

03.2

Влияние примесей в каплях суспензий, эмульсий и растворов на скорости их испарения

© С.А. Керимбекова, Р.С. Волков, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: susanna21@tpu.ru

Поступило в Редакцию 6 июля 2023 г.

В окончательной редакции 18 августа 2023 г.

Принято к публикации 18 августа 2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований интегральных характеристик испарения капель воды с примесями. Варьируемые параметры: температура газовой среды (573–873 К), (тип твердые нерастворимые — оксид алюминия, диоксид титана, глина, ил, песок; твердые растворимые — поваренная соль; жидкие — трансформаторное масло, спирт) и массовая концентрация (0.5–5%) примесей. Установлены диапазоны изменения массовой скорости испарения капель суспензий, эмульсий и растворов в зависимости от теплофизических и реологических свойств капель с примесями (плотность, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность). Получено аппроксимационное выражение, иллюстрирующее в безразмерном виде зависимость скорости испарения капель от температуропроводности. Предложен подход к прогнозированию скорости испарения капли при известных теплофизических и реологических характеристиках состава.

Ключевые слова: капля, примеси, растворы, суспензии, скорость испарения.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.20.56337.19676

Тенденция нарастания в последнее десятилетие количества исследований в области испарения капель растворов с различного рода примесями обусловлена их широким распространением в технологиях: термическая и огневая очистка вод (технологических, сточных) [1], газопарокапельные теплоносители [2], полидисперсное пожаротушение [3], топливные технологии [4]. В результате производственных работ во многих отраслях промышленности формируются большие объемы сточных вод. В их состав входят инородные органические и неорганические примеси, такие как металлы и их производные, частицы глины, ила и прочих твердых включений, гликоли, амины, метанол [5]. Как правило, сточные воды подвергаются термической очистке путем выпаривания (концентрирование примесей), сушки (распыление жидкости в среде горячего воздуха или дымовых газов), термического окисления („выжигание“ примесей) [6]. Кроме очистки сточных вод задача оптимизации и управления характеристиками испарения капель жидкостей при высоких (более 500 К) температурах газовой среды актуальна также в области пожаротушения. Установлено, что наличие грунтовых примесей (глины, песка, ила, почвы) значительно интенсифицирует фазовые превращения неоднородных капель по причине повышенных (относительно воды) значений теплопроводности и температуропроводности примесей [7]. Определены характеристики процесса испарения, в частности зависимость изменения размера капель (ΔR) от относительной массовой доли примесей (глины, ила, песка, земли) в составе последних [7]. На данный момент в этом научном направлении отмечается нехватка экспериментальных данных в области значений массовых

скоростей испарения мелкодисперсных капель воды с различного рода примесями. Это связано с трудностями проведения экспериментов (размер капель менее 2 мм, высокие скорости протекания процессов) и влиянием на скорость испарения совокупности разнообразных факторов (размер капель, концентрация компонентов, температура жидкости и газовой среды, подводимый тепловой поток и схема нагрева). Рациональным представляется определение скоростей испарения при высокотемпературном (573–873 К) нагреве капель воды с твердыми и жидкими примесями.

При проведении экспериментов использовалась совокупность типичных твердых и жидких примесей к воде. В табл. 1 приведены теплофизические характеристики (плотность, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность), размеры частиц и массовая концентрация примесей. Значения теплофизических параметров примесей (табл. 1) варьируются в широких диапазонах. Использование разнородных примесей обусловливалось необходимостью дальнейшего обобщения полученных экспериментальных результатов, а также получения математических зависимостей скорости испарения капель суспензий, эмульсий или раствора от значений их теплофизических и реологических параметров. При помощи лабораторных микровесов „Vibra HT 84RCE“ (дискретность 10^{-5} г) определялась необходимая масса примеси, после чего последняя добавлялась в емкость (бак) с водопроводной (ГОСТ Р 51232–98) водой и тщательно перемешивалась в ней до получения однородного состава.

Эксперименты проводились на стенде, аналогичном описанному в работе [8]. При помощи специализиро-

Таблица 1. Теплофизические характеристики использованных примесей

Тип примеси	Теплофизические характеристики при 293 К				Массовая концентрация, % (размер, μm)	Отношение температуропроводности смеси к температуропроводности примеси, $a_{\text{mix}}/a_{\text{imp}}$
	Теплопроводность λ , $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Удельная теплоемкость C , $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Плотность ρ , kg/m^3	Температуропроводность a , $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$		
Диоксид титана	0.599	720	4235	22.95	0.5 (0.1–2)	1.003
Глина	7	840	2750	6.49	1 (10–20)	0.995
Ил	1.5	1200	1050	14.2	1 (300–800)	0.999
Песок	1.8	960	1440	8.68	1 (100–200)	0.996
Графитовые частицы	1.2	710	1300	21.66	5 (20–30)	1.025
Трансформаторное масло	2	2100	820	5.8	2.5	0.985
Спирт этиловый	1	1000	987	7.09	5	0.975
NaCl	0.7	3200	1128	1.43	5	0.955

ванного дозатора генерировался поток капель (радиусом $R_d \approx 1 \text{ mm}$), который подавался в цилиндрический канал (жаропрочный цилиндр высотой 1 м с внутренним диаметром 0.2 м) с продуктами сгорания керосина. Скорость движения продуктов сгорания в экспериментах регулировалась путем измерения расхода воздуха вытяжной вентиляционной системы и составляла около $U_g \approx 1.5 \text{ m/s}$. Размеры капель регистрировались методом теневой фотографии („shadow photography“) [9] на разных участках по всей высоте цилиндрического канала с использованием передвижной системы регистрации на основе координатного механизма [8]. Метод „shadow photography“ предполагает фоновую подсветку измерительной области лазером (применялся зеленый YAG:Nd-лазер „Quantel EverGreen 70“) посредством оптического световода, подключенного к рассеивающему диффузному экрану, и видеофиксацию изображений капель с использованием ССD-видеокамеры (модель „ImperX IGV-B2020M“). Экспериментальные данные обрабатывались в программном обеспечении „Actual Flow“. При помощи специализированных программных фильтров выделялись границы капель, нейтрализовались шумы и определялись радиусы капель. Погрешность определения R_d не превышала 1.5%. Также экспериментально определялось время прохождения каплями канала с продуктами сгорания (Δt_d) путем слежения за отдельными каплями с использованием высокоскоростной CMOS-видеокамеры „Phantom MIRO M310“ (разрешение изображения $1280 \times 800 \text{ px}$, скорость съемки до $6.5 \cdot 10^5 \text{ fps}$). Регистрировались временные моменты вхождения капель в канал (t_1) и выхода из него (t_2). Погрешность определения Δt_d не превышала 0.03 с.

Для регистрации температуры воздуха и продуктов сгорания (T_g) в экспериментах применялся измерительный комплекс, состоящий из высокоскоростной платы аналогового ввода „National Instruments“ типа NI 9219 и четырех хромель-алюмелевых (диапазон измеряемых температур 273–1473 К, систематическая погрешность $\pm 3 \text{ K}$) малоинерционных (время теплового запаздывания менее 0.1 с) термопар, расположенных в четырех точках равномерно по высоте цилиндрического кварцевого канала. Максимальные случайные погрешности измерения T_g не превышали 15 К.

Значение скорости испарения в каждом эксперименте и для каждого жидкостного состава (табл. 1) вычислялось по формуле [8]:

$$W_e = \rho_d(R_d - R_d^*)/\Delta t_d = \rho_d \Delta R/\Delta t_d,$$

где ρ_d — плотность воды [kg/m^3], R_d и R_d^* — начальное и конечное значения радиуса капли [м], Δt_d — время прохождения капель канала с продуктами сгорания [с]. Погрешность определения массовой скорости испарения капель не превышала 2.5%.

На рис. 1 представлены установленные зависимости скоростей испарения капель ($R_d \approx 1 \text{ mm}$) от их реологических и теплофизических параметров (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность) при варьировании начальной температуры жидкости T_d от 293 до 373 К в условиях их подачи во встречно направленный поток продуктов сгорания температурой $T_g = 573 \text{ K}$. На основе анализа данных, представленных на рис. 1, сформулировано заключение о том, что на процесс испарения влияют три рассмотренные характеристики в совокупности. Изучение влияния на процесс испарения только одного из этих трех параметров является

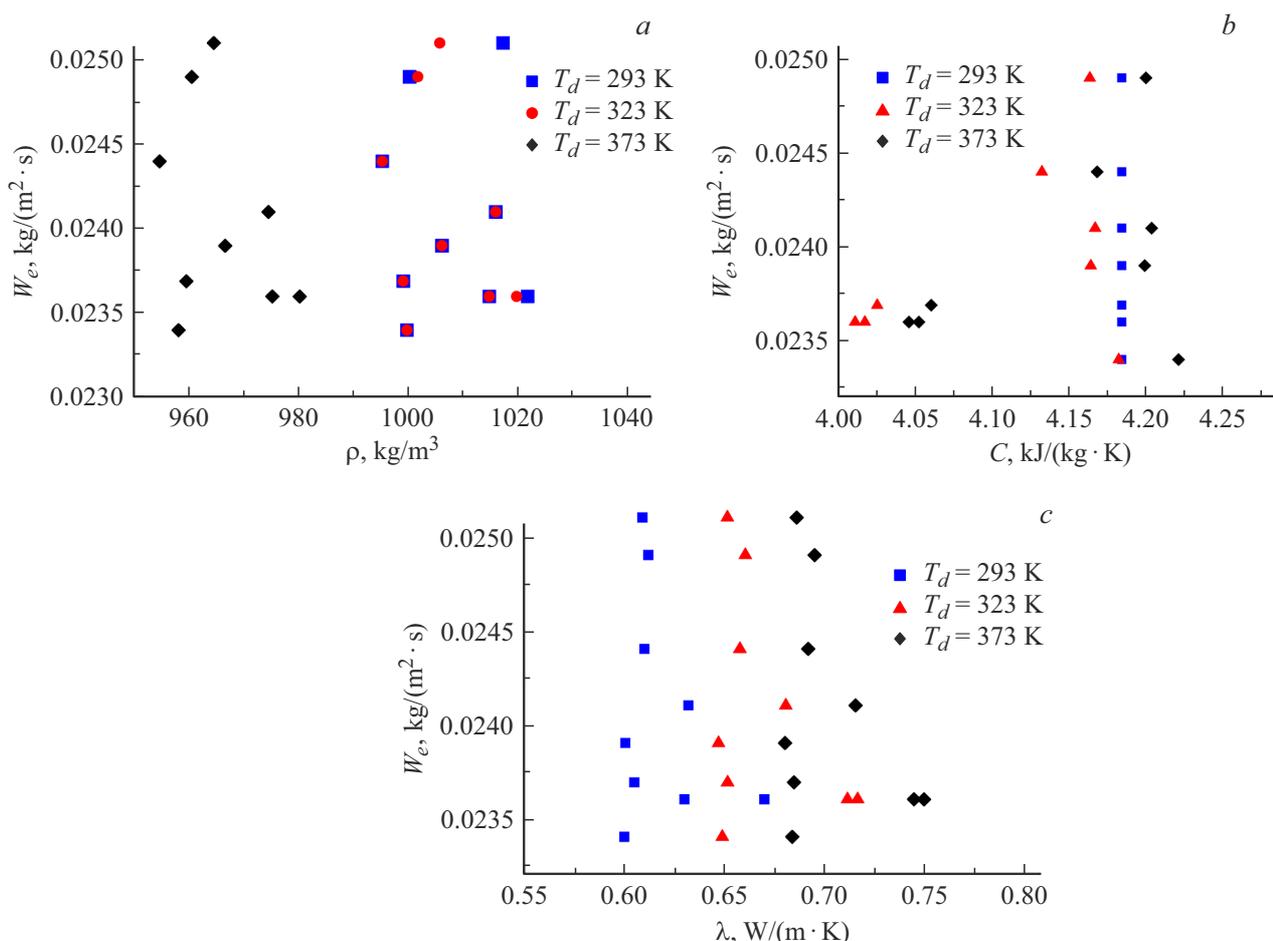


Рис. 1. Влияние реологических и теплофизических характеристик исследованных составов ($R_d \approx 1$ мм, $T_g \approx 573$ К) жидкостей на массовую скорость испарения капель при варьировании начальной температуры капель (293–373 К).

некорректным. Поэтому целесообразно обобщить рассмотренные параметры в одной физической величине — температуропроводности, характеризующей скорость изменения температуры вещества в нестационарных тепловых процессах. Температуропроводность вычислялась по формуле

$$a = \lambda / (\rho C),$$

где ρ — плотность [kg/m^3], λ — теплопроводность [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], C — удельная теплоемкость [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$].

На рис. 2 представлены полученные по результатам расчетов зависимости относительных массовых скоростей испарения капель жидкостей ($R_d \approx 1$ мм, $T_g \approx 573$ К) от их относительной температуропроводности для трех начальных температур жидкости. Значения относительной массовой скорости испарения, а также относительной температуропроводности рассчитывались по формулам

$$W'_e = W_e / W_e^{\max}, \quad a' = a / a_{\max},$$

где W_e^{\max} и a_{\max} — максимальные полученные по результатам экспериментов значения параметров W_e и a соответственно. Из рис. 2 видно, что для трех

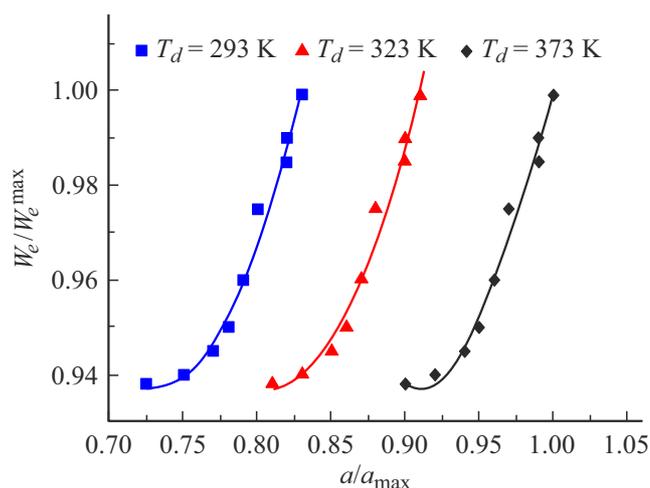


Рис. 2. Зависимости относительных массовых скоростей испарения капель исследованных составов ($R_d \approx 1$ мм, $T_g \approx 573$ К) от их относительной температуропроводности для трех начальных температур капель. Линиями показаны аппроксимации для каждой температуры.

Таблица 2. Коэффициенты функции $W'_e = b + c \exp(da')$

Начальная температура капель, К	Коэффициенты аппроксимационной функции			R^2
	b	c	d	
293	0.9346	$1.21 \cdot 10^{-1}$	27.05	0.9636
323	0.9647	$5.06 \cdot 10^{-18}$	21.58	0.9999
393	0.9176	$3.24 \cdot 10^{-9}$	17.07	0.9908

исследуемых начальных температур капель динамика изменения скорости испарения сопоставима. При аналогичных условиях (тепловой поток, температура продуктов сгорания, начальная температура и радиус капель) увеличение теплопроводности состава путем добавления в жидкость примесей приводит к росту скорости испарения капель при их распылении. Анализ рис. 2 показывает, что достичь одного и того же значения скорости испарения можно увеличением как начальной температуры капель, так и их теплопроводности. Полученный результат имеет важное прикладное значение. Так, зная концентрацию (массовую долю) и тип примесей в составе жидкости, можно рассчитать температуру, до которой необходимо нагреть состав для получения максимальных значений скорости испарения. При фиксированной температуре воды можно прогнозировать концентрацию и тип примесей для получения необходимых характеристик испарения. Таким образом, становится возможным управление характеристиками фазовых превращений жидкости, что, очевидно, является очень важным для широкого круга практических приложений.

По результатам экспериментов (рис. 2) путем аппроксимации получена обобщенная математическая зависимость для прогнозирования значений массовой скорости испарения капель жидкости в зависимости от ее теплопроводности для трех начальных температур:

$$W'_e = b + c \exp(da').$$

Коэффициенты полученной аппроксимационной функции W'_e приведены в табл. 2. Проведенные эксперименты позволили установить, что скорости испарения капель растворов с примесями при их распылении в высокотемпературной газовой среде главным образом зависят от их теплофизических параметров, а именно от теплопроводности. При этом показано, что, изменяя такие параметры, как концентрация и тип примеси, а также температура жидкости, можно достаточно успешно управлять характеристиками испарения последней.

Необходимо отметить, что на скорость фазовых превращений оказывают влияние также характеристики примеси: концентрация и размер частиц (в случае твердых примесей). При наличии в каплях твердых примесей наблюдалось активное поглощение и аккумуляция энергии продуктов сгорания и, как следствие, интенсификация нагрева и испарения капель. Это обусловлено

меньшим количеством энергии, требуемой для прогрева поверхностного слоя капли суспензии до активного испарения. Также при движении капель с примесями наблюдалась более интенсивная деформация капель, чем для капель воды без примесей. Это приводило к более активному перемешиванию слоев жидкости и росту средней температуры капель. Поскольку размеры твердых примесей (табл. 1) в ходе приготовления не могут быть строго одной величины и наблюдается их варьирование в определенном диапазоне, это ведет к еще более интенсивному теплообмену между слоями жидкости. В работе [9] обосновано, что при незначительном содержании паров воды температура капли в процессе испарения достигает стационарного значения, которое ниже температуры потока на сотни градусов. Этот эффект определяет создание некоторой тепловой защиты (буферного парового слоя) капли от внешней газовой среды.

Финансирование работы

Исследования процессов прогрева и испарения многокомпонентных капель в высокотемпературной газовой среде выполнены в рамках проекта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-806. Эксперименты с каплями жидких биотоплив проводились при поддержке гранта Президента РФ (МД-31616.2022.4).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.М. Бочкарева, М.К. Лей, В.В. Терехов, В.И. Терехов, Инж.-физ. журн., **92** (5), 2208 (2019). [E.M. Bockkareva, M.K. Ley, V.V. Terekhov, V.I. Terekhov, J. Eng. Phys. Thermophys., **92** (5), 1171 (2019). DOI: 10.1007/s10891-019-02031-4].
- [2] V.I. Terekhov, P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov, Int. J. Heat Mass Transfer, **158**, 120057 (2020). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120057
- [3] X. Zhou, S.P. D'Aniello, H.-Z. Yu, Fire Saf. J., **54**, 36 (2020). DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.07.007

- [4] E.M. Starinskaya, N.B. Miskiv, A.D. Nazarov, V.V. Terekhov, O.D. Rybdylova, S.S. Sazhin, available at SSRN (2022). DOI: 10.21203/rs.3.rs-2312383/v1
- [5] А.К. Стрелков, А.О. Базарова, С.Ю. Теплых, Градостроительство и архитектура, **11** (3), 50 (2021). DOI: 10.17673/Vestnik.2021.03.08
- [6] Н.М. Легкий, С.М. Кривенцов, В.К. Шумилин, Символ науки: международный научный журнал, № 11-2, 11 (2022).
- [7] О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, А.А. Щербинина, Теоретические основы химической технологии, **51** (4), 455 (2017). DOI: 10.7868/S0040357117040145 [O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, A.A. Shcherbinina, Theor. Found. Chem. Eng., **51** (4), 468 (2017). DOI: 10.1134/S0040579517040297].
- [8] Р.С. Волков, С.А. Керимбекова, П.А. Стрижак, Письма в ЖТФ, **47** (22), 28 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51723.18791
- [9] А.А. Бринь, С.П. Фисенко, Ю.А. Ходыко, Инж.-физ. журн., **84** (2), 274 (2011). [A.A. Brin, S.P. Fisenko, Yu.A. Khodyko, J. Eng. Phys. Thermophys., **84** (2), 292 (2011). DOI: 10.1007/s10891-011-0472-1].