

УДК 536.4  
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4360

## Скорости испарения капель воды с растворимыми и нерастворимыми добавками

С.А. Керимбекова<sup>✉</sup>, Р.С. Волков, И.П. Озерова, Д.С. Романов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

✉ susanna21@tpu.ru

### Аннотация

**Актуальность** исследования обусловлена широким практическим применением воды с типичными растворимыми и нерастворимыми добавками в технологиях: термической и огневой очистке жидкостей, полидисперсном пожаротушении, сжигании суспензионных топлив из отходов, очистке теплонагруженных поверхностей, создании теплоносителей на базе продуктов сгорания. Любое изменение компонентного состава жидкости приводит к изменению ее теплофизических свойств, скоростей прогрева и фазовых превращений. Пока недостаточно экспериментальных данных о скоростях испарения капель воды с типичными растворимыми и нерастворимыми добавками. **Цель:** экспериментальное определение скорости испарения капель воды с типичными добавками при различных схемах нагрева. **Методы.** Для регистрации размеров капель в процессе движения использовались оптические методы регистрации на базе высокоскоростной видеокамеры. Для регистрации температуры продуктов сгорания применялся измерительный комплекс, состоящий из платы NI 9219 и четырех хромель-алюмелевых малоинерционных термопар. При проведении исследований использовались четыре схемы нагрева капель: в потоке продуктов сгорания при доминировании конвективного теплообмена, в трубчатой муфельной печи при доминировании радиационного теплообмена, на твердой поверхности при доминировании кондуктивного теплообмена, в пламени при доминировании смешанного (конвективного и радиационного) теплообмена. **Результаты.** Определены диапазоны изменения скоростей испарения капель воды с типичными (растворимыми и нерастворимыми) добавками при различных схемах нагрева с доминированием конвективного, радиационного и кондуктивного теплообмена. Установлено влияние типа и концентрации добавки, схемы нагрева и температуры греющей среды на характеристики испарения капель.

**Ключевые слова:** нагрев, испарение, капли, добавки, примеси.

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке проекта Министерства науки и образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806/7).

**Для цитирования:** Скорости испарения капель воды с растворимыми и нерастворимыми добавками / С.А. Керимбекова, Р.С. Волков, И.П. Озерова, Д.С. Романов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 11. – С. 138–146. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4360

---

UDC 536.4  
DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4360

## Evaporation rates of water droplets with soluble and insoluble additives

S.A. Kerimbekova<sup>✉</sup>, R.S. Volkov, I.P. Ozerova, D.S. Romanov

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

✉ susanna21@tpu.ru

### Abstract

**The relevance.** Caused by a wide practical use of water with typical soluble and insoluble additives in the following technologies. They are: thermal and fire purification of liquids, polydisperse fire extinguishing, combustion of waste-derived slurry fuels, cleaning of heat-loaded surfaces, creation of heat agents based on combustion products. Any change in liquid compo-

nent composition leads to a change in its thermophysical properties, heating rates and phase transformations. So far, there is not enough experimental data on evaporation rates of water droplets with typical soluble and insoluble additives. **The aim.** Experimental determination of evaporation rate of water droplets with typical additives under various heating methods. **The methods.** To register sizes of moving droplets, optical registration methods based on a high-speed video camera were used. To register the temperature of combustion products, a measuring complex, consisting of an NI 9219 board and four chromel-alumel fast-response thermocouples, was used. The authors used four methods of droplet heating: in the flow of combustion products with the dominance of convective heat transfer, in a tubular muffle furnace with the dominance of radiative heat transfer, on a solid surface with the dominance of conductive heat transfer, and in a flame with the dominance of mixed (convective and radiative) heat transfer. **The results.** The authors have determined the ranges of change in evaporation rates of water droplets with typical (soluble and insoluble) additives for various heating methods with the dominance of convective, radiative, and conductive heat transfer. The effect of an additive type and concentration, heating method and heating medium temperature on of droplet evaporation characteristics was established.

**Keywords:** heating, evaporation, droplets, additives, impurities.

**Acknowledgments:** The study was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of Russia, Agreement No 075-15-2020-806/7.

**For citation:** Kerimbekova S.A., Volkov R.S., Ozerova I.P., Romanov D.S. Evaporation rates of water droplets with soluble and insoluble additives. *Bulletin of the Tomsk polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 11, pp. 138–146. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4360

## Введение

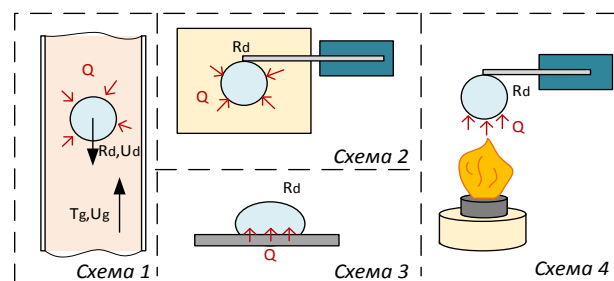
Исследования процессов нагрева и испарения капля жидкостей имеют большое значение для развития технологий, связанных с физико-химическими процессами и фазовыми превращениями. Наиболее перспективными принято считать технологии термической и огневой очистки жидкостей [1–3], полидисперсного пожаротушения [4–6], горения суспензионных, жидких и эмульсионных топлив [7–11], очистки теплонагруженных поверхностей [12–14], создания теплоносителей на базе паров и дымовых газов [15–17]. В технологических процессах нередко используется неочищенная от растворенных в ней примесей вода [18], либо она смешивается в определенной концентрации со специализированными добавками [19, 20]. Любое изменение компонентного состава жидкости приводит к изменению ее теплофизических свойств, скоростей прогрева и фазовых превращений. Пока недостаточно экспериментальных данных о скоростях испарения капель воды с типичными растворимыми и нерастворимыми добавками. Это обусловлено тем, что для соответствующих процессов характерны высокие скорости и совокупность совместно влияющих факторов: размеры капля, концентрации компонентов, температура жидкости и газовой среды, подводимый тепловой поток, схема нагрева и др. Целью данного исследования являлось экспериментальное определение скорости испарения воды с типичными добавками (на примере твердой, растворимой и нерастворимой) при схемах нагрева капля, соответствующих газопарокапельным приложениям.

## Материалы и методы

При проведении исследований использовались четыре схемы нагрева капля (рис. 1): в потоке про-

дуктов сгорания при доминировании конвективного теплообмена, в трубчатой муфельной печи при доминировании радиационного теплообмена, на твердой поверхности при доминировании кондуктивного теплообмена, в пламени при доминировании смешанного (конвективного и радиационного) теплообмена.

В качестве типичных твердых добавок использованы углеродистые (графит) частицы в массовой концентрации 5 %, нерастворимых – отработанное трансформаторное масло в объемной концентрации 2,5 %, растворимых – этиловый спирт (в объемной концентрации 5 %). В таблице приведены теплофизические свойства воды и типичных добавок к ней при различной температуре. Варьирование начальной температуры воды и добавок в диапазоне 293...373 К приводит к существенному изменению теплофизических свойств.



**Рис. 1.** Схемы нагрева капля с доминированием кондуктивного, конвективного, радиационного и смешанного теплообмена

**Fig. 1.** Heat supply schemes of droplets with the dominance of conductive, convective, radiative and mixed heat transfer

**Таблица.** Теплофизические свойства воды и добавок  
**Table.** Thermophysical properties of water and additives

Вещество Substance	Температура Temperature $T, K$	Теплофизические свойства Thermophysical properties			
		Теплопроводность $\lambda, W/(m \cdot K)$ Thermal conductivity $\lambda, W/(m \cdot K)$	Удельная теплоемкость $C_p, kJ/(kg \cdot K)$ Specific heat $C_p, kJ/(kg \cdot K)$	Плотность $\rho, kg/m^3$ Density $\rho, kg/m^3$	Температуропроводность $a, 10^{-3} m^2/s$ Thermal diffusivity $a, 10^{-3} m^2/s$
Вода Water	293	0,599	4,183	998,2	0,143
	323	0,648	4,181	998	0,155
	373	0,683	4,22	958,4	0,168
Углеродистые (графит) частицы Carbonaceous (graphite) particles [21]	293	70	0,714	1700	57,67
	323	69	0,857	1750	46
	373	68	0,98	1688	41,1
Этиловый спирт Ethanol [22]	293	0,18	2,36	790	0,096
	323	0,142	2,65	763	0,07
	373	0,1	3,26	711	0,043
Трансформаторное масло Transformer oil [23]	293	0,11	1,668	863,6	0,076
	323	0,1082	1,845	845	0,069
	373	0,1039	2,145	816	0,059

Капля воды в экспериментах генерировалась с использованием электронного дозатора (варьирования объема с шагом 0,1 нл). Начальный размер (радиус) капль варьировался в диапазоне  $R_d=0,7-0,8$  мм. В зависимости от технологий и причины попадания в воду данных веществ их принято считать примесями или добавками.

Схема 1 предусматривала инициирование горения керосина марки ТС-1. Сгенерированные дозатором капли сбрасывались в канал из кварцевого стекла с высокотемпературными продуктами сгорания. Результаты такого исследования крайне важны во многих теплотехнологиях. Например, на ТЭС можно существенно снизить тепловые потери с уходящими газами при нагреве распыленной рабочей жидкости [24]. Применимы результаты данного исследования также для развития технологий пожаротушения, в основе которых лежат процессы смешения капельных и высокотемпературных газовых потоков. Для регистрации размеров капль в процессе движения по кварцевому каналу использовалась высокоскоростная система на базе видеокамеры с частотой съемки до  $6 \cdot 10^5$  кадров в секунду, максимальным разрешением съемки  $1280 \times 1280$  пикселей. Методика регистрации соответствует [25]. Систематические погрешности определения  $R_d$  составили 0,015 мм. Для регистрации температуры продуктов сгорания ( $T_g$ ) в экспериментах применялся измерительный комплекс, состоящий из платы NI 9219 и четырех хромель-алюмелевых (диапа-

зон измеряемых температур 273–1473 К, систематическая погрешность  $\pm 3$  К) малоинерционных (время теплового запаздывания – менее 0,1 с) термомпар. Термомпары размещались в четырех точках равномерно по высоте кварцевого канала. Максимальные случайные погрешности измерения  $T_g$  не превышали 15 К.

Для реализации схемы 2 применялась трубчатая муфельная печь (максимальная температура 1200 °С, объем камеры 0,004 м<sup>3</sup>). Контроль и установление необходимой температуры нагрева  $T_a$  выполнялись с помощью интегрированных регулятора и термомпары типа S (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1,150 °С, показатель тепловой инерции не более 5 с, предел допускаемых отклонений  $\pm 1$  °С). Капля воды с добавками вводилась роботизированным координатным механизмом в камеру до ее центра для обеспечения требуемых температурных условий. Исследования тепломассообмена капль при такой схеме нагрева важны для развития ряда приложений, в частности, для создания новых и усовершенствования существующих теплообменников смешивающего типа, основанных на принципе распыления жидкости в нагретой среде.

Результаты исследования нагрева капль на твердой поверхности (схема 3) применимы при развитии технологии охлаждения теплонагруженных поверхностей оборудования путем подачи спрея. В основе такой технологии охлаждения лежит принцип теплового эффекта фазового перехода (типа «вода–пар»). В экспериментах в качестве твердой поверхности использовалась медная подложка (толщиной 4 мм и диаметром 50 мм), нагрев которой осуществлялся при помощи автоматизированной нагревательной плиты ПЛ-01 (диапазон рабочих температур греющей поверхности 40–400 °С, точность установки температуры  $\pm 1$  °С, материал нагревательной поверхности – дюралюминий с нанокерамическим покрытием). Для определения температуры подложки использовалась платина-платинородиевая термомпара (диаметр спая 0,05 мм, инерционность 0,1 с, погрешность  $\pm 1$  °С), закрепленная на поверхности подложки посредством термомпасты.

Эксперименты в пламенной зоне при доминировании конвективного и радиационного теплообмена (схема 4) крайне важны в развитии топливных технологий на основе водных суспензий и эмульсий. Прогрев и испарение капль суспензий существенно влияют на эффективность их зажигания и горения и, как следствие, на количество выбросов, в частности CO и NO<sub>x</sub>. Также результаты исследования применимы в технологии термической очистки воды выжиганием: распыленные капль воды попадают в факельную зону и испаряются, а содер-

жащиеся в них добавки отделяются. В экспериментах капли нагревались в пламени спиртовой горелки (рис. 1), температура которой варьировалась изменением высоты нахождения держателя капли от металлического диска спиртовой горелки. Температура на высоте 6 см составляла 400 °С, 12 см – 100 °С. Изменение значений температуры обеспечивалось посредством термопары типа К (диапазон измеряемых температур от –200 до +1350 °С).

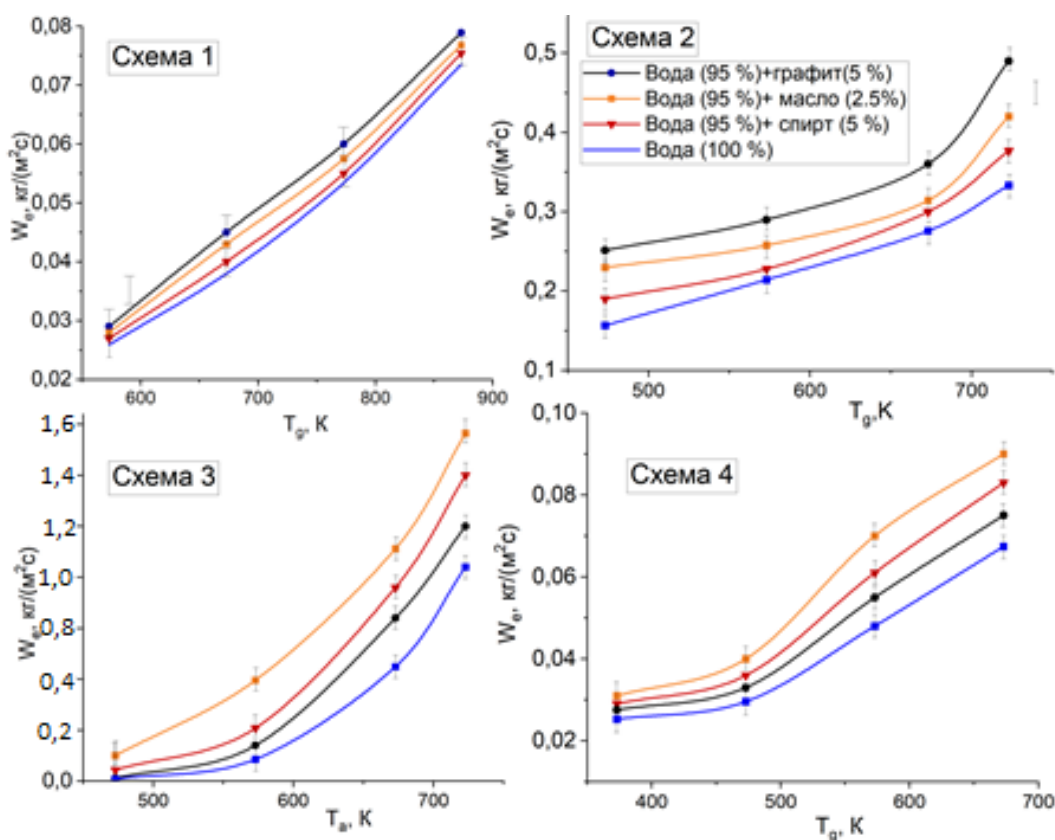
Для каждого компонентного состава капль при разной температуре внешней греющей среды (473–773 К) выполнялись не менее 10 экспериментов. Определялся радиус капли в каждый момент времени. Конечной целью каждого эксперимента являлось вычисление массовых скоростей испарения капль ( $W_e$ ) по формуле [26]:

$$W_e = \rho_d \frac{R_d - R_d^*}{\Delta t_d},$$

$\rho_d$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $R_d, R_d^*$  – начальное и текущее значение радиуса капли, м;  $\Delta t_d$  – длительность испарения, с.

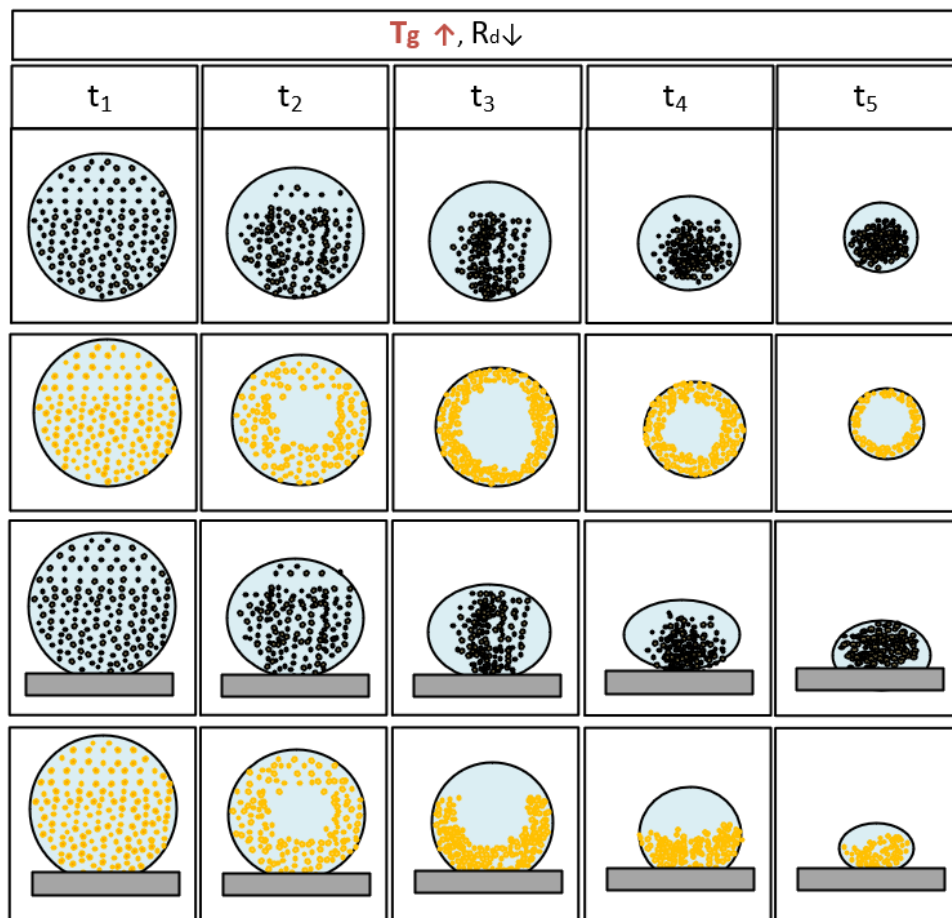
### Результаты исследования

На рис. 2 приведены результаты экспериментально полученных средних (за весь период испарения, который называют временем жизни) скоростей испарения ( $W_e$ ) капль с добавками для четырёх схем их нагрева. Установлено, что при нагреве капль в потоке продуктов сгорания (схема 1) наибольшая скорость испарения характерна для капль воды с твердой добавкой. Аналогичная тенденция выделена и при нагреве капль в муфельной печи (схема 2). Это обусловлено тем, что в схемах 1 и 2 подвод тепла к капле осуществляется по всей ее свободной поверхности (рис. 1), а твердые частицы графита в процессе нагрева и испарения агломерируются (вследствие гравитационных сил) в нижней части капли (рис. 3). Агломерированные твердые частицы графита активно аккумулируют энергию продуктов сгорания и радиационного излучения муфельной печи, интенсифицируя прогрев и испарение жидкости. Смешивание воды с нерастворимой добавкой (трансформаторное масло) приводит к большему росту скорости испарения капль, чем при смешивании с растворимой – спиртом.



**Рис. 2.** Зависимости скоростей испарения жидкостей ( $R_d=0,8$  мм) от температуры газовой среды и поверхности для четырех схем их нагрева

**Fig. 2.** Dependences of evaporation rates of liquids ( $R_d=0.8$  mm) on gas medium and surface temperatures for four methods of heating



**Рис. 3.** Особенности поведения твердой и нерастворимой добавки в каплях при нагреве и испарении на твердой нагретой поверхности и в пламени спиртовой горелки

**Fig. 3.** Features of behavior of a solid insoluble additive in droplets during heating and evaporation

Для схем 3 и 4 характерен локальный подвод тепла снизу (рис. 1). Эксперименты показали, что максимальная скорость испарения характерна для воды с трансформаторным маслом (2,5 %), которое за счет более высокой вязкости локализуется в нижней части капли (рис. 3) и имеет максимальную площадь контакта с пламенем и нагретой поверхностью. Это приводит к более быстрому нагреву слоя масла и, как следствие, необходимости подвода меньшего количества энергии для прогрева и испарения поверхностного слоя воды.

Представленные выше экспериментальные результаты получены для определённого начального размера ( $R_d=0,8$  мм) каплей и концентрации (2,5–5 %) добавок к ней. Варьирование размера капли или концентрации добавки приведет к существенным изменениям скоростей испарения. Анализ экспериментально полученных данных показал, что интенсификация прогрева и испарения капель происходит главным образом в результате изменения теплофизических свойств растворов, суспензий, эмульсий: теплоемкости, плотности, теплопроводности, температуропроводности. Целесообразно

обобщить влияние теплофизических свойств с применением температуропроводности, которая характеризует скорость изменения температуры вещества в нестационарных тепловых процессах:

$$a=\lambda/(\rho \cdot c),$$

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

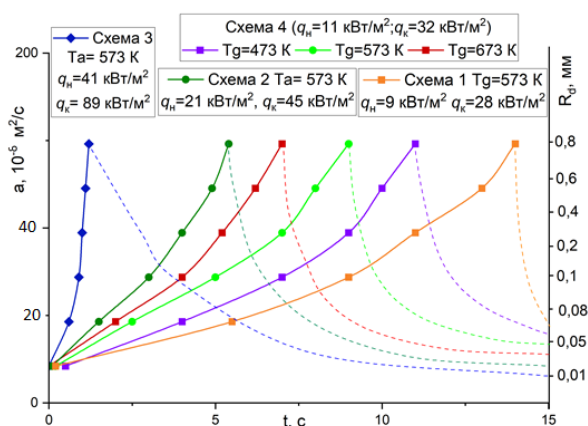
По результатам экспериментов установлена динамика изменения температуропроводности капли с графитовыми частицами (в массовой концентрации 5 %) во времени при разных схемах нагрева (рис. 4) с учетом уменьшения доли воды. Установлено, что быстрое испарение воды из капли суспензии увеличивает относительную долю графита в ее составе. Это приводит к увеличению температуропроводности капли в несколько раз. Данный рост имеет нелинейный характер вследствие нелинейной связи скоростей фазовых превращений и перемешивания слоев суспензий с подводимыми тепловыми потоками. Расчет плотностей тепловых потоков выполнен с применением выражений [27]:

$$\begin{aligned} q_{\text{рад}} &= \sigma_c [\varepsilon_d (T_a^4 - T_s^4) + \varepsilon_a T_a^4], \\ q_{\text{конв}} &= h(T_a - T_s), \\ q_{\text{конд}} &= \lambda_d \frac{T_{\text{sub}} - T_s}{R_d}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $q_{\text{рад}}$  – радиационный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma_c$  – постоянная Стефана–Больцмана, кг·с<sup>-3</sup>·К<sup>-4</sup>;  $\varepsilon_d$  – степень черноты для капли;  $T_a$  – температура воздуха, К;  $T_s$  – температура в приповерхностном слое капли, К;  $\varepsilon_a$  – степень черноты для воздуха;  $q_{\text{конв}}$  – конвективный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $h$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $q_{\text{конд}}$  – кондуктивный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_d$  – теплопроводность капли, Вт/(м·К);  $T_{\text{sub}}$  – температура разогретой подложки, К;  $R_d$  – радиус капли, мм.

Вычисления плотностей тепловых потоков проводились при конкретных значениях, иллюстрирующих оптические и теплофизические свойства компонентов системы. В реальной практике данные свойства могут отличаться от использованных в расчете в пределах 10–15 %. Кроме того, значения плотностей тепловых потоков рассчитаны для начального момента времени, в процессе нагрева эти значения будут меняться в зависимости от изменения температуры капель. Как следствие, количественные значения плотностей тепловых потоков могут различаться в пределах 20–25 %.

При расчете плотности теплового потока (уравнение (1)) помимо плотности потока собственного излучения капли ( $\sigma_c \varepsilon_d T_a^4$ ) учитывается результирующий лучистый тепловой поток на поверхности капли, ограничивающей газовую среду с температурой  $T_a$ , по формуле Нуссельта ( $\sigma_c \varepsilon_d (T_a^4 - T_s^4)$ ).



**Рис. 4.** Динамика изменения температуропроводности капли с добавкой графитовых частиц (5 %) в процессе ее прогрева и испарения при разных схемах нагрева

**Fig. 4.** Dynamics of thermal diffusivity of a droplet with graphite particles (5%) during its heating and evaporation under different heating methods

Для каждой схемы нагрева (рис. 1) суммарный тепловой поток рассчитывался как сумма  $q_{\text{рад}}$ ,  $q_{\text{конв}}$  и  $q_{\text{конд}}$  с учетом основных входных параметров системы «капля – греющая среда» для начального ( $q_n$ ) и конечного ( $q_k$ ) момента времени. Использование четырех различных схема нагрева позволило получить значения тепловых потоков в широком диапазоне (до 100 кВт/м<sup>2</sup>). На рис. 4 приведены значения плотностей тепловых потоков.

Установлено (рис. 4), что капля воды на твердой нагретой поверхности достигнет определенного стабильного значения температуропроводности быстрее, чем в опытах при других трех схемах нагрева. Это обусловлено непосредственным контактом нагретой поверхности с частицами графита после их агломерации на ней. Определяющее значение имеет фактор размещения добавок в объеме капли. Чем неравномернее данное размещение по объему капли, тем интенсивнее прогрев последней. Как следствие, чем больше радиус капли, тем масштабнее проявляется данный эффект.

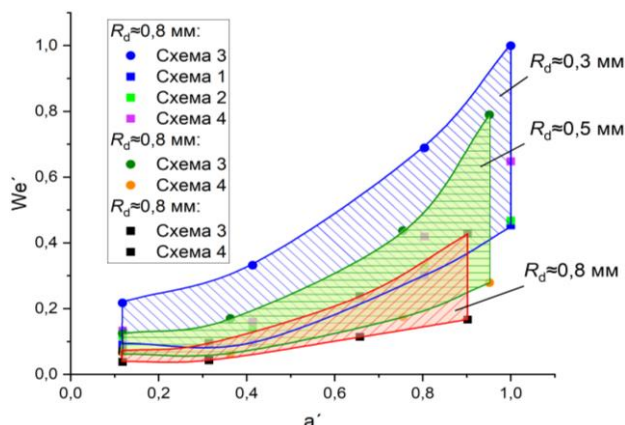
На рис. 5 приведены результаты расчетов относительных массовых скоростей испарения капель ( $R_d \approx 0,8$  мм,  $T_g \approx 673$  К) с учетом их относительной температуропроводности для четырех схем их нагрева и их начальной температуре 293 К. Значения относительной массовой скорости испарения, а также относительной температуропроводности рассчитывались по формулам:

$$\begin{aligned} W_e' &= W_e / W_e^{\text{max}}, \\ a' &= a / a_{\text{max}}, \end{aligned}$$

где  $W_e^{\text{max}}$  и  $a_{\text{max}}$  – максимальные полученные по результатам экспериментов значения параметров  $W_e$  и  $a$ , соответственно ( $W_e^{\text{max}} = 1,5$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $a_{\text{max}} = 58 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с). Максимальные значения данных параметров покрывают условия, реализующиеся в большинстве промышленных приложений.

Приведенные на рис. 5 области изменения значений  $W_e$  показывают достаточно узкий диапазон потенциального варьирования скорости испарения. Этот результат очень важен, так как он обосновывает возможность допущения о постоянной скорости испарения жидкости в процессе времени существования капель разных размеров и при различных схемах подвода тепловой энергии. Это допущение более обосновано при снижении значений  $a$ , т. е. чем меньше концентрация добавок в воде, тем меньше диапазон изменения  $W_e$ . Также важно отметить, что максимальные скорости испарения капель достигаются при смешанном теплообмене и в потоке продуктов сгорания с доминированием конвективного теплообмена.

В данных условиях добавки более существенно влияют на прогрев капель вследствие поглощения подводимого теплового потока и деформации поверхности капель относительно сферических форм.



**Рис. 5.** Значения относительных массовых скоростей испарения капель исследованных составов ( $T_0 \approx 673$  K) с учетом изменения их относительной температуропроводности для четырех схем нагрева при варьировании начальных размеров капель ( $R_d \approx 0,8$  мм,  $R_d \approx 0,5$  мм,  $R_d \approx 0,3$  мм) при их начальной температуре 20 °C

**Fig. 5.** Relative mass evaporation rates of droplets of compositions ( $T_0 \approx 673$  K), taking into account the change in their relative thermal diffusivity for four heating methods with varying the initial droplet sizes ( $R_d \approx 0.8$  mm,  $R_d \approx 0.5$  mm,  $R_d \approx 0.3$  mm) at their initial temperature of 20 °C

Используя рис. 5, можно прогнозировать диапазоны изменения  $We_e$  для совокупности приложений, указанных в вводной части статьи. На рис. 5 показаны области, рассчитанные по экспериментальным данным для разных начальных размеров капель. Для этого выбраны радиусы капель  $R_d \approx 0,8$  мм,  $R_d \approx 0,5$  мм,  $R_d \approx 0,3$  мм. Так как время прогрева и существования капель достаточно ограничено для малых  $R_d$ , можно в первом приближении использовать указанный подход. Его применение показало, насколько данные области могут трансформироваться при варьировании  $R_d$ , а также в процессе существования капель в высокотемпературной газовой среде.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lin Y., Chu F., Wu X. Evaporation of heated droplets at different wetting modes: a decoupled study of diffusive and convective effects // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – V. 207. – 123993.
2. Evaporation of vertical and pendant ethanol droplets and internal Marangoni convections / J. Liu, J. Yu, J. Chen, Z. Pan // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2023. – V. 214. – 124338.
3. Methodological characteristics of an experimental investigation of the process of evaporation of suspended liquid droplets / E.M. Bochkareva, M.K. Ley, V.V. Terekhov, V.I. Terekhov // J. Eng. Phys. Thermophys. – 2019. – V. 92. – № 5. – P. 1171–1179.
4. A comparative study of ultrafine water mist extinguishing hydrocarbon pool fires with or without potassium salts / T. Liang, X. Bai, D. Zhang, W. Zhong // Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – V. 39. – 101655.
5. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: laboratory and field tests // International Journal of Thermal Sciences. – 2017. – V. 121. – P. 398–409.
6. Mechanism insight of shielded methane non-premixed jet flame extinction with water mist: OH-PLIF visualization and quantitative analysis of critical fire extinguishing / Y. Liu, X. Wang, Q. Tang, G. Li, C. Pan, T. Liu, X. Ni, Y. Wu // Fire Safety Journal. – 2022. – V. 132. – 103642.
7. Li S., Zhang H., Law C.K. Gas-phase transient effects on droplet evaporation and ignition // Combustion and Flame. – 2023. – V. 254. – 112840.
8. Experimental investigation on evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene droplet above the critical temperature under various pressure conditions / J. Yin, S. Chen, D. Zhu, S. Xue, S. Li, Z. Zhou, B. Liu // Aerospace Science and Technology. – 2023. – V. 140. – 108463.

На рис. 5 показано, что для четырех исследуемых схем нагрева капель динамика изменения скорости испарения сопоставима. Увеличение температуропроводности капель путем добавления к ней добавок приводит к нелинейному росту скорости испарения. Установлено (рис. 5), что схема нагрева существенно влияет на скорость испарения при аналогичных значениях начальной температуры и радиуса капель, а также температуры греющей среды. Показано (рис. 2), что достичь одного и того же значения скорости испарения можно изменением схемы нагрева и величины температуропроводности, в частности, варьированием компонентного состава капель и их размера. Полученный результат имеет важное прикладное значение. Так, при фиксированной температуре жидкости можно прогнозировать концентрацию и тип добавки для получения необходимых характеристик испарения при разных схемах нагрева. При таких условиях становится возможным гибкое управление характеристиками испарения жидкости, что является важным для развития практических приложений и прогнозирования роли добавок в составе капель.

## Заключение

Исследование процесса нагрева и испарения капель с типичной твердой, растворимой и нерастворимой добавками позволило определить диапазоны изменения скоростей испарения и температуропроводности капель воды с добавками при различных схемах их нагрева. Установлено влияние схемы нагрева и температуры греющей среды на характеристики их испарения. Полученные экспериментальные результаты важны для развития технологий, в частности, термической и огневой очистки жидкостей, полидисперсного пожаротушения, сжигания и горения суспензионных топлив, очистки теплонагруженных поверхностей, создания теплоносителей на базе продуктов сгорания.

9. A study of blending carbon nanoparticles made of coconut shell (fullerene C60) in vegetable oils on the droplet evaporation characteristics / E. Marlina, A.F. Alhikami, B. Waluyo, S.R. Sahwahita, I. Wardana // *Fuel*. – 2023. – V. 346. – 128319.
10. Wang B., Xuan Y., Han X. Analysis on roles of thermal radiation to evaporation and combustion of fuel droplets // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023. – V.191. – 108306.
11. Experimental study on the ignition and burning characteristics of liquid fuels on hot surfaces / Z. Wang, J. Chen, Y. Yu, D. Kong // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2023. –V. 176. – P. 725–733.
12. Wu S., Lin Z., Lo C. Study of super-hydrophilic nanoscale bilayer assembly surface modification and its application to enhance evaporation // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2022. – V. 27. – 101133.
13. Wang J., Xie J., Liu X. Investigation of wettability on performance of pulsating heat pipe // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – V. 150. – 119354.
14. Urban. J.J. Emerging scientific and engineering opportunities within the water-energy nexus // *Joule*. – 2017. – V. 1. – Iss. 4. – P. 665–688.
15. Modelling and simulating of premixed layer in stratified fuel coolant configuration / J. Kokalj, M. Uršič, M. Leskovar, R. Meignen // *Annals of Nuclear Energy*. – 2023. – V. 185. – 109740.
16. Numerical analysis on subcooled boiling in PWR coolant channel based on a modified multi-scale interface model / X. Zhang, R. Li, M. Peng, T. Cong, C. He, C. Xia, X. Wei // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – V. 229. – 120598.
17. A hydrophobic porous substrate-based vapor venting technique for mitigating flow boiling instabilities in microchannel heat sink / A. Priy, S. Raj, M. Pathak, M.K. Khan // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – V. 216. – 119138.
18. Zhdanova A., Vysokomornaya O., Strizhak P. Evaporation features of water droplets with typical subsoil impurities during the motion through high-temperature gas environment: research experience at Tomsk Polytechnic University // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 2015. – V. 206. – P. 327–332.
19. The effect of additives on the treatment of oil-in-water emulsions by vacuum evaporation / G. Gutiérrez, A. Cambiella, J.M. Benito, C. Pazos, J. Coca // *Journal of Hazardous Materials*. – 2007. – V. 144. – Iss. 3. – P. 649–654.
20. Analytical and experimental study on binary droplet evaporation: inhibitory effect of adding mineral oil adjuvant to water / X. Xi, C. Cai, H. Liu, R. Wen, X. Ma, X. Song // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2023. – V. 142. – 106630.
21. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1967. – 474 с.
22. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
23. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Metallurgia, 1975. – 370 с.
24. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Особенности перемещения и испарения капель воды в контактных водонагревателях // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 9. – С. 68–75.
25. Volkov R.S., Chvanov S.V., Andriyanov D.D. Diagnostics of the presence of solid particles in aqueous aerosol droplets by their interference pattern // *Technical Physics Letters*. – 2019. – V. 45. – № 6. – P. 605–608.
26. Савельев А.С. Метод обработки теневаых фотографий факела распыла жидкости // *Вестник Объединенного института высоких температур*. – 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 69–74.
27. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 152. – P. 409–419.

## REFERENCES

1. Lin Y., Chu F., Wu X. Evaporation of heated droplets at different wetting modes: a decoupled study of diffusive and convective effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 207, no. 123993.
2. Liu J., Yu J., Chen J., Pan Z. Evaporation of vertical and pendant ethanol droplets and internal Marangoni convections. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 214, no. 124338.
3. Bochkareva E.M., Ley M.K., Terekhov V.V., Terekhov V.I. Methodological characteristics of an experimental investigation of the process of evaporation of suspended liquid droplets. *J. Eng. Phys. Thermophys*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1171–1179.
4. Liang T., Bai X., Zhang D., Zhong W. A comparative study of ultrafine water mist extinguishing hydrocarbon pool fires with or without potassium salts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, vol. 39, no.101655.
5. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: laboratory and field tests. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, vol. 121, pp. 398–409.
6. Liu Y., Wang X., Tang Q., Li G, Pan C., Liu T., Ni X., Wu Y. Mechanism insight of shielded methane non-premixed jet flame extinction with water mist: OH-PLIF visualization and quantitative analysis of critical fire extinguishing. *Fire Safety Journal*, 2022, vol. 132, no. 103642.
7. Li S., Zhang H., Law C.K. Gas-phase transient effects on droplet evaporation and ignition. *Combustion and Flame*, 2023, vol. 254, no. 112840.
8. Yin J., Chen S., Zhu D., Xue S., Li S., Zhou Z., Liu B. Experimental investigation on evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene droplet above the critical temperature under various pressure conditions. *Aerospace Science and Technology*, 2023, vol. 140, no. 108463.
9. Marlina E., Alhikami A.F., Waluyo B., Sahwahita S.R., Wardana I. A study of blending carbon nanoparticles made of coconut shell (fullerene C60) in vegetable oils on the droplet evaporation characteristics. *Fuel*, 2023, vol. 346, no. 128319.
10. Wang B., Xuan Y., Han X. Analysis on roles of thermal radiation to evaporation and combustion of fuel droplets. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, vol. 191, no. 108306.
11. Wang Z., Chen J., Yu Y., Kong D. Experimental study on the ignition and burning characteristics of liquid fuels on hot surfaces. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 176, pp. 725–733.
12. Wu S., Lin Z., Lo C. Study of super-hydrophilic nanoscale bilayer assembly surface modification and its application to enhance evaporation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2022, vol. 27, no. 101133.



13. Wang J., Xie J., Liu X. Investigation of wettability on performance of pulsating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 150, no. 119354.
14. Urban. J.J. Emerging Scientific and engineering opportunities within the water-energy nexus. *Joule*, 2017, vol. 4, no. 4, pp. 665–688.
15. Kokalj J., Uršič M., Leskovar M., Meignen R. Modelling and simulating of premixed layer in stratified fuel coolant configuration. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, vol. 185, no. 109740.
16. Zhang X., Li R., Peng M., Cong T., He C., Xia C., Wei X. Numerical analysis on subcooled boiling in PWR coolant channel based on a modified multi-scale interface model. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 229, no.120598.
17. Priy A., Raj S., Pathak M., Khan M.K. A hydrophobic porous substrate-based vapor venting technique for mitigating flow boiling instabilities in microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 2022, vol. 216, no. 119138.
18. Zhdanova A., Vysokomornaya O., Strizhak P. Evaporation features of water droplets with typical subsoil impurities during the motion through high-temperature gas environment: research experience at Tomsk Polytechnic University. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2015, vol. 206, pp. 327–332.
19. Gutiérrez G., Cambiella A., Benito J.M., Pazos C., Coca J. The effect of additives on the treatment of oil-in-water emulsions by vacuum evaporation. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, vol. 144, no. 3, pp. 649–654.
20. Xi X., Cai C., Liu H., Wen R., Ma X., Song X. Analytical and experimental study on binary droplet evaporation: Inhibitory effect of adding mineral oil adjuvant to water. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 142, no. 106630.
21. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki* [Thermophysical properties of nuclear technology materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1967. 474 p.
22. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 721 p.
23. Kazantsev E.I. *Promyshlennyye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlya raschetov i proektirovaniya* [Industrial furnaces. Reference manual for calculations and design]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 370 p.
24. Volkov R.S., Kusnezov G.V., Strizhak P.A. Features of movement and evaporation of water droplets in contact water heaters. *Thermal power engineering*, 2016, no. 9, pp. 68–75. In Rus.
25. Volkov R.S., Chvanov S.V., Andriyanov D.D. Diagnostics of the presence of solid particles in aqueous aerosol droplets by their interference pattern. *Technical Physics Letters*, 2019, vol. 45, no. 6, pp. 605–608.
26. Saveliev A.S. Method for processing shadow photographs of a liquid spray plume. *Bulletin of the Joint Institute for High Temperatures*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 69–74. In Rus.
27. Antonov D.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Explosive disintegration of two-component drops under intense conductive, convective, and radiant heating. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 152, pp. 409–419.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сусанна Александровна Керимбекова**, инженер организационного отдела Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; susanna21@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9932-2628>; шифр специальности ВАК: 1.3.14

**Роман Сергеевич Волков**, кандидат технических наук, доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; romanvolkov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7970-3654>

**Ирина Петровна Озерова**, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; ozer@tpu.ru

**Даниил Сергеевич Романов**, инженер-исследователь лаборатории тепломассопереноса Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; dsr7@tpu.ru

Поступила в редакцию: 30.08.2023

Поступила после рецензирования: 25.09.2023

Принята к публикации: 05.10.2023

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Susanna A. Kerimbekova**, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; susanna21@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9932-2628>

**Roman S. Volkov**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; romanvolkov@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7970-3654>

**Irina P. Ozerova**, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; ozer@tpu.ru

**Daniil S. Romanov**, Research Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; dsr7@tpu.ru

Received: 30.08.2023

Revised: 25.09.2023

Accepted: 05.10.2023