

5. Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 369–371.
6. Визгавлюст Н.В., Старченко А.В. Программа для расчета концентрации монооксида азота в пылеугольной топке котлоагрегата // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611378. Бюлл. прогр. – 2014. – № 1.
7. Безгрешнов А.Н., Липов Ю.М., Шлейфер Б.М. Расчет паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240с.

УДК 536.4

КРОССКОРРЕЛЯЦИОННАЯ ВИДЕОФИКСАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОПАРОКАПЕЛЬНЫХ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Волков Р.С., Высокоморная О.В., Жданова А.О., Стрижак П.А.
Томский политехнический университет, Томск
E-mail: pavelspa@tpu.ru

В последние годы активно обсуждаются вопросы повышения эффективности современных технологий пожаротушения. Выдвигаются идеи использования диспергированных флегматизаторов горения (в особенности тонкораспыленной воды) в борьбе с пожарами. Существуют разные взгляды на применение тонкораспыленной воды при локализации возгораний. Однако последние результаты не только теоретических, но и экспериментальных исследований [1-7] показали особую эффективность применения данных систем в сравнении с традиционными технологиями пожаротушения. Особый интерес вызвала интенсификация процесса испарения тонкораспыленной воды в области пламени, повышающая эффективность ее использования в борьбе с возгораниями. На данный момент с помощью современных методов диагностики можно детально рассмотреть, как могут воздействовать начальные параметры (начальная температура, скорость, состав, размеры капель в потоке) на сам процесс.

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение влияния начальных параметров тонкораспыленной воды на основные характеристики формирования двухфазных газопарокапельных потоков при их движении в области высокотемпературных продуктов сгорания.

Экспериментальный стенд и методы исследований

Схема экспериментального стенда, использованного при проведении исследований, представлена на рисунке 1. Экспериментальная установка представляет собой высокоскоростную измерительную систему диагностики двухфазных газо-, парожидкостных потоков, работающую на базе оптических методов «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Interferometric Particle Imaging» (IPI) [8-10]. Основными элементами экспериментальной установки (аналогично 5-7) являются: кросскорреляционная видеокамера 3 с форматом изображения – 2048×2048 пикселей, кадровой частотой – не менее 1,5 Гц, минимальной задержкой между двумя последовательными кадрами – не более 5 мкс; двойной

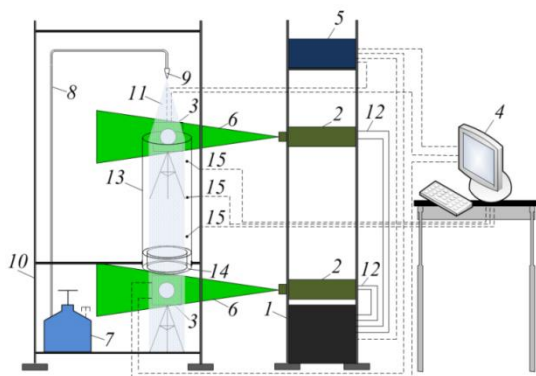


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – генератор лазерного излучения; 2 – двойной импульсный твердотельный лазер; 3 – кросскорреляционная видеокамера; 4 – ПК: персональный компьютер; 5 – синхронизирующий процессор; 6 – световой «нож»; 7 – емкость с рабочей жидкостью; 8 – канал подачи рабочей жидкости; 9 – распылитель; 10 – штатив; 11 – капилляр тонкораспыленной жидкости; 12 – канал охлаждения лазера; 13 – светопрозрачный жаростойкий цилиндр; 14 – полый цилиндр с горючей жидкостью; 15 – термопары.

внутренней и внешней стенок – 0,1 м и 0,18 м соответственно) устанавливался в основание светопрозрачного жаростойкого цилиндрического канала 13 (высота 1 м, диаметр 0,2 м). В межстеночное пространство цилиндра 14 заливался керосин – горючая жидкость со стабильными свойствами. Перед началом экспериментов производилось зажигание керосина. В процессе горения во внутреннем пространстве цилиндрического канала 13 формировалось пламя и, как следствие, поток высокотемпературных продуктов сгорания. После прогрева внутренней полости цилиндра 13 до постоянных температур (около 1100 К), рабочая

импульсный твердотельный лазер 2 с активной сферой «алюмо-иттриевый гранат» и добавками неодима, 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 5 с дискретизацией сигналов – не более 10 нс и поддерживающий режимы внешнего и внутреннего запуска.

Эксперименты проводились следующим образом. Полый цилиндр 14 (высота 0,1 м, диаметр

жидкость, находящаяся под давлением в емкости 7, по каналу 8 подавалась на вход распылителя 9. Выставлялись необходимые параметры распыления жидкости. Распылителем 9 осуществлялась подача капель рабочей жидкости в канал 13, заполненный высокотемпературными продуктами сгорания. При помощи светового «ножа» 6 лазера 2 частицы потока многократно освещались. Процедура видеорегистрации проводилась кросскорреляционной камерой 3. Видеоизображения передавались на персональный компьютер (ПК) 4, где выполнялась их обработка.

Последующая обработка изображений в установленных регистрационных областях (на входе и выходе цилиндрического канала 13) позволяла рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить поля скорости «трассеров» с помощью метода PIV. Также были определены размеры капель с помощью метода IPI.

Для повышения качества видеоизображений при подсветке лазером в рабочую жидкость (аналогично опытам [5-7]) добавляли частицы диоксида титана (около 0,5 % по массе).

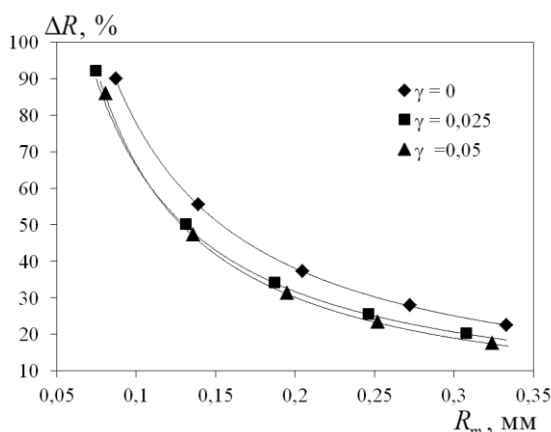


Рис. 2. Зависимость параметра ΔR от средних начальных размеров капель R_m при различных массовых долях соли γ в растворе рабочей жидкости ($T_w=293$ K, $U_m=0,8$ м/с).

Все эксперименты проводились в три этапа. На первом этапе в рабочую жидкость добавлялась соль NaCl (массовая доля γ в растворе изменялась в пределах $0 \div 0,05$) и оценивалось влияние примесей соли в жидкости на полноту ее испарения при прохождении через высокотемпературные газы. На следующем этапе определялось влияние начальной температуры рабочей жидкости ($293 \div 323$ K) на характеристики ее испарения. На третьем этапе производилась оценка влияния изменения начальных скоростей ($0,8 \div 1,4$ м/с) потока диспергированной жидкости на процесс ее испарения.

Для оценки полноты испарения рабочей жидкости при прохождении ей зоны пламени был введен интегральный параметр ΔR :

$$\Delta R = \frac{R_m^{\text{вх}} - R_m^{\text{вых}}}{R_m^{\text{вх}}} \cdot 100 ,$$

где $R_m^{\text{вх}}$, $R_m^{\text{вых}}$ – значение среднего характерного радиуса капель жидкости на входе и выходе из цилиндрического канала $I3$ соответственно, мм.

Температура газов (продуктов сгорания) в канале $I3$ контролировалась хромель-алюмелевыми (диапазон измеряемых температур $273 \div 1373$ К, допустимое отклонение $\Delta = 3,3$ К) термопарами на разных по высоте уровнях (0,15 м, 0,5 м, 0,85 м) и составляла 1070 ± 30 К. Начальная температура рабочей жидкости контролировались хромель-копелевыми (диапазон измеряемых температур $233 \div 573$ К, допустимое отклонение $\Delta = 2,5$ К) термопарами. Использовались известные методики термопарных измерений [11].

Систематические ошибки в измерениях температуры газа и жидкости не превышали 2,5 % [12], «трассирующих» скоростей – 2 % [8, 9], размеров капель – 1,5 % [10].

В ходе проведения серии экспериментов была произведена оценка влияния указанных выше факторов на полноту испарения капель жидкости в зоне пламени. На рисунке 2 показано влияние примесей соли на интенсивность испарения капель распыленной воды.

Так установлено, что при росте массовой доли γ соли NaCl в составе рабочей жидкости интенсивность ее испарения снижается незначительно (в пределах 10 %). В природных водоемах солесодержание может колебаться в диапазоне 0-100 г/л, поэтому нет необходимости выбора водоема, забора большого (часто избыточного) количества жидкости воздушными судами, ее специальной подготовки и других сопутствующих затратных операций при тушении лесных пожаров.

На рисунке 3 показано влияние начальной температуры воды на интенсивность ее испарения при прохождении через зону пламени. При изменении начальной температуры T_w ($293 \div 323$ К) в несколько раз интенсифицирует испарение распыленной воды.

В действительности же при разработке систем пожаротушения данный фактор не учитывается, хотя температура T_w тушащей жидкости в зависимости от температуры окружающей среды способна меняться в широком диапазоне.

Начальная скорость U_m потока распыленной жидкости также должна являться немаловажным фактором на этапах проектирования систем пожаротушения. Из результатов проведенных экспериментов,

представленных на рисунке 4 видно, что начальная скорость капель умеренно влияет (в пределах 5 %) на полноту их испарения в диапазоне скоростей (0,8÷1,5 м/с). В реальных же системах пожаротушения можно спрогнозировать значительное увеличение вклада скоростей U_m в полноту испарения скоростей U_m , т.к. скорость потока может составлять десятки метров в секунду.

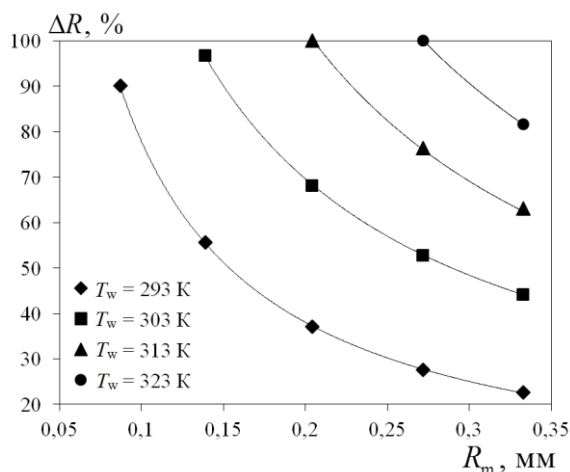


Рис. 3. Зависимость параметра ΔR от средних начальных размеров капель R_m при различных начальных температурах T_w рабочей жидкости ($\gamma=0$, $U_m=0,8$ м/с).

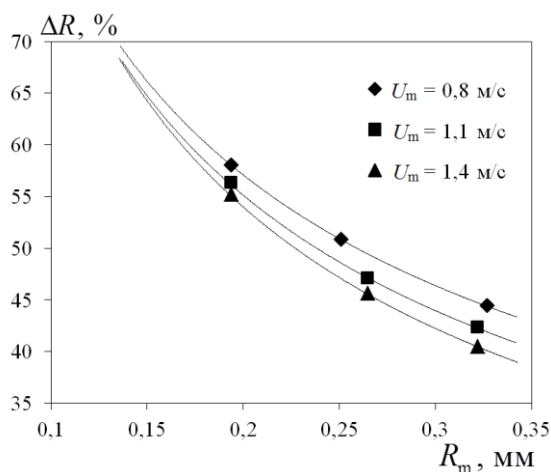


Рис. 4. Зависимость параметра ΔR от средних начальных размеров капель R_m при различных начальных скоростях движения U_m потока жидкости ($\gamma=0$, $T_w=298$ K).

Также, в результате проведенных экспериментов получено, что для помещений, где высота пламени, как правило, не превышает 1-2 м, скорость восходящих продуктов сгорания составляет 0,3÷2 м/с, а температура тушащей жидкости в системе пожаротушения соответствует комнатной, капли с размерами $R_m > 0,3$ мм проходят сквозь пламя практиче-

ски не испарившись (рис. 2-4), а капли с размерами $R_m \leq 0,15$ мм практически в полном объеме подвержены развороту и последующему уносу с высокотемпературными продуктами сгорания.

На основании полученных данных при тушении возгораний в помещениях можно рекомендовать использование полидисперсного капельного потока, более 50 % должны составлять капли с размерами $0,15 < R_m \leq 0,25$ мм. Капли с данным размером при продолжительном воздействии на пламя проникают в зону горения, и, испарившись там полностью, снижают температуру пламени ниже температур начала термического разложения горящих материалов и конструкций.

В результате проведенных экспериментальных исследований составлена математическая модель, которая описывает движение групп капель воды в высокотемпературной газовой среде. Математическая модель включает следующую систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных ($0 < \tau < \tau_d$):

$$0 < R < R_L, 0 < Z < Z_1, Z_2 < Z < Z_3, Z_4 < Z < Z_L; R_1 < R < R_L, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4$$

$$\frac{1}{Fo_1} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2}; \quad \frac{\partial \gamma_w}{\partial \tau} = Gp_3 \left(\frac{\partial^2 \gamma_w}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \gamma_w}{\partial R} + \frac{\partial^2 \gamma_w}{\partial Z^2} \right);$$

$$\gamma_f + \gamma_w = 1;$$

$$0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4$$

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2}; \quad Fo_1 = \frac{\lambda_1 t_m}{\rho_1 C_1 z_m^2}, Fo_2 = \frac{\lambda_2 t_m}{\rho_2 C_2 z_m^2}, Gp_3 = \frac{D_3 t_m}{z_m^2}, \dots$$

Начальные ($\tau=0$) условия (рис. 1, а): $\Theta = \Theta_0$ при $0 < R < R_L, 0 < Z < Z_1, Z_2 < Z < Z_3, Z_4 < Z < Z_L; R_1 < R < R_L, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4; \Theta = \Theta_f, \gamma_f = 1, \gamma_w = 0$ при $0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4$.

Граничные условия (рис. 1, а): на границах «жидкость – газ» ($R=R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4; Z=Z_1, Z=Z_2, Z=Z_3, Z=Z_4, 0 < R < R_1$) для уравнения диффузии задавались краевые условия II рода с учетом вдува паров воды; на внешних границах ($R=0, R=R_L, 0 < Z < Z_L; Z=0, Z=Z_L, 0 < R < R_L$) для всех уравнений принималось условие равенства нулю градиентов соответствующих функций. В отличие от модели [13] для учета влияния вдува паров воды на условия теплообмена на границах «жидкость – газ» в соответствии с заключениями [14] для уравнений энергии выставлялись следующие краевые условия:

$$R=R_1, Z_1 < Z < Z_2, Z_3 < Z < Z_4,$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial R} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} - Q_e W_e \frac{z_m}{\Delta T \lambda_2} - \rho_3 C_3 V_e (\Theta_{3s} - \Theta_{2s}) \frac{z_m}{\lambda_2},$$

$$Z=Z_1, Z=Z_2, Z=Z_3, Z=Z_4, 0 < R < R_1,$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial Z} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} - Q_e W_e \frac{z_m}{\Delta T \lambda_2} - \rho_3 C_3 V_e (\Theta_{3s} - \Theta_{2s}) \frac{z_m}{\lambda_2}.$$

Уравнение движения капли в условиях парообразования с учетом действия сил сопротивления и тяжести согласно представлениям [15–17] имеет следующий вид:

$$\frac{dv_d}{dt} = \frac{3\rho_3}{4\rho_2 2r_d} c_\chi |v_d - v_e| (v_d - v_e) + g, \text{ где } v_d(0) = v_0.$$

Таким образом, полученные в результате проведенных экспериментов и полученная на их основе математическая модель способны довольно подробно описать процесс испарения капель тонкораспыленной жидкости, движущихся через высокотемпературный газовый поток, с учетом целого ряда различных факторов.

В результате серии проведенных экспериментов получены зависимости влияния изменения основных параметров капель распыленной воды (начальная скорость, содержание примесей, размеры капель, температура тушащей жидкости) на процесс и степень их испарения при прохождении через высокотемпературные продукты сгорания.

Выбран полидисперсный капельный поток (не менее 50% которого составляют капли с размерами $0,15 < R_m \leq 250$, мкм), как наиболее эффективный при ликвидации возгораний в помещениях.

Разработана математическая модель, которая описывает процессы испарения капель жидкости при их движении в высокотемпературной газовой среде, позволяющая с учетом выявленных экспериментально особенностей производить прогностическую оценку доли испарившейся воды. Данная модель должна применяться для определения основных параметров оборудования, работающего в системах пожаротушения на базе тонкораспыленной воды.

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

Список литературы:

1. B. Yao, B.H. Cong, J. Qin, W.K. Chow, Fire Safety Journal 47, 32 (2012)
2. Na Meng, Longhua Hu, Shuai Liu, Long Wu, Longfei Chen, Binghai Liu. Journal of Fire Sciences 30, 138 (2012)
3. M. Guptaa, R. Rajoraa, S. Sahaia, R. Shankar, A. Ray, S.R. Kale, Fire Safety Journal 54, 130 (2012)
4. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Math. Prob. Eng. 2014, 920480 (2014)
5. R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, Journal of Engineering Physics and Thermophysics 87, 450 (2014)
6. P.C. Волков, О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, Инженерно-физический журнал 86 (2), 1327 (2013)

7. R.S. Volkov, O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Adv. Mech. Eng.* 2014, 865856 (2014)
8. R.D. Keane, R.J. Adrian, *Applied Scientific Research* 49, 191 (1992)
9. J.M. Foucaut, M. Stanislas, *Measurement Science and Technology* 13, 1058 (2002)
10. T. Kawaguchi, Y. Akasaka, M. Maeda, *Measurement Science and Technology* 13, 308 (2002)
11. Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич, *Тепловая защита (Энергия, Москва, 1976)*
12. А.Н. Зайдель, *Элементарные оценки ошибок измерений (Наука, Ленинградское отделение, 1968)*
13. П.А. Стрижак, *Инженерно-физический журнал* 86 (4), 839 (2013)
14. Б.М. Панкратов, Ю.В. Полежаев, А.К. Рудько, *Взаимодействие материалов с газовыми потоками (Машиностроение, Москва, 1975)*
15. Basset A.V. *On the motion of a sphere in a viscous liquid (Phil. Trans. Roy. Soc. Lond, 1888)*
16. Boussinesq J.V. *Sur la resistance d'une sphere solide (C.R. Hebd. Seanc. Acad. Sci. Paris, 1885)*
17. Oseen C.W. *Hydromechanik (Akademische Verlagsgem, Leipzig, 1927)*

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО КОНДЕНСАТОРА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Галашов Н.Н., к.т.н., Цибульский С.А.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: gal@tpu.ru

Применение воздушных конденсаторов (ВК) на ТЭС вместо водяных дает ряд существенных преимуществ: сокращение площади, занимаемой ТЭС, из-за отсутствия системы технического водоснабжения; уменьшение затрат и сроков строительства ТЭС; независимость расположения ТЭС от источника водоснабжения; улучшение экологической обстановки в районе расположения ТЭС. Главной проблемой применения ВК является то, что они имеют большие габариты при работе турбин ТЭС на водяном паре.

Одним из способов снижения этой проблемы является использование в цилиндре низкого давления турбин не водяного пара, а низкокипящих веществ (НКВ), пар которых имеет значительно большую плотность, чем водяной. При этом ВК будет надежно работать при отрицательных температурах в зимнее время года, что позволяет повысить КПД цикла за счет снижения температуры отвода теплоты.

Для исследования работы ВК на НКВ на основе методик, описанных в [1, 2], была разработана математическая модель, которая представляет систему уравнений, позволяющих по заданным геометрическим характеристикам теплообменной поверхности и режимным параметрам конденсируемого вещества и охлаждающего воздуха определить