

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТЕЙ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗАХ

Р. С. Волков, Г. В. Кузнецов, В. Е. Накоряков*, П. А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

* Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: romanvolkov@tpu.ru, kuznetsovgv@tpu.ru, nakve@itp.nsc.ru, pavelspa@tpu.ru

С использованием высокоскоростных видеорегирующихся камер и малоинерционных термопар экспериментально определены скорости испарения капель воды в высокотемпературных газах (на примере потока нагретого воздуха). Эксперименты проводились при начальных размерах (радиусах) капель $1 \div 3$ мм и температуре воздуха $500 \div 1000$ К. Получены зависимости скорости испарения капель воды от времени и температуры газов при различных начальных размерах капли.

Ключевые слова: капля воды, высокотемпературные газы, испарение, скорость испарения.

DOI: 10.15372/PMTF20170515

Введение. Современные модели испарения капель жидкостей (в частности, воды) в газовой среде сформулированы на основе классических представлений [1–4]. Развитие этих представлений позволило получить ряд аппроксимационных выражений $Nu = f(Pr, Re)$ для зависимости числа Нуссельта Nu от чисел Рейнольдса Re и Прандтля Pr (см., например, [5–8]). Эти выражения используются при моделировании конвективно-кондуктивных теплообменных процессов и фазовых превращений на границе раздела сред жидкость — газ. Область применения такого подхода ограничена, что не всегда позволяет получить удовлетворительно согласующиеся теоретические и экспериментальные значения характеристик испарения [5, 6]. Одним из ограничений [5, 6] является проблема адекватного воспроизведения высокотемпературных (при температуре более 1000 К) условий процесса испарения с использованием моделей [1–4].

В работе [9] приведены результаты сравнения экспериментальных данных и значений скорости испарения капель воды, вычисленных с помощью классических диффузионных и кинетических моделей испарения, а также традиционного подхода, основанного на эмпирических выражениях $Nu = f(Pr, Re)$. Показано, что при умеренных значениях температуры (менее 600 К) с использованием выражений типа $Nu = f(Pr, Re)$ [5–8] можно получить значения скорости испарения, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — докторов наук (грант № МД-1221.2017.8).

© Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Накоряков В. Е., Стрижак П. А., 2017

данными (различие не превышает 15 %). При температуре более 1000 К значения скорости испарения различаются в несколько раз [9]. В работе [9] сделано предположение, что при высокой температуре внешней газовой среды определяющую роль в процессе испарения играет формирование буферного парового слоя вблизи поверхности испаряющихся капель (изменение условий кондуктивного, конвективного и радиационного теплообмена на границе раздела сред), а также сложные процессы изменения (на молекулярном уровне) оптических свойств воды при ее нагревании (см. [10]). Поэтому актуальными задачами являются получение зависимостей характеристик испарения жидкостей от температуры среды, внешней по отношению к капле, или от теплового потока, а также вычисление соответствующих констант в выражениях для скорости испарения [11–13].

Получение достоверных экспериментальных данных о высокотемпературных газопарокапельных процессах чрезвычайно важно, так как эти процессы применяются при термической или огневой очистке жидкостей, пожаротушении, обработке теплонагруженных поверхностей энергетического оборудования, а также в многофазных газопарокапельных теплоносителях и теплообменных устройствах энергетических систем. Развитие моделей фазовых превращений при высоких температурах позволит решить различные задачи теплообмена в многофазных системах [14], так как наличие твердых частиц в капельных или газовых потоках может привести к существенному увеличению интенсивности фазовых превращений и конвективных процессов.

В работе [13] сформулирован подход к определению скоростей испарения капли воды в газовой среде с контролируемой высокой температурой. Использование этого подхода позволяет в первом приближении выполнить соответствующие измерения и получить значения скорости испарения капель воды при умеренных (500 К) и высоких (1000 К) температурах.

Целью настоящей работы является получение экспериментальной оценки скорости испарения капель воды при их нагреве в высокотемпературной газовой среде.

Экспериментальный стенд и методы исследований. В соответствии с [13] в экспериментах в качестве нагревательной камеры использовался цилиндр из кварцевого стекла с внутренним диаметром, равным 0,1 м (рис. 1). В нижней части цилиндра размещались нагревательный и нагнетательный элементы, с помощью которых температура воздуха в канале цилиндра варьировалась в диапазоне 500 ÷ 1000 К. Скорость движения потока нагретого воздуха в цилиндре U_g контролировалась с использованием панорамного метода PIV [13] и поддерживалась постоянной ($U_g \approx 0,25$ м/с) во всех экспериментах. Малое значение U_g выбрано для достоверной регистрации положения границы раздела сред (поверхности испаряющейся капли) и минимизации ее флуктуаций.

В отличие от [13] в экспериментах, описываемых в настоящей работе, капля воды с известным начальным характерным радиусом R_d вводилась в канал (см. рис. 1) с нагретыми газами на малоинерционной платинородий-платиновой термопаре (диапазон измеряемых температур 233 ÷ 1773 К, допустимая погрешность ± 1 К, диаметр спая 0,05 мм, показатель тепловой инерции 0,1 с). Термопара перемещалась автоматизированным координатным механизмом (минимальный шаг 0,05 мм, погрешность 0,008 мм, скорость движения 0,05 м/с). Еще две аналогичные термопары использовались для измерения температуры поверхности испаряющейся капли воды T_s и температуры парогазовой смеси T_g^v на расстоянии от капли, равном 1 мм. Формирование газового потока и контроль его температуры T_g осуществлялись с помощью регулятора, нагревателя, нагнетателя и хромель-алюмелевой термопары (максимальная рабочая температура 1620 К, показатель тепловой инерции не более 3 с, допустимая погрешность ± 1 К). Показания всех четырех термопар фиксировались регистратором температуры NI 9219 и передавались на персональный компьютер (ПК).

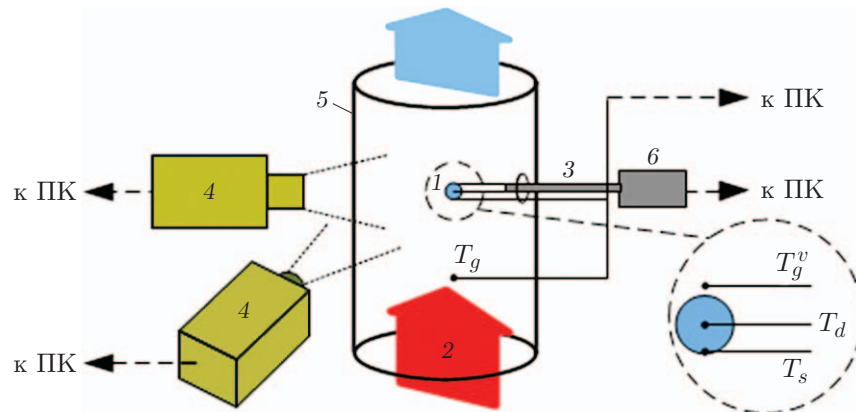


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — капля воды, 2 — нагретый воздух, 3 — малоинерционные термопары, 4 — высокоскоростные видеокамеры, 5 — полый кварцевый цилиндр, 6 — автоматизированное координатное устройство

Термопара, измеряющая температуру поверхности капли T_s , устанавливалась таким образом, чтобы ее спай был полностью погружен в жидкость (глубина погружения $0,1 \div 0,7$ мм). Измерение указанной глубины проводилось с использованием двух высокоскоростных (10^5 кадр/с) видеокамер и программного обеспечения Tema Automotive. В экспериментах регистрировались температуры поверхности капли воды в момент ее отрыва от спаев термопары. С помощью специальных алгоритмов обработки Tema Automotive отслеживалось движение границы сред слои воды — высокотемпературная среда при испарении капли.

Капли воды генерировались дозирующим устройством Finnpiquette Novus (шаг варьирования объема капли $0,1$ мкл, погрешность $\pm 3\%$) со сменными наконечниками. Начальные радиусы капель варьировались в диапазоне $R_d = 1 \div 3$ мм. Значения R_d вычислялись по методике [13] на основе данных о положении границы раздела сред. Случайные погрешности вычисления R_d в серии опытов при идентичных условиях не превышали 4% , систематические погрешности составляли $2,5\%$.

В работе [13] определена массовая скорость испарения $W_e = (1/S) dm/dt$, где $S = 4\pi R^2$ — площадь поверхности капли при допущении ее сферической формы. В процессе нагрева капли ее радиус R изменяется от начального значения R_d до конечного значения R_d^* за фиксированное время dt . Масса капель также меняется от значения m_d до значения m_d^* . Запишем выражение для объема капли: $V = 4\pi R^3/3$ и ее массы: $m = \rho_d V$ (ρ_d — плотность воды, кг/м³). В [13] показано, что скорость испарения можно вычислить по формуле $W_e = \rho_d(R_d - R_d^*)/t_d$, где производная заменена конечными разностями: $dR/dt \approx (R_d - R_d^*)/t_d$; t_d — время регистрации изменения размера капли от значения R_d до значения R_d^* .

Результаты сравнения рассчитанных масс испарившейся жидкости и измеренных в экспериментах [13] позволяют сделать вывод о правомерности использования в проводимых опытах эффективного (осредненного по трем пространственным координатам) радиуса капель R_d в качестве их характерного размера.

В настоящей работе для определения скорости испарения капли воды использовалось выражение $W_e = \rho_d dR/dt$. Чем меньше был выбранный интервал времени dt , тем меньше различались значения W_e от эксперимента к эксперименту при идентичных условиях. Высокоскоростная видеорегистрация и специализированное программное обеспечение Tema Automotive позволяли варьировать интервал времени в диапазоне $dt = 0,01 \div 1,00$ с.

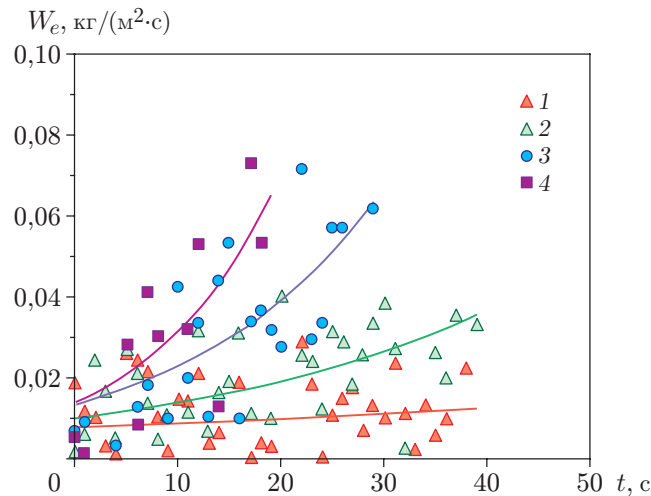


Рис. 2. Расчетная зависимость скорости испарения капли воды ($R_d \approx 1,53$ мм) от времени при различных значениях температуры потока газа:
 1 — $T_g = 573$ К, 2 — $T_g = 673$ К, 3 — $T_g = 773$ К, 4 — $T_g = 873$ К

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 2 представлена расчетная зависимость скорости испарения W_e от времени при различных значениях температуры потока газа (значение dt составляло 0,25 с на начальном этапе нагрева капли и 2 с после формирования ее температурного поля). Термопара, на которой капля жидкости помещалась в нагревательную камеру, регистрировала значения температуры в центре капли T_d . Плотность воды вычислялась в зависимости от T_d с использованием известных справочных данных.

Следует отметить, что результаты экспериментов, по которым получены данные, представленные на рис. 2, удовлетворительно согласуются. Различие значений W_e при идентичных условиях нагрева не превышало 9–11 %, что обусловлено стабильностью условий экспериментов (температура газов, начальные характеристики капель) и высокой точностью измерений, обеспечиваемой панорамными оптическими методами и малоинерционными термопарами.

В отличие от опытов, описанных в [13], в настоящих экспериментах на условия нагрева и испарения капли воды мог оказывать влияние держатель — спай термопары. Для оценки этого влияния проведены дополнительные эксперименты в соответствии с методикой [13], в которых осуществлялся сброс капли воды в нагревательную камеру (цилиндр) и регистрировались характерные изменения размеров капель во времени (в моменты входа и выхода из цилиндра). Как и следовало ожидать, миниатюрный спай термопары несколько ускоряет нагрев капли. Оценки показали, что при большой температуре различие времен полного испарения капель для двух указанных экспериментов не превышает 3,5 %. При уменьшении температуры газов до значения, равного 573 К, различие составляло менее 1,7 %. Незначительное влияние спаи термопары на время испарения обусловлено его малым размером (в 10 раз меньше характерного диаметра исследуемой капли воды). О незначительном влиянии спаи на условия нагрева и испарения капли воды свидетельствует небольшое различие значений температуры в центре капли и на ее поверхности (рис. 3). Из рис. 3 следует, что основной нагрев капли происходит со стороны ее свободной поверхности.

Также на рис. 3 видно, что температурное поле капли в основном формируется на начальном участке нагрева. В течение промежутка времени $3 \text{ с} < t < 7 \text{ с}$, в несколько раз

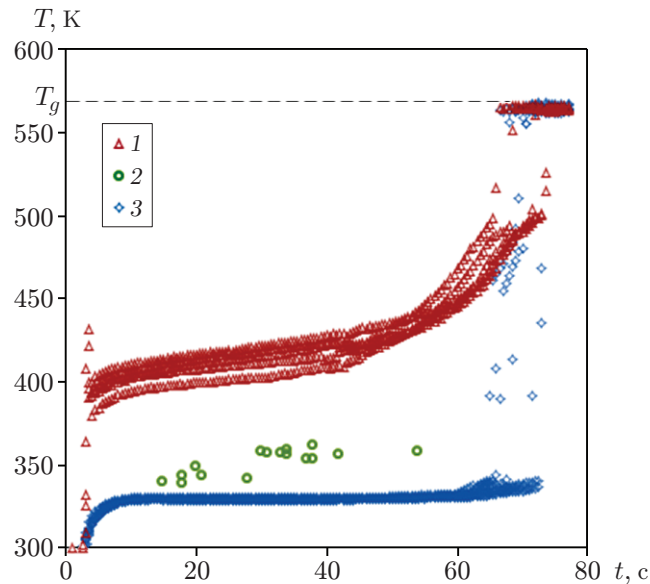


Рис. 3. Зависимости температуры парогазовой смеси в окрестности капли T_g^v (1), температуры поверхности капли T_s (2) и температуры в центре капли T_d (3) от времени при $T_g = 573$ К

меньшего времени полного испарения капли воды ($t > 60$ с), температуры T_s и T_d выходят на некоторое практически постоянное значение. Этот результат характеризует условия, при которых интенсифицируется испарение со свободной поверхности. Эндотермическое фазовое превращение замедляет увеличение температуры поверхности капли. Кроме того, вокруг капли формируется паровой буферный слой с меньшей теплопроводностью, что обуславливает уменьшение теплового потока к поверхности капли (на рис. 3 температура парового слоя в окрестности капли T_g^v существенно меньше температуры T_g).

На рис. 4 приведена нелинейная зависимость скорости испарения от температуры потока газа T_g при различных характерных начальных размерах капель. Характер кривых соответствует классическим выражениям Герца — Кнудсена [12, 13] для скорости испарения как функции температуры.

В процессе нагрева капли скорость испарения воды существенно (в несколько раз) изменяется (см. рис. 2, 4), что необходимо учитывать при моделировании соответствующих процессов. В целом можно сделать вывод о достаточно сложном характере зависимости скорости испарения воды от параметров, определяющих условия нагрева, в первую очередь от начальных размеров капли и температуры газов, а также от температуры поверхности капли.

На рис. 4 видно, что вычисленные с помощью выражений вида $Nu = f(Pr, Re)$ значения скорости испарения (кривая 4) существенно отличаются от экспериментальных значений, полученных при температуре газовой среды $T_g > 750$ К. При этом различия значительны как при нагреве капли на спае термпары (кривые 1–3), так и при ее свободном падении в канале с нагретыми газами (точки 5). Сравнение кривых, приведенных на рис. 4, позволяет определить область применения моделей и соответствующих формул [5–8]. Также на рис. 4 видно, что даже при использовании капель небольшого размера ($R_d \approx 0,5$ мм) результаты расчетов по модели с аппроксимациями $Nu = f(Pr, Re)$ значительно отличаются от экспериментальных данных [13] и результатов настоящей работы. Вычисленные значения скорости испарения капель радиусом $1 \div 3$ мм меньше значения $W_e = 0,01$ кг/(м² · с) не только при относительно малых, но и при больших температурах.

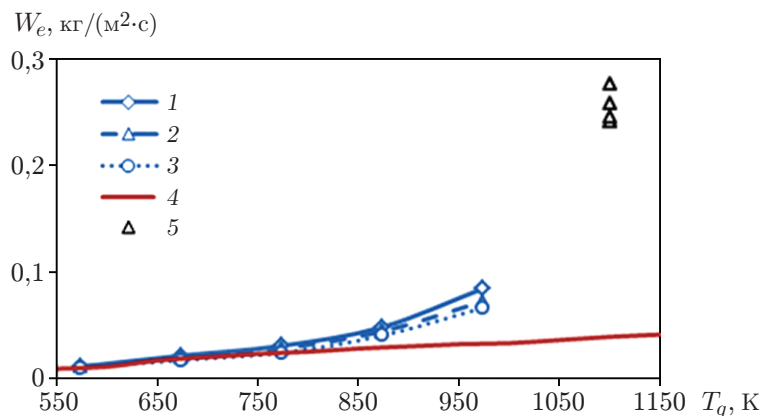


Рис. 4. Зависимость скорости испарения капли воды от температуры внешней среды при различных начальных значениях радиуса капель:

1–3 — экспериментальные данные, полученные в настоящей работе (1 — $R_d \approx 1,7$ мм, 2 — $R_d \approx 1,5$ мм, 3 — $R_d \approx 1,3$ мм); 4 — результаты расчетов с использованием модели конвективно-кондуктивного теплообмена на поверхности капли [9] ($R_d \approx 0,5$ мм); 5 — данные экспериментов [13] ($R_d \approx 2,76$ мм)

По-видимому, при больших значениях T_g существенное влияние на скорость испарения капли оказывают процессы, не учитываемые при выводе выражений вида $Nu = f(Pr, Re)$, в частности формирование буферного парового слоя вблизи поверхности испаряющихся капель [9], изменение (на молекулярном уровне) оптических свойств воды при нагревании [10], распространение инфракрасного излучения через слой паров и пленку воды, нагретой до температуры кипения. Полученные экспериментальные данные и предложенный в настоящей работе подход могут быть использованы при изучении процесса испарения жидкостей в высокотемпературных средах. Кроме того, с помощью алгоритма [13] и полученных в данной работе экспериментальных зависимостей можно рассчитать константы испарения.

Имеются основания предположить, что отличие экспериментальных значений скорости испарения [13] от полученных в настоящей работе обусловлено излучательными свойствами газовой среды. В экспериментах [13] использовался поток продуктов сгорания керосина. Содержащиеся в типичных продуктах сгорания твердые частицы сажи, углекислый и угарный газы обладают существенно большей излучательной способностью по сравнению с практически прозрачным воздухом.

Заключение. Предложенный в работе подход к оценке значений скорости испарения, а также анализ полученных значений этого параметра позволяют получить более полное представление об интенсивных фазовых превращениях. Данный подход может применяться при разработке перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Spalding D. B. Some fundamentals of combustion. L.: Butterworth's, 1955.
2. Fuchs N. A. Evaporation and droplet growth in gaseous media. L.: Pergamon Press, 1959.
3. Ranz W. E., Marshall W. R. (Jr.) Evaporation from drops. Pt 1 // Chem. Engng Progress. 1952. V. 48. P. 141–146.
4. Ranz W. E., Marshall W. R. (Jr.) Evaporation from drops. Pt 2 // Chem. Engng Progress. 1952. V. 48. P. 173–180.

5. **Yuen M. C., Chen L. W.** Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1978. V. 21. P. 537–542.
6. **Renksizbulut M., Yuen M. C.** Numerical study of droplet evaporation in a high-temperature stream // J. Heat Transfer. 1983. V. 105. P. 389–397.
7. **Терехов В. И., Терехов В. В., Шишкин Н. Е., Би К. Ч.** Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // Инж.-физ. журн. 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.
8. **Sazhin S. S., Elwardany A. E., Krutitskii P. A., et al.** Multi-component droplet heating and evaporation: numerical simulation versus experimental data // Intern. J. Thermal Sci. 2011. V. 50. P. 1164–1180.
9. **Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Evaporation of water droplets in a high-temperature gaseous medium // J. Engng Phys. Thermophys. 2016. V. 89, N 1. P. 141–151.
10. **Kim A. V., Medvedev N. N., Geiger A.** Molecular dynamics study of the volumetric and hydrophobic properties of the amphiphilic molecule C8E6 // J. Molecular Liquids. 2014. V. 189. Spec. iss. “Fluid phase associations”. P. 74–80.
11. **Муратова Т. М., Лабунцов Д. А.** Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // Теплофизика высоких температур. 1969. № 5. С. 959–967.
12. **Авдеев А. А., Зудин Ю. Б.** Кинетический анализ интенсивного испарения (метод обратных балансов) // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 4. С. 565–574.
13. **Кузнецов Г. В., Куйбин П. А., Стрижак П. А.** Оценка численных значений констант испарения капель воды, движущихся в потоке высокотемпературных газов // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 264–269.
14. **Вараксин А. Ю.** Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.

Поступила в редакцию 24/III 2017 г.
