

## СЕКЦИЯ № 8. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК: ФИЗИКИ, ХИМИИ, МАТЕМАТИКИ

### Экспериментальное исследование процессов столкновения капель распыленной воды в потоке высокотемпературных газов

Д. В. Антонов, Р. С. Волков, П. А. Стрижак  
dva14@tpu.ru

*Научный руководитель: профессор, П.А. Стрижак  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050*

**Ключевые слова:** капли воды, газовая среда, коагуляция, столкновение, разлет.

**Введение.** В настоящее время в связи со стремительным развитием технического прогресса, противопожарная безопасность является весьма актуальной. При этом основной задачей всевозможных разработок и исследований является повышение эффективности известных средств и методов пожаротушения. На сегодняшний день одним из наиболее распространенных является способ тушения возгораний, при котором осуществляется мелкодисперсный распыл воды в зону пожара. При этом, как правило, основное внимание уделяется таким параметрам, как взаимное расположение форсунок, скорости распыла, расход воды, дисперсность капель в потоке и др. Абсолютно не берется во внимание тот факт, что капли при движении во встречно направленной высокотемпературной газовой среде подвержены многочисленным столкновениям, последствием которых может являться изменение структуры капельного потока. Это, в свою очередь, способно по-разному сказываться на эффективности тушения возгораний: от уменьшения времени их ликвидации до увеличения расхода тушащей жидкости.

**Цель настоящей работы** – экспериментальное исследование и определение вероятности наступления одного из характерных режимов столкновения капель воды при их движении в потоке высокотемпературных газов.

**Методика экспериментальных исследований.** При проведении исследований использовался экспериментальный стенд, обеспечивающий видеорегистрацию процессов столкновения капель в потоке высокотемпературных газов, аналогичный применяемому в работах [3,4]. В отличие от работ [3,4] стенд использовался для регистрации процесса столкновения двух капель воды, попавших в регистрационную область.

Для обеспечения распыления капель воды использовалась форсунка ФМТ-9,0 и баллон с водой со специальными включениями – «трассерами», представляющими нанопорошок диоксида титана. Последний вводился в воду для повышения контрастности видеogramм с изображениями капель. Начальные размеры (радиусы)  $r_m$  капель воды варьировались в диапазоне 0,05...1 мм. Начальные скорости капель  $u_m$  изменялись в диапазоне 0,5...5 м/с. Это позволяло регистрировать столкновения капель с различными характеристиками: скоростями и размерами. Благодаря широкому

диапазону скоростей и размеров капель была увеличена область экспериментальных исследований. Максимальные случайные погрешности определения рассматриваемых параметров составили:  $r_{m1}$  и  $r_{m2} - 2,1 \%$ ,  $u_{m1}$  и  $u_{m2} - 3,4 \%$ .

Для формирования высокотемпературной газовой среды с контролируемыми параметрами применялся вертикальный цилиндрический канал из жаростойкого светопрозрачного стекла (высота 1 м, диаметр 0,2 м). В основании канала устанавливался полый цилиндр, в межстеночное пространство которого заливалось жидкое топливо – керосин, которое зажигалось непосредственно перед проведением опытов. Через интервал времени около 300 секунд вследствие стационарного режима горения керосина в цилиндре формировалась газовая среда с требуемой для экспериментов температурой (1100 К).

В качестве регистрационной аппаратуры использовались кросскорреляционная камера с форматом изображения 2048×2048 пикселей, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами не более 5 мкс; двойной импульсный твердотельный лазер, имеющий длину волны 532 нм, энергию в импульсе не менее 70 мДж, длительность импульса не более 12 нс, частоту повторений не более 15 Гц; синхронизирующий процессор с дискретизацией сигналов не более 10 нс. Данное оборудование позволяло регистрировать моменты смещения капельного и газового потоков, а также строить двухкомпонентные поля скоростей газового потока.

Для получения видеок кадров столкновений двух капель воды использовалась высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA1. С ее помощью производилась видеофиксация процесса столкновения капель в разных регистрационных областях. Затем с использованием специального программного обеспечения «Тема Automotive» проделывалась процедура обработки снятых видеок кадров, по результатам которой определялись режимы столкновений капель воды, а также оценивалось влияние скоростей ( $u_{m1}$ ,  $u_{m2}$ ) и размеров ( $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ) на вероятность возникновения того или иного результата столкновения.

**Результаты.** В ходе данного исследования были выявлены характерные режимы столкновения капель: коагуляция (слияние), дробление (образование более трех капель существенно меньших относительно начальных размеров) и разлет (образование двух капель с характерными размерами, близкими начальным). Получены кадры видеogramм экспериментов с изображением коагулирующих, разлетающихся и дробящихся капель в процессе их движения в потоке высокотемпературных газов.

Анализ более 1000 кадров видеogramм проведенных экспериментов позволил определить вероятности реализации каждого из трех последствий столкновений. При численной обработке результатов экспериментов использованы параметры:

$P_1=N_1/(N_1+N_2+N_3)$ ,  $P_2=N_2/(N_1+N_2+N_3)$ ,  $P_3=N_3/(N_1+N_2+N_3)$ , где  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  – число столкновений, в результате которых реализуется, соответственно, первый, второй и третий варианты последствий столкновений.

На рис. 1 представлены типичные значения критериев  $P_1$  (коагуляция),  $P_2$  (разлет) и  $P_3$  (дробление) при изменении скоростей движения сталкивающихся капель. Хорошо видно (Рис. 1), что вероятность наступления процесса коагуляция высока при малых скоростях и уменьшается по мере увеличения скорости капель воды. Это обусловлено превышением сил вязкости над силами инерции. При росте скоростей капель воды вероятность наступления процессов разлета ( $P_2$ ) и дробления ( $P_3$ ) увеличивается, и в один из моментов вероятность наступления каждого процесса

равноправна (равно возможна). Этому моменту соответствует скорость капель воды  $u_{m1} = 9 - 11$  м/с.

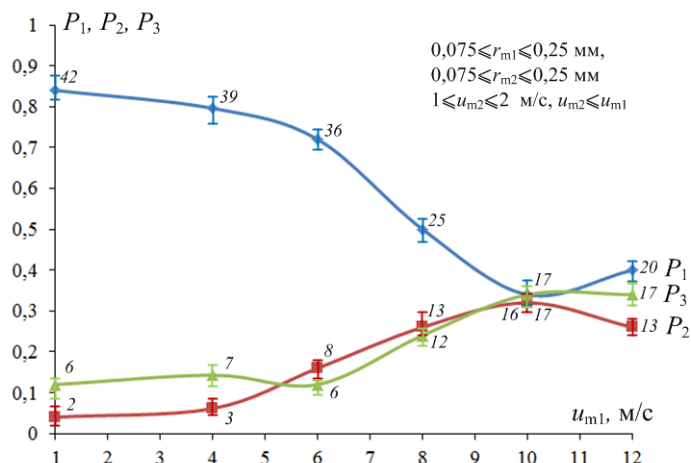


Рис. 1. Статистика возникновения каждого из трех последствий столкновения двух капель при изменении скорости перемещения одной из них:  $P_1$  – коагуляция,  $P_2$  – разлет,  $P_3$  – дробление

Аналогичные Рис. 1 зависимости вероятностей наступления различных последствий столкновений были получены для различных размеров капель. Так при сопоставимых размерах капель рост разности скоростей их движения приводит к увеличению вероятности разлета и снижению числа столкновений с коагуляцией до  $P_1=0,15$ . При этом вероятности дробления минимальны ( $P_3=0,11$ ). Этот результат, скорее всего, обусловлено тем, что при сопоставимых размерах и малых скоростях движения капель их импульсы практически идентичны. Поэтому силы инерции при столкновении минимальны. Силы поверхностного натяжения и вязкости существенны. Это приводит к доминированию процесса коагуляции.

**Заключение.** В результате проведенных исследований были выявлены три характерных режима столкновения: коагуляция, дробление и разлет. Также в экспериментах установлены основные характеристики ( $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$ ,  $u_{m1}$ ,  $u_{m2}$ ) режимов столкновения капель воды в потоке высокотемпературных газов. Установлено, что все характеристики тем или иным образом влияют на режим столкновения. При малых скоростях вероятность наступления коагуляции высока, при более высоких происходит увеличение частоты реализации процессов дробления и разлета. Полученные результаты иллюстрируют целесообразность учета трех режимов столкновения при формулировании математических выражений для основных характеристик капель, а также для более эффективного использования потока капель при обеспечении пожарной безопасности и тушения пожаров.

*«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).»*

**Список литературы:**

1. Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплоперенос и гидродинамика в газочастичных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
2. Алеханов Ю.В., Блинецов М.В., Власов Ю.А. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 6. С. 1–6.
3. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 7. С. 15–23.
4. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ТВТ. 2014. Т. 52. № 4. С. 597–604.