

## Краткие сообщения

03

### Высокотемпературное испарение капель воды в газовой среде

© И.С. Войтков, Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050 Томск, Россия  
e-mail: pavelspa@tpu.ru

(Поступило в Редакцию 28 февраля 2017 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов испарения капель воды при нагреве в газовой среде с температурой от 500 до 1100 К. Применены высокоскоростные средства видеорегистрации и панорамные оптические методы цифровой трассерной визуализации. Вычислены времена полного испарения капель и массовые скорости парообразования. Выполнено сравнение скоростей испарения с вычисленными при применении известных моделей испарения. Определены диапазоны температур, при которых данные математического моделирования хорошо коррелируют с экспериментами.

DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45220.2218

#### Введение

Развитие теории фазовых превращений жидкостей характеризуется этапным созданием физических и математических моделей, начиная от представлений Рэнца и Маршала [1], Фукса [2] и Сполдинга [3] до Йена, Чена и Разумбулута [4,5], С.С. Кутателадзе [6], Д.В. Лабунцова и В.В. Ягова [7]. Модели [1–7] условно можно разделить на две группы („диффузионные“ и „кинетические“) по доминирующему фактору влияния на интенсивность отрыва и последующего оттока молекул от поверхности раздела „жидкость–внешняя среда“ (градиента концентрации молекул или интенсивности нагрева поверхности фазового перехода).

Современные представления (например, [8–11]) о скоростях испарения и конденсации чаще всего опираются на закон Герца–Кнудсена [6,7], отражающий существенно нелинейную зависимость скорости парообразования как от температуры, так и от градиента концентрации паров. Особую значимость имеют такие зависимости при высоких температурах внешней по отношению к капле газовой среды [11].

В связи с многочисленными возможными приложениями выполнен [11] сравнительный анализ значений скоростей испарения капель воды  $W_e$  при высокотемпературном нагреве в газовой среде, полученных с использованием известных „диффузионных“ и „кинетических“ моделей парообразования. Экспериментальные значения  $W_e$  представлены в [11] лишь при умеренных температурах (около 300 К) и максимально возможных для использовавшегося в [11] стенда (около 1100 К). Поэтому сопоставление экспериментальных и теоретических значений скоростей испарения проводилось в [11] лишь в двух „точках“ широкого и представляющего интерес для практики диапазона температур (300–1100 К). Целесообразно провести экспериментальное изучение ско-

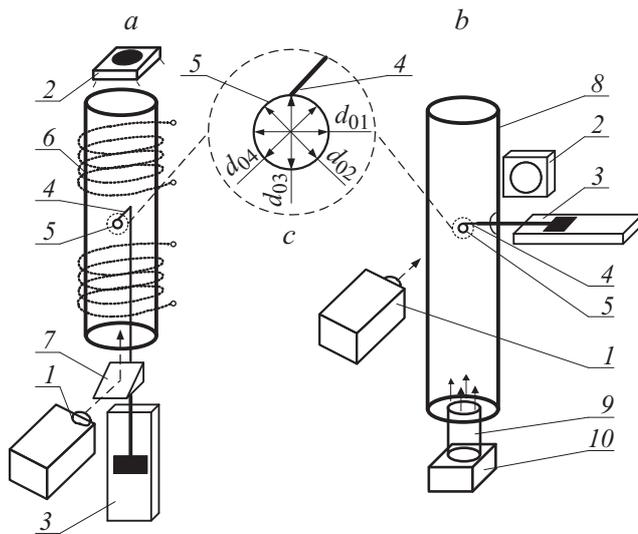
ростей испарения капель воды для всего этого диапазона температур при разных конвективных и радиационных тепловых потоках, характерных для большой группы приложений (например, термическая и огневая очистка жидкостей). По результатам таких экспериментов станет возможным проведение оценок температурных диапазонов, в которых модели [1–7] адекватно описывают реальные скорости испарения  $W_e$ .

Цель настоящей работы — определение температурных диапазонов обоснованного использования известных моделей испарения воды [1–7] для достоверного прогноза  $W_e$ .

#### Экспериментальный стенд и методы исследования

Функциями цели в экспериментах являлись скорости парообразования ( $W_e$ ) и времена полного испарения ( $t_e$ ) капель воды. С применением подхода [12] выполнялись оценки  $W_e = \Delta R \rho / \Delta t$ , где  $\Delta t$  — интервал времени, с;  $\Delta R$  — изменение радиуса капли в течение  $\Delta t$ , м;  $\rho$  — плотность воды,  $\text{kg/m}^3$ . На рис. 1 показано изображение капли с иллюстрацией схемы определения ее размеров. Последние вычислялись при выполнении непрерывного слежения за границей раздела сред с применением программного обеспечения „Tema Automotive“ [12]. Систематические погрешности определения времен ( $t_e$ ) и размеров ( $R_d$ ) определялись частотой и разрешением видеосъемки и составили 0.01 с и 0.025 мм соответственно.

Температуры нагрева ( $T_g$ ) капель воды варьировались в соответствии с диапазонами (от 300 до 1100 К) их возможного изменения в перспективных газопарокапельных приложениях: термическая и огневая очистка жидкостей, топливные технологии, теплоносители на основе дымовых газов и капель воды, пожаротушение и др. Поэтому



**Рис. 1.** Схемы экспериментальных стендов, обеспечивающих разные условия нагрева (*a* — в керамической трубке в условиях доминирования радиационного теплообмена, *b* — в потоке разогретого воздуха), с иллюстрацией системы подвешивания капли на держателе (*c*): 1 — высокоскоростная CMOS-видеокамера, 2 — светодиодный прожектор, 3 — моторизированное координатное устройство, 4 — держатель капли, 5 — капля воды, 6 — трубчатый нагревательный элемент, 7 — зеркало, 8 — кварцевый цилиндр, 9 — нагнетатель, 10 — воздухонагреватель.

применялись два стенда, схемы которых приведены на рис. 1. В качестве камер нагрева использовались полые цилиндры с внутренним диаметром 0.1 м из керамики и кварцевого стекла. Основным блоком первого стенда (рис. 1, *a*) был нагревательный элемент (полый керамический цилиндр) 6, выполненный по принципу действия муфельной трубчатой печи. С применением второго стенда (рис. 1, *b*) проводился нагрев капли воды в потоке разогретого воздуха. Использовался нагреватель 10 (мощность 11 kW, максимальная температура газа на выходе 1250 K) и нагнетатель 9 (мощность 0.25 kW, расход воздуха до 1200 л/мин).

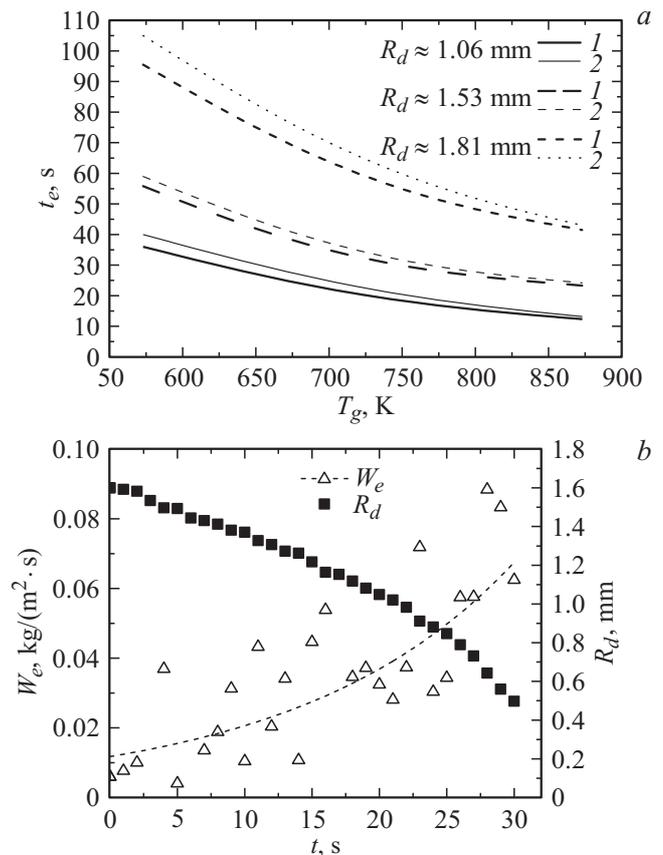
Скорость движения потока воздуха  $U_g$  поддерживалась на уровне 2.5 м/с и контролировалась с применением панорамного метода PIV [12]. Систематические погрешности определения  $U_g$  не превышали 0.05 м/с. Конвективные тепловые потоки соответствовали достигнутому в экспериментах [12]. Температуры в камерах 6 и 8 контролировались группой термопар (диапазон 273–1873 K, погрешность  $\pm 3$  K, инерционность не более 1 с). Максимальные случайные погрешности определения  $T_g$  и  $U_g$  не превышали 15 K и 0.05 м/с соответственно.

Для генерации капель воды 5 (рис. 1) применялся электронный дозатор (объем — 2.5–100  $\mu\text{l}$ , шаг варьирования — 0.1  $\mu\text{l}$ ). Радиусы капель варьировались в диапазоне 1–3 мм. В каждом эксперименте капля 5

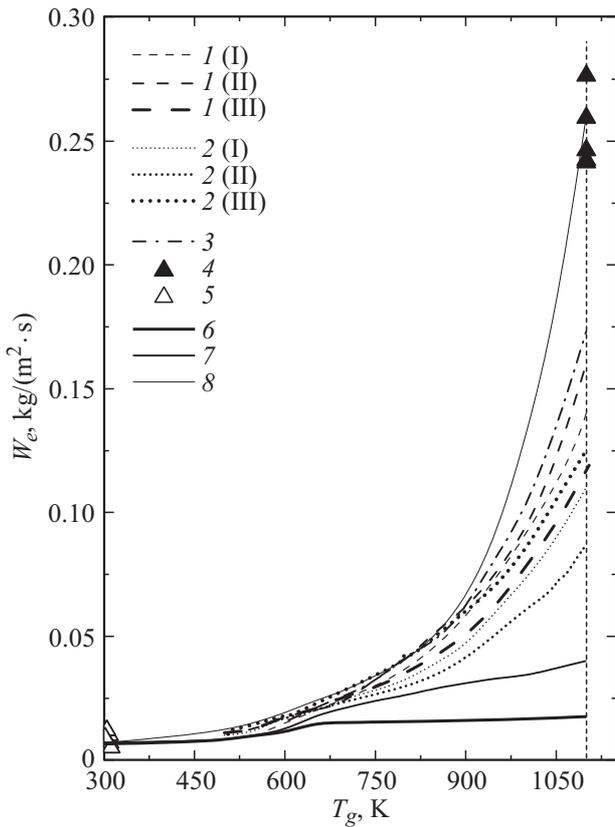
помещалась на держатель 4 и с применением координатного механизма 3 перемещалась (со скоростью 0.5 м/с) в нагревательную камеру. В качестве держателя использованы: спай термопары (диаметр 0.1 мм, диапазон 273–1873 K, погрешность  $\pm 1$  K, инерционность не более 0.1 с); стальная проволока (диаметр 0.1 мм); фосфорный стержень (диаметр 0.1 мм). С использованием видеокамеры 1 проводилась высокоскоростная (до  $10^5$  fps) видеорегистрация процесса испарения капли с вычислением соответствующих значений  $t_e$ . Также проведены дополнительные эксперименты с регистрацией изменений размеров свободно падающей капли во встречном потоке воздуха по методике [12].

## Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены типичные результаты экспериментов — времена  $t_e$  и скорости парообразования  $W_e$ . Значения  $W_e$  можно вычислить при использовании разных подходов к усреднению скоростей изменения размеров капель вследствие испарения. Первый — основан



**Рис. 2.** Времена полного испарения капель воды в потоке разогретого воздуха на разных держателях (*a*) и рассчитанные скорости испарения (треугольниками обозначены вычисленные значения, штриховая кривая представляет их аппроксимацию) (*b*): 1 — в потоке разогретого воздуха, 2 — в керамической трубке (воздух практически неподвижен).



**Рис. 3.** Зависимости скоростей испарения капель воды от температуры газовой среды: *I* — в потоке разогретого воздуха, *2* — в керамической трубке в условиях доминирования радиационного теплообмена, *3* — свободное падение капли во встречном потоке разогретого воздуха, *4* — экспериментальные данные [12], *5* — экспериментальные данные [9], *6* — „диффузионная“ модель испарения [2,3], *7* — модель „фазового перехода“ [1,4,5,9], *8* — модель испарения, учитывающая радиационный, конвективный и кондуктивный теплообмен, подогрев паров воды, нелинейную зависимость скорости испарения от температуры поверхности капли [11] (материал держателя: *I* — спай малоинерционной термопары, *II* — стальная проволочка, *III* — фосфорный стержень).

на использовании коротких интервалов времени (например,  $\Delta t = 0.1$  с) и регистрации  $\Delta R$  в течение  $\Delta t$ . Как следствие, полученные значения  $W_e$  можно считать мгновенными. Второй подход предполагает расчет среднего значения  $W_e$  (за время полного испарения  $t_e$ ) и считая, что  $\Delta R = R_d$ . На рис. 2 показаны средние значения  $W_e$ , вычисленные за время  $t_e$ . Для достижения цели настоящей работы такой подход является достаточным. На рис. 3 приведены значения  $W_e$ , полученные в экспериментах при разных условиях нагрева. Также приведены экспериментальные значения  $W_e$ , полученные в условиях испарения капель в потоке продуктов сгорания при температуре 1100 К [12] и в потоке воздуха при 300 К [9]. Для оценки диапазонов соответствия экспериментам моделей парообразования [1–7] вычислены значения  $W_e$ . Выбраны три широко используемые и

существенно отличающиеся модели из рассмотренных в [11]. Первая — „диффузионная“ (модель Сполдинга [3] с учетом гипотезы Максвелла), основанная на предположении о доминировании диффузии паров и малой значимости других процессов вблизи межфазной границы. Вторая — „кинетическая“ или „модель фазового перехода“ [4,5,8], основой которой является предположение о расходовании всей подведенной к границе раздела сред энергии на испарение. При этом предполагается, что  $Q_e W_e = \alpha(T_g - T_s)$ , где  $Q_e$  — теплота фазового перехода, J/kg;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена, W/(m<sup>2</sup>K);  $T_g, T_s$  — температура газовой среды и поверхности капли, К. Третья модель (система уравнений в частных производных приведена в [11]) учитывает конвективный, кондуктивный и радиационный теплообмен на поверхности капли, а также собственное излучение газов (продуктов сгорания и водяного пара).

Из анализа зависимостей  $W_e(T_g)$ , представленных на рис. 3, можно сделать несколько основных заключений. Во-первых, верхняя граница диапазона изменения температуры газов, в котором экспериментальные значения  $W_e$  удовлетворительно коррелируют со всеми теоретическими, соответствует 700 К. Во-вторых, при дальнейшем росте температуры конвективный и радиационный тепловые потоки значительно растут. Это приводит к существенно нелинейному увеличению  $W_e$ . Так как в „диффузионной“ модели [3] не учитывается температурный градиент на границе раздела сред, то полученные с ее применением значения  $W_e$  существенно ниже рассчитанных с учетом конвекции и излучения в тонком слое газовой смеси вблизи поверхности фазового превращения (рис. 3). В-третьих, при сравнении результатов, выполненных на двух стендах экспериментов при идентичной температуре газовой среды, хорошо виден вклад процесса обтекания капли потоком разогретого воздуха (конвективной составляющей теплового потока). В-четвертых, сопоставление значений  $W_e$  для разных условий крепления капли в газовой среде показало влияние как процесса стока тепла к держателю, так и, наоборот, дополнительного подвода энергии через него к испаряющейся капле. В-пятых, кривая 3 соответствует условиям экспериментов, в которых капля воды свободно падала в потоке разогретого воздуха. При сопоставлении значений  $W_e$  для температуры воздуха 1100 К и данных опытов [12] хорошо виден вклад собственного излучения продуктов сгорания. В частности, оценки тепловых потоков для выполненных экспериментов показывают, что конвективный тепловой поток может достигать 65–80 kW/m<sup>2</sup>, кондуктивный — 25–35 kW/m<sup>2</sup>, радиационный (за счет излучения стенок камеры нагрева) — 75–90 kW/m<sup>2</sup>, излучение смеси продуктов сгорания и паров в тонком слое вблизи поверхности капли воды 7–11 kW/m<sup>2</sup>. Чем больше размер последней, тем существеннее будет роль лучистой составляющей теплового потока по сравнению с конвективной. На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что общая теория высокотемпературного испарения

жидкостей может быть создана лишь на базе моделей, учитывающих все тепломассообменные процессы вблизи границы раздела сред (учет лишь конвективного или радиационного тепловых потоков недостаточен).

## Заключение

По результатам выполненных исследований впервые определен диапазон изменения температуры газовой среды (до 700 К), в котором „диффузионные“ и „конвективные“ модели парообразования [1–7], сформулированные в соответствии с представлениями Рэнца, Маршала, Фукса, Сполдинга, Йена, Чена, Разумбулута, С.С. Кутателадзе, Д.В. Лабунцова и В.В. Ягова, позволяют достоверно прогнозировать скорости испарения капель воды. Также выделен диапазон температур (выше 1000 К), в котором адекватное воспроизведение экспериментальных скоростей испарения можно обеспечить лишь при учете конвективного, кондуктивного и радиационного теплообмена, а также излучательных свойств газовой среды. Результаты выполненного анализа способствуют развитию современных представлений о высокотемпературном испарении жидкостей, эмульсий, растворов и суспензий, а также потенциально способствуют разработке перспективных газопарокапельных технологий (термическая очистка, топливные системы, пожаротушение, теплоносители и др.).

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД–1221.2017.8).

## Список литературы

- [1] *Ranz W.E., Marshall W.R.* // Chem. Eng. Prog. 1952. Vol. 48. P. 141–146, 173–180.
- [2] *Fuchs N.A.* Evaporation and droplet growth in gaseous media. London: Pergamon Press, 1959. 80 p.
- [3] *Spalding D.B.* Some fundamentals of combustion. London: Butterworth's, 1955. 250 p.
- [4] *Yuen M.C., Chen L.W.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 1978. Vol. 21. P. 537–542.
- [5] *Renksizbulut M., Yuen M.C.* // J. Heat Transfer. 1983. Vol. 105. P. 389–397.
- [6] *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [7] *Лабунцов Д.А., Ягов В.В.* Механика двухфазных систем. М.: МЭИ, 2000. 374 с.
- [8] *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Тепломассоперенос и гидродинамика в газопарокапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 282 с.
- [9] *Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч.* // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 5. С. 829–836.
- [10] *Авдеев А.А., Зудин Ю.Б.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 4. С. 565–574.
- [11] *Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 1. С. 133–142.
- [12] *Кузнецов Г.В., Куйбин П.А., Стрижак П.А.* // ТВТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 264–269.