

03

## Высокотемпературное испарение капель воды с твердыми нерастворимыми примесями

© М.С. Шахрай<sup>1,2</sup>, Д.В. Антонов<sup>1,2</sup>, П.А. Стрижак<sup>1,2</sup>, С.С. Сажин<sup>1-3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> School of Architecture, Technology and Engineering, Advanced Engineering Centre, University of Brighton, Brighton, U.K.

E-mail: dva14@tpu.ru

Поступило в Редакцию 13 сентября 2024 г.

В окончательной редакции 11 октября 2024 г.

Принято к публикации 11 октября 2024 г.

Представлены результаты моделирования характеристик высокотемпературного испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями. Изучена динамика изменения радиусов капель и их температуры при испарении в разогретой газовой среде в диапазонах размеров от 10 до 100  $\mu\text{m}$  и температур газовой среды от 500 до 1100 К. Показано, что при увеличении относительной массовой концентрации твердых нерастворимых примесей в составе капель воды скорость их испарения возрастает по степенному закону. Установлено, что при относительной массовой концентрации твердых нерастворимых примесей в диапазоне от 5 до 8% в составе капель воды, их радиусах от 10 до 100  $\mu\text{m}$  и температуре газовой среды от 500 до 1100 К время их выпаривания изменяется от 0.1 до 0.36 с, что соответствует условиям распыления технологических и сточных вод в нагревательных камерах.

**Ключевые слова:** капля, испарение, твердые нерастворимые примеси, нагрев, термическая очистка.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59833.20119

Актуальной проблемой мирового масштаба является недостаток чистой питьевой воды [1]. В последние годы эта проблема усложнилась в связи с биологическими атаками и террористическими действиями, направленными на заражение водоемов [2], а также вследствие роста объемов промышленных производств, сопровождающихся выработкой технологических и сточных вод. Это негативно сказывается на экологической обстановке и требует совершенствования существующих методов очистки жидкостей [3]. Очистка технологических и сточных вод, как правило, реализуется в несколько этапов: многоступенчатая фильтрация [4], химическая нейтрализация примесей [5], термическое (высокотемпературное) воздействие [6]. Термические методы очистки включают выпаривание (концентрирование примесей), сушку (распыление жидкости в среде горячего воздуха или дымовых газов), термическое окисление (выжигание горючих примесей). Выжигание применяется для обезвреживания органических примесей сточных вод. Для очистки минерализованных вод чаще всего используется выпаривание [7]. Процесс удаления минеральных веществ и твердых примесей из воды может быть проведен в две стадии: концентрирование и выделение сухих веществ. Выделение сухого продукта может происходить, например, в распылительной сушилке [8]. Нередко вторую стадию заменяют захоронением концентрированных растворов [9]. Выбор метода зависит от объема сточных вод, их состава, теплотворной способности, коррозионной активности, экономичности процесса, требований, предъ-

являемых к очищенным водам. Причина ограниченной применимости термических методов очистки жидкостей до сих пор заключается в дороговизне и энергоемкости, поскольку требуется много энергии на интенсификацию фазовых переходов и окислительных реакций [10]. В настоящее время термическую очистку применяют для обезвреживания сточных вод с малыми относительными массовыми концентрациями твердых нерастворимых примесей (до 8%) [11]. В рамках настоящей работы проанализированы характерные теоретические времена выпаривания примесей в условиях распыления технологических и сточных вод в нагревательных камерах. Это позволит сформулировать требования для оптимизации распыления жидкости с учетом возможностей реакторов, состава жидкости, тепловых условий, интенсификации парообразования по комбинированным методикам, применения избыточного сбрасываемого тепла на станциях, систем замкнутого цикла с использованием очищаемой жидкости в качестве рабочего тела и теплообменного агента. Данные проблемы мотивировали наше исследование.

С использованием верифицированной при сравнении с экспериментальными данными модели тепломассопереноса для анализа процессов сушки и фрагментации капель [12,13] исследовано высокотемпературное испарение капель воды с твердыми нерастворимыми примесями. В качестве модельных твердых нерастворимых примесей использованы углеродистые частицы на примере каменного угля. Соответствующие приме-

Основные теплофизические характеристики капель воды и твердых нерастворимых примесей (температура  $T$  в К) [14]

Параметр	Компонент	
	Дистиллированная вода	Нерастворимая примесь (уголь)
Плотность, $\text{kg/m}^3$	$325 \cdot 0.27^{-\left[1 - \left(T/647.096\right)\right]^{0.23}}$	$0.003(T - 273.15)^2 - 1.4065(T - 273.15) + 1402.9$
Удельная теплоемкость, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$	$(-2.2417 \cdot 10^4 + 876.97T - 2.5704T^2 + 2.4838 \cdot 10^{-3} \cdot T^3)/18$	$1154(T - 273.15)^{0.0346}$
Теплопроводность, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	$-0.35667 + 5.057 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6.1071 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$	$0.0000009(T - 273.15)^2 - 0.0006(T - 273.15) + 0.2707$
Теплота парообразования, $\text{J/kg}$	$-2.4324 \cdot 10^3 \cdot T + 3.1672 \cdot 10^6$	—
Давление насыщенных паров, Па	$8 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(0.0508T)$	—
Динамическая вязкость, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	$3 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 - 3.94 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 2.0328 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 4.6803 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.0406389$	—

си попадают в технологические и сточные воды при обогащении угля. Основные теплофизические свойства использованных в работе компонентов представлены в таблице. Научная новизна настоящей работы состоит в установлении функциональных связей между интегральными характеристиками выпаривания твердых нерастворимых примесей и основными входными параметрами.

Твердые примеси, диспергированные в испаряющейся жидкости (воде), рассматриваются как неиспаряющиеся составные части капли. Эффекты седиментации и агломерации, характерные для многофазных сред, не рассматриваются. Предполагается, что капли имеют сферическую форму. Физическая модель высокотемпературного испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями представлена на рис. 1. На первом этапе капля монотонно прогревается и испаряется. На начальном этапе принимается гомогенное распределение частиц по объему. На втором этапе вблизи поверхности капля растет концентрация твердых нерастворимых примесей и снижается доля воды. На третьем этапе процесс прогрева гетерогенной капли заканчивается сушкой капли и образованием пористого каркаса. Начальная температура капель воды во всех расчетах принималась равной  $T_{d0} = 300$  К. Начальные радиусы капель варьировались в диапазоне  $10\text{--}100 \mu\text{m}$ , температура газовой среды в области решения —  $500\text{--}1100$  К, относительные массовые концентрации твердых нерастворимых примесей —  $5\text{--}8\%$ .

Процесс прогрева капли воды с твердыми нерастворимыми примесями описывался нестационарным дифференциальным уравнением теплопроводности в сферической системе координат

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T}{\partial R} \right) + P(t, R), \quad (1)$$

где  $\kappa = k/(c\rho)$ ,  $k$ ,  $c$  и  $\rho$  — температуропроводность, теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность

воды с твердыми нерастворимыми примесями,  $R$  — расстояние от центра капли,  $T$  — температура,  $t$  — время,  $P(t, R)$  — дополнительный источник тепла (например, радиационный тепловой поток).

Начальные и граничные условия:

$$T(t = 0) = T_{d0}(R), \quad (2)$$

$$h(T_{eff} - T_s) = k \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_d-0}, \quad (3)$$

где  $h = \text{const}$  в течение короткого временного шага — коэффициент теплоотдачи,  $T_s$  — температура поверхности капли,

$$T_{eff} = T_g + \frac{\rho L \dot{R}_{d(e)}}{h}, \quad \dot{R}_{d(e)} = \frac{|\dot{m}_d|}{4\pi\rho R_d^2}, \quad (4)$$

$L$  — теплота парообразования воды.

Для оценки массовой скорости испарения  $\dot{m}_d$  и коэффициента теплопередачи  $h$  использовалась модель Абрамзона и Сириньяно [15]:

$$|\dot{m}_d| = 2\pi R_d D_v \rho_{total} \ln(1 + B_M), \quad (5)$$

где  $D_v$  — коэффициент диффузии паров воды,  $\rho_{total}$  — плотность парогазовой смеси,  $B_M$  — массовое число Сполдинга.

Уравнение диффузии компонентов капли в сферической системе координат

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 Y_i}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial Y_i}{\partial R} \right), \quad (6)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии твердых нерастворимых частиц в капле воды,  $Y_i$  — относительная массовая концентрация  $i$ -го компонента,  $i$  — номер компонента ( $i = 1$  — вода,  $i = 2$  — твердые нерастворимые частицы).

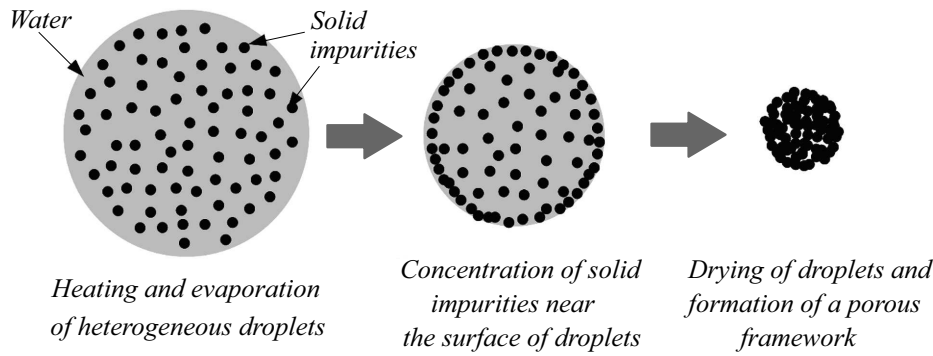


Рис. 1. Физическая модель высокотемпературного испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями.

Начальные и граничные условия:

$$Y_i(t = 0) = Y_{i0}(R), \quad (7)$$

$$\alpha(\varepsilon_i - Y_{is}) = -D \frac{\partial Y_i}{\partial R} \Big|_{R=R_d-0}, \quad \alpha = \frac{|\dot{m}_d|}{4\pi\rho R_d^2}, \quad \varepsilon_i = \frac{Y_{vis}}{\sum_i Y_{vis}}, \quad (8)$$

где  $Y_{is}$  — относительная массовая концентрация  $i$ -го компонента на поверхности капли воды с твердыми нерастворимыми примесями,  $Y_{vis}$  — относительная массовая концентрация паров  $i$ -го компонента.

Парциальное давление паров воды  $p_v$  определялось по закону Рауля

$$p_v = X_{Is} p_v^{sat}, \quad (9)$$

где  $X_{Is}$  — относительная молярная масса воды на поверхности капли,  $p_v^{sat}$  — давление насыщенных паров воды.

Эффективные значения теплофизических свойств капли воды с твердыми нерастворимыми частицами определялись по следующим выражениям [12]:

$$\rho = \left[ \sum_{i=1}^{i=2} (Y_i/\rho_i) \right]^{-1}, \quad c = \sum_{i=1}^{i=2} (Y_i c_i),$$

$$k = \left[ \sum_{i=1}^{i=2} (Y_i k_i^{-2}) \right]^{-1/2}, \quad (10)$$

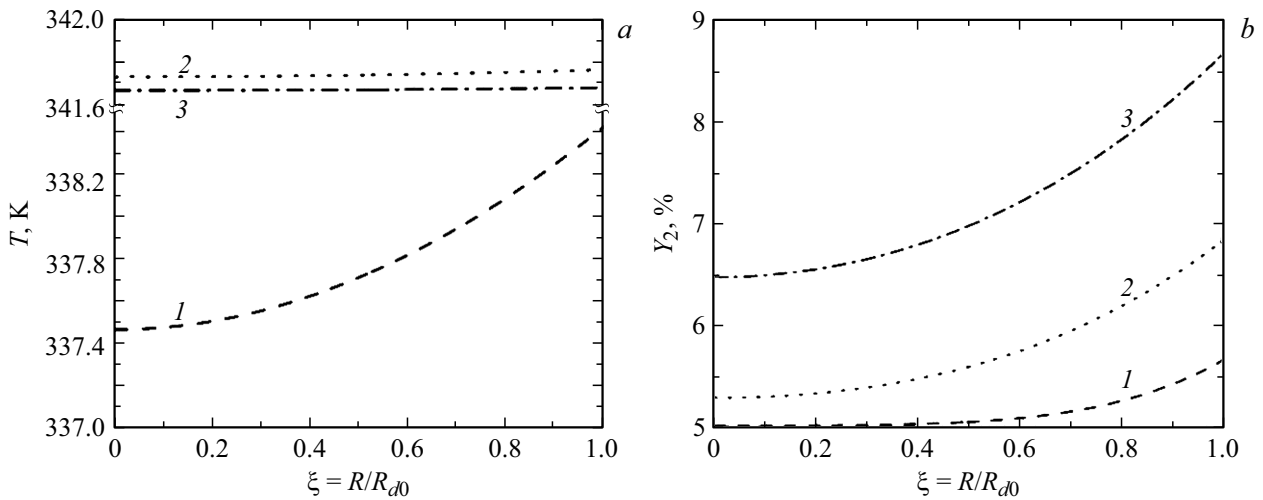
где  $\rho_i$ ,  $c_i$  и  $k_i$  — плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность компонентов капли воды с твердыми нерастворимыми частицами.

Рассматриваемая система уравнений решается аналитически, а результаты аналитического решения внедряются в численный код на каждом коротком шаге по времени. Использовался постоянный шаг по времени  $10^{-6}$  s. Характеристики ЭВМ: процессор Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v3 @ 2.60 GHz (количество процессоров 2), установленная ОЗУ 128 GB. Время вычислений от 1 до 5 min.

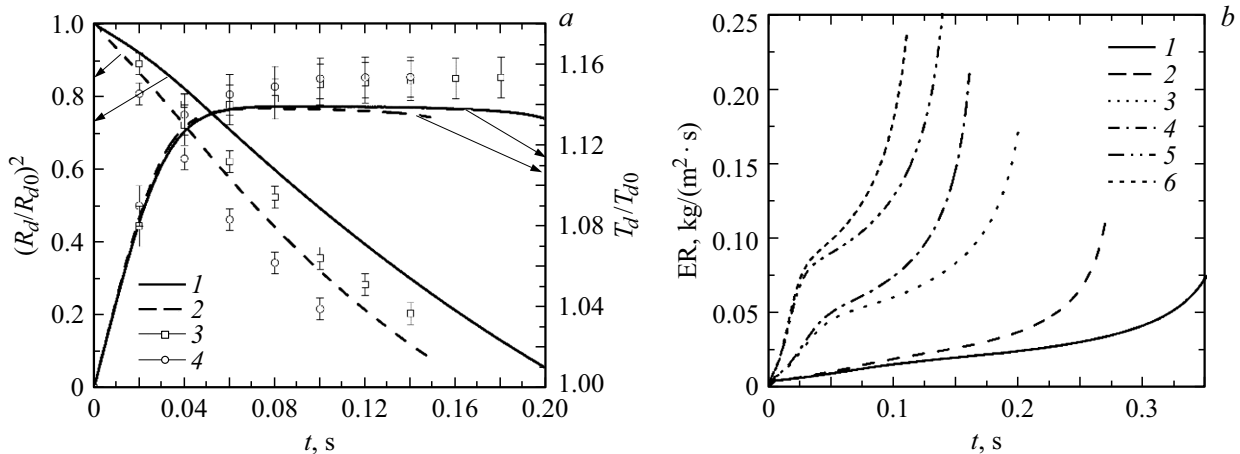
На рис. 2 представлены типичные распределения температуры и концентрации твердых примесей в разные моменты времени ( $t = 0.04, 0.08, 0.12$  s) при начальной

относительной массовой концентрации 5%,  $T_g = 800$  K и  $R_{d0} = 50 \mu\text{m}$ . Отметим, что наиболее высокие температуры внутри капель наблюдаются вблизи их поверхности, а минимальные — в центре на каждом шаге по времени. Аналогичные заключения можно сделать и для распределений концентрации твердых примесей: их максимальная доля сосредоточена вблизи поверхности капель, а минимальная — в центре. При этом видно, что градиенты температур внутри капель невысокие (менее  $0.02 \text{ K}/\mu\text{m}$ ), что указывает на возможность упрощения вычисления за счет исключения из системы уравнений зависимостей температуры от координаты. Однако этим нельзя будет пренебречь при решении уравнения диффузии для получения распределений концентрации примесей.

На рис. 3, а представлена типичная динамика изменения размеров капель воды с твердыми нерастворимыми примесями в виде  $(R_d/R_{d0})^2$  и их средней температуры в виде  $T_d/T_{d0}$  для начальной относительной массовой концентрации примесей 5% (кривые 1) и 8% (кривые 2) при  $T_g = 800$  K и  $R_{d0} = 50 \mu\text{m}$ . Хорошо видно, что чем выше относительная массовая концентрация твердых примесей в каплях воды, тем интенсивнее протекают процессы их прогрева и испарения. Так, например, при увеличении начальной относительной массовой концентрации твердых частиц в каплях воды с 5 до 8% время их испарения снижается более чем на 25%. Это связано главным образом с ростом значения эффективной теплопроводности гетерогенной капли и соответственно с увеличением коэффициента массоотдачи. Отметим, что конечные результаты моделирования соответствуют моменту самоконсервации капель вследствие образования оболочки из твердых примесей вокруг капель воды. Экспериментальные данные при тех же условиях показаны символами (3 — 5%, 4 — 8%). Эксперименты по регистрации условий и характеристик процессов прогрева и испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями проведены с использованием схемы нагрева в потоке разогретого воздуха, аналогичной применявшейся в [13] (доминирует конвективный теплообмен). Такой



**Рис. 2.** Типичные распределения температуры (а) и концентрации твердых примесей (b) в различные моменты времени при начальной относительной массовой концентрации 5%,  $T_g = 800$  К и  $R_{d0} = 50$   $\mu\text{m}$ .  $t = 0.04$  (1), 0.08 (2) и 0.12 с (3).



**Рис. 3.** а — типичная динамика изменения размеров капель воды с твердыми нерастворимыми примесями в виде  $(R_d/R_{d0})^2$  и их средней температуры в виде  $T_d/T_{d0}$  для начальной относительной массовой концентрации примесей 5 (1) и 8% (2) при  $T_g = 800$  К и  $R_{d0} = 50$   $\mu\text{m}$ . Символы — экспериментальные данные при тех же условиях для начальной относительной массовой концентрации примесей 5 (3) и 8% (4). б — теоретические скорости испарения (ER) капель воды ( $R_{d0} = 50$   $\mu\text{m}$ ) с твердыми нерастворимыми примесями с начальной относительной массовой концентрацией 5 (1, 3, 5) и 8% (2, 4, 6) при  $T_g = 500$  (1, 2), 800 (3, 4) и 1100 К (5, 6).

вариант схемы нагрева каплей наиболее приближен к реальным условиям в системах термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей [6,7]. Регистрация характеристик процессов прогрева и испарения капель воды с твердыми нерастворимыми примесями проводилась с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro C110 (915 кадров в секунду при разрешении 1280 на 1024 пикселей). Полученные по результатам экспериментов видеокдры обрабатывались с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Регистрировались динамика изменения размеров и температуры капель во времени. Температура капель измерялась с помощью термопары (тип К). Систематические погрешности регистрации размеров и температу-

ры каплей не превышали 0.05 мм и 3 К соответственно. При сравнении результатов моделирования и опытов следует отметить более высокие скорости прогрева и испарения неоднородных капель в экспериментах (до 20–30%). Это связано главным образом с учетом в модели рециркуляции конвективных течений, а также седиментации и агломерации твердых примесей.

На рис. 3, б представлены рассчитанные значения скорости испарения (ER) капель воды ( $R_{d0} = 50$   $\mu\text{m}$ ) с твердыми нерастворимыми примесями с начальной относительной массовой концентрацией 5 и 8% при  $T_g = 500$ , 800 и 1100 К. По результатам математического моделирования установлено, что при увеличении доли твердых нерастворимых примесей в составе каплей

воды скорость их испарения возрастает, как правило, по степенному закону.

Таким образом, показано, что при относительной массовой концентрации твердых нерастворимых примесей в составе капель воды в диапазоне от 5 до 8%, их радиусах от 10 до 100  $\mu\text{m}$  и температуре газа от 800 до 1100 К время их выпаривания изменяется от 0.1 до 0.36 с. Этого времени достаточно для прогрева капель в нагревательных камерах систем термической и огневой очистки жидкостей от нерегламентированных примесей [14]. С применением разработанной модели можно прогнозировать эффективные условия очистки воды при разном содержании твердых нерастворимых примесей в исходной капле.

### Финансирование работы

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант 075-15-2024-620).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Т.А. Карюхина, И.Н. Чурбанова, *Химия воды и микробиология* (Стройиздат, М., 1983), с. 123.
- [2] A. Zahoor, G. Mao, X. Jia, X. Xiao, J.L. Chen, *Environ. Sci.: Adv.*, **1** (2), 92 (2022). DOI: 10.1039/D2VA00002D
- [3] J.A.C. Castellar, A. Torrens, G. Buttiglieri, H. Monclús, C.A. Arias, P.N. Carvalho, A. Galvao, J. Comas, *J. Clean. Prod.*, **340**, 130660 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130660
- [4] В.А. Никашина, Сорбционные и хроматографические процессы, **19** (3), 289 (2019). DOI: 10.17308/sorpchrom.2019.19/746
- [5] D. Ghazi, Z. Rasheed, E. Yousif, *Arch. Org. Inorg. Chem. Sci.*, **3** (3), 344 (2018). DOI: 10.32474/AOICS.2018.03.000161
- [6] A. Kizgin, D. Schmidt, A. Joss, J. Hollender, E. Morgenroth, C. Kienle, M. Langer, *J. Environ. Manage.*, **347**, 119001 (2023). DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119001
- [7] Д.В. Антонов, Р.С. Волков, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, *Письма в ЖТФ*, **42** (5), 49 (2016). [D.V. Antonov, R.S. Volkov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (3), 248 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016030032].
- [8] Д.Л. Дубовец, *Экология на предприятии*, № 5 (143), 27 (2023).
- [9] В.С. Валиев, Д.В. Иванов, Р.Р. Шагидуллин, *Рос. журн. прикладной экологии*, № 4, 52 (2020). DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034
- [10] А.П. Гуськов, *Письма в ЖТФ*, **47** (11), 10 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.11.50999.18613 [A.P. Gus'kov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 553 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021060080].
- [11] V. Balaram, L. Copia, U.S. Kumar, J. Miller, S. Chidambaram, *Geosyst. Geoenviron.*, **2** (4), 100210 (2023). DOI: 10.1016/j.geogeo.2023.100210
- [12] S.S. Sazhin, O. Rybdylova, A.S. Pannala, S. Somavarapu, S.K. Zaripov, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **122**, 451 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.094
- [13] D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Appl. Therm. Eng.*, **195**, 117190 (2021). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117190
- [14] C.L. Yaws, *Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds* (Knovel, 2003).
- [15] B. Abramzon, W.A. Sirignano, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **32** (9), 1605 (1989). DOI: 10.1016/0017-9310(89)90043-4