и паффинга. Установлены диапазоны варьирования температуры, при которых стабильно реализуются режимы частичной фрагментации и полного микровзрывного распада капель. При обработке видеogramм вычислены времена задержки фрагментации и общего времени существования капель. Определено влияние концентрации компонентов в капле на условия прогрева, испарения, фрагментации и их зажигания.

Ключевые слова: многокомпонентные капли, жидкое биотопливо, микровзрыв, фрагментация, вторичное измельчение.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.09.52449.19152

Значительные антропогенные выбросы от сжигания традиционных углеводородных топлив в транспортном и энергетическом секторах, а также сопутствующие негативные экологические последствия мирового масштаба [1] стимулируют разработки альтернативных топлив на основе биоматериалов и добавок. В последние годы предложено довольно много альтернативных составов на основе рапсового масла [2,3], опилок и стружек [4], листьев деревьев и кустарников [5]. Ключевая сложность применения композиционных жидких топлив в виде эмульсий и суспензий в топочных камерах котельных агрегатов и автомобильных двигателях состоит в значительных затратах энергии [1,6] на распыление вследствие, как правило, высокой вязкости, седиментации твердых частиц, расслоения жидкостей. Методики вторичного измельчения капель композиционных жидких топлив непосредственно в камерах сгорания позволяют минимизировать данные сложности и исключить определяющее влияние соответствующих эффектов. Методики вторичного измельчения базируются на соударениях капель между собой, с твердыми стенками, кольцами, решетками, газовой струей, а также на перегреве жидкостей до условий вскипания и разрушения [7–9]. Процессы микровзрывного измельчения являются наиболее актуальными с точки зрения их реализации непосредственно в зоне нагрева. Условия стабильной фрагментации капель композиционных жидких топлив изучены для ограниченного перечня композиций на базе воды, дизельного топлива и угольных частиц [2]. В такого рода композиционных топливах возможно два режима фрагментации [2]: 1) паффинг — частичное разрушение с последовательным отрывом от родительской капли совокупности вторичных фрагментов (количеством не более 20–25); 2) микровзрывной распад — кратковременный перегрев низкокипящего компонента

капли биотоплива (как правило, воды) с ее полным разрушением и образованием облака фрагментов, размеры которых на несколько порядков меньше (менее $10\ \mu\text{m}$) аналогичного параметра для родительской капли. Тепловые условия (температуры, тепловые потоки, схемы и темпы нагрева), достаточные для стабильной реализации этих двух режимов, существенно различаются для капель с разным содержанием воды, жидких и твердых горючих компонентов. В связи с активным стремлением мирового сообщества к переходу от традиционных углеводородных топлив к биотопливам актуальной задачей является изучение режимов фрагментации их капель для интенсификации вторичного измельчения последних. Целесообразно изучить предельные условия реализации основных режимов фрагментации капель перспективных двух- и трехкомпонентных жидких биотоплив с учетом трех факторов: температуры газовой среды и схемы нагрева, начального размера капли, концентраций компонентов. В этом состояла цель данного исследования.

В [2] показано, что высокотемпературный нагрев капель на основе воды и горючей жидкости растительного происхождения (рапсового масла) приводит к их микровзрывному распаду и частичной фрагментации, которые являются основными режимами вторичного измельчения. Установлены диапазоны изменения времен существования капель (от 10 до 35 s) при разных температурах газовой среды (от 573 до 773 K) и концентрации компонентов (3–10 wt.%). В [6] описаны результаты экспериментальных исследований режимов, предельных условий и последствий микровзрывной фрагментации капель органоводоугольных суспензий. В качестве горючей жидкости использовано рапсовое масло, негорючей — вода, твердых примесей — бурый и каменный уголь. Показано, что площадь поверхности топливной суспензии может быть увеличена более чем в 10 раз

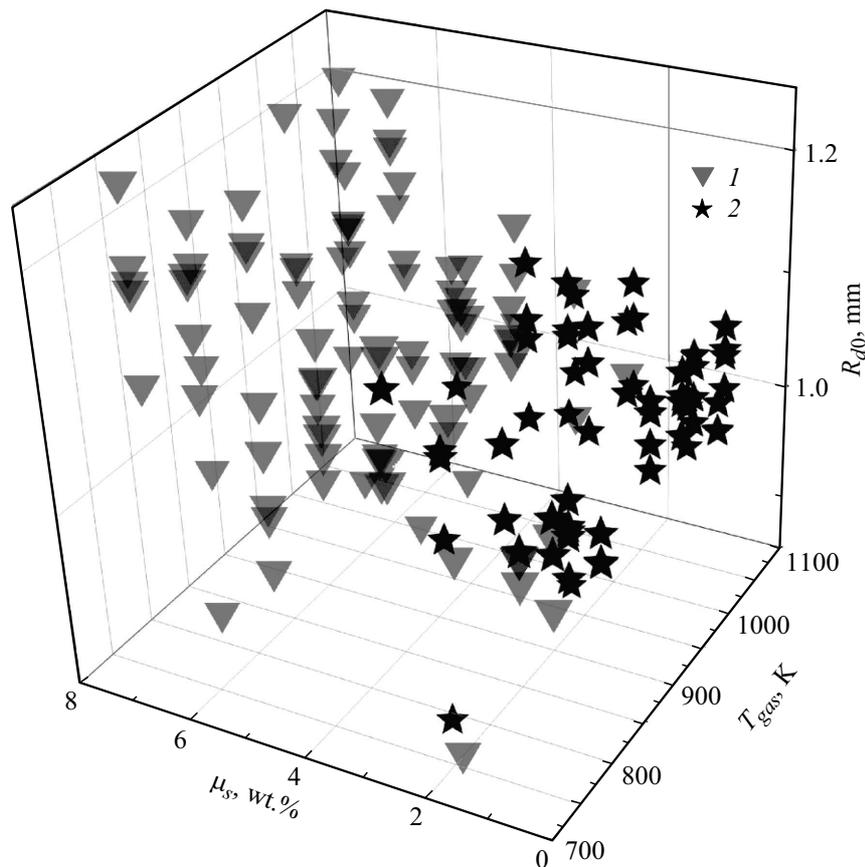


Рис. 1. Условия реализации режимов фрагментации исследованных двух- и трехкомпонентных капель жидких биотоплив. 1 — паффинг, 2 — микровзрыв. R_{d0} — начальный радиус капель, T_{gas} — температура газа, μ_s — массовая концентрация биомассы (древесных опилок).

за счет микровзрывного распада исходных капель. Для композиций с растительными добавками соответствующие эффекты пока не изучались. В нашем исследовании в качестве нагревательной системы применялась спиртовая горелка (максимальная температура пламени 1150 К). Выбор данной схемы обусловлен тем, что при нагреве в пламени формируется наибольшее количество вторичных фрагментов (мелких капелек) по сравнению со случаями нагрева капель с доминированием только кондуктивного, конвективного или радиационного теплообмена [6]. Капли биотоплив вводились непосредственно в пламя спиртовой горелки. Контроль температуры в пламени спиртовой горелки осуществлялся с использованием системы, состоящей из комплекта сбора данных National Instruments и малоинерционных термодпар с ошибками измерения температуры менее чем ± 3 К и ошибками измерения времени менее чем ± 0.1 с. Для калибровки системы температура пламени измерялась в нескольких сечениях на разном расстоянии от горелки с шагом 0.5 см. Подробно методика измерения тепловых условий в пламени описана в работе [10]. Максимальные отклонения температуры газа в пределах области регистрации не превышали 20–25 К. Методика генерации капель композиционных биотоплив аналогична исполь-

зованной в [6]. Применялись два электронных дозатора Finnpiette Novus (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 μ l). На первом этапе формировалась капля воды заданного объема и подвешивалась на держатель. Далее формировалась капля рапсового масла (без и с добавлением древесных опилок), которая растекалась по поверхности капли воды, образуя на ней пленку толщиной 0.05–0.5 мм. Исследуемые капли жидких биотоплив вводились в область регистрации с помощью координатного механизма, на конце которого располагался держатель, представляющий собой нихромовую проволоку диаметром 0.2 мм. Скорость движения капель при вводе в объем нагретого газа задавалась постоянной и равной 0.5 м/с для снижения времени задержки регистрации процессов распада, которое составляло менее 0.01 с. При анализе времени задержек распада учитывалась задержка в их регистрации, обусловленная инерционностью процесса ввода капель в область регистрации с помощью координатного механизма. Область регистрации подсвечивалась с помощью светодиодного прожектора MultiLed QT projector. Процессы нагрева, испарения и фрагментации капель регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310. Частота съемки составляла 5400 кадров в секунду при

разрешении 768×768 пикселей. При обработке видеок кадров регистрировались время задержки распада капель жидких биотоплив, режимы их фрагментации, времена существования капель. Систематические погрешности средств измерения при определении времени задержки распада не превышали 0.001 с. Случайные погрешности оценивались в виде доверительных интервалов с доверительной вероятностью 0.95 для всех экспериментальных точек, представленных на зависимостях в работе. Проводилось не менее $5-10$ экспериментов при идентичных условиях.

Проведенные эксперименты позволили установить условия стабильной реализации двух режимов фрагментации: паффинг (частичная фрагментация, не приводящая к полному распаду родительской капли, при которой образуются вторичные фрагменты радиусами более $10 \mu\text{m}$ общим количеством не более 25) и микровзрыв (полный распад родительской капли с образованием мелких вторичных фрагментов с размерами менее $10 \mu\text{m}$). Заметим, что не весь начальный объем родительской капли переходит в объем вторичных фрагментов при паффинге. При нагреве капель биотоплив в одном эксперименте регистрировалось несколько последовательных частичных фрагментаций (паффинг). Режим монотонного испарения при температурах газовой среды от 750 до 1050 К не зарегистрирован. На рис. 1 представлена диаграмма для режимов фрагментации исследованных двух- и трехкомпонентных капель жидких биотоплив в диапазоне изменения температуры газовой среды от 750 до 1050 К, начальных размеров капель от 0.8 до 1.3 мм, концентрации древесных опилок в суспензиях от 0.5 до 7 wt.%. Реализация режима микровзрывного распада (наиболее перспективного с точки зрения увеличения площади поверхности испарения после фрагментации) достигается во всем диапазоне исследуемых температур и начальных размеров капель, но при массовых концентрациях древесных опилок менее 4 wt.%. При более высоких концентрациях биомассы в составе суспензий доминировал режим паффинга. Это обусловлено определяющей ролью свойства биомассы впитывать влагу. Для микровзрыва необходимо наличие границы раздела горючей и негорючей жидкостей. При малых концентрациях частиц биомассы в составе капель такие границы присутствовали в явном виде. При повышении концентрации биомассы последняя поглощала значительную долю воды. Существенно медленнее протекает процесс поглощения масла частицами опилок. Как следствие, граница раздела воды и масла смещалась к поверхности твердых частиц. В таких условиях для прогрева воды до условий вскипания требуются большие тепловые потоки и время, чем для композиций без твердых частиц биомассы. Анализ показывает, что процессы микровзрывной фрагментации и паффинга будут достигаться быстрее при гидрофобных твердых частицах в составе капель.

На рис. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных по зависимостям времени задержки

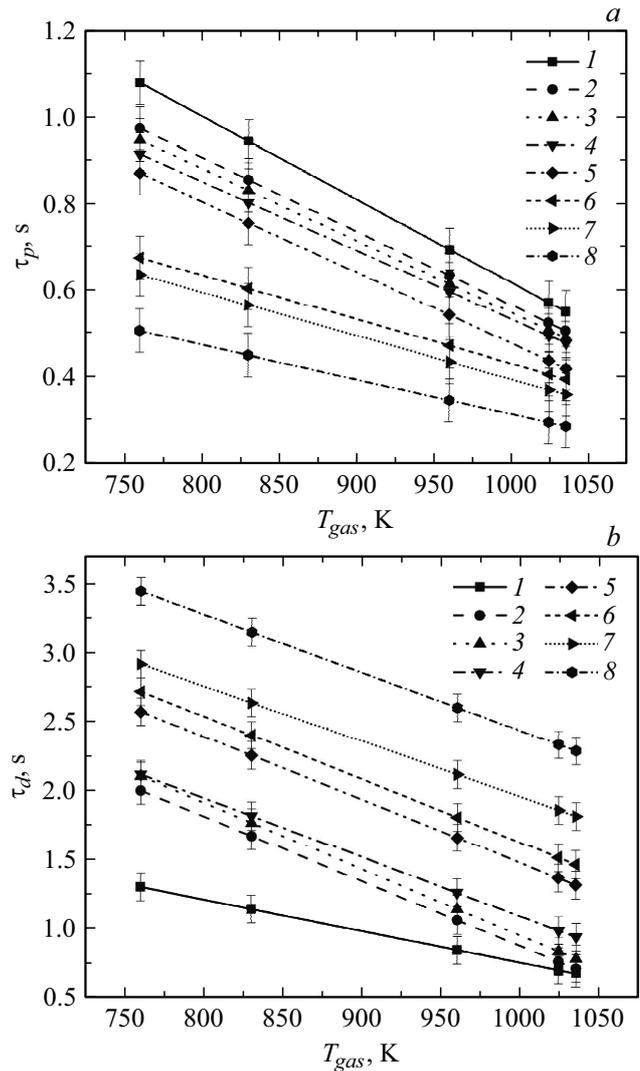


Рис. 2. Зависимости времени задержки фрагментации (а) и общего времени существования (б) исследованных двух- и трехкомпонентных капель жидких биотоплив от температуры внешней газовой среды. 1 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 89.5 wt.%, древесные опилки 0.5 wt.%; 2 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 89 wt.%, древесные опилки 1 wt.%; 3 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 88 wt.%, древесные опилки 2 wt.%; 4 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 87 wt.%, древесные опилки 3 wt.%; 5 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 86 wt.%, древесные опилки 4 wt.%; 6 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 85 wt.%, древесные опилки 5 wt.%; 7 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 84 wt.%, древесные опилки 6 wt.%; 8 — вода 10 wt.%, рапсовое масло 83 wt.%, древесные опилки 7 wt.%.

фрагментации (а) и времени существования (б) исследованных двух- и трехкомпонентных капель жидких биотоплив от температуры газовой среды. Под временем задержки микровзрывного распада понимается время от начала нагрева родительской двухжидкостной капли до момента отрыва от нее первого вторичного фрагмента вследствие локального вскипания дисперсной фазы (воды). С увеличением температуры газовой среды

регистрировалось значительное снижение как времени задержки фрагментации, так и полного времени существования, поскольку с увеличением температуры растёт количество теплоты, подводимой к поверхности композиционных биотоплив в единицу времени. Интересным является тот факт, что при высоких температурах нагрева (от 750 до 1050 К) зависимости времени задержки распада и полного времени существования близки к линейным. Также по результатам анализа рис. 2 установлено, что увеличение концентрации древесных опилок с 0.5 до 7 wt.% приводит к снижению времени задержки фрагментации на 60%, но к увеличению времени полного существования на 70%. Это связано с тем, что композиция становится более плотной, значения теплопроводности и температуропроводности растут. Этого достаточно для интенсивного локального перегрева и инициирования фрагментации капель. Но так как биомасса поглощает значительный объём воды, последняя агломерируется не в виде некоторого единого объёма в масле, а распределяется в глубинных слоях многокомпонентной капли. Как следствие, замедляется ее прогрев до полного выпаривания воды и масла, если фрагментация не реализуется. Аналитические оценки времени задержки распада в широком диапазоне варьируемых параметров (температур и начальных размеров капель) сделаны в [10]. Результаты математического моделирования [10] показали, что при температурах выше 1000 К в камерах сгорания важно учитывать радиационную составляющую теплового потока при прогнозировании характеристик фрагментации капель в режимах паффинга и микровзрыва.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили установить предельные тепловые и концентрационные условия интенсивной микровзрывной фрагментации капель жидких биотоплив. Полученные результаты представляют интерес для развития технологий вторичного измельчения капель перспективных жидких биотоплив в виде суспензий и эмульсий как в топочных камерах энергетических котлов, так и в автомобильных двигателях.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-1616.2022.4).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Ahmad, D. Zhang, *Energy Rep.*, **6**, 1973 (2020). DOI: 10.1016/j.egy.2020.07.020
- [2] Д.В. Антонов, П.А. Стрижак, *Письма в ЖТФ*, **46** (3), 23 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.03.48987.18008 [D.V. Antonov, P.A. Strizhak, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (2), 122 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020029].
- [3] P. Senthilkumar, G. Sankaranarayanan, *J. Energy Inst.*, **89** (4), 504 (2016). DOI: 10.1016/j.joei.2015.07.006
- [4] R. García, M.P. González-Vázquez, F. Rubiera, C. Pevida, M.V. Gil, *J. Clean. Prod.*, **328**, 129635 (2021). DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129635
- [5] A. Chen, Y.J. Guan, M. Bustamante, L. Uribe, L. Uribe-Lorío, M.M. Roos, Y. Liu, *Biomass Bioenergy*, **141**, 105675 (2020). DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105675
- [6] D.V. Antonov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, Z. Nissar, S.S. Sazhin, *Fuel*, **289**, 119814 (2021). DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119814
- [7] Ю.В. Алеханов, М.В. Близнецов, Ю.А. Власов, В.И. Дудин, А.Е. Левушов, А.И. Логвинов, С.А. Ломтев, Е.Е. Мешков, *Письма в ЖТФ*, **29** (6), 1 (2003). [Yu.V. Alekhanov, M.V. Bliznetsov, Yu.A. Vlasov, V.I. Dudin, A.E. Levushov, A.I. Logvinov, S.A. Lomtev, E.E. Meshkov, *Tech. Phys. Lett.*, **29** (3), 218 (2003). DOI: 10.1134/1.1565638].
- [8] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, Н.Н. Золоторёв, К.Г. Перфильева, А.С. Усанина, *Письма в ЖТФ*, **46** (3), 31 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.03.48989.17970 [V.A. Arkhipov, S.A. Basalae, N.N. Zolotorev, K.G. Perfil'eva, A.S. Usanina, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (2), 130 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020030].
- [9] С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов, *Письма в ЖТФ*, **45** (22), 32 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48646.17984 [S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (11), 1148 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019110178].
- [10] D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, Z. Nissar, S.S. Sazhin, *Combust. Flame*, **233**, 111599 (2021). DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111599