

03.1;03.2

Интенсивности микровзрывной фрагментации двухжидкостных капель

© Д.В. Антонов, Р.М. Федоренко, Р.С. Волков

Лаборатория тепломассопереноса Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, Россия

E-mail: rmfedorenko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 22 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 мая 2024 г.

Принято к публикации 19 мая 2024 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований интенсивностей фрагментации двухжидкостных капель типа ядро/оболочка (вода/горючая жидкость) в высокотемпературной газовой среде. Концентрация воды в двухжидкостных каплях принималась равной $10 \pm 2 \text{ vol.}\%$. Установлены характерные для режимов паффинга и микровзрыва диапазоны изменения интенсивностей фрагментации: $< 150 \text{ s}^{-1}$ и $> 500 \text{ s}^{-1}$ соответственно. Показано, что с ростом температуры газовой среды в диапазоне от 600 ± 10 до $750 \pm 10 \text{ K}$ интенсивности фрагментации в режиме микровзрыва для двухжидкостных капель вода/рапсовое масло увеличиваются более чем в 5 раз, вода/дизельное топливо — в 1.5 раза вода/керосин — в 2.4 раза.

Ключевые слова: интенсивность фрагментации, паффинг, микровзрыв, двухжидкостная капля, рапсовое масло, керосин.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58581.19967

Ужесточение требований к сокращению выбросов загрязняющих веществ при сжигании жидких углеводородных топлив и рост соответствующих штрафных санкций мотивируют разработку новых технологий организации горения в камерах сгорания двигательных и энергетических установок. Интегральные характеристики таких устройств и эффективность горения в целом определяются процессами распыления топлива и смешения компонентов топливоздушную смеси [1,2]. Для интенсификации процессов смесеобразования необходимо обеспечить тепловые условия, приводящие к многократному дроблению капель топливных композиций с формированием мелких вторичных фрагментов. Перспективной технологией организации распыления топливных композиций является вторичная фрагментация капель жидкостей в многофазных и многокомпонентных потоках [3]. Процессы вторичной фрагментации позволяюткратно увеличить площадь поверхности испарения жидкости за счет быстрого измельчения исходных капель до нескольких десятков микрометров [4]. В результате интенсивного нагрева и локального перегрева легкокипящих компонентов в составе многофазных и многокомпонентных капель реализуются режимы паффинга и микровзрыва [5]. При разделении режимов микровзрывной фрагментации на микровзрыв и паффинг, как правило, используют визуальный критерий, основанный на количестве и размерах вторичных фрагментов. Под паффингом понимают частичный распад исходной капли, при котором формируются вторичные фрагменты жидкости в количестве до 20 с размерами (радиусами) более 0.3 mm; микровзрыв — полный распад исходной капли с образованием мелкодисперсного аэрозоля [6]. Интенсивность фрагментации позволяет характеризовать

объем диспергируемой жидкости и время, за которое реализуется измельчение исходной капли [7]. Известно несколько подходов к определению интенсивности фрагментации гетерогенных капель. Как правило, они учитывают изменения объема [7] и размеров [8] капель. Критерий перехода между режимами паффинга и микровзрыва по интенсивности фрагментации и диапазоны их изменения являются важными при организации первичного распыления жидкостей и обеспечения эффективных условий вторичного измельчения капель. В настоящий момент в литературе представлено ограниченное количество результатов, посвященных интенсивностям микровзрывной фрагментации и критериям распада, большая часть которых направлена на изучение этих процессов при нагреве смесевых топлив на основе биодизеля, 1-пентанола, метанола и гексадекана [7,8]. При этом обоснованной методики разделения режимов паффинга и микровзрыва капель не разработано. Указанные задачи послужили мотивацией для проведения данного исследования.

Методика экспериментальных исследований и схема стенда (рис. 1) аналогичны использованной в [4]. В качестве нагревательной системы использовалась трубчатая муфельная печь (диапазон температур нагрева до 1573 K), расположенная вертикально к основанию стенда. Сверху на выходе муфельной печи устанавливался металлический теплоизолированный цилиндр для поддержания постоянной температуры на выходе муфельной печи. В цилиндре выполнены отверстия для ввода капель в зону нагрева, регистрации процессов фрагментации, освещения капель светодиодным прожектором. Исследуемые двухжидкостные капли вводились в область регистрации с помощью координатного меха-

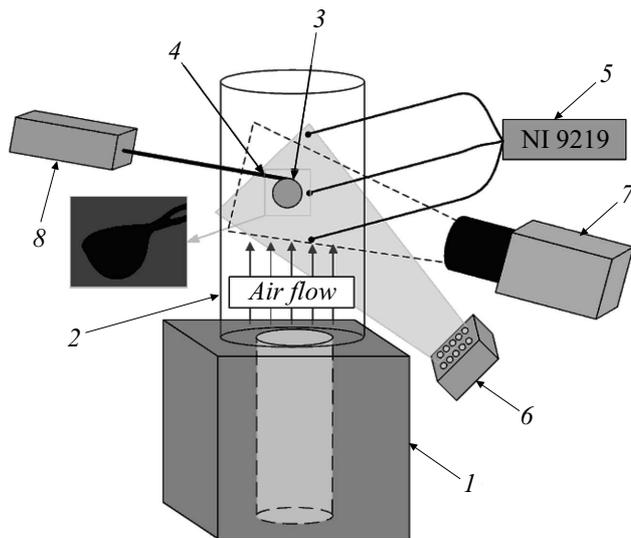


Рис. 1. Стенд для регистрации характеристик фрагментации двухжидкостных капель. 1 — трубчатая муфельная печь, 2 — теплоизолированный цилиндр, 3 — двухжидкостная капля, 4 — держатель, 5 — система для регистрации температуры National Instruments, 6 — источник света, 7 — высокоскоростная видеокамера, 8 — координатный механизм.

низма, на конце которого закреплен держатель из тонкой нихромовой проволоки диаметром 0.2 mm. Температура газовой среды регистрировалась с помощью системы, состоящей из комплекса сбора данных National Instruments и малоинерционных термопар с погрешностью не более 3 K и инерционностью менее 0.1 s. Варьирование температуры в печи осуществлялось в диапазоне от 1073 до 1273 K, что обеспечивало изменение температуры газа в зоне нагрева в диапазоне от 600 до 750 K. Выбор температурного диапазона обусловлен тем, что при соответствующем теплообмене достигаются предельные условия реализации режимов микровзрыва и паффинга [9]. Это позволило установить диапазоны интенсивностей микровзрывного распада при реализации разных режимов. Процессы прогрева, испарения и фрагментации капель регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры. Частота съемки в процессе проведения экспериментов составляла 10^4 fps при разрешении 768×768 px. Обработка видеофрагментов осуществлялась с помощью авторского программного кода [10]. Регистрировались радиусы исходных капель R_d в процессе нагрева и фрагментации, а также длительности микровзрывной фрагментации τ_s . Систематические погрешности определения R_d и τ_s составили 0.0125 mm и 0.1 ms. Для минимизации случайных погрешностей регистрации указанных параметров выполнялись серии из 15–20 экспериментов при идентичных начальных условиях.

В качестве исследуемых жидкостей использовались дистиллированная вода, керосин марки ТС-1, дизельное топливо и рапсовое масло. Методика генерации двух-

жидкостных капель аналогична использованной в [9]. Концентрация воды при проведении экспериментов принималась равной 10 vol.%. При такой концентрации воды достигается максимальный прирост площади поверхности испарения после фрагментации [9]. Начальные радиусы капель при проведении экспериментов составляли 0.9 mm. Свойства жидкостей, использованных при проведении экспериментов, полученные на основании исследований [11], приведены в таблице.

На рис. 2 представлены типичные видеокadres с иллюстрацией фрагментации двухжидкостных капель с начальным радиусом $R_{d0} = 0.9$ mm при температуре газовой среды $T_a = 750$ K. Во всем диапазоне исследуемых температур для всех составов регистрировалась смена режимов от частичной фрагментации (паффинг) к полной (микровзрыв). Полученные видеокadres показывают, что для дизельного топлива и рапсового масла фрагментация двухжидкостных капель в режиме микровзрыва протекает более интенсивно, чем для капель на основе керосина. В [4] установлено, что микровзрывное измельчение реализуется с формированием максимального числа вторичных фрагментов в случае, когда топливная оболочка представлена высоковязкими жидкостями. В таком случае импульс давления от формирующихся пузырьков пара не приводит к отрыву изолированных вторичных фрагментов жидкости от объема родительской капли из-за высокой силы внутреннего трения, реализуется интенсивный микровзрыв.

Наиболее предпочтительным для определения эффективности фрагментации является подход [7]. Данный подход позволяет рассчитать интенсивность фрагментации для всех случаев, включая случай, когда исследуемая двухжидкостная капля фрагментируется с формированием сложнотестируемого мелкодисперсного аэрозоля. Оценка интенсивности фрагментации двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва проводится с использованием выражения [7]:

$$I_i = \frac{V_{0i} - V_{1i}}{\tau_s V_{0i}} [\text{s}^{-1}],$$

где τ_s — длительность фрагментации двухжидкостной капли [s], V_{0i} и V_{1i} — объемы жидкости до и после фрагментации [m^3].

Вычисления объемов жидкости проводились на основании анализа теневых изображений капель с использованием авторского программного кода [10]. Радиус капли R_d рассчитывался как радиус круга, имеющего ту же площадь, что и область, занимаемая каплей на изображении. Далее объем капли рассчитывался по формуле объема сферы $V = 4\pi R_d^3/3$. Эксперименты по анализу погрешностей определения объемов капель включали дополнительные процедуры, в ходе которых при помощи электронного дозатора [9] капли рапсового масла заданного объема ($2.5 \mu\text{l}$) помещались на держатель при комнатной температуре. По полученным видеокadres с использованием алгоритма [10] фиксировались размеры капель и рассчитывался их объем. Полученные

Основные свойства использованных жидкостей при 300 К [11]

Параметр	Дистиллированная вода	Рапсовое масло	Дизельное топливо	Керосин
Плотность, kg/m^3	1010	870	860	727
Теплоемкость, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	4200	2352	2250	1802
Теплопроводность, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	0.61	0.17	0.12	0.1
Динамическая вязкость, $\text{mPa}\cdot\text{s}$	1	34	2.7	2.4
Поверхностное натяжение, N/m	0.072	0.034	0.025	0.024

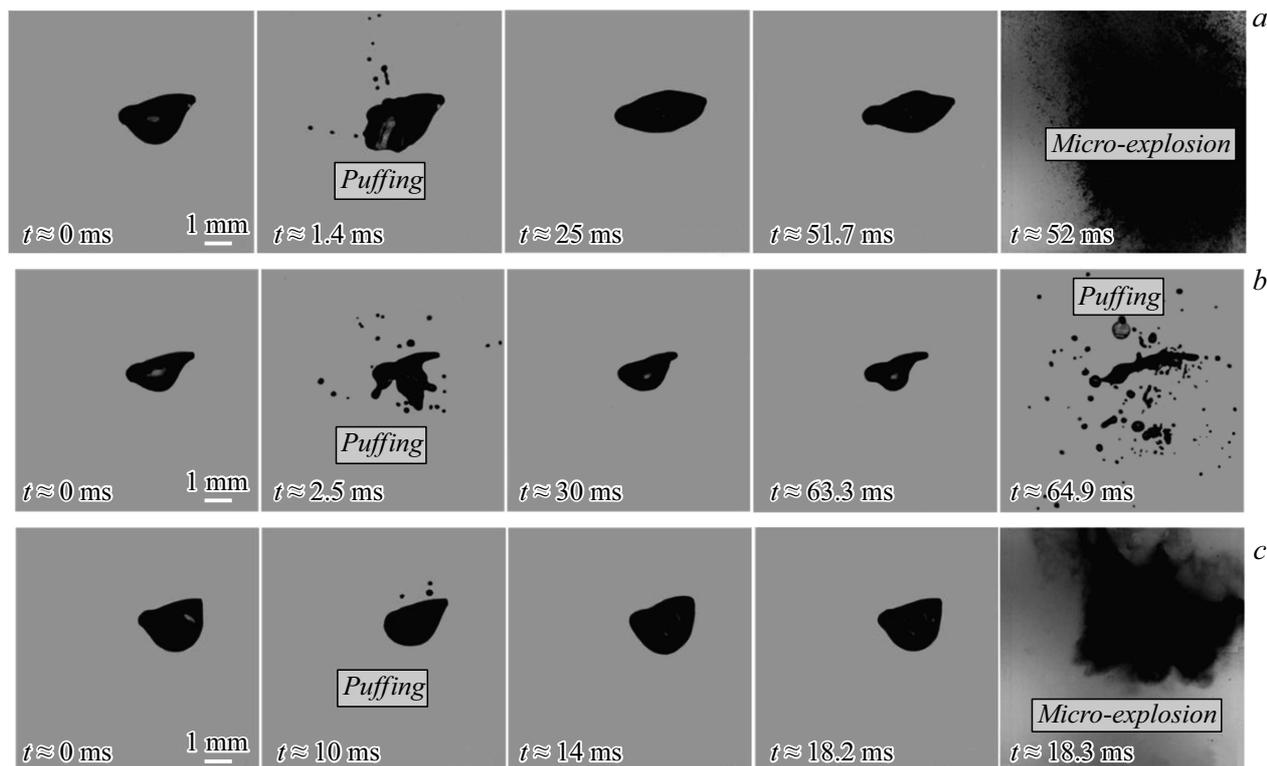


Рис. 2. Видеокдры фрагментации двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва ($R_{d0} = 0.90 \pm 0.05$ mm, $T_a = 750 \pm 10$ K). *a* — дизельное топливо 90 vol.%, вода 10 vol.%; *b* — керосин 90 vol.%, вода 10 vol.%; *c* — рапсовое масло 90 vol.%, вода 10 vol.%.

результаты затем сравнивались с ожидаемым значением $2.5 \mu\text{l}$. При идентичных условиях проводилась оценка объемов 30 капель. Проведенный анализ показал, что средний рассчитанный объем капель составил $2.43 \mu\text{l}$, при этом относительная погрешность измерения объема составила 2.8%.

Важным аспектом при анализе интенсивностей микровзрывного распада является скорость записи видеоизображений. В настоящей работе частота съемки составляла 10^4 fps. При полном разрушении исходной капли за один кадр минимальный интервал времени, в течение которого регистрировался процесс распада, мог составлять $1/10^4$ s. Максимальная регистрируемая интенсивность распада не могла превышать 10^4 s^{-1} . С использованием более скоростных средств регистрации можно уточнить значения интенсивности вторичного измельчения.

В наших экспериментах максимальные регистрируемые интенсивности не превышали 5000 s^{-1} .

Результаты расчета интенсивностей фрагментации I двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва при варьировании температуры газовой среды представлены на рис. 3, *a*. Для паффинга значения параметра I не превысили 150 s^{-1} , а для микровзрыва составили более 500 s^{-1} . Установленные диапазоны изменения I позволяют с высокой точностью идентифицировать режим фрагментации капель независимо при любых входных параметрах эксперимента. Во всем диапазоне исследуемых температур максимальные интенсивности регистрировались для капель на основе дизельного топлива, а минимальные — для капель на основе керосина. Из рис. 3, *a* видно, что интенсивности фрагментации двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва увеличиваются с ростом темпе-

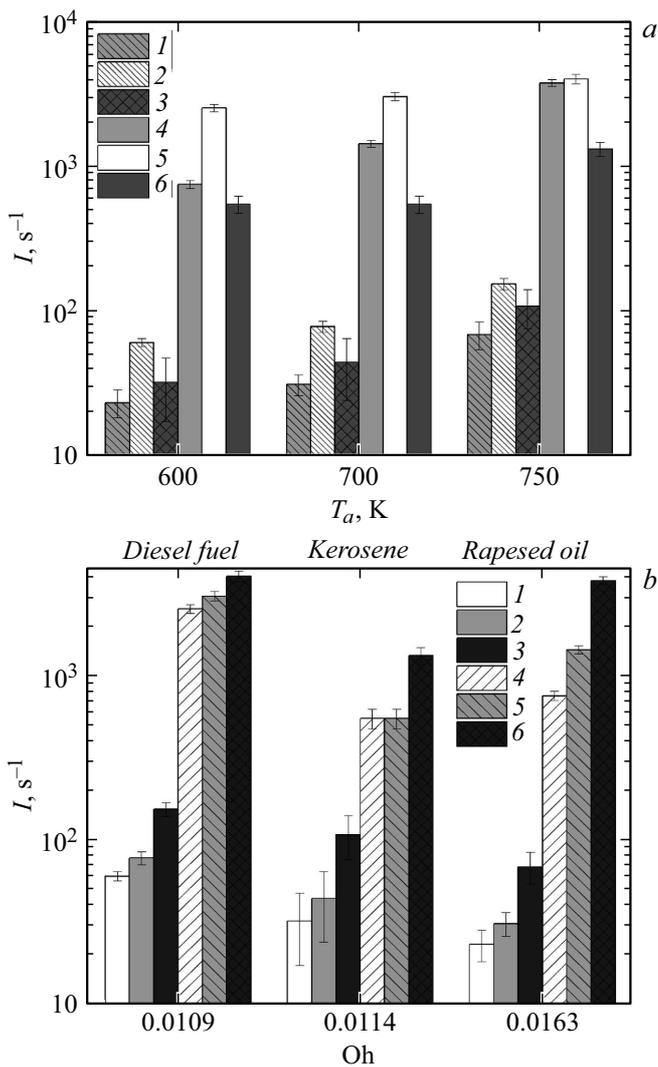


Рис. 3. Интенсивности фрагментации двухжидкостных капель. *a* — при варьировании температуры газа: 1 — паффинг, рапсовое масло 90 vol.%, вода 10 vol.%; 2 — паффинг, дизельное топливо 90 vol.%, вода 10 vol.%; 3 — паффинг, керосин 90 vol.%, вода 10 vol.%; 4 — микровзрыв, рапсовое масло 90 vol.%, вода 10 vol.%; 5 — микровзрыв, дизельное топливо 90 vol.%, вода 10 vol.%; 6 — микровзрыв, керосин 90 vol.%, вода 10 vol.%. *b* — при варьировании типа горючей жидкости: 1 — паффинг, $T_a = 600 \pm 10$ К; 2 — паффинг, $T_a = 700 \pm 10$ К; 3 — паффинг, $T_a = 750 \pm 10$ К; 4 — микровзрыв, $T_a = 600 \pm 10$ К; 5 — микровзрыв, $T_a = 700 \pm 10$ К; 6 — микровзрыв, $T_a = 750 \pm 10$ К.

ратуры газовой среды от 600 до 750 К, что обусловлено ростом скорости прогрева воды и достижимых степеней ее перегрева [12]. Максимальный прирост интенсивности фрагментации (в 5 раз) зарегистрирован для двухжидкостных капель на основе рапсового масла, а минимальный (в 1.5 раза) — для капель на основе дизельного топлива в режиме микровзрыва. С ростом температуры интенсивность фрагментации капель на основе дизельного топлива оставалась макси-

мальной, однако значительных изменений не наблюдалось.

Увеличение вязкости горючей жидкости, являющейся оболочкой двухкомпонентной капли, приводит к тому, что требуется больше энергии для формирования и роста парового пузыря внутри нее. На рис. 3, *b* представлены интенсивности фрагментации двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва при варьировании числа Онезорге (Oh). Чем выше число Онезорге, т.е. чем выше вязкость топливной оболочки, тем сложнее достичь критических условий фрагментации капель за короткий промежуток времени. С ростом температуры газовой среды вязкость и поверхностное натяжение горючих жидкостей снижаются. Это приводит к тому, что интенсивность фрагментации возрастает.

Анализ рис. 3, *b* показывает, что, несмотря на сопоставимые свойства дизельного топлива и керосина, интенсивность фрагментации последнего ниже. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, керосин имеет меньшие значения вязкости и поверхностного натяжения. Соответственно для его фрагментации требуется меньше количество энергии. Во-вторых, скорость испарения керосина по отношению к другим исследуемым жидкостям (дизельному топливу и рапсовому маслу) значительно выше (более чем в 2 раза) [10]. Это приводит к тому, что в процессе нагрева капли значительно изменяется соотношение концентраций содержащихся в ней жидкостей. Как следствие, фрагментация протекает менее эффективно. Образуются крупные вторичные фрагменты. За счет интенсивного испарения керосина также часть подводимой энергии расходуется на фазовый переход, что снижает скорость прогрева дисперсной фазы [12].

Проведенные эксперименты позволили установить различия интенсивностей фрагментации двухжидкостных капель в режимах паффинга и микровзрыва. Показано, что с ростом температуры газовой среды интенсивность фрагментации в режиме паффинга и микровзрыва возрастает в несколько раз. Значения интенсивности фрагментации для режимов паффинга составляли менее $150 s^{-1}$, а для микровзрыва — более $500 s^{-1}$. Максимальные интенсивности фрагментации соответствовали каплям на основе дизельного топлива в режиме микровзрыва ($I = 4000 s^{-1}$), а минимальные — каплям на основе рапсового масла в режиме паффинга ($I = 25 s^{-1}$). Представленный подход позволяет прогнозировать рациональные условия измельчения капель с различным компонентным составом с учетом ограничений соответствующих ресурсов в группе приложений, например при измельчении капель топлив, огнетушащих жидкостей, нефтехимических реагентов, очищаемых жидкостей и др. В зависимости от требований, предъявляемых к конструкциям камер сгорания и реакторов смешения, можно прогнозировать диапазоны снижения температур нагрева и

потенциальной экономии энергоресурсов с использованием установленных значений интенсивности фрагментации.

Финансирование работы

Исследования проведены за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-10008, <https://rscf.ru/project/21-71-10008/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K.Yu. Arefyev, O.V. Guskov, A.N. Prokhorov, A.S. Saveliev, E.E. Son, K. Gautham, D. Sam, K.T. Sonu, T.M. Muruganandam, *High Temp.*, **58**, 884 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20060036
- [2] С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, Е.Ю. Шадрин, О.В. Шарыпов, *Письма в ЖТФ*, **45** (22), 32 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48646.17984 [S.V. Alekseenko, I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, O.V. Sharypov, *Tech. Phys. Lett.*, **45**, 1148 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019110178].
- [3] D.C.K. Rao, S. Syam, S. Karmakar, R. Joarder, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **89**, 284 (2017). DOI: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2017.08.025
- [4] Д.В. Антонов, К.Ю. Вершинина, Р.М. Федоренко, *Письма в ЖТФ*, **49** (14), 3 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.14.55816.19575 [D.V. Antonov, K.Yu. Verшинina, R.M. Fedorenko, *Tech. Phys. Lett.*, **49**, 41 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.07.56443.19575].
- [5] M.M. Avulapati, T. Megaritis, J. Xia, L. Ganippa, *Fuel*, **239**, 1284 (2019). DOI: 10.1016/J.FUEL.2018.11.112
- [6] D.V. Antonov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak, *Energies*, **15**, 7670 (2022). DOI: 10.3390/EN15207670
- [7] C. Liu, L. Cui, J. Xu, L. Cen, J. Xu, P. Li, T. Xiao, F. Cao, *Chem. Eng. Sci.*, **281**, 119120 (2023). DOI: 10.1016/J.CES.2023.119120
- [8] K. Han, Q. Lin, M. Liu, K. Meng, Z. Ni, Y. Liu, J. Tian, Z. Qiu, *Renew. Energy*, **196**, 261 (2022). DOI: 10.1016/J.RENENE.2022.06.104
- [9] D.V. Antonov, M.V. Piskunov, P.A. Strizhak, *Int. J. Therm. Sci.*, **142**, 30 (2019). DOI: 10.1016/J.IJTHEMALSCI.2019.04.011
- [10] R.M. Fedorenko, D.V. Antonov, P.A. Strizhak, S.S. Sazhin, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **191**, 122838 (2022). DOI: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2022.122838
- [11] C.L. Yaws, *Yaws' handbook of thermodynamic and physical properties of chemical compounds* (Knovel, 2003).
- [12] D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **196**, 123293 (2022). DOI: 10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2022.123293