

03.2

Испарение кластера капель при движении в высокотемпературной газовой среде

© В.А. Архипов, С.А. Басалаев[¶], А.И. Коноваленко, К.Г. Перфильева

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

[¶] E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Поступило в Редакцию 20 марта 2020 г.

В окончательной редакции 26 марта 2020 г.

Принято к публикации 26 марта 2020 г.

Предложен новый способ определения скорости испарения компактной группы (кластера) капель при гравитационном осаждении в высокотемпературной газовой среде. Представлены результаты экспериментального исследования скорости испарения кластера капель дистиллированной воды радиусом 0.77 мм в диапазоне температур 650–800 К. Выявлено существенное снижение скорости испарения с уменьшением расстояния между каплями.

Ключевые слова: кластер капель, расстояния между каплями, высокотемпературная газовая среда, скорость испарения.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.12.49527.18300

Основной объем информации по методам и результатам экспериментального исследования процессов испарения относится к одиночным каплям (см., например, обзор в [1]). В большинстве практических приложений (в частности, при анализе эффективности тушения пожаров тонкораспыленной водой [2]) реализуется процесс испарения группы капель. При этом наблюдается эффект влияния соседних капель на скорость и полноту испарения. Теоретические оценки этого эффекта приведены для двух модельных „капель“ в виде прямоугольников, вытянутых в направлении их движения [1].

Экспериментальному исследованию закономерностей испарения группы капель посвящены единичные публикации [1,3]. В частности, в [1] обобщены результаты исследований процесса испарения полидисперсного потока капель радиусом 0.1–0.3 мм, получаемых с помощью диспергирования дистиллированной воды распылительной форсункой. Нагрев капель осуществлялся продуктами сгорания типичного горючего вещества. Концентрация и размер капель измерялись оптическими методами. Для оценки полноты испарения капель в высокотемпературной газовой области использовался безразмерный параметр

$$\delta R = \frac{R_0 - R_k}{R_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где R_0 и R_k — радиусы капли на входе и выходе из области нагрева.

В работе [4] рассмотрены закономерности движения, коагуляции и испарения в высокотемпературной среде нескольких последовательно падающих капель воды.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование особенностей испарения кластера монодисперсных капель дистиллированной воды диаметром 0.77 мм, движущихся в высокотемпературной газовой среде, в зависимости от температуры газовой среды

и среднего расстояния между каплями. Методика измерения принципиально отличается от известных [1,3,4] осреднением скорости испарения по большому количеству капель ($\sim 10^3$), что повышает точность полученных результатов.

Схема экспериментальной установки [5] приведена на рис. 1. Полый цилиндрический нагреватель выполнен из керамической трубы 1 диаметром 12 см и высотой $L = 1$ м, на внутренней поверхности которой установлены проволочные нихромовые спирали 2, соединенные с источником напряжения 3. Мерная емкость 4 с набором капилляров одинакового диаметра 5 располагается над верхним срезом трубы 1. В качестве мерной емкости использован цилиндр из фторопласта, в торце которого установлен набор из девяти медицинских игл с внешним диаметром 0.8 мм. В мерную емкость 4 помещена исследуемая жидкость 6. Внутренняя полость мерной емкости 4 соединена с воздушным микрокомпрессором 7 через электропневмоклапан 8, который управляется низкочастотным генератором напряжения 9. Скоростные видеокамеры 10 установлены на входе и на выходе трубы 1, приемная емкость 11 установлена на выходе трубы 1. Температура газа в зоне нагрева трубы 1 контролируется съемными термомпарами 12, расположенными по ее оси. Сигналы от термомпар 12 через усилитель 13 поступают на осциллограф 14.

При проведении эксперимента внутренняя полость трубы 1 прогревается до заданной температуры в диапазоне 600–850 К, контролируемой термомпарами 12. После выравнивания температуры в полости трубы 1 термомпары 12 удаляются из зоны нагрева. В мерную емкость 4 заливается исследуемая жидкость 6. При подаче импульсов напряжения от генератора 9 на электропневмоклапан 8 в полости мерной емкости 4 создаются импульсы давления, которые приводят к одновременному отрыву капель от срезов капилляров 5. При этом

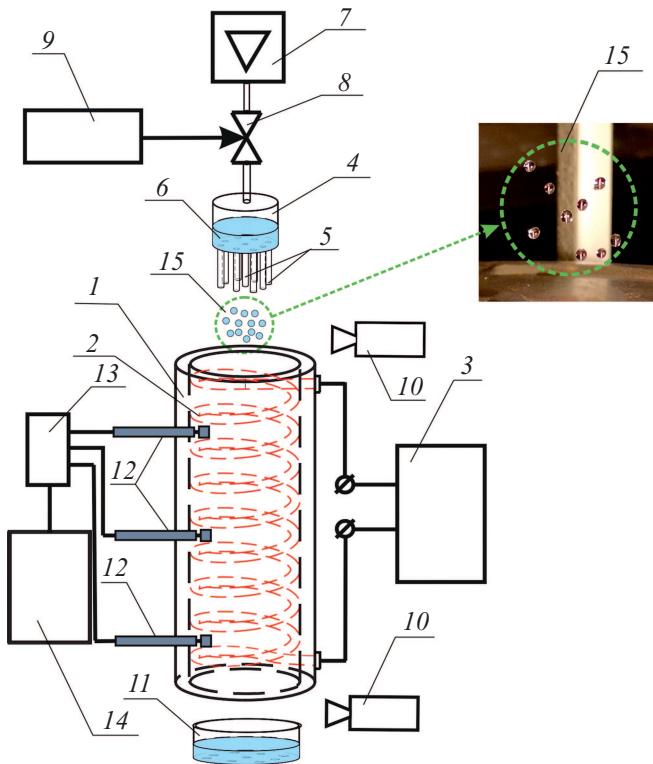


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Пояснения в тексте.

образуется компактный кластер монодисперсных капель 15. При многократной подаче импульсов давления в нагреватель последовательно поступают идентичные группы капель.

Скорость испарения капли определяется уравнением [6]:

$$W = \rho_p \frac{\Delta R}{\Delta t}, \quad (2)$$

где ρ_p — плотность жидкости; $\Delta R = R_0 - R_k$ — изменение радиуса капли за время нагрева Δt .

Предположим, что за время измерения в нагреватель поступило N_0 капель с суммарной массой $m_0 = 4N_0 \rho_p \pi R_0^3 / 3$, а в приемную емкость — N_k капель с суммарной массой $m_k = 4N_k \rho_p \pi R_k^3 / 3$. При $N_0 = N_k$ изменение радиуса капли определяется формулой

$$\Delta R = R_0 - R_k = R_0 \left(1 - \sqrt[3]{\frac{m_k}{m_0}} \right). \quad (3)$$

Для расчета времени нагрева Δt рассмотрим уравнение гравитационного осаждения капли [7]:

$$\rho_p V_0 \frac{du}{dt} = g V_0 (\rho_p - \rho_g) - C_D S_m \frac{\rho_g u^2}{2}, \quad (4)$$

где $V_0 = 4\pi R_0^3 / 3$ — начальный объем капли, u — скорость движения капли, t — время, C_D — коэффициент сопротивления, $S_m = \pi R_0^2$ — площадь миделева сечения капли, g — ускорение свободного падения, ρ_g — плотность газа.

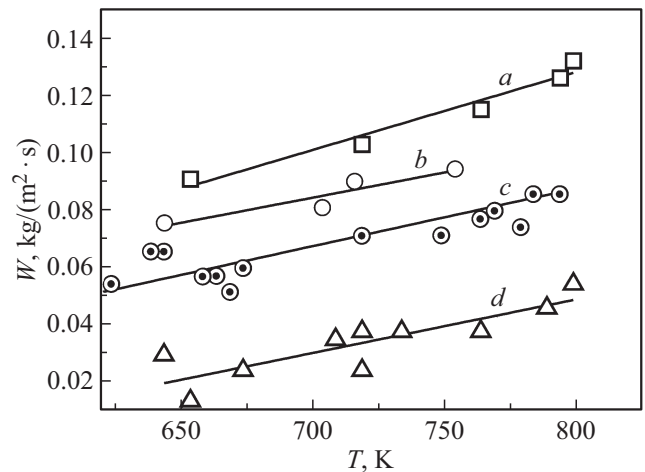


Рис. 2. Зависимость скорости испарения от температуры. $n = 1$ (a), 2 (b), 4 (c) и 9 (d).

Для расчета скорости капли $u(t)$ представим уравнение (4) в безразмерном виде

$$\frac{dy}{d\tau} = 1 - y^2, \quad (5)$$

где $y = u/u_*$ — безразмерная скорость капли, $\tau = t/t_*$ — безразмерное время ($t_* = u_*/g$).

Масштаб скорости u_* соответствует скорости стационарного осаждения капли и определяется из уравнения (4) при $du/dt = 0$:

$$u_* = \sqrt{\frac{2\rho_p g V_0}{\rho_g C_D S_m}}. \quad (6)$$

Для капли жидкости реализуется автомодельный режим осаждения, при котором $C_D = \text{const} = 0.44$ [8]. При этом из (6) следует

$$u_* = 2.46 \sqrt{R_0 g \rho_p / \rho_g}.$$

Аппроксимация решения уравнения (5) с нулевыми начальными условиями ($\tau = 0, y = 0$) в диапазоне $\tau \leq 0.75$ имеет вид

$$y(\tau) = 0.93\tau. \quad (7)$$

Подставляя (7) в уравнение для безразмерного расстояния $\xi = x/x_*$, пройденного каплей,

$$\xi(\tau) = \int_0^\tau y(\tau) d\tau$$

и проводя интегрирование, получим (с учетом $x_* = u_* t_*$) формулу для определения Δt в размерном виде

$$\Delta t = 1.466 \sqrt{L/g}. \quad (8)$$

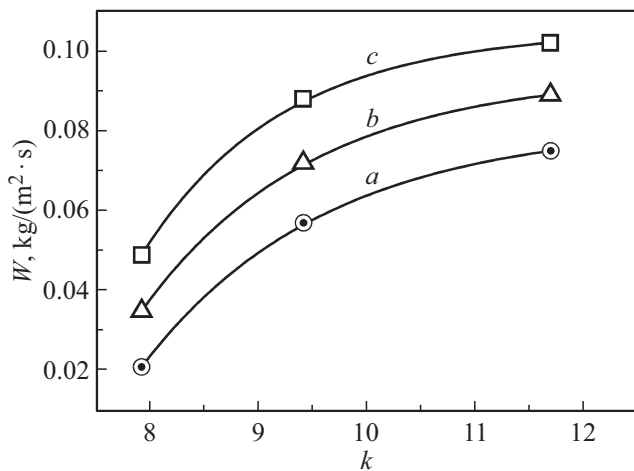


Рис. 3. Зависимость скорости испарения от параметра k . $T = 650$ (a), 725 (b), 800 К (c).

Подставляя ΔR из (3) и Δt из (8) в уравнение (2), получим соотношение для определения скорости испарения каждой из капель в кластере

$$W = 0.682\rho_p R_0 \sqrt{g/L} (1 - \sqrt[3]{m_k/m_0}). \quad (9)$$

Радиус капель R_0 измерялся по результатам видеосъемки с погрешностью $\sim 4\%$, значения m_0 и m_k определялись взвешиванием на аналитических весах с погрешностью $\sim 1\%$. В проведенных экспериментах $m_0 \sim 20$ г, $N_0 \sim 2 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3$.

На рис. 2 приведены результаты измерений скорости испарения капель дистиллированной воды с начальным радиусом $R_0 = 0.77$ мм в зависимости от температуры окружающей среды и количества капель в кластере ($n = 2, 4, 9$). В диапазоне температур $T = 650-800$ К скорость испарения как одиночной капли, так и кластера капель линейно возрастает с ростом температуры. Количественные данные по скорости испарения одиночной капли (рис. 2, зависимость a) хорошо согласуются с известными литературными данными [9], полученными в близких условиях проведения эксперимента, для которых реализуется комбинированный механизм теплообмена (45% — радиационный тепловой поток от стенок нагревателя, 40% — конвективный нагрев, 15% — кондуктивный нагрев).

В проведенной серии экспериментов обнаружено существенное уменьшение скорости испарения с увеличением количества капель в кластере (рис. 2, зависимости b–d). Увеличение количества капель в кластере приводит к увеличению их объемной концентрации C_V , которая характеризуется безразмерным параметром $k = l/2R_0$, где l — среднее расстояние между центрами капель в кластере. Для используемой в экспериментах установки (рис. 1) значения этого параметра составляют $k = 11.7$ ($n = 2$), $k = 9.4$ ($n = 4$) и $k = 7.9$ ($n = 9$). На рис. 3 приведены зависимости скорости испарения капель от параметра k для различных значений температуры окружающей среды.

Из приведенных на рис. 3 зависимостей следует, что с увеличением параметра k от 7.9 до 11.7 скорость испарения монотонно возрастает от 0.021 до 0.075 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ при $T = 650$ К, от 0.035 до 0.089 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ при $T = 725$ К, от 0.049 до 0.102 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ при $T = 800$ К. Снижение скорости испарения капель с увеличением их концентрации можно объяснить увеличением концентрации водяных паров в кластере. Аналогичный эффект обнаружен в работе [1], где получено снижение скорости испарения потока капель на 14–18% с увеличением C_V от $2 \cdot 10^{-5}$ до $9 \cdot 10^{-5}$. При большом количестве капель в кластере параметр k связан с их объемной концентрацией соотношением [7]:

$$k = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6C_V}}. \quad (10)$$

Отметим, что в работе [1] параметр k в соответствии с (10) изменялся от 29.7 до 18.7.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10014).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 302 с.
- [2] Копылов Н.П., Карпов В.Н., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Хасанов И.Р., Сушкина Е.Ю. // Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика. 2019. № 59. С. 79–86.
- [3] Люлин Ю.В., Кабов О.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 17. С. 88–94.
- [4] Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Legros J.C., Strizhak P.A. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 95. P. 184–197.
- [5] Архипов В.А., Басалаев С.А., Коноваленко А.И., Золоторев Н.Н., Перфильева К.Г., Антонникова А.А. Способ определения скорости испарения группы капель. Заявка № 2019139349 на патент РФ. МПК G01N 21/00. Заявл. 02.12.2019.
- [6] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 284 с.
- [7] Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск: Изд. Дом Томск. гос. ун-та, 2019. 328 с.
- [8] Нигматулин Р.И. Движение многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. I. 464 с.
- [9] Войтков И.С., Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 12. С. 1911–1914.