

УДК 561.22

## Интерпретация фононной модели теплопроводности транс-1-хлор-3,3,3-трифторпропена (HFO-1233zd (E)) на жидкостной ветви бинодали

*Д-р техн. наук* О. Б. ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>, *канд. техн. наук* Ю. А. ЛАПТЕВ<sup>2</sup>,  
*канд. техн. наук* В. В. МИТРОПОВ<sup>3</sup>, *д-р техн. наук* А. В. ШАРКОВ<sup>4</sup>, *д-р техн. наук* А. В. ФЕДОРОВ<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>tsvetkov@itmo.ru, <sup>2</sup>laptev\_yua@mail.ru, <sup>3</sup>v\_mit@mail.ru, <sup>4</sup>avsharkov@itmo.ru, <sup>5</sup>afedorov@itmo.ru  
Университет ИТМО

*Поиск новых рабочих веществ, обеспечивающих интенсификацию и энергоэкологическую эффективность процессов, которые протекают в системах низкопотенциальной энергетики, вызывает значительный интерес к вопросам прогнозирования свойств, особенно свойств переноса, в широком диапазоне изменения параметров состояния. Одним из самых востребованных свойств, сопутствующих многим физическим процессам, протекающим при наличии в рабочей среде градиента температур, является теплопроводность. В работе показано, что интерпретация физических представлений, развитых при построении теории переноса энергии в жидкой среде фононами (Предводителев А. С., Варгафтик Н. Б., Филиппов Л. П.), может быть положена в основу определения теплопроводности на линии фазового перехода для представителя новой альтернативной генерации галогенозамещенных углеводородов (гидрохлорфторолефинов) — хладагента транс-1-хлор-3,3,3-трифторпропена (HFO-1233zd (E)). Оценены результаты сравнения проведенных расчетов с существующими эмпирическими схемами описания коэффициента теплопроводности для жидкости на линии насыщения и результатами экспериментального исследования хладагента R1233zd (E).*

**Ключевые слова:** гидрохлорфторолефины, жидкая фаза, методы расчета, теплопроводность.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 19.11.2019, принята к печати 19.02.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-103-107

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Цветков О. Б., Лаптев Ю. А., Митропов В. В., Шарков А. В., Федоров А. В. Интерпретация фононной модели теплопроводности транс-1-хлор-3,3,3-трифторпропена (HFO-1233zd (E)) на жидкостной ветви бинодали // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С. 103–107.

## Interpretation of photonic model for trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropene (HFO-1233zd (E)) thermal conductivity for the liquid branch of the bimodal

*D. Sc.* O. B. TSVETKOV<sup>1</sup>, *Ph. D.* Yu. A. LAPTEV<sup>2</sup>, *Ph. D.* V. V. MITROPOV<sup>3</sup>,

*D. Sc.* A. V. SHARKOV<sup>4</sup>, *D. Sc.* A. V. FEDOROV<sup>5</sup>

<sup>1</sup>tsvetkov@itmo.ru, <sup>2</sup>laptev\_yua@mail.ru, <sup>3</sup>v\_mit@mail.ru, <sup>4</sup>avsharkov@itmo.ru, <sup>5</sup>afedorov@itmo.ru

ITMO University

*The attention of refrigeration industry recently increased especially for what concerns the use of new alternative organic compounds in climate-friendly and energy optimal low temperatures industrial processes. The related estimation methods can be regarded as powerful tools to the prediction of thermophysical properties in large range of thermodynamic parameters. The thermal conductivity is one of the most important properties in the systems with temperature gradient. The rigorous phonones theory of the liquid state developed by Predvoditelev, Vargaftik and Filippov have been used for prediction of thermal conductivity at saturated state of alternative refrigerant trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropene (HFO-1233zd (E)). Predicted values of thermal conductivity were compared to predicted values for saturated liquid from conventional correlations as well to experimental values of R1233zd (E) at saturated state.*

**Keywords:** hydrochlorofluoroolefins, liquid, prediction, thermal conductivity.

**Article info:**

Received 19/11/2019, accepted 19/02/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-103-107

Article in Russian

**For citation:**

Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Mitropov V. V., Sharkov A. V., Fedorov A. V. Interpretation of photonic model for trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropene (HFO-1233zd (E)) thermal conductivity for the liquid branch of the bimodal. *Vestnik Mezh-dunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 1. p. 103–107.

**Введение**

Изучение свойств веществ, как неотъемлемая часть исследований строения материи, важно с прикладной точки зрения. Быстро меняющиеся запросы современной техники низких температур обусловили появление экологически безопасных синтетических рабочих веществ, прежде всего обладающих низким потенциалом глобального потепления — Global warming potential (GWP).

К таким рабочим веществам относятся гидрофторолефины (ГФО), обладающие, по сравнению с ранее применяемыми хлорфторуглеродами (ХФУ), гидрохлорфторуглеродами (ГХФУ), перфторуглеродами (ПФУ) и гидрофторуглеродами (ГФУ), ультранизким GWP. Сведений о коэффициентах теплопроводности новых рабочих веществ явно недостаточно, поэтому интенсивное развитие, особенно в последние годы XX века, получили эмпирические схемы расчета теплопроводности, однако, как следует из проведенного анализа, эти соотношения плохо согласуются между собой и с экспериментом, причем наблюдаются расхождения, как качественного, так и количественного характера. При этом, экспериментальные исследования сложны и дорогостоящи, и не в состоянии оперативно решить эту проблему, что, естественно, способствовало появлению разнообразных эмпирических методов расчета и прогнозирования свойств технически важных веществ.

Основная цель работы состояла в определении теплопроводности альтернативного хладагента — гидрохлорфторолефина, транс-1-хлор-3,3,3-трифторпропена (HFO-1233zd (E)) на жидкостной ветви бимодали, на основе представлений строгой, теоретически обоснованной модели переноса энергии в жидкостях коллективными тепловыми движениями — продольными гипер акустическими (дебаевскими) волнами (фононами).

**Объекты исследования**

Гидрофторолефины (ГФО) являются новым альтернативным классом рабочих веществ, появление которых в начале XXI века инициировано актуальными экологическими проблемами, обязанными многолетним применением в индустрии холода хлорфторуглеродов, гидрофторхлоруглеродов и гидрофторуглеродов в циклах холодильных машин, тепловых насосов, в органических циклах Ренкина, системах кондиционирования. Галогенопроизводные предельных углеводородов обладают многими достоинствами, однако их потенциал глобального потепления (GWP) в десятки, а иногда и в тысячи раз превышает GWP диоксида углерода. Гидрофторолефины безопасны для озонового слоя, имеют ультранизкий GWP. Можно отметить короткое время жизни ГФО в атмосфере, хорошие термодинамические характеристики, совместимость с конструкционными материалами.

Наиболее востребованы ГФО — изомеры пропилены — пропены, в частности, тетрафторпропены HFO-1234yf, HFO-1234ze (E), HFO-1234ze (Z) и хлортрифторпропен HFO-1233zd (E) (табл. 1). Имеет место стереоизомерия (транс- и цис-), поскольку пропены содержат ненасыщенную двойную C=C-связь. В молекуле HFO-1233zd (E) присутствует атом хлора, но благодаря короткому времени жизни этого изомера в атмосфере (26 дн), хладагент HFO-1233zd (E) признан безопасным для озонового слоя [1]–[6].

Таблица 1

**Термодинамические характеристики пропен**

Table 1

**Thermodynamic characteristics of propenes**

Хладагент	$M$ , кг/кмоль	$p_{кр}$ , бар	$T_{кр}$ , К
R1234yf	114,04	33,822	367,85
R1234ze (E)	114,04	36,349	382,51
R1234ze (Z)	114,04	35,330	423,27
R1233zd (E)	130,50	36,237	439,60

Хладагент HFO-1233zd (E) не является горючим веществом. В международном стандарте, по нумерации и классификации безопасности хладагентов ISO 817, из 46 хладагентов с GWP<500 только 5 не горючих: диоксид углерода, HFO-1336mzz (Z), азеотропы R514A и R515A и HFO-1233zd (E), причем только диоксид углерода и HFO-1233zd (E) имеют ультранизкие потенциалы глобального потепления. Пропены HFO-1234ze (E), HFO-1234ze (Z) и HFO-1234yf горючи, поэтому хлортрифторпропен HFO-1233zd (E) для практического применения особенно интересен.

**Методика расчетов**

Дефицит строгих теоретических представлений о механизме переноса теплоты в многоатомных жидкостях способствовал появлению эмпирических расчетных схем [7, 8]. В работе [9] рассмотрены 26 расчетных методов XX века, более десятка методов появились уже в настоящее время [9]–[11].

Теоретические представления о процессе переноса теплоты в жидкостях посредством гипер акустических волновых движений с учетом их поглощения и рассеяния на флуктуациях плотности, разработанные А. С. Предводителевым, Н. Б. Варгафтиком и Л. П. Филипповым, позволяют описать температурную зависимость теплопроводности жидкости соотношением вида

$$\lambda = \psi k^{1/3} (c_p \rho)^{2/3} u \quad (1)$$

Экспериментальные ( $\lambda_{\text{экс}}$ ) и расчетные ( $\lambda_{\text{рас}}$ ) значения теплопроводности HFC-134a и HFC-125 на линии насыщения

Таблица 2

Table 2

Experimental ( $\lambda_{\text{экс}}$ ) and theoretical ( $\lambda_{\text{рас}}$ ) values of HFC-134a thermal conductivity and HFC-125 at saturation line

$T, K$	$\lambda_{\text{рас}} \cdot 10^3, \text{Вт/ (м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{экс}} \cdot 10^3, \text{Вт/ (м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{рас}} / \lambda_{\text{экс}}$	$T, K$	$\lambda_{\text{рас}} \cdot 10^3, \text{Вт/ (м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{экс}} \cdot 10^3, \text{Вт/ (м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{\text{рас}} / \lambda_{\text{экс}}$
HFC-125				HFC-134a			
253,15	83,8	83,6	1,00	240,15	109,7	108,9	1,01
273,15	75,0	75,1	1,00	260,15	100,7	99,7	1,01
293,15	66,2	66,6	0,99	280,15	91,6	89,3	1,03
313,15	57,5	58,1	0,99	320,15	73,4	72,0	1,02
323,15	53,1	53,8	0,99	360,15	55,3	57,0	0,97

где  $\lambda$  — теплопроводность;  $k$  — постоянная Больцмана;  $u$  — скорость звука (гиперзвука);  $c_p$  — удельная изобарная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $\psi$  — эмпирический параметр.

В процессе апробации теории для широкого класса рабочих веществ на линии фазового перехода, в том числе сжиженных инертных газов, углеводородов, квантовых жидкостей зависимость (1) была дополнена, что позволило учесть роль изомерии, в частности, изменение теплопроводности при переходе от нормальных алканов к родственным изомерам. Введение параметра подобия (критериальная единица) [7, 12] позволило расширить класс изучаемых веществ, включая изомеры алканов, алкенов, циклические, ароматические углеводороды, простейшие неорганические соединения. Теоретически такая возможность интерпретирована в форме зависимости

$$\frac{\lambda}{\lambda^*} \sim \frac{1}{\phi^2} f, \quad (2)$$

где  $\lambda^*$  — параметрическая (критериальная) единица теплопроводности;  $\phi$  — приведенный объем;  $f$  — множитель, равный единице для  $\phi \leq \phi_m$  и  $f > 1$  для  $\phi > \phi_m$ . Здесь  $\phi_m = 0,359 + 0,056 \cdot \lg A$ ,  $A$  — параметр подобия.

Известны параметры подобия Риделя, Питцера, Филиппова и др. [12], основанные на зависимости приведенного давления от приведенной температуры.

Таблица 3

Сравнение расчетных ( $\lambda_{\text{рас}}$ ) и экспериментальных ( $\lambda_{\text{экс}}$ ) [15] значений теплопроводности HFO-1233zd (E), мВт/(м·К)

Table 3

Comparison of theoretical ( $\lambda_{\text{рас}}$ ) and experimental ( $\lambda_{\text{экс}}$ ) [15] HFO-1233zd (E) thermal conductivity values, mW/(m·K)

$T, K$	$\tau$	$\lambda_{\text{экс}}$	$\lambda_{\text{рас}}$	$\delta, \%$
313,52	0,7132	77,19	78,44	-1,59
332,92	0,7573	72,00	72,69	-0,96
353,26	0,8036	67,62	66,93	1,03
373,19	0,8489	60,80	60,72	0,13
393,14	0,8943	56,73	54,80	3,52
413,09	0,9397	51,20	48,87	4,77

### Результаты расчетов

Для галогенозамещенных предельных углеводородов критериальная единица теплопроводности в [13] представлена как

$$\frac{1}{\lambda^*} = \xi Gu^4, \quad (3)$$

где

$$\xi = \frac{M^{1/2} T_{\text{кр}}^{1/6}}{p_{\text{кр}}^{2/3}}; Gu = \frac{T_{\text{кр}}}{T_0},$$

здесь  $M$  — молекулярная масса,  $T_{\text{кр}}$  — критическая температура,  $T_0$  — температура кипения при нормальном давлении,  $p_{\text{кр}}$  — критическое давление,  $Gu$  — критерий Гульдберга.

Согласно выражению (3), проводились расчеты теплопроводности фторхлоруглеродов (ХФУ), гидрофторхлоруглеродов (ГХФУ) и гидрофторуглеродов (ГФУ) на жидкостной ветви бинадали [13, 14]. Возможности подобного подхода для описания температурной зависимости теплопроводности жидкости на линии фазового перехода иллюстрирует табл. 2, на примере наиболее изученных ГФУ — HFC-134a и HFC-125 [14].

Для транс-хлортрифторпропена HFO-1233zd (E) сравнение с опытными данными [15] представлено в табл. 3, а сопоставление с экспериментом [15] расчетов по эмпирическим корреляциям Сато-Риделя, Латини, Грифони и Пассерини [7]–[11] содержит табл. 4. Для табл. 3 и 4 расчеты проводились, исходя из формул  $\tau = T/T_{\text{кр}}$ ,  $\delta = (\lambda_{\text{экс}} - \lambda_{\text{рас}})/\lambda_{\text{рас}}$ .

В табл. 4 не вошли расчеты по корреляции [11], поскольку отклонения от экспериментальных данных больше аналогичных для корреляций Сато-Риделя и Латини.

Экспериментально теплопроводность транс-хлортрифторпропена HFO-1233zd (E) изучали в 2018 г. нестационарным методом нагретой нити в области температур 313–433 К и давлений до 4,0 МПа [15]. Неопределенность в данных о теплопроводности оценивалась в  $\pm 2,17\%$  при уровне конфидентности 95% [15]. Расчетные данные о теплопроводности жидкости на линии фазового перехода, полученные теоретически, как показывает табл. 3, согласуются с данными [15]. Данные о теплопроводности изомеров HFC-1234ze (E) и HFO-1234ze (Z) получены в двух экспериментальных работах. Измерения вели методом коаксиальных цилиндров в стационарном варианте [17] и методом нагретой нити в нестационарной ин-

Таблица 4

Сопоставление расчетных ( $\lambda_{\text{рас}}$ ) значений теплопроводности HFO-1233zd (E) по корреляциям Саго-Риделя, Латини, Грифони и Пассерини, с данными эксперимента ( $\lambda_{\text{экс}}$ ) [15], мВт/(м·К)

Table 4

Comparison of theoretical ( $\lambda_{\text{рас}}$ ) HFO-1233zd (E) thermal conductivity values according to Sato-Riedel, Latini, Grifoni, and Passerini correlations and experimental data ( $\lambda_{\text{экс}}$ ) [15], mW/(m·K)

T, K	$\tau$	$\lambda_{\text{экс}}$	Расчетные значения			
			по методике Риделя		по методике Латини и др.	
			$\lambda_{\text{рас}}$	$\delta, \%$	$\lambda_{\text{рас}}$	$\delta, \%$
313,52	0,7132	77,19	89,21	-13,47	84,27	-8,40
332,92	0,7573	72,00	82,22	-12,43	78,28	-8,02
353,26	0,8036	67,62	74,38	-9,09	66,23	2,10
373,19	0,8489	60,80	66,15	-8,09	60,56	0,40
393,14	0,8943	56,73	56,98	-0,44	54,89	3,35
413,09	0,9397	51,20	46,33	10,51	49,21	4,04

терпретации [16]. Обращает внимание значительное расхождение опытных данных для этих двух стереоизомеров (десятки процентов). Возможно, это говорит о влиянии изомерии на теплопроводность, тем не менее, для дальнейшей апробации и совершенствования методов расчета необходимо большее информационное поле о данных экспериментальных исследований.

### Выводы

Показана перспективность описания температурной зависимости теплопроводности жидкости на линии насыщения на основе теоретически обоснованной фо-

нонной модели переноса энергии в жидкой фазе. Проведенные расчеты показали, что строгая теоретическая модель в состоянии описать подтвержденную экспериментально зависимость коэффициента теплопроводности жидкости в широком диапазоне температур. Подтверждено, что решение проблем вычисления свойств новых рабочих веществ на основе минимальных эмпирических данных делает актуальным для практики продолжение исследований, направленных на создание и разработку теоретических основ прогнозирования поведения термодинамических и переносных характеристик веществ.

### Литература

### References

- Brown S. HFOs new low Global Warming Potentials refrigerants. // *ASHRAE-Journal*. 2009. 51 (8). P. 22–29.
- McLinden M. O., Kazakov A. F., Brown J. S., Damanski P. A. A thermodynamic analysis of refrigerants: possibilities and tradeoffs for low — GWP refrigerants. // *Int. Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 38. P. 80–92.
- Akasaka R., Higashi Y., Miyara A., Koyarma S. A fundamental equation of state for cis-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234ze (Z)). // *Int. Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 44, № 3. P. 168–176.
- Бабакин Б. С., Борщев Г. В., Бабакин С. Б., Белозеров А. Г. Холодильные агенты группы ГФО и их особенности // *Холодильная техника*. 2017. № 6. С. 37–40.
- Цветков О. Б., Лантев Ю. А. Монреальскому протоколу 30 лет: вызовы XXI века и глобальные трансформации // *Холодильная техника*. 2018. № 5. С. 48–54.
- Цветков О. Б., Лантев Ю. А., Митропов В. В., Пятаков Г. Л., Клименко С. Ю., Лысев В. И. Молекулярно-кинетическое моделирование свойств переноса бинарной смеси разреженных газов CO<sub>2</sub>+R1234yf // *Вестник Международной академии холода*. 2018. № 3. С. 74–79.
- Филиппов Л. П. Прогнозирование теплопроводности жидкостей // *Инженерно-физический журнал*. 1987. Т. 53, № 2. С. 328–336.
- Цветков О. Б., Лантев Ю. А., Клецкий А. В., Митропов В. В., Галахова Н. А. Расширенное описание температуропроводности диформетана в окрестности критической точки // *Вестник Международной академии холода*. 2017. № 4. С. 59–65.
- Brown S. HFOs new low Global Warming Potentials refrigerants. *ASHRAE-Journal*. 2009. 51 (8). P. 22–29.
- McLinden M. O., Kazakov A. F., Brown J. S., Damanski P. A. A thermodynamic analysis of refrigerants: possibilities and tradeoffs for low — GWP refrigerants. *Int. Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 38. P. 80–92.
- Akasaka R., Higashi Y., Miyara A., Koyarma S. A fundamental equation of state for cis-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234ze (Z)). *Int. Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 44, № 3. P. 168–176.
- Babakin B. S., Borshchev G. V., Babakin S. B., Belozеров A. G. Refrigerating agents of the GO group and their features. *Kholodilnaya tekhnika*. 2017. No. 6. Pp. 37–40. (in Russian)
- Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A. Montreal Protocol 30 years: challenges of the XXI century and global transformations. *Kholodilnaya tekhnika*. 2018. No. 5. Pp. 48–54. (in Russian)
- Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Mitropov V. V., Paytakov G. L., Klimemenko S. Yu., Lysev V. I. Molecular kinetic simulation for transport properties of binary CO<sub>2</sub>+R1234yf mixture in the dilute gas state. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 3. p. 74–79. (in Russian)
- Filippov L. P. Prediction of thermal conductivity of liquids. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1987. Vol. 53, no. 2. Pp. 328–336. (in Russian)
- Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A., Kletskii A. V., Mitropov V. V., Galakhova N. A. An extended description of the thermal diffusivity singular behavior of difluoromethane near the critical point. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 4. p. 59–65. (in Russian)

9. Latini G., Grifoni R. C., Passirini G. Methods for liquid thermal conductivity of propane series refrigerants. // 13th Symposium on Thermophysical Properties, June 25–30, 2000, Boulder, Colorado, USA.
10. Latini G., Sotte M. Thermal conductivity of refrigerants in the liquid state: a comparison of estimation methods // *Int. Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. P. 1377–1383.
11. Di Nicola G., Ciarrocchi E., Coccia G., Pierantozzi M. Correlations of thermal conductivity for liquid refrigerants at atmospheric pressure or near saturation // *Int. Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 45. P. 168–176.
12. Филиппов Л. П. Методы расчета и прогнозирования свойств веществ. М.: Изд-во МГУ, 1988. 252 с.
13. Цветков О. Б. Теплопроводность холодильных агентов. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 220 с.
14. Цветков О. Б., Лантев Ю. А. Априорные расчеты теплопроводности жидких гидрофторуглеродов // *Вестник международной академии холода*. 2013. № 3. С. 43–45.
15. Alam M. J., Islam M. A., Kariya K., Miyara A. Measurement of thermal conductivity and correlations at saturated state of refrigerants trans-1-chloro-3,3,3-trifluoro-propene (R-1233zd (E)) // *Int. Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 90. P. 174–180.
16. Grebenkov A. J., Hulse R., Pham H., Singh R. Physical properties and equation of state for trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene // 3<sup>rd</sup> IIR Conference on Thermophysical properties and transfer processes of Refrigerants, 2009, paper N 191, Boulder, CO, USA.
9. Latini G., Grifoni R. C., Passirini G. Methods for liquid thermal conductivity of propane series refrigerants. *13th Symposium on Thermophysical Properties*, June 25–30, 2000, Boulder, Colorado, USA.
10. Latini G., Sotte M. Thermal conductivity of refrigerants in the liquid state: a comparison of estimation methods. *Int. Journal of Refrigeration*. 2012. Vol. 35. P. 1377–1383.
11. Di Nicola G., Ciarrocchi E., Coccia G., Pierantozzi M. Correlations of thermal conductivity for liquid refrigerants at atmospheric pressure or near saturation. *Int. Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 45. P. 168–176.
12. Filippov L. P. Methods for calculating and predicting the properties of substances. Moscow: MSU publishing House, 1988. 252 PP. (in Russian)
13. Tsvetkov O. B. thermal Conductivity of refrigerating agents. Leningrad: leningr publishing House LSU, 1984. 220 p. (in Russian)
14. Tsvetkov O. B., Laptev Yu. A. Priori calculations of thermal conductivity of liquid hydrofluorocarbons. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No. 3. Pp. 43–45. (in Russian)
15. Alam M. J., Islam M. A., Kariya K., Miyara A. Measurement of thermal conductivity and correlations at saturated state of refrigerants trans-1-chloro-3,3,3-trifluoro-propene (R-1233zd (E)). *Int. Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 90. P. 174–180.
16. Grebenkov A. J., Hulse R., Pham H., Singh R. Physical properties and equation of state for trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene. 3<sup>rd</sup> IIR Conference on Thermophysical properties and transfer processes of Refrigerants, 2009, paper N 191, Boulder, CO, USA.

### Сведения об авторах

#### Цветков Олег Борисович

Д. т. н., профессор, доцент факультета низкопотенциальной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, tsvetkov@itmo.ru

#### Лаптев Юрий Александрович

К. т. н., тьютор факультета низкопотенциальной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, laptev\_yua@mail.ru

#### Митропов Владимир Викторович

К. т. н., старший преподаватель факультета низкопотенциальной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, v\_mit@mail.ru,

#### Шарков Александр Васильевич

Д. т. н., профессор, профессор факультета низкопотенциальной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, avsharkov@itmo.ru

#### Федоров Александр Валентинович

Д. т. н., старший преподаватель факультета пищевых биотехнологий и инженерии Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, afedorov@itmo.ru

### Information about authors

#### Tsvetkov Oleg B.

D. Sc., Professor, Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, tsvetkov@itmo.ru

#### Laptev Yuri A.

Ph. D., Tutor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, laptev\_yua@mail.ru

#### Mitropov Vladimir V.

Ph. D., Senior teacher of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, v\_mit@mail.ru

#### Sharkov Aleksander V.

D. Sc., Professor, Professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, avsharkov@itmo.ru

#### Fedorov Aleksander V.

D. Sc., Senior teacher of the Faculty of Food Biotechnology and Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, afedorov@itmo.ru