

03

Микровзрывная фрагментация группы неоднородных капель топлив

© Д.В. Антонов, П.А. Стрижак[¶], Р.М. Федоренко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

[¶] E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступило в Редакцию 12 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 12 февраля 2020 г.

Принято к публикации 20 февраля 2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов микровзрывной фрагментации двухкомпонентных (дизельное топливо–вода) капель при нагреве в высокотемпературной среде. Опыты проведены с группой из 10–30 падающих капель в трубчатой муфельной печи. Изучены времена задержки микровзрыва. Показано, что взаимное расположение капель существенно влияет на интегральные характеристики процесса. Установлены предельные расстояния между каплями (от 8 до 10 радиусов), при которых характеристики микровзрыва близки к регистрируемым в опытах с одиночными каплями.

Ключевые слова: микровзрыв, фрагментация, вторичное измельчение, капли топлива, коллективные эффекты.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.10.49424.18244

Технологии вторичного измельчения [1] капель жидкостей (в первую очередь топливных композиций) довольно активно развиваются в связи с необходимостью интенсификации тепломассообменных процессов в камерах сгорания при широком вовлечении негорючих компонентов, в частности воды и водяного пара [2,3]. Необходимость использования технологических и сточных вод в составе топлив обусловлена тем, что они, как правило, содержат большое количество различных примесей, полная очистка от которых требует использования дорогостоящих устройств и длительного времени работы последних [4]. Добавление воды в состав топлив не только способствует существенному снижению газовых антропогенных выбросов вследствие того, что водяной пар ограничивает скорости некоторых химических реакций и вытесняет определенную долю других газов из зоны горения, но и приводит к реализации микровзрывной фрагментации капель, т.е. к их вторичному измельчению [5]. Этот процесс способствует повышению скорости выгорания топлива и соответственно тепловыделению в единицу времени [5]. Для эффективного применения микровзрывной фрагментации капель важно понимание необходимых и достаточных условий. Последние изучаются экспериментально [6] и теоретически [7] с использованием одиночных капель. Неизученным остается влияние коллективных эффектов, возникающих при взаимодействии соседних капель между собой. В [8] показано, что при последовательном движении капель друг за другом в потоке высокотемпературных газов движущиеся впереди капли испаряются более интенсивно, чем следующие за ними, из-за образования парового буферного слоя, который снижает времена прогрева и полного испарения последующих капель. В [9] установлено, что времена задержки зажигания нескольких капель топлив могут быть значительно выше времени задержки зажигания

одиночных капель при одинаковых условиях нагрева. Важно исследовать влияние коллективных эффектов на процессы микровзрыва группы капель неоднородных топлив. В первом приближении целесообразно изучить различия времен задержки фрагментации капель при разном расстоянии между ними в процессе движения в разогретой газовой среде. В этом и состоит цель настоящей работы.

В [10] показано, что для композиций на основе воды и дизельного топлива характерны средние значения времен задержки микровзрыва (относительно других перспективных составов). Наибольшее количество вторичных капель зарегистрировано при минимальной концентрации воды (не более 10%) [10]. Поэтому в настоящей работе использованы двухкомпонентные капли с относительной объемной концентрацией дизельного топлива 90% и воды 10%. Методика генерации капель аналогична использованной в [10]. Двухкомпонентные капли формировались с помощью электронных дозаторов Finnpiette Novus (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 μ l). Созданная капля воды заданного объема подвешивалась на элемент держателя. Затем генерировалась капля горючего компонента, которая растекалась по поверхности первой. Выбор такой схемы формирования двухкомпонентной капли обусловлен ее соответствием технологиям сжигания эмульгированных топлив, в которых часто капельки воды растворены в горючем компоненте и при нагреве объединяются в одну общую каплю [6,7]. Начальный объем капель во всех экспериментах составил $V_{d0} \approx 2.5 \mu$ l, что соответствует среднему начальному радиусу $R_{d0} \approx 0.842$ mm. Выбор данного начального размера капель обусловлен несколькими причинами и ограничениями экспериментальной методики. В частности, исключались эффекты существенной трансформации поверхности и фрагментации капли до вхождения в область нагрева, обеспечивалась

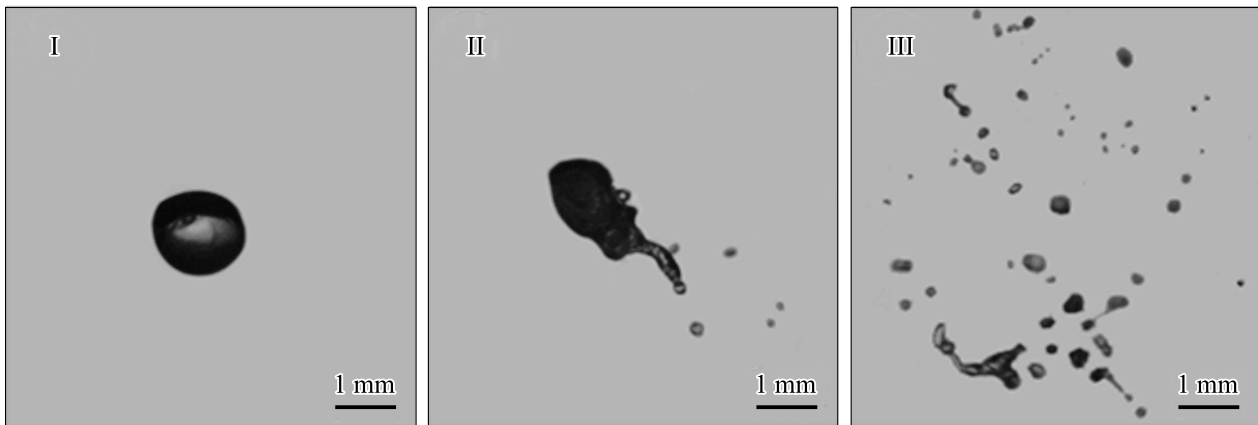


Рис. 1. Типичные кадры с каплями в трубчатой муфельной печи. I — монотонное испарение, II — последовательное отделение фрагментов жидкости (puffing), III — полный распад с формированием облака мелких капель (micro-explosion).

возможность регистрации микровзрывных эффектов, несмотря на малое время движения в нагревательной камере (до 0.5 s). Средние значения скорости движения капель в муфельной печи составили около 1.5 m/s. Для одновременной подачи группы капель использовалось металлическое кольцо, внутри которого размещены тонкие (диаметр 0.1 mm) проволочки. На них опускалась группа сгенерированных капель (от 10 до 30). При касании кольца механическим устройством капли срывались и перемещались вниз в виде определенного эшелона.

В качестве нагревательной системы использовалась трубчатая муфельная печь (диапазон температур до 1250°C), расположенная вертикально к основанию стенда. Сбрасываемые капли могли перемещаться в ней в режиме свободного падения. Температура в печи регистрировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар с погрешностью не более 3°C и инерционностью менее 0.1 s. Варьирование температуры в печи осуществлялось в диапазоне от 950 до 1100°C. Процессы движения, испарения, распада, зажигания и взаимодействия капель регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310, расположенной над трубчатой печью. Частота съемки при проведении экспериментов составляла 5400 fps при разрешении 768 × 768 px. Пространство в камере муфельной печи подсвечивалось снизу с помощью прожектора. Обработка видеофрагментов осуществлялась при использовании программного обеспечения Phantom Camera Control. Регистрировались размеры (радиусы R_{d0}) и количество (N_d) капель, расстояние между ними (L), время задержки микровзрывной фрагментации каждой из них (τ_d). Систематические погрешности при определении τ_d , R_{d0} и L составили 0.00037 s, 0.017 mm и 0.033 mm соответственно. Для минимизации случайных погрешностей регистрации указанных параметров исследованных процессов выполнялись серии из 10–15 экспериментов при идентичных начальных условиях.

На рис. 1 представлены типичные кадры, иллюстрирующие фрагментацию одной из капель топливной композиции в разогретой газовой среде при движении в составе группы. Установлено, что в зависимости от взаимного расположения капель топлив в газовой среде может реализоваться один из трех режимов их нагрева, а именно монотонное испарение без фрагментации; последовательный отрыв от капли группы жидкостных фрагментов; микровзрывной распад капли с образованием облака мелких капелек. Анализ видеogramм показал, что по результатам их обработки можно выделить предельные расстояния между каплями как границы переходов от одного режима к другому. В частности, установлено, что при расстояниях между каплями менее $(5-7)R_d$ реализуется режим монотонного испарения, т.е. фрагментация не зарегистрирована, и капли уменьшаются в размерах вследствие испарения жидкости со свободной поверхности. При расположении капель в газовой среде на расстоянии от $(5-7)R_d$ до $(8-10)R_d$ регистрировались условия частичной фрагментации [6,7]. Лишь иногда регистрировались последовательно частичная фрагментация и полный микровзрывной распад. Микровзрыв устойчиво реализовался при расстояниях между каплями более $(8-10)R_d$. В процессе движения группы капель наблюдались различные режимы их фрагментации. Например, после нескольких интенсивных частичных фрагментаций исходной капли регистрировался определенный временной интервал, за которым следовал микровзрыв, приводящий к ее полному распаду. На видеокадрах проведенных опытов были видны различные режимы взаимодействия капель между собой при столкновениях: отскок (сближение, касание и удаление друг от друга), коагуляция (слияние в единый жидкостной фрагмент), дробление (распад капель с образованием мелких фрагментов). Следует отметить, что данные режимы носили случайный характер и регистрировались не во всех экспериментах. Вероятность соударения во многом зависела от расстояния между каплями, а также от их концентрации.

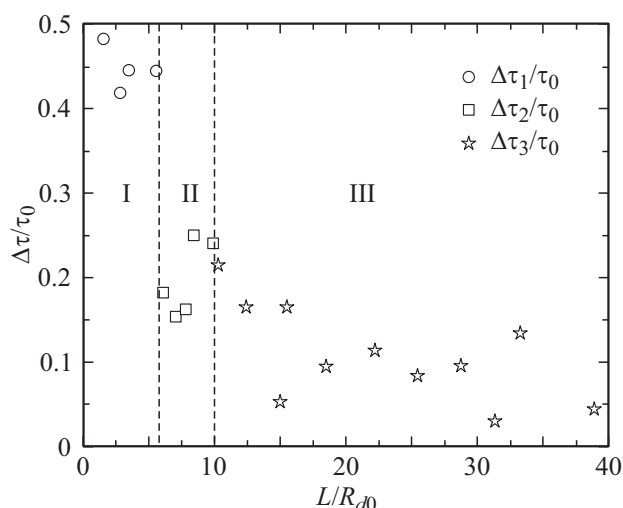


Рис. 2. Типичные различия времен задержки фрагментации первой (средние значения для трех режимов $\tau_0 = 0.34$ s) и последующих капель в группе для разных соотношений L/R_{d0} при реализации трех типичных режимов для температуры воздуха 1000°C . $\Delta\tau_1$ — при монотонном испарении, $\Delta\tau_2$ — при последовательном отделении фрагментов жидкости, $\Delta\tau_3$ — при полном распаде с формированием облака мелких капель. Обозначение режимов (I–III) то же, что на рис. 1.

Установлено, что образующиеся при двух режимах распада (частичная и полная фрагментация) вторичные капельки оказывают разное влияние на соседние капли. При реализации частичной фрагментации количество вторичных капель существенно меньше, а их размеры больше. Как следствие, кинетическая энергия таких фрагментов достаточно высока и приводит к существенной трансформации поверхности соседних капель, не прошедших этапы фрагментации. Регистрировались условия, при которых образованные после частичной фрагментации капельки на большой скорости соударялись с соседними каплями. Происходил разлет последних или их дробление. При малых скоростях движения вторичных капель последние должны были коагулировать с соседними, но вследствие интенсивного испарения и формирования вокруг них паровой буферной зоны их отбрасывало на периферию. При микровзрыве количество вторичных капель существенно больше, и они формируются одновременно. Кадры видеogramм показывали достаточно мощную волну вторичных фрагментов из очага распада к стенкам камеры. Она способствовала не столько полному разрушению соседних капель, сколько их трансформации, вращению и частичной фрагментации. Лишь в единичных экспериментах регистрировались условия распада соседних капель при достижении их поверхности большой группой мелких фрагментов, образующихся при микровзрыве одной из исходных капель. Такие условия регистрировались при реализации микровзрыва вблизи стенки камеры.

На рис. 2 приведены результаты обработки видеogramм проведенных опытов по регистрации времен задержки микровзрывов и частичной фрагментации в сравнении с результатами опытов с одиночной каплей. Показаны предельные расстояния между каплями, при которых регистрировались условия реализации соответствующего режима фрагментации. Эти расстояния, т.е. границы переходов между режимами, являются основным результатом выполненных исследований. С их использованием можно прогнозировать условия интенсивной фрагментации капель топлив в высокотемпературной газовой среде. Следует также отметить, что в будущем данные границы можно уточнить для разных температур нагрева и компонентного состава капель. Из рис. 2 видно, что чем больше отношение L/R_{d0} , т.е. чем дальше расположены капли друг от друга, тем меньше отличия времен задержки от аналогичных характеристик из опытов с одиночными каплями. Однако значения $\Delta\tau$ уменьшаются с ростом L/R_{d0} не монотонно. Этот результат и иллюстрирует определенную частоту реализации того или иного режима распада при использовании группы капель, которые оказывают взаимное влияние на соседние как за счет изменения скоростей тепломассообменных процессов и фазовых превращений, так и за счет непосредственно соударений между собой.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили установить предельные расстояния между каплями (от 8 до 10 характерных радиусов), при которых характеристики микровзрыва близки к регистрируемым в опытах с одиночными каплями. Полученные результаты важны для развития фундаментальных исследований в области процессов микровзрывной фрагментации, так как они показывают диапазоны применимости моделей и экспериментальных подходов с одиночными каплями для прогнозирования условий и характеристик исследованных процессов в аэрозольных технологиях.

Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-314.2019.8).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Watanabe H., Shoji Y., Yamagaki T., Hayashi J., Akamatsu F., Okazaki K. // *Fuel*. 2016. V. 182. P. 259–265.
- [2] Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шадрин Е.Ю., Шарыпов О.В. // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45. В. 22. С. 32–35.
- [3] Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. В. 16. С. 98–104.

- [4] *Romero R.J., Rodriguez-Martinez A.* // *Desalination*. 2008. V. 220. P. 506–513.
- [5] *Антонов Д.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2019. Т. 45. В. 16. С. 14–17.
- [6] *Tarlet D., Mura E., Josset C., Bellettre J., Allouis C., Massoli P.* // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. V. 77. P. 1043–1054.
- [7] *Sazhin S.S., Rybdylova O., Crua C., Heikal M., Ismael M.A., Nissar Z., Aziz A.R.B.A.* // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. V. 131. P. 815–821.
- [8] *Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A.* // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. V. 95. P. 184–197.
- [9] *Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A.* // *Fuel Process. Technol.* 2016. V. 152. P. 22–33.
- [10] *Antonov D., Bellettre J., Tarlet D., Massoli P., Vysokomornaya O., Piskunov M.* // *Energies*. 2018. V. 11. P. 3307 (1–17).