

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ СУСПЕНЗИЙ НА ОСНОВЕ ВОДЫ С ГРУНТОВЫМИ ПРИМЕСЯМИ В ЗОНЕ ПЛАМЕНИ

Ю.Е. Балахнина, М.В. Шихман, О.В. Высокоморная  
Томский политехнический университет

В производственных циклах большинства отраслей вода является одной из самых распространённых технологических жидкостей [1, 2]. Зачастую технологический процесс с использованием воды, а также растворов, эмульсий и суспензий на её основе предполагает осуществление в производственном цикле нагрева и испарения капельных потоков в среде высокотемпературных газов: при создании двухфазных газопаровых теплоносителей, в технологии полидисперсного пожаротушения, для осуществления термической очистки загрязнённых технологических и бытовых вод и т.д.

Результаты экспериментальных исследований [3] показали, что интенсивность фазового перехода в указанных технологических циклах во многом определяется характерными размерами капель распылённой воды и жидкостных составов на её основе. Однако в результате проведения экспериментов [4] выявлено, что при измельчении капель до характерных размеров  $R_d < 200$  мкм возможны явления торможения, разворота и уноса последних встречным потоком греющей газовой среды.

В работе [5] показано, что наличие в каплях воды твёрдых примесей, характеризующихся большими (относительно воды) значениями теплопроводности и температуропроводности, интенсифицирует прогрев и фазовые превращения неоднородных капель. В указанных условиях в качестве альтернативного способа повышения полноты испарения можно рассмотреть изменение теплофизических характеристик капель за счёт наличия в них твёрдых частиц типичных грунтовых примесей – глины, песка, ила, почвы.

Цель настоящей работы – определение интегральных характеристик процесса испарения капель суспензий на основе воды с типичными грунтовыми примесями в среде высокотемпературных продуктов сгорания.

При проведении экспериментов использовался стенд, представленный на рис. 1.

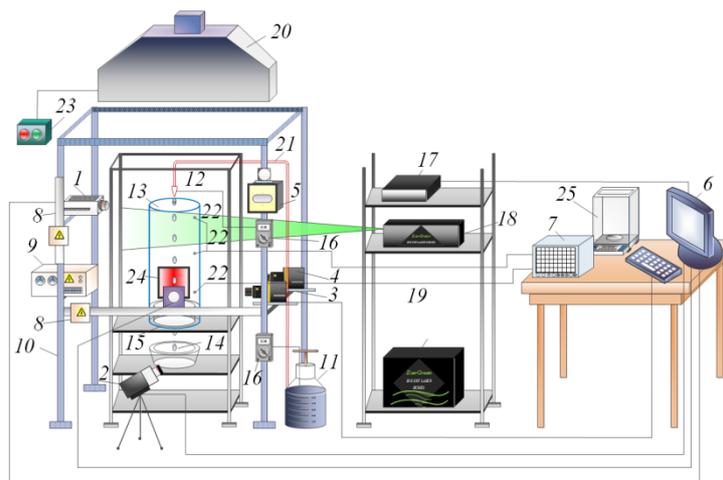


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1, 2 – высокоскоростные видеокамеры; 3, 4 – кросскорреляционные камеры; 5 – осветительный прожектор; 6 – персональный компьютер (ПК); 7 – регистратор многоканальный технологический (PMT); 8 – моторизированное координатное устройство (МКУ); 9 – блок питания МКУ; 10 – алюминиевая стойка; 11 – емкость с водой; 12 – дозатор капель (распылитель); 13 – цилиндр из кварцевого стекла; 14 – уловитель капель; 15 – полый цилиндр с горючей жидкостью; 16 – цифровой мультиметр; 17 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 18 – двойной импульсный Nd:YAG лазер; 19 – генератор лазерного излучения; 20 – нагнетательная система; 21 – канал подачи воды; 22 – термопары; 23 – пульт включения/отключения нагнетательной системы; 24 – диффузионный экран в комплекте со световодом; 25 – аналитические весы

Внутренняя полость цилиндра 13 заполнялась жидким горючим веществом – ацетоном, который затем зажигался. По истечении времени, необходимого для возникновения устойчивого горения ацетона и прогрева канала 13 (около 200 с), капли суспензии заданного размера подавались дозирующим устройством 12 в область высокотемпературных (около 1100 К) продуктов сгорания. Траектория движения капель совпадала с осью симметрии канала 13. Процесс свободного падения капель в высокотемпературных газах регистрировался высокоскоростными видеокамерами 1 и 2, а также кросскорреляционными камерами 3 и 4. Для определения формы и размеров капель применялось программное обеспечение «Тема Automotive» с функцией непрерывного слежения за динамическими объектами. Определялись положение, форма и характерный размер капель  $R_d$ , а также скорости движения последних  $U_d$  в потоке высокотемпературных продуктов сгорания. Размеры капель в расчётных областях видеок кадров (до и после зоны пламени) определялись по видеозаписям, представляющим по-

следовательный набор видеogramм через фиксированный временной интервал.

Скорость движения газов  $U_g$  в цилиндрическом канале 13 измерялась (в первом приближении) лопастным анемометром UnionTest AN110 (максимальная погрешность – 0.1 м/с) и составляла около 1.5 м/с.

В качестве основной характеристики исследуемого процесса использовался параметр, характеризующий уменьшение размера капель при движении через высокотемпературные газы:  $\Delta R = (R_d - R_d^*) / R_d$ , где  $R_d$ ,  $R_d^*$  – значение условного среднего радиуса капли на входе и выходе из зоны высокотемпературных газов, мм.

Табл. 1. Зависимость параметра  $\Delta R$  от концентрации глины ( $\gamma_{\text{clay}}$ ) для одиночных капель суспензии с разными начальными средними радиусами  $R_d$  мм при движении через высокотемпературные продукты сгорания ( $T_g \approx 1100$  К)

| $\gamma_{\text{clay}}$ , % | $\Delta R$ , % |      |      |      |       |       |
|----------------------------|----------------|------|------|------|-------|-------|
|                            | 0              | 0.2  | 0.4  | 0.6  | 0.8   | 1.0   |
| $R_d=2.8$ мм               | 1.25           | 1.17 | 1.98 | 2.65 | 3.53  | 4.68  |
| $R_d=2.3$ мм               | 1.83           | 2.46 | 3.34 | 4.61 | 6.39  | 9.17  |
| $R_d=2.1$ мм               | 3.92           | 5.14 | 6.49 | 8.46 | 11.20 | 17.42 |

Табл. 2. Зависимость параметра  $\Delta R$  от концентрации песка ( $\gamma_{\text{sand}}$ ) для одиночных капель суспензии с разными начальными средними радиусами  $R_d$  мм при движении через высокотемпературные продукты сгорания ( $T_g \approx 1100$  К)

| $\gamma_{\text{sand}}$ , % | $\Delta R$ , % |      |      |      |      |      |
|----------------------------|----------------|------|------|------|------|------|
|                            | 0              | 2    | 4    | 6    | 8    | 10   |
| $R_d=2.8$ мм               | 1.02           | 1.38 | 1.96 | 2.73 | 3.92 | 5.82 |
| $R_d=2.3$ мм               | 1.63           | 2.12 | 2.78 | 3.58 | 4.63 | 6.02 |
| $R_d=2.1$ мм               | 3.24           | 3.72 | 4.21 | 4.78 | 5.55 | 6.42 |

Представленные в табл. 1 и 2 зависимости позволяют сделать вывод о том, что наличие в суспензии грунтовых частиц значительно интенсифицирует процесс испарения капель. Особенно масштабно этот эффект проявлялся в экспериментах с использованием глины для приготовления суспензии. Он обусловлен тем, что теплофизические (теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ ) и оптические характеристики суспензии выше по сравнению с «однородной» или «чистой» водой (без примесей). Частицы глины интенсивно поглощают и аккумулируют энергию излучения пламени (продуктов сгорания), что способствует ускоренному (относительно воды без примесей) нагреву и испарению капель, так как меньше энергии требуется для прогрева приповерхностного слоя капли суспензии до

условий интенсивного испарения. Если в капле присутствует несколько (группа) частиц, то процессы теплообмена между отдельными слоями жидкости ещё более интенсифицируются.

Примеси песка в каплях воды влияют на интенсивность испарения менее значительно, так как степень черноты песка меньше по сравнению с глиной. Однако частицы песка также заметно (по сравнению с водой без примесей) интенсифицируют фазовый переход при изменении массовой концентрации песка в диапазоне 0–10 %

Выделенные эффекты интенсификации испарения суспензий по сравнению с водой без примесей твёрдых частиц подтверждают целесообразность применения существенно неоднородных капель в различных практических приложениях.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского фонда фундаментальных исследований (14–08–00057). Изменение характерного размера капель суспензий выполнено при финансовой поддержке Стипендии Президента РФ для молодых учёных (СП-1350.2015.1).*

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шияев М.И., Хромова Е.М. Моделирование процесса тепло-массообмена в оросительных камерах // Теорет. основы хим. технологии. 2008. Т. 42. № 4. С. 419.
2. Сосновский С.К. Оптимальные параметры работы градирен // Технол. аудит и резервы произв. 2012. Т. 5. № 1. С. 5.
3. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальная оценка характерных времен “существования” капель жидкостей в форме сферы и эллипсоида при их движении в газовой среде в условиях умеренных чисел Вебера // Теорет. основы хим. технологии. 2015. Т. 49. № 4. С. 477.
4. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion zone // Fire Saf. Journ. 2014. V. 70. P. 61.
5. Anufriev I.S., Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A., Chernetskii M.Yu. Conditions of Explosive Evaporation at the Phase Interface in an Inhomogeneous Droplet // Tech. Phys. Lett. 2015. V. 41. № 8. P. 810.

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., зав. каф. АТП ЭНИН ТПУ.