

03

Рост площади поверхности отделившихся фрагментов жидкости при высокотемпературном дроблении неоднородной капли воды

© Пискунов М.В., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
E-mail: piskunovmv@tpu.ru

Поступило в Редакцию 19 января 2017 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования капельного облака при интенсивном нагреве и последующем взрывном дроблении неоднородной капли воды. Эксперименты проведены при добавлении в капли воды графитовых частиц и нагреве сформированных неоднородных капель в потоке продуктов сгорания с температурой от 600 до 1100 К. Установлены три режима дробления неоднородных капель жидкости, отличающиеся суммарной площадью поверхности образующихся аэрозольных облаков. Определено влияние на выделенные режимы отношения объемов воды и включения, а также подведенной теплоты.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.12.44706.16709

Увеличение площади поверхности жидкости принято считать одним из наиболее распространенных подходов интенсификации теплообмена в газопарокапельных системах различного назначения [1–3]. Наличие дисперсной фазы в жидкостных потоках приводит к интенсификации фазовых превращений [4–6]. При этом масштабы такой интенсификации могут быть чрезвычайно большими для перспективных высокотехнологичных приложений в области термической и огневой очистки жидкостей, создания теплоносителей на основе дымовых газов, капель воды и пара, получения синтез-газа из различных растворов.

В работе [6] был установлен эффект взрывного дробления (распада) неоднородных (с добавлением твердых непрозрачных включений) капель воды при интенсивном нагреве в продуктах сгорания с высокой температурой. Объяснены физические основы изученных процессов и

определяющие эффекты [6]. Термин „взрывное дробление“ использован [6] (в соответствии с представлениями [7–9]) для иллюстрации высокой скорости прогрева капли и отрыва с ее поверхности фрагментов жидкости. Данный процесс представляет образование аэрозоля вследствие схлопывания интенсивно прогреваемой и „набухающей“ (заполненной паром) неоднородной капли воды. Актуальной и нерешенной до настоящего времени задачей является определение ключевого параметра — отношения площадей поверхности жидкости до и после взрывного дробления неоднородных капель, а также установление условий, при которых данный процесс можно считать устойчивым и стабильно воспроизводимым.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение условий и характеристик роста площади поверхности жидкости в результате взрывного дробления интенсивно нагреваемых неоднородных капель воды.

Эксперименты проводились с применением стенда [6]. В качестве камеры нагрева применялся вертикальный полый цилиндр из кварцевого стекла (длина — 1 м, внутренний диаметр — 0.2 м) со специализированными отверстиями для помещения термопар и неоднородных капель, а также проведения высокоскоростной видеорегистрации. При формировании потока продуктов сгорания с контролируемой температурой (T_g) и скоростью движения (U_g) в качестве горючего вещества применялся керосин. В отличие от работы [6], в которой применялся технический спирт, выбор керосина обусловлен более высокой температурой продуктов сгорания T_g (и длительностью ее поддержания). За счет варьирования параметров настройки нагнетательной системы температура T_g и скорость U_g изменялись в диапазонах 700–1100 К и 0.5–2 м/с. Контроль T_g проводился с применением трех одновременно размещенных в цилиндре хромель-алюмелевых термопар (диапазон 273–1373 К, погрешность ± 3 К). Достоверное определение скорости U_g обеспечивалось за счет применения метода Particle Image Velocimetry и кросскорреляционного комплекса [10].

Неоднородная капля воды формировалась по методике [6]. Генерация капель воды выполнялась дозатором (минимальный и максимальный объемы — 5 и 50 μl , шаг — 0.1 μl). Толщина пленки жидкости вокруг включения изменялась в пределах 0.2–1.5 мм. Капля с подложки весовой системы наконечником дозатора закачивалась в его выпускающий канал. Включения (графитовые частицы) в форме параллелепипеда

(размеры: $2 \times 2 \times 1 \text{ mm}$, $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}$, $2 \times 2 \times 3 \text{ mm}$) изготавливались с применением системы [6]. В частице выполнялось отверстие радиусом 0.15 mm и глубиной 0.3 mm . С применением последнего включение закреплялось на керамическом стержне (длиной 0.25 m). Стержень перемещался по двум координатам (вдоль оси симметрии цилиндра и перпендикулярно ей) с использованием моторизированных механизмов. Это позволило помещать каплю с включением под углом 90° к направлению потока газов. На включение дозатором опускалась капля воды таким образом, чтобы обеспечить условие его полного обволакивания [6]. С использованием двух высокоскоростных видеокамер проводилась видеорегистрация испарения и дробления капли.

Программное обеспечение Tema Automotive применялось для определения размеров неоднородных капель (максимальных диаметров по трем координатам и вычисления среднего d) и отделившихся в процессе дробления фрагментов жидкости (радиусов R_d), а также вычисления площади поверхности последних (S_{out}). Погрешности определения размеров капель и отделившихся фрагментов жидкости не превышали 0.01 mm .

Проведенные эксперименты позволили установить три режима взрывного дробления неоднородных капель воды, отличающиеся характеристиками протекания процесса: время прогрева, число образующихся капель и их площадь поверхности. На рис. 1 приведены типичные изображения объектов исследований при реализации трех выделенных режимов.

Первый режим представляет распад неоднородной капли на несколько (до 3–5) достаточно крупных жидкостных фрагментов с характерным размером R_d до $1–1.5 \text{ mm}$. Второй — характеризуется отделением от 5 до 10 фрагментов жидкости, размеры которых составляют от 0.5 до 1 mm . Третий соответствует условиям образования большой совокупности (несколько десятков и даже сотен) мелких капель ($R_d < 0.5 \text{ mm}$). Выделить установленные режимы дробления неоднородной капли стало возможным после обработки многочисленных видеограмм экспериментов с применением специализированных алгоритмов слежения и инструментов в Tema Automotive: Airbag, Advanced Airbag, Distance. По видеограммам с двух камер синхронно регистрировались процессы отрыва капель, определялись их размеры по трем координатам и площади поверхности. С применением высокоскоростной видеорегистрации установлено, что отрывающиеся фрагменты жидкости неоднородны

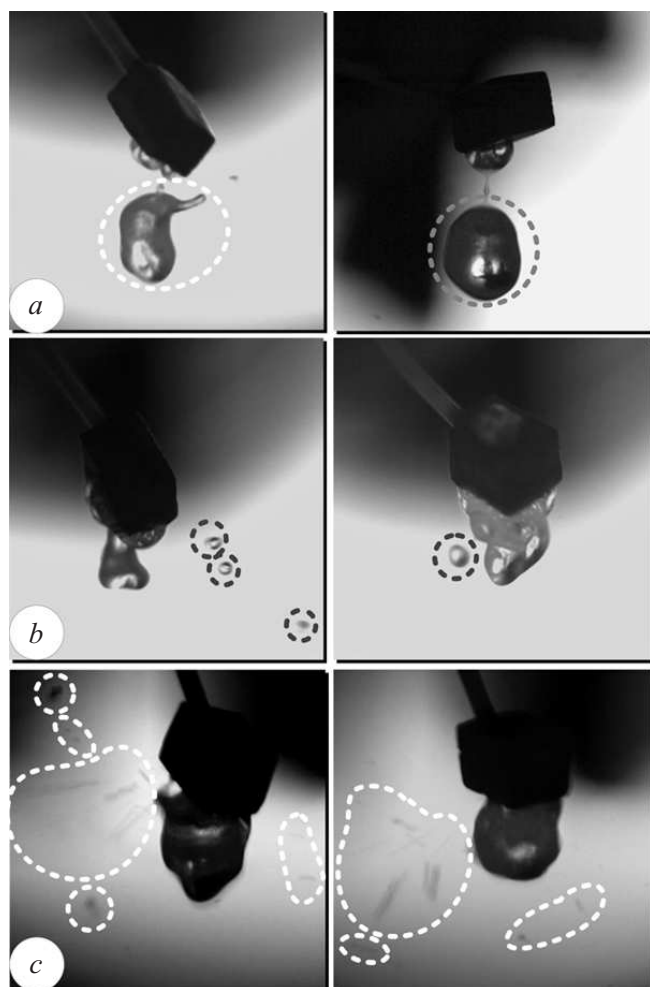


Рис. 1. Кадры видеogramм с отделением фрагментов жидкости при разных режимах (*a* — первый, *b* — второй, *c* — третий) взрывного дробления неоднородной капли воды.

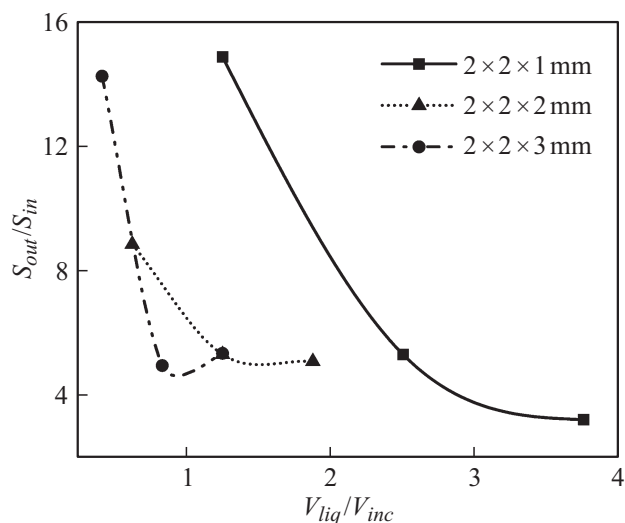


Рис. 2. Отношение суммарной площади поверхности фрагментов жидкости (S_{out}) после взрывного дробления капли к начальной площади поверхности жидкости (S_{in}) от отношения объемов воды V_{liq} и включения V_{inc} .

(содержат водяной пар и воздух). Как следствие, регистрировалось их последующее вскипание и дробление.

На рис. 2 представлены значения отношений площадей поверхности отделившихся фрагментов (S_{out}) после распада неоднородной капли и пленки жидкости (S_{in}) до взрывного дробления последней, характеризующие интенсивность протекания этого процесса при нагреве в условиях разных соотношений объемов включения (V_{inc}) и жидкости (V_{liq}) (соответственно разной толщины пленки последней вокруг твердой частицы). Хорошо видно, что чем меньше отношение V_{liq}/V_{inc} , тем заметнее преобладание третьего режима дробления неоднородных капель. Первый режим становится основным при значениях V_{liq} , в несколько раз больших, чем V_{inc} . Второй режим реализовывался при изменении V_{liq}/V_{inc} в диапазоне от 1 до 2.

Анализ результатов выполненных экспериментов с варьированием температуры и скорости движения продуктов сгорания позволил установить предельные условия, при которых регистрировалось доми-

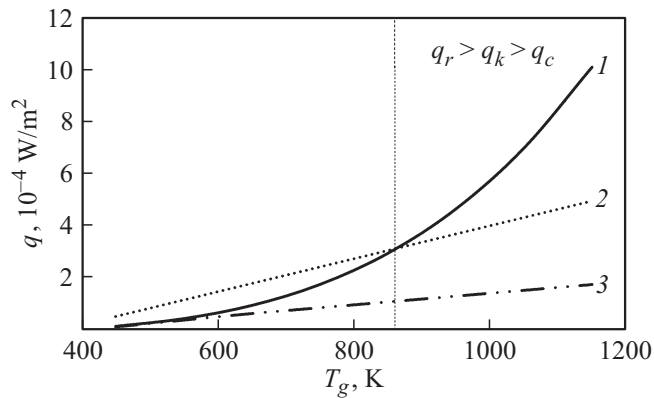


Рис. 3. Плотности лучистого q_r (1), конвективного q_k (2) и кондуктивного q_c (3) тепловых потоков при нагреве неоднородной капли в потоке продуктов сгорания.

нирование одного режима дробления над остальными. В частности, при скорости движения потока U_g до 1 м/с и температуре продуктов сгорания T_g выше 900 К третий режим (формирование мелкодисперсного аэрозоля) преобладал (регистрировался в 8 экспериментах из 10) над первым и вторым. При повышении скоростей движения потока продуктов сгорания ($U_g > 1$ м/с) чаще реализовывался второй режим. Это обусловлено срывом (отрывом) части фрагментов жидкости за счет аэродинамических сил. Вследствие вязкостных свойств жидкости отрывающиеся фрагменты были разных размеров ($R_d = 0.5-1$ мм). При высокой скорости движения потока (более 1.5 м/с), но относительно низкой температуре газов (от 800 до 900 К) доминировал первый режим. Этот результат обусловлен значительным радиационным тепловым потоком от газов к поверхности капли.

На рис. 3 приведены типичные значения плотностей конвективных ($q_k = \alpha(T_g - T_s)$, коэффициент теплоотдачи $\alpha = 40-70$ Вт/м²·К, температура поверхности жидкости $T_s = 370$ К), кондуктивных ($q_c = \lambda(T_g - T_s)/\delta$, коэффициент теплопроводности смеси газов и паров $\lambda = 0.028-0.045$ Вт/м·К, толщина буферного парового слоя $\delta = 0.001-0.002$ м) и радиационных ($q_r = \epsilon_w \sigma(T_g^4 - T_s^4) + \epsilon_v \sigma T_g^4 + \epsilon_g \sigma T_g^4$, степени черноты кварцевых стенок нагревательной камеры

($\varepsilon_w = 0.9$), паров воды ($\varepsilon_v = 0.01$), продуктов сгорания ($\varepsilon_g = 0.12$); постоянная Стефана–Больцмана $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$) тепловых потоков в рассматриваемой системе „неоднородная капля воды — поток продуктов сгорания“. Все исходные параметры в расчете выбирались с учетом зависимости теплофизических свойств веществ от температуры и исходя из современных представлений об исследованных процессах. Штриховой вертикальной прямой отмечена граница, при превышении которой реализуются три установленных режима дробления. Чем выше q_r , тем интенсивнее дробление неоднородной капли воды. Это еще раз подтверждает сформулированную в [6] гипотезу о механизме взрывного дробления неоднородной капли воды, основанную на интенсивном прогреве поверхности включения и достижении ею температуры значений, соответствующих вскипанию воды. Чем выше лучистая составляющая теплового потока, тем быстрее будут реализовываться прогрев поверхности включения, формироваться центры парообразования, расти паровой слой и „набухать“ капля (заполняться паром). Конвективная составляющая теплового потока приводит к интенсификации перемешивания прогретых (у поверхности включения и свободной поверхности капли) и непрогретого (в глубине пленки) слоев воды. Эти процессы несколько замедляют прогрев поверхности включения, и процессы зарождения и роста пузырьков становятся не такими масштабными (при доминировании радиационного теплообмена у поверхности включения аккумулируется большое количество энергии, и интенсивно зарождаются пузырьки пара). Поэтому вместо кратковременного образования мелкодисперсного аэрозоля могут образовываться фрагменты с разными размерами (от третьего режима реализуется переход ко второму и первому). Третий режим характеризовался временами протекания процесса менее 1–1.5 s, второй и первый — до 5–8 s. Отношение же площади поверхности отделившихся в результате дробления фрагментов жидкости S_{out} к S_{in} достигало для третьего режима 14–17, второго — 5–7, первого — 1.5–3.

Таким образом, проведенные исследования позволили впервые определить масштабы роста площади поверхности жидкости в результате ее интенсивного парообразования на внутренней границе раздела сред с последующим взрывным дроблением. Полученные результаты являются фундаментальной основой развития перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий в области термической очистки жидкостей, пожаротушения, теплоносителей нового поколения и др.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ (МД-1221.2017.8).

Список литературы

- [1] Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях. М.: МЭИ, 2014. 542 с.
- [2] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокпельных потоках. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2009. 284 с.
- [3] Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 302 с.
- [4] Вараксин А.Ю. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 5. С. 777–796.
- [5] Минаков А.В., Лобасов А.С., Рудяк В.Я. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 13. С. 44–51.
- [6] Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Пискунов М.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 16. С. 98–104.
- [7] Hopfinger E.J., Lasheras J.C. // Phys. Fluids. 1996. V. 8. N 7. P. 1696–1698.
- [8] Stan C.A., Milathianaki D., Laksmo H. et al. // Nat. Phys. 2016. V. 12. N 10. P. 966–971.
- [9] Allen S.D. // Nat. Phys. 2016. V. 12. N 10. P. 899–900.
- [10] Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 9. С. 50–55.