

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СОСТАВЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ НА ПОЛНОТУ ЕЕ ИСПАРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ

Волков Р.С.

Научные руководители: Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., профессор, Стрижак П.А., д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: romanvolkov@tpu.ru

На протяжении последних нескольких лет активно обсуждаются перспективы использования «тонкораспыленной» воды в борьбе с различными типами возгораний. Теоретические [1, 2] и экспериментальные [3] исследования показали, что применение потоков распыленной жидкости позволяет существенно увеличить коэффициент полезного использования тушащего средства в зоне пламени. Анализ макроскопических закономерностей парообразования жидкости в зоне пламени [1–3] позволяет заключить, что одним из факторов, существенно влияющих на интенсивность испарения тушащей среды, является ее компонентный состав. Представляет интерес экспериментальное исследование влияния твердых включений в каплях воды на интенсивность их испарения в зоне пламени.

Цель работы - экспериментальный анализ влияния твердых включений в каплях воды на интенсивность парообразования в зоне пламени.

Для анализа процесса испарения капель воды в высокотемпературной области использовалась экспериментальная установка (рис. 1), аналогичная используемой в опытах [3], работающая на базе оптических методов диагностики двухфазных газопарожидкостных потоков «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [4, 5].

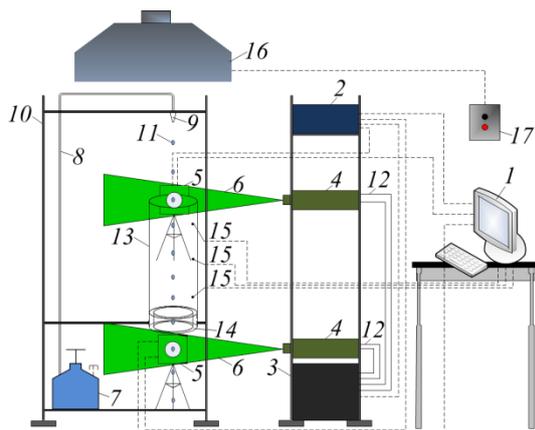


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – синхронизатор; 3 – генератор лазерного излучения; 4 – двойной твердотельный импульсный лазер; 5 – кросскорреляционная камера; 6 – световой «нож»; 7 – ёмкость с рабочей жидкостью; 8 – канал подачи рабочей жидкости; 9 – дозатор; 10 – штатив; 11 – капли рабочей жидкости; 12 – канал движения охлаждающей жидкости лазера; 13 –

цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 14 – полый цилиндр, в межстеночное пространство которого залита горючая жидкость; 15 – термодатчик; 16 – вытяжная вентиляция; 17 – пульт включения/отключения вентиляции

При проведении исследований использовалась жидкость с предварительно введенными в нее твердыми углеродистыми частицами. Размеры частиц варьировались в диапазоне $L_m = 450 \div 500$ мкм, концентрация частиц в воде γ_c - от 0 до 1 %. Для оценки доли испарившейся жидкости в рассмотренном введем параметр $\Delta R = (R_{вх} - R_{вых}) / R_{вх}$, где $R_{вх}$, $R_{вых}$ – значение радиуса капли на входе и выходе из канала с газами, мм

На рис. 2 приведен типичный видеокادر с изображением одиночной капли, содержащей твердые включения. Видно, что частицы в форме неправильных многоугольников хаотичным образом ориентированы относительно друг друга, но достаточно равномерно распределены в капле. Это, в первую очередь, можно объяснить их перемещениями в капле вследствие конвекции.



Рис. 2. Видеограмма капли воды ($R_d=3$ мм) с примесью углеродистых частиц ($L_m = 450 \div 500$ мкм): 1 – капля, 2 – углеродистые частицы

На рис. 3 представлена зависимость параметра ΔR от относительной массовой концентрации углеродистых частиц в каплях воды (γ_c). Установлено (рис. 3), что с ростом γ_c от 0 до 1 % существенно (почти в 3 раза) возрастает доля испарившейся жидкости при движении капель воды через высокотемпературную газовую среду. Этот эффект можно объяснить тем, что при даже относительно небольшом увеличении γ_c в несколько раз возрастает теплопроводность неоднородной системы «капля воды – твердые включения». Как следствие, значительно снижается время прогрева приповерхностного слоя капли воды и последующего эндотермического фазового превращения. Прогрев жидкости происходит с реализацией кондуктивного, конвективного и радиационного механизмов теплопереноса. Твердые включения

поглощают существенно больше энергии излучения (продуктов сгорания) по сравнению с водой. Возрастает теплота, аккумулируемая в системе «капля воды – твердые включения». В малой окрестности твердых включений формируются локальные области фазовых превращений. Это, в свою очередь, приводит к перемещению как твердых включений, так и непосредственно слоев жидкости внутри капель – реализуется конвективный теплоперенос.

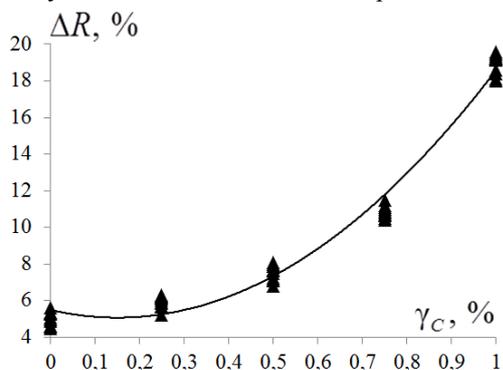


Рис. 3. Зависимость параметра ΔR от относительной массовой концентрации углеродистых частиц γ_C для капель с $R_d = 3$ мм (размер углеродистых частиц $L_m = 50 \div 70$ мкм)

При увеличении размеров твердых включений в каплях жидкости влияние выделенных эффектов на интенсивность прогрева жидкости существенно возрастает. Так, на рис. 4 приведена зависимость параметра ΔR от характерного среднего размера углеродистых частиц L_m . Показано, что при средних размерах частиц $L_m = 50 \div 70$ мкм величина параметра ΔR составляет 7,6 %, при $L_m = 250 \div 300$ мкм – 9,1 %, при $L_m = 450 \div 500$ мкм – 12,9 %.

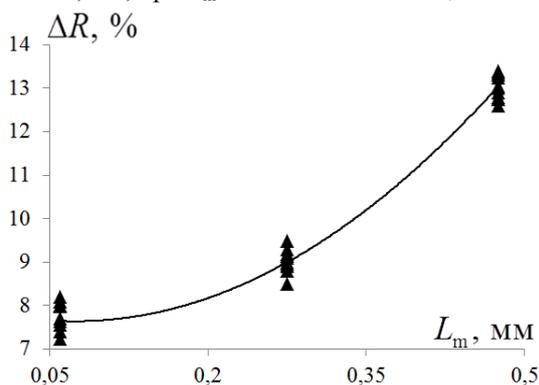


Рис. 4. Зависимость параметра ΔR от характерного среднего размера углеродистых частиц L_m для капель с $R_d = 3$ мм ($\gamma_C = 0,5$ %)

Выявленные эффекты можно использовать для интенсификации процессов испарения локально «сброшенной» (подаваемой) в зону горения жидкости. Так, например, при относительно небольшой концентрации твердых включений (до 1 %) не требуется существенное измельчение капель жидкости. Целесообразно лишь

порционная подача последней. За счет кондуктивного, конвективного и лучистого теплообмена капли движущейся в виде определенных порций («слоев») жидкости будут деформироваться и разрушаться. Как следствие, будет формироваться парок капельное облако. Эффективность воздействия таких неоднородных многофазных смесей по сравнению с монолитной водой обоснована многочисленными исследованиями, например, [1–3].

Результаты выполненных экспериментов позволяют сделать вывод о существенной роли качества подаваемой в зону горения воды. Установлено, что наличие типичных твердых неметаллических включений в относительно крупных ($R_d = 1 \div 5$ мм) каплях жидкости оказывает существенное влияние на процесс их испарения при прохождении зоны высокотемпературных продуктов сгорания. Показано, что рост массовой концентрации, а также размеров твердых включений в капле воды существенно интенсифицируют парообразование и убыль массы жидкости. Полученные результаты показывают, что для повышения эффективности использования воды в зоне пламени помимо измельчения капель также целесообразно специализированное введение твердых включений в состав тушащей жидкости. При этом размеры включений целесообразно выбирать в несколько раз меньшими генерируемых капель жидкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 14–08–00057).

Список литературы

1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21, № 5. С. 74–78.
2. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4, № 12. С. 531–538.
3. Волков Р. С., Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Экспериментальное исследование закономерностей испарения тонкораспыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания. Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 35, № 9. С. 38–46.
4. Keane R.D., Adrian R.J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images // Applied Scientific Research. – 1992. – V. 49. – P. 191–215.
5. Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry // Measurement Science and Technology. – 1997. – V. 8. – P. 1379–1392.