

DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf626383>



Обзор экспериментальных исследований свойств озонобезопасного хладагента R1234yf и их математического моделирования с помощью уравнений состояния

А.В. Валякина, В.В. Доля

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В настоящем обзоре последовательно рассмотрены исследования, посвящённые изучению теплофизических свойств перспективного озонобезопасного хладагента R1234yf, составлен их перечень. Представлены наборы экспериментальных данных, которые необходимы при внедрении хладагента, из 44 научных работ по следующим свойствам: давление насыщения, плотность насыщенного пара, p - v - t зависимости, изобарная теплоёмкость, изохорная теплоёмкость, изобарная теплоёмкость идеального газа, скорость звука, динамическая вязкость, кинематическая вязкость, поверхностное натяжение, теплопроводность. Указана заявленная авторами погрешность измерений. Приведен перечень научных работ, посвященных расчетному моделированию термодинамических свойств хладагента R1234yf с указанием типа используемого уравнения состояния. Описан вклад российских учёных в развитие этой области. Наличие настоящего обзора повышает эффективность поиска информации о свойствах R1234yf и их моделировании. Сделаны выводы о полноте информации, основанной на экспериментах, и о широте возможностей, существующих на сегодняшний день способов моделирования свойств рассматриваемого хладагента.

Ключевые слова: R1234yf; озонобезопасный хладагент; гидрофторолефин; термодинамические свойства; уравнение состояния; плотность; теплоёмкость; теплопроводность; скорость звука; поверхностное натяжение.

Как цитировать:

Валякина А.В., Доля В.В. Обзор экспериментальных исследований свойств озонобезопасного хладагента R1234yf и их математического моделирования с помощью уравнений состояния // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 4. С. 193–203. DOI: <https://doi.org/10.17816/Rf626383>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF626383>

Review of experimental studies on the properties of the ozone-safe refrigerant R1234yf and their mathematical modeling using equations of state

Anna V. Valiakina, Vladimir V. Dolya

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

In this review, a set of 44 experimental studies on the thermophysical properties of the promising ozone-safe refrigerant R1234yf are considered. Based on the experimental data, the following properties are found to be necessary when using the refrigerant: saturation pressure, saturated vapor density, p – v – t dependence, isobaric heat capacity, isochoric heat capacity, isobaric heat capacity of an ideal gas, sound velocity, dynamic viscosity, kinematic viscosity, surface tension, and thermal conductivity. In addition, the published measurement errors are specified. Furthermore, a list of computational modeling studies on the thermodynamic properties of the refrigerant R1234yf with an indication of the type of equation of state used is presented. The contributions of Russian scientists to the development of this field are also described. This review increases the efficiency of the information search on the properties of R1234yf and their modeling. Finally, conclusions are drawn regarding the completeness of the information based on experiments and the extent of possibilities of the current modeling methods for the properties of the refrigerant under consideration.

Keywords: R1234yf; ozone-safe refrigerant; hydrofluoroolefin; thermodynamic properties; equation of state; density; heat capacity; thermal conductivity; sound velocity; surface tension.

To cite this article:

Valiakina AV., Dolya VV. Review of experimental studies on the properties of the ozone-safe refrigerant R1234yf and their mathematical modeling using equations of state. *Refrigeration Technology*. 2021;110(4): 193–203. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF626383>

Received: 02.02.2024

Accepted: 12.02.2024

Published online: 02.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Хладагент R1234yf (2,3,3,3-тетрафторпропен) является озонобезопасным хладагентом четвёртого поколения. Имеет потенциал разрушения озонового слоя Земли $ODP=0$ и потенциал глобального потепления $GWP=4$. Класс опасности по стандарту ASHRAE-A2L. Предназначен для замены хладагента R134a, в связи с тем, что последний имеет слишком высокий потенциал глобального потепления $GWP=1600$. С 2011 года законодательство Европейского Союза запретило использование хладагентов с $GWP>150$ в транспортных средствах нового типа, а с 2017 года и во всех новых транспортных средствах. Наряду с этим, постановлением Правительства РФ от 20 ноября 2014 года № 1229 подтверждаются жесткие меры учета и отчетности за поступлением, использованием, хранением, рекуперацией и рециркуляцией озоноразрушающих веществ в рамках выполнения ограничений по международным договорам. Это постановление конкретизируется распоряжением Правительства РФ от 20 ноября 2014 г. № 2327 «О регулировании обращения озоноразрушающих веществ».

По мнению авторов, данный хладагент является перспективным для использования в холодильной технике и системах кондиционирования, но его внедрение в инструментарий для расчёта циклов, используемый инженерами, ведётся не очень активно. R1234yf представлен в наиболее крупных библиотеках свойств рабочих веществ, таких как CoolProp [1] и REFPROP [2], но такие пакеты как CoolPack и SOLKANE, содержащие в себе удобные инструменты для проектирования холодильных систем и популярные среди российских проектировщиков, не поддерживают работу с R1234yf. Из аналогичных расчётных пакетов следует отметить GeneTron Properties, где возможно обращение к свойствам рассматриваемого хладагента при расчётах холодильных циклов. Таким образом, видно, что R1234yf ещё недостаточно хорошо вошёл в обиход проектировщиков, как уже ставшие привычными хладагенты, такие как R22 или R134a.

Также следует отметить, что первые работы по исследованию свойств R1234yf датируются 2009 годом. В настоящее время активно изучают смесевые хладагенты на основе R1234yf. В основном экспериментальные исследования являются зарубежными. Наличие в русскоязычной научной литературе сведений об экспериментальных данных и уравнениях состояния для R1234yf, представленных в удобной и краткой форме, является основой быстрого старта при проведении экспериментов и научно-исследовательских работ с этим хладагентом российскими учёными.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Сведения по экспериментальным данным о параметрах состояния хладагента R1234yf, собранные за период

с 2009 по 2021 г. [3–44], представлены в таблице 1. За эти годы, по подсчётам авторов, было опубликовано:

- 17 исследований по давлению насыщения;
- 2 исследования плотности насыщенной жидкости;
- 1 исследование плотности насыщенного пара;
- 11 исследований плотности в зависимости от давления и температуры (p–t данные);
- 5 исследований изобарной теплоёмкости;
- 1 исследование изохорной теплоёмкости;
- 3 исследования изобарной теплоёмкости идеального газа;
- 4 исследования скорости звука;
- 6 исследования динамической вязкости;
- 1 исследование кинематической вязкости;
- 3 исследования поверхностного натяжения;
- 2 исследования теплопроводности.

Для составления таблицы 1 также были использованы зарубежные обзорные статьи [45–49].

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Сведения о работах, в которых рассматривалось применение того или иного уравнения состояния для моделирования свойств хладагента R1234yf [50–58] представлены в таблице 2.

РОССИЙСКИЙ ВКЛАД

Как видно из таблиц 1 и 2, в последние годы можно наблюдать появление фамилий наших соотечественников в списках людей, работавших над уравнениями состояния для описания свойств R1234yf. Так, на основе работы [58], представленной в 2020 году в России, были сформированы стандартные справочные данные ГСССД 380-2020. Они содержат описание математической модели и таблицы с рассчитанными по этой модели свойствами R1234yf. Экспериментальные данные, на основе которых была разработана модель, помечены знаком «*» в таблице 1. Графическая интерпретация экспериментальных данных представлена на рисунках 1 и 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На момент написания настоящей работы, хладагент R1234yf достаточно изучен с точки зрения термодинамики. Со стороны стандартизации современный инженерный инструментарий в полной мере готов к проектированию холодильных систем и систем кондиционирования на рассматриваемом хладагенте. Дальнейшие исследования R1234yf следует проводить с учётом накопленных знаний. Последнему способствует данный обзор, в котором представлены сведения, дающие исчерпывающую информацию о существующих исследованиях, посвящённых свойствам R1234yf и их моделированию.

Таблица 1. Исследования, посвящённые измерению свойств R1234yf**Table 1.** Studies involving R1234yf property evaluation

Авторы	Ссылка	Год	Количество измерений	Чистота вещества (мольная доля в %)	Область исследования Т (К)	Область исследования р (МПа)	Погрешность эксперимента
Давление насыщенного пара (vapor pressure)							
Hulse и др.	[3]	2009	12	–	241–353	–	–
Kano и др.	[4]	2009	10	99	303–367	–	–
Di Nicola и др.	[5]*	2010	35	99,95	224–366	1 кПа	1 кПа
Tanaka и Higashi	[6]*	2010	11	99,99	310–360	1 кПа	1 кПа
Richter и др.	[7]*	2011	30	99,96	250–366	0,2–0,55 кПа	0,2–0,55 кПа
Fedele и др.	[8]*	2011	40	99,5	246–343	1 кПа	1 кПа
Hu и др.	[9]	2013	5	99,9 (массовая)	283–323	3,5 кПа	3,5 кПа
Kamiaka и др.	[10]	2013	21	99	273–333	0,7 кПа	0,7 кПа
Yang и др.	[11]*	2014	54	99,9 (массовая)	248–361	1,5 кПа	1,5 кПа
Chen и др.	[12]	2015	5	99,9 (массовая)	283–323	0,5 кПа	0,5 кПа
Madani и др.	[13]	2016	7	99 (объёмная)	254–348	0,4 кПа	0,4 кПа
Yang и др.	[14]	2016	4	99,9 (массовая)	283–315	1,5 кПа	1,5 кПа
Konchenburger и др.	[15]	2017	13	99,5 (массовая)	193–273	0,14–0,55 кПа	0,14–0,55 кПа
Zhong и др.	[16]	2017	5	99,9	253–393	0,2 кПа	0,2 кПа
Hu и др.	[17]	2018	5	99,9 (массовая)	283–323	3,5 кПа	3,5 кПа
Valtz и др.	[18]	2019	27	99,5 (объёмная)	276–337	±0,4 кПа	±0,4 кПа
Yin и др.	[19]*	2019	24	99,9	253–367	0,5 кПа	0,5 кПа
Плотность насыщения жидкости (Saturated-liquid density)							
Hulse и др.	[3]	2009	9	–	265–365	–	–
Tanaka и Higashi	[6]	2010	10	99,99	348–368	1,7 кг/м³	1,7 кг/м³
Плотность насыщения пара (Saturated-vapor density)							
Tanaka и Higashi	[6]	2010	12	99,99	356–368	1,7 кг/м³	1,7 кг/м³
Данные о свойствах: p–v–T или p–ρ–T (PVT properties)							
Yoshitake и др.	[20]	2009	115	–	263–323	1–40	–
Kayukawa и др.	[21]	2009	61	99	278–296	0,11–0,59	–
Di Nicola и др.	[22]*	2010	135	99,95	243–373	0,08–3,72	1%
Tanaka, Higashi и Akasaka	[23]*	2010	23	99,99	310–360	1–5	0,2%
Richter и др.	[7]*	2011	93	99,96	232–400	0,55–9,59	0,006–0,012%
Tanaka и Higashi	[24]	2011	202	99,99	310–360	0,93–2,89	–
Fedele и др.	[25]*	2012	280	99,5 (массовая)	283–353	0,68–35,02	0,08 кг/м³
Klomfar и др.	[26]	2012	89	99,5 (массовая)	217–353	1–40	0,6–1,2 кг/м³
Qiu и др.	[27]*	2013	128	99,9 (массовая)	284–363	1–100	0,001–0,03 кг/м³
Hu и др.	[28]	2017	146	99,9 (массовая)	252–345	0,07–1,91	0,014–0,034%
Yin и др.	[19]*	2019	172	99,9	253–368	0,1–3,37	0,15%

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

Авторы	Ссылка	Год	Количество измерений	Чистота вещества (мольная доля в %)	Область исследования Т (К)	Область исследования р (МПа)	Погрешность эксперимента
Изобарная теплоёмкость (isobaric heat-capacity)							
Tanaka, Hagashi и Akasaka	[23]*	2010	22	99,99	310–360	2–5	5%
Gao и др.	[29]*	2014	74	99,9 (массовая)	305–355	1,5–5,08	1,7%
Liu и др.	[30]	2017	154	99,95 (массовая)	304–373	1,51–12,08	1%
Al Ghafri и др.	[31]*	2018	19	99,5	283–298	0,67–3,07	1,5–1,6 Дж/(кг*моль)
Lukawski и др.	[32]*	2018	33	99,99 (массовая)	373–413	3,5–10,03	0,6%
Изохорная теплоёмкость (isochoric heat-capacity)							
Zhong и др.	[33]*	2018	74	99,9	240–341	1,67–12,84	1%
Изобарная теплоёмкость идеального газа (ideal-gas isobaric heat-capacity)							
Hulse и др.	[3]	2009	12	–	213–573		–
Kano и др.	[34]	2010	6	99,9	278–353		0,1 %
Kazakov		2010	–	–	200–600		–
Скорость звука (speed of sound)							
Yoshitake и др.	[20]	2009	212	–	263–333	0,28–22,11	–
Kano и др.	[34]*	2010	41	99,9	278–353	0,03–0,41	0,01%
Lago и др.	[35]*	2011	22	99,5 (массовая)	260–360	1,99–6,06	0,065%
McLinden и Perkins		2019	98	–	235–380	0,64–50,28	–
Динамическая вязкость (dynamic viscosity)							
Yamaguchi и др.	[36]	2009	94	–	263–323	0,1–19,6	–
Husle и др.	[3]	2009	39	–	257–307	0,2–2,1	–
Counsins и Laesecke	[37]	2012	20	99,96	247–340	нас. жидк.	2,6–5,2%
Meng и др.	[38]	2013	110	99,9 (массовая)	243–363	0,1–30	2%
Dang и др.	[39]	2015	25	99,9	283–321	0,6–1,3	2%
Dang и др.	[40]	2015	8	99	274–338	0,1–0,11	1,5%
Кинематическая вязкость (kinematic viscosity)							
Zhao и др.	[41]	2014	10	99,9 (массовая)	293–365	нас. жидк.	2–6 %
Поверхностное натяжение (surface tension)							
Tanaka и Higashi	[6]	2010	29	99,99	273–338		0,2 мН/м
Zhao и др.	[41]	2014	10	99,9 (массовая)	293–365		1,5%
Zhao и др.	[42]	2017	44	99,95 (массовая)	242–365		0,2 мН/м
Теплопроводность (thermal conductivity)							
Perkins и Huber	[43]	2011	790	99,96	242–344	0,1–23	0,2–2%
Miyara и др.	[44]	2011	–	–	–	–	–

Примечание:

«*» – экспериментальные данные были использованы при разработке ГСССД 380–2020

Таблица 2. Работы, посвящённые моделированию свойств R1234yf

Table 2. Modeling studies on R1234yf properties

Автор	Источник	Год	Тип уравнения
Brown и др.	[49]	2010	Уравнение Пенга-Робинсона (EPR)
Akasaka и др.	[50]	2010	Уравнение Пателя-Тя (EPT) Уравнение соответствующих состояний (ECS)
Leck	[51]	2010	Уравнение Мартина-Хоу (МН)
Hustle и др.	[52]	2010	Уравнение соответствующих состояний (ECS)
Raabe и Maginn	[53]	2010	Моделирование молекулярной динамики
Akasaka и др.	[45]	2011	Уравнение в энергиях Гельмгольца
Richter и др.	[7]	2011	Уравнение в энергиях Гельмгольца
Lai и др.	[54]	2011	Уравнение BACKONE
Agrawal и др.	[55]	2012	Уравнение Пенга-Робинсона (EPR) Уравнение Лу-Ю (ELY) Уравнение Гуо-Ди (EGD)
Fouad и др.	[56]	2017	Уравнение PC-SAFT
Rykov и др.	[57]	2019	Уравнение в энергиях Гельмгольца
Kolobaev и др.	[58]	2021	Уравнение в энергиях Гельмгольца

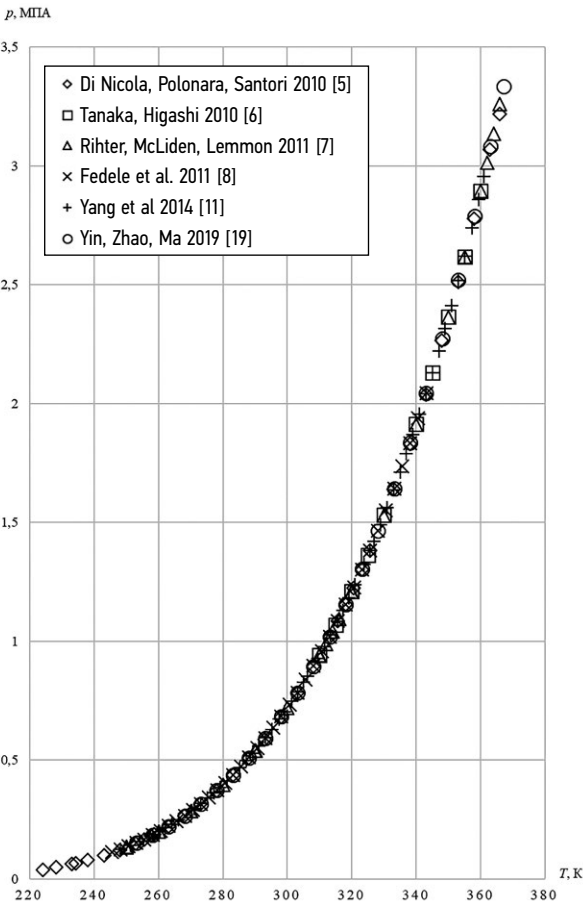


Рис. 1. Экспериментальные данные по исследованию давления насыщения, использованные при создании ГСССД 380-2020.
Fig. 1. Experimental data from the study on saturation pressures conducted for developing GSSSD 380-2020.

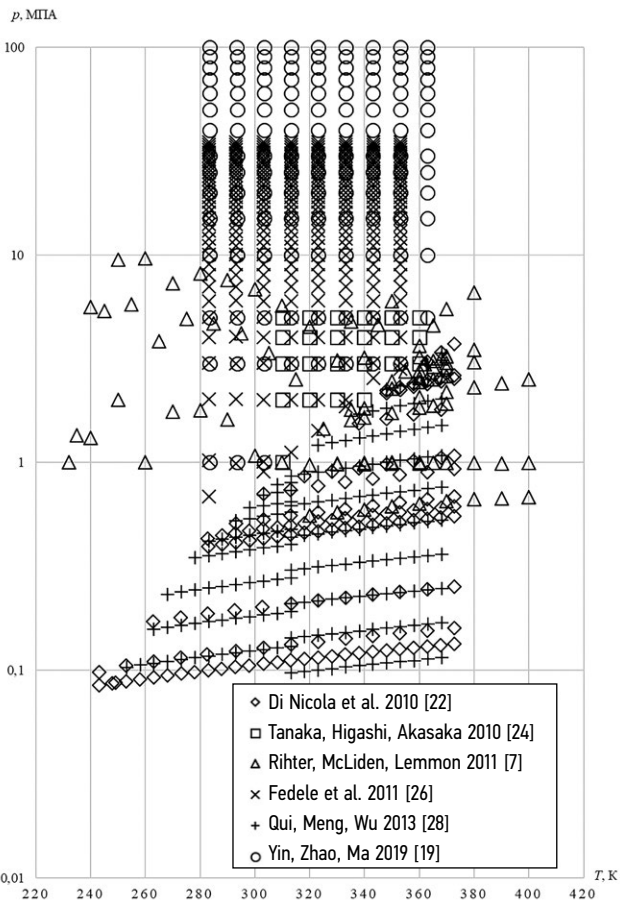


Рис. 2. Экспериментальные данные по исследованию p-v-T свойств, использованные при создании ГСССД 380-2020.
Fig. 2. Experimental data from the study on p-v-T properties conducted for developing GSSSD 380-2020.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с подготовкой и публикацией статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bell I.H., Wronski J., Quoilin S., et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53, N 6. P. 2498–2508. doi: 10.1021/ie4033999
2. Lemmon E.W., Bell I.H., Huber M.L., et al. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, Standard Reference Data Program. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018. doi: 10.18434/T4/1502528
3. Hulse R., Singh R., Pham H. In: *Proceedings of the 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigeration*, Boulder, CO, USA. Boulder: IIR, 2009. P. 60.
4. Kano Y., Kayukawa Y., Fujii K. Measurement of Critical Point for Novel Hydrofluoro-Olefin Refrigerants. In: *Proceedings of the 19th Symposium on Environmental Engineering*, Naha, Japan. Naha, 2009. P. 423.
5. Di Nicola G., Polonara F., Santori G. Saturated Pressure Measurements of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010. Vol. 55, N 1. P. 201–204. doi: 10.1021/je900306v
6. Tanaka K., Higashi Y. Thermodynamic Properties of HFO-1234yf (2,3,3,3-Tetrafluoropropene) // *International Journal of Refrigeration*. 2010. Vol. 33, N 3. P. 474–479. doi: 10.1016/j.jirefrig.2009.10.003
7. Richter M., McLinde M.O., Lemmon E.W. Thermodynamic Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf): Vapor Pressure and p-p-T Measurements and an Equation of State // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011. Vol. 56, N 7. P. 3254–3264. doi: 10.1021/je200369m
8. Fedele L., Bobbo S., Groppo, et al. Saturated Pressure Measurements of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) for Reduced Temperatures Ranging from 0.67 to 0.93 // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011. Vol. 56, N 5. P. 2608–2612. doi: 10.1021/je2000952
9. Hu P., Chen L.-X., Chen, Z.-S. Vapor-Liquid Equilibria for the 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a)+1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane (HFC-227ea) and 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a)+2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) Systems // *Fluid Phase Equilibria*. 2013. Vol. 360. P. 293–297. doi: 10.1016/j.fluid.2013.09.056
10. Kamiaka T., Dang C., Hihara E. Vapor-Liquid Equilibrium Measurements for Binary Mixtures of R1234yf with R32, R125, and R134a // *International Journal of Refrigeration*. 2013. Vol. 36, N 3. P. 965–971. doi: 10.1016/j.jirefrig.2012.08.016

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by external sources of funding.

11. Yang Z., Kou L., Mao W., et al. Experimental study of saturated pressure measurements for 2,3,3,3- tetrafluoropropene (HFO-1234yf) and 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoropropane (HCFC-244bb) // *J. Chem. Eng. Data* 2014. Vol. 59. P. 157–160. doi: 10.1021/je400970y
12. Chen L.-X., Hu P., Zhu W.-B., et al. Vapor-Liquid Equilibria of Fluoroethane (HFC-161)+2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) // *Fluid Phase Equilibria*. 2015. Vol. 392. P. 19–23. doi: 10.1016/j.fluid.2015.02.014
13. Madani H., Valtz A., Zhang F., et al. Isothermal Vapor-Liquid Equilibrium Data for the Trifluoromethane (R23) + 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) System at Temperatures from 254 to 348 K // *Fluid Phase Equilibria*. 2016. Vol. 415. P. 158–165. doi: 10.1016/j.fluid.2016.02.005
14. Yang Z.-Q., Kou L.-G., Han S., et al. Vapor-Liquid Equilibria of 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf) + 1,1,1,2,2-Pentafluoropropane (HFC-245cb) System // *Fluid Phase Equilibria*. 2016. Vol. 427. P. 390–393. doi: 10.1016/j.fluid.2016.07.031
15. Kochenburger T., Gomse D., Tratschitt I., et al. Vapor-Liquid and Vapor-Liquid-Liquid Equilibrium Measurements and Correlation of the Binary Mixtures 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) + (Tetrafluoromethane (R14), Trifluoromethane (R23), Octafluoropropane (R218), Nitrogen (R728) and Argon (R740)) and ethane (R170) + trifluoromethane (R23) // *Fluid Phase Equilibria*. 2017. Vol. 450. P. 13–23. doi: 10.1016/j.fluid.2017.07.002
16. Zhong Q., Dong X., Zhao Y., et al. Measurements of isothermal vapour-liquid equilibrium for the 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene+propane system at temperatures from 253.150 to 293.150 K // *Int. J. Refrig.* 2017. Vol. 81. P. 26–32. doi: 10.1016/j.jirefrig.2017.05.016
17. Hu P., Zhang N., Chen L.-X., Cai X.-D. Vapor-Liquid Equilibrium Measurements for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene + Butane at Temperatures from 283.15 to 323.15 K // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2018. Vol. 63, N 5. P. 1507–1512. doi: 10.1021/acs.jced.7b01073
18. Valtz A., Abbadi J.E., Coquelet C., et al. Experimental measurements and modelling of vapour-liquid equilibrium of 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234yf) + 1,1,1,2,2-pentafluoropropane (R-245cb) system // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 107. P. 315–325. doi: 10.1016/j.jirefrig.2019.07.024
19. Yin J., Zhao G., Ma S. Experimental measurements of saturated vapor pressure and gaseous pvT property for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) // *International Journal of Refrigeration* 2019. Vol. 107. P. 183–190. doi: 10.1016/j.jirefrig.2019.08.008
20. Yoshitake M., Matsuo S., Sotani T. Density and Speed of Sound Measurements of HFO1234yf. In: *Proceedings of the 30th Japan*

- Symposium on Thermophysical Properties. Yonezawa, Japan. 2009. P.353–355. (in Japanese).
- 21.** Kayukawa Y., Kano Y., Fujii K. In: Proceedings of the 2009 Symposium on Environmental Engineering, Okinawa, Japan. 2009. P. 406. (in Japanese).
- 22.** Di Nicola C., Di Nicola G., Pacetti M., et al. P – V – T Behavior of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) in the Vapor Phase from (243 to 373) K // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010. Vol. 55, N 9. P. 3302–3306. doi: 10.1021/jc100102q
- 23.** Tanaka K., Higashi Y., Akasaka R. Measurements of the Isobaric Specific Heat Capacity and Density for HFO-1234yf in the Liquid State // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010. Vol. 55, N 8. P. 901–903. doi: 10.1021/jc900515a
- 24.** Tanaka K., Higashi Y. PT Property for HFO1234yf in the Gaseous Phase // *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. 2011. Vol. 28(1). P. 51–61 (in Japanese)
- 25.** Fedele L., Brown J.S., Colla L., et al. Compressed Liquid Density Measurements for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011. Vol. 57, N 2. P. 482–489. doi: 10.1021/jc201030g
- 26.** Klomfar J., Součková M., Pátek J. Liquid-Phase p–p–T Data for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R-1234yf) and 1,1,2,3,3,3-Hexafluoroprop-1-ene (R-1216) at Temperatures from (208 to 353) K under Pressures up to 40 MPa // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012. Vol. 57, N 11. P. 3283–3289. doi: 10.1021/jc3009304
- 27.** Qiu G., Meng X., Wu J. Density measurements for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013. Vol. 60. P.150–158. doi: 10.1016/j.jct.2013.01.006
- 28.** Hu P., Cai X.-D., Chen L.-X., et al. pvT Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) in the Gaseous Phase // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017. Vol. 62, N 10. P. 3353–3359. doi: 10.1021/acs.jced.7b00427
- 29.** Gao N., Jiang Y., Wu J., He Y., et al. Measurements of the isobaric heat capacity of R1234yf in liquid phase at temperatures from 305K to 355K and pressures up to 5MPa // *Fluid Phase Equilibria*. 2014. Vol. 376. P. 64–68. doi: 10.1016/j.fluid.2014.05.029
- 30.** Liu Y., Zhao X., Lv S., et al. Isobaric Heat Capacity Measurements for R1234yf from 303 to 373 K and Pressures up to 12 MPa // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017. Vol. 62, N 3. P. 1119–1124. doi: 10.1021/acs.jced.6b00959
- 31.** Al Ghafri S.Z.S., Rowland D., Akhfaish M., et al. Thermodynamic properties of hydrofluoroolefin (R1234yf and R1234ze(E)) refrigerant mixtures: Density, vapour-liquid equilibrium, and heat capacity data and modelling // *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 98. P. 249–260. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.10.027
- 32.** Lukawski M.Z., Ishmael M.P.E., Tester J.W. Isobaric Heat Capacity Measurements of Supercritical R1234yf // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2018. Vol. 63, N 2. P. 463–469. doi: 10.1021/acs.jced.7b00946
- 33.** Zhong Q., Dong X., Zhao Y., et al. Adiabatic calorimeter for isochoric specific heat capacity measurements and experimental data of compressed liquid R1234yf // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2018. N 125. P. 86–92. doi: 10.1016/j.jct.2018.05.022
- 34.** Kano Y., Kayukawa Y., Fujii K., et al. Ideal-Gas Heat Capacity for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf) Determined from Speed-of-Sound Measurements // *International Journal of Thermophysics*. 2010. Vol. 31, N 11–12. P. 2051–2058. doi: 10.1007/s10765-010-0885-7
- 35.** Lago S., Albo P.A.G., Brignolo S. Speed of Sound Results in 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(E)) in the Temperature Range of (260 to 360) K // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010. Vol. 56, N 1. P. 161–163. doi: 10.1021/jc100896n
- 36.** Yamaguchi S., Matsuo S., Sotani T. Viscosity measurement of HFO1234yf by means of rolling-ball method. In: 30th Japan Symposium on Thermophysical Properties, Yonezawa, Japan. 2009.
- 37.** Laesecke A., Cousins D.S. Sealed Gravitational Capillary Viscometry of Dimethyl Ether and Two Next-Generation Alternative Refrigerants // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2012. Vol. 117, N 0. P. 231–256. doi: 10.6028/jres.117.014
- 38.** Meng X., Qiu G., Wu J., et al. Viscosity measurements for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013. N 63. P. 24–30. doi: 10.1016/j.jct.2013.03.013
- 39.** Dang Y., Kamiaka T., Dang C., et al. Liquid viscosity of low-GWP refrigerant mixtures (R32+R1234yf) and (R125+R1234yf) // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2015. Vol. 89. P. 183–188. doi: 10.1016/j.jct.2015.05.009
- 40.** Dang Y., Kim H.S., Dang C., et al. Measurement of vapor viscosity of R1234yf and its binary mixtures with R32, R125 // *International Journal of Refrigeration*. 2015. N 58. P. 131–136. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.06.010
- 41.** Zhao G., Bi S., Fröba A.P., et al. Liquid Viscosity and Surface Tension of R1234yf and R1234ze Under Saturation Conditions by Surface Light Scattering // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2014. Vol. 59, N 4. P. 1366–1371. doi: 10.1021/jc5001457
- 42.** Zhao X., Duan W., Zeng X., et al. Measurements of Surface Tension of R1234yf and R1234ze(E) // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017. Vol. 63, No.1. P. 21–26. doi: 10.1021/acs.jced.7b00543
- 43.** Perkins R.A., Huber M.L. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R1234ze(E)) // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011. Vol. 56, No.12. P. 4868–4874. doi: 10.1021/jc200811n
- 44.** Miyara A., Fukuda R., Tsubaki K. Thermal conductivity of saturated liquid of R1234ze (E)+ R32 and R1234yf+ R32 mixtures // *Trans. Jpn. Soc. Refrig. Air Cond. Eng.*. 2011. No.28. P. 435–443.
- 45.** Akasaka R. New Fundamental Equations of State with a Common Functional Form for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(E)) // *International Journal of Thermophysics*. 2011. Vol. 32, No.6. P. 1125–1147. doi: 10.1007/s10765-011-0992-0
- 46.** Kayukawa Y., Sakoda N., Akasaka R. Trends in research on thermophysical properties of olefinic low-GWP refrigerants. In: Proceedings of the Japanese Society for Refrigeration and Air Conditioning. 2020;37(1):1–44. doi: 10.11322/tjsrae.20-08R
- 47.** Nair V. HFO refrigerants: A review of present status and future prospects // *International Journal of Refrigeration*. 2021. No.122. P. 156–170. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.10.039
- 48.** Huber M.L., Assael M.J. Correlations for the viscosity of 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)) // *International Journal of Refrigeration*. 2016. No.71. P. 39–45. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.08.007
- 49.** Brown J.S., Zilio C., Cavallini A. Thermodynamic properties of eight fluorinated olefins // *International Journal of Refrigeration*. 2010. Vol. 33, No.2. P. 235–241. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.04.005

50. Akasaka R., Tanaka K., Higashi Y. Thermodynamic property modeling for 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) // *International Journal of Refrigeration*. 2010. Vol. 33, No.1. P. 52–60. doi: 10.1016/j.jrefrig.2009.09.004

51. Leck T. Evaluation of HFO-1234yf as a Replacement for R-134a in Refrigeration and Air Conditioning Applications. In: *Proceedings 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties & Transport Processes of Refrigerants*, Boulder, Colorado. 2010. P. 23–26.

52. Hulse R., Singh R., Pham H. Physical Properties of HFO-1234yf. Evaluation of HFO-1234yf as a Replacement for R-134a in Refrigeration and Air Conditioning Applications. In: *Proceedings 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties & Transport Processes of Refrigerants*, Boulder, Colorado. 2010.

53. Raabe G., Maginn E.J. A Force Field for 3,3,3-Fluoro-1-propenes, Including HFO-1234yf // *Journal of Physical Chemistry B*. 2010. Vol. 114, N 31. P. 10133–10142. doi: 10.1021/jp102534z

54. Lai N.A., Vrabec J., Raabe G., et al. Description of HFO-1234yf with BACKONE equation of state // *Fluid*

Phase Equilibria. 2011. Vol. 305, No.2. P. 204–211. doi: 10.1016/j.fluid.2011.04.005

55. Agrawal A., Cornelio A.A., Limperich D. Investigation of cubic EOS models for HFO-1234yf refrigerant used in automotive application. In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2012. P. 1232.

56. Fouad W.A., Vega L.F. Next generation of low global warming potential refrigerants: Thermodynamic properties molecular modeling // *AIChE Journal*. 2017. Vol. 64, No.1. P. 250–262. doi: 10.1002/aic.15859

57. Rykov V.A., Rykov S.V., Sverdlov A.V. Fundamental equation of state for R1234yf // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1385, No.1. 012013. doi: 10.1088/1742-6596/1385/1/012013

58. Колобаев В.А., Рыков С.В., Кудрявцева И.В., и др. Методика построения уравнения состояния и термодинамических таблиц для хладагента нового поколения // *Измерительная техника*. 2021. № 2. С. 9–15. doi: 10.32446/0368-1025it.2021-2-9-15

REFERENCES

1. Bell IH, Wronski J, Quoilin S, et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014;53(6):2498–2508. doi: 10.1021/ie4033999
2. Lemmon EW, Bell IH, Huber ML, et al. *NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, Standard Reference Data Program*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018. doi: 10.18434/T4/1502528
3. Hulse R, Singh R, Pham H. In: *Proceedings of the 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigeration, CO, USA*. Boulder: IIR, 2009:60.
4. Kano Y, Kayukawa Y, Fujii K. Measurement of Critical Point for Novel Hydrofluoro-Olefin Refrigerants. In: *Proceedings of the 19th Symposium on Environmental Engineering, Japan*. Naha; 2009:423.
5. Di Nicola G, Polonara F, Santori G. Saturated Pressure Measurements of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf). *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010;55(1):201–204. doi: 10.1021/je900306v
6. Tanaka K, Higashi Y. Thermodynamic Properties of HFO-1234yf (2,3,3,3-Tetrafluoropropene). *International Journal of Refrigeration*. 2010;33(3):474–479. doi: 10.1016/j.jrefrig.2009.10.003
7. Richter M, McLinden MO, Lemmon EW. Thermodynamic Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf): Vapor Pressure and p-p-T Measurements and an Equation of State. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011;56(7):3254–3264. doi: 10.1021/je200369m
8. Fedele L, Bobbo S, Groppo F, et al. Saturated Pressure Measurements of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) for Reduced Temperatures Ranging from 0.67 to 0.93. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011;56(5):2608–2612. doi: 10.1021/je2000952
9. Hu P, Chen L-X, Chen Z-S. Vapor-Liquid Equilibria for the 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a)+1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane (HFC-227ea) and 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a)+2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) Systems. *Fluid Phase Equilibria*. 2013;360:293–297. doi: 10.1016/j.fluid.2013.09.056
10. Kamiaka T, Dang C, Hihara E. Vapor-Liquid Equilibrium Measurements for Binary Mixtures of R1234yf with R32, R125, and R134a. *International Journal of Refrigeration*. 2013;36(3):965–971. doi: 10.1016/j.jrefrig.2012.08.016
11. Yang Z, Kou L, Mao W, et al. Experimental study of saturated pressure measurements for 2,3,3,3- tetrafluoropropene (HFO-1234yf) and 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoropropane (HCFC-244bb). *J. Chem. Eng. Data*. 2014;59:157–160. doi: 10.1021/je400970y
12. Chen L-X, Hu P, ZhuW-B, et al. Vapor-Liquid Equilibria of Fluoroethane (HFC-161)+2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf). *Fluid Phase Equilibria*. 2015;392:19–23. doi: 10.1016/j.fluid.2015.02.014
13. Madani H, Valtz A, Zhang F, et al. Isothermal Vapor-Liquid Equilibrium Data for the Trifluoromethane (R23) + 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) System at Temperatures from 254 to 348 K. *Fluid Phase Equilibria*. 2016;415:158–165. doi: 10.1016/j.fluid.2016.02.005
14. Yang Z-Q, Kou L-G, Han S, et al. Vapor-Liquid Equilibria of 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf) + 1,1,1,2,2-Pentafluoropropane (HFC-245cb) System. *Fluid Phase Equilibria*. 2016;427:390–393. doi: 10.1016/j.fluid.2016.07.031
15. Kochenburger T, Gomse D, Tratschitt I, et al. Vapor-Liquid and Vapor-Liquid-Liquid Equilibrium Measurements and Correlation of the Binary Mixtures 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) + (Tetrafluoromethane (R14), Trifluoromethane (R23), Octafluoropropane (R218), Nitrogen (R728) and Argon (R740)) and ethane (R170) + trifluoromethane (R23). *Fluid Phase Equilibria*. 2017;450:13–23. doi: 10.1016/j.fluid.2017.07.002
16. Zhong Q, Dong X, Zhao Y, et al. Measurements of isothermal vapour-liquid equilibrium for the 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene+propane system at temperatures from 253.150 to 293.150 K. *Int. J. Refrig*. 2017;81:26–32. doi: 10.1016/j.jrefrig.2017.05.016
17. Hu P, Zhang N, Chen L-X, et al. Vapor-Liquid Equilibrium Measurements for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene + Butane at Temperatures from 283.15 to 323.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2018;63(5):1507–1512. doi: 10.1021/acs.jced.7b01073

18. Valtz A, Abbadi JE, Coquelet C, et al. Experimental measurements and modelling of vapour-liquid equilibrium of 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234yf) + 1,1,1,2,2-pentafluoropropane (R-245cb) system. *International Journal of Refrigeration*. 2019;107:315–325. doi: 10.1016/j.jirefrig.2019.07.024
19. Yin J, Zhao G, Ma S. Experimental measurements of saturated vapor pressure and gaseous pVT property for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf). *International Journal of Refrigeration*. 2019;107:183–190. doi: 10.1016/j.jirefrig.2019.08.008
20. Yoshitake M, Matsuo S, Sotani T. Density and Speed of Sound Measurements of HFO1234yf. In: *Proceedings of the 30th Japan Symposium on Thermophysical Properties*. Yonezawa, Japan. 2009:353–355 (in Japanese).
21. Kayukawa Y, Kano Y, Fujii K. In: *Proceedings of the 2009 Symposium on Environmental Engineering*, Okinawa, Japan. 2009:406 (in Japanese).
22. Di Nicola C., Di Nicola G., Pacetti M, et al. P – V – T Behavior of 2,3,3,3- Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) in the Vapor Phase from (243 to 373) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010;55(9):3302–3306. doi: 10.1021/je100102q
23. Tanaka K, Higashi Y, Akasaka R. Measurements of the Isobaric Specific Heat Capacity and Density for HFO-1234yf in the Liquid State. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010;55(8):901–903. doi: 10.1021/je900515a
24. Tanaka K, Higashi Y. PpT Property for HFO1234yf in the Gaseous Phase. *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*. 2011;28(1):51–61 (in Japanese)
25. Fedele L, Brown JS, Colla L, et al. Compressed Liquid Density Measurements for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf). *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011;57(2):482–489. doi: 10.1021/je201030g
26. Klomfar J, Součková M, Pátek J. Liquid-Phase p–p–T Data for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R-1234yf) and 1,1,2,3,3,3-Hexafluoroprop-1-ene (R-1216) at Temperatures from (208 to 353) K under Pressures up to 40 MPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012;57(11):3283–3289. doi: 10.1021/je3009304
27. Qiu G, Meng X, Wu J. Density measurements for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)). *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013;60:150–8. doi: 10.1016/j.jct.2013.01.006
28. Hu P, Cai X-D, Chen L-X, et al. pVT Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (HFO-1234yf) in the Gaseous Phase. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017;62(10):3353–3359. doi: 10.1021/acs.jced.7b00427
29. Gao N, Jiang Y, Wu J, He Y, Chen G. Measurements of the isobaric heat capacity of R1234yf in liquid phase at temperatures from 305K to 355K and pressures up to 5MPa. *Fluid Phase Equilibria*. 2014;376:64–68. doi: 10.1016/j.fluid.2014.05.029
30. Liu Y, Zhao X, Lv S, He H. Isobaric Heat Capacity Measurements for R1234yf from 303 to 373 K and Pressures up to 12 MPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017;62(3):1119–1124. doi: 10.1021/acs.jced.6b00959
31. Al Ghafri SZS, Rowland D, Akhshar M, et al. Thermodynamic properties of hydrofluoroolefin (R1234yf and R1234ze(E)) refrigerant mixtures: Density, vapour-liquid equilibrium, and heat capacity data and modelling. *International Journal of Refrigeration*. 2019;98:249–260. doi: 10.1016/j.jirefrig.2018.10.027
32. Lukawski MZ, Ishmael MPE, Tester JW. Isobaric Heat Capacity Measurements of Supercritical R1234yf. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2018;63(2):463–469. doi: 10.1021/acs.jced.7b00946
33. Zhong Q, Dong X, Zhao Y, et al. Adiabatic calorimeter for isochoric specific heat capacity measurements and experimental data of compressed liquid R1234yf. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2018;125:86–92. doi: 10.1016/j.jct.2018.05.022
34. Kano Y, Kayukawa Y, Fujii K, Sato H. Ideal-Gas Heat Capacity for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf) Determined from Speed-of-Sound Measurements. *International Journal of Thermophysics*. 2010;31(11–12):2051–2058. doi: 10.1007/s10765-010-0885-7
35. Lago S, Albo PAG, Brignolo S. Speed of Sound Results in 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(E)) in the Temperature Range of (260 to 360) K. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010;56(1):161–163. doi: 10.1021/je100896n
36. Yamaguchi S, Matsuo S, Sotani T. Viscosity measurement of HFO1234yf by means of rolling-ball method. In: *30th Japan Symposium on Thermophysical Properties*. Yonezawa, Japan; 2009.
37. Laescke A, Cousins DS. Sealed Gravitational Capillary Viscometry of Dimethyl Ether and Two Next-Generation Alternative Refrigerants. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2012;117(0):231–256. doi: 10.6028/jres.117.014
38. Meng X, Qiu G, Wu J, et al. Viscosity measurements for 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)). *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013;63:24–30. doi: 10.1016/j.jct.2013.03.013
39. Dang Y, Kamiaka T, Dang C, et al. Liquid viscosity of low-GWP refrigerant mixtures (R32+R1234yf) and (R125+R1234yf). *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2015;89:183–188. doi: 10.1016/j.jct.2015.05.009
40. Dang Y, Kim HS, Dang C, et al. Measurement of vapor viscosity of R1234yf and its binary mixtures with R32, R125. *International Journal of Refrigeration*. 2015;58:131–136. doi: 10.1016/j.jirefrig.2015.06.010
41. Zhao G, Bi S, Fröba AP, et al. Liquid Viscosity and Surface Tension of R1234yf and R1234ze Under Saturation Conditions by Surface Light Scattering. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2014;59(4):1366–1371. doi: 10.1021/je5001457
42. Zhao X, Duan W, Zeng X, et al. Measurements of Surface Tension of R1234yf and R1234ze(E). *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2017;63(1):21–26. doi: 10.1021/acs.jced.7b00543
43. Perkins RA, Huber ML. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivity of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R1234ze(E)). *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2011;56(12):4868–4874. doi: 10.1021/je200811n
44. Miyara A., Fukuda R., Tsubaki K. Thermal conductivity of saturated liquid of R1234ze (E)+ R32 and R1234yf+ R32 mixtures. *Trans. Jpn. Soc. Refrig. Air Cond. Eng.* 2011;28:435–443.
45. Akasaka R. New Fundamental Equations of State with a Common Functional Form for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234yf) and trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(E)). *International Journal of Thermophysics*. 2011;32(6):1125–1147. doi: 10.1007/s10765-011-0992-0
46. Kayukawa Y, Sakoda N, Akasaka R. Trends in research on thermophysical properties of olefinic low-GWP refrigerants.

Proceedings of the Japanese Society for Refrigeration and Air Conditioning. 2020;37(1):1–44. doi: 10.11322/tjsrae.20-08R

47. Nair V. HFO refrigerants: A review of present status and future prospects. *International Journal of Refrigeration*. 2021;122:156–170. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.10.039

48. Huber ML, Assael MJ. Correlations for the viscosity of 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) and trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(E)). *International Journal of Refrigeration*. 2016;71:39–45. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.08.007

49. Brown JS, Zilio C, Cavallini A. Thermodynamic properties of eight fluorinated olefins. *International Journal of Refrigeration*. 2010;33(2):235–241. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.04.005

50. Akasaka R, Tanaka K, Higashi Y. Thermodynamic property modeling for 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf). *International Journal of Refrigeration*. 2010;33(1):52–60. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.09.004

51. Leck T. Evaluation of HFO-1234yf as a Replacement for R-134a in Refrigeration and Air Conditioning Applications. In: *Proceedings 3rd IIR Conference on Thermophysical Properties & Transport Processes of Refrigerants*, Boulder, Colorado. 2010:23–26.

52. Hulse R, Singh R, Pham H. Physical Properties of HFO-1234yf. Evaluation of HFO-1234yf as a Replacement for R-134a in Refrigeration and Air Conditioning Applications. In: *Proceedings*

3rd IIR Conference on Thermophysical Properties & Transport Processes of Refrigerants, Boulder, Colorado; 2010.

53. Raabe G, Maginn EJ. A Force Field for 3,3,3-Fluoro-1-propenes, Including HFO-1234yf. *Journal of Physical Chemistry B*. 2010;114(31):10133–10142. doi: 10.1021/jp102534z

54. Lai NA, Vrabec J, Raabe G, et al. Description of HFO-1234yf with BACKONE equation of state. *Fluid Phase Equilibria*. 2011;305(2):204–211. doi: 10.1016/j.fluid.2011.04.005

55. Agrawal A, Cornelio AA, Limperich D. Investigation of Cubic EOS Models for HFO-1234yf Refrigerant Used In Automotive application. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 1232. 2012

56. Fouad WA, Vega LF. Next generation of low global warming potential refrigerants: Thermodynamic properties molecular modeling. *AIChE Journal*. 2017;64(1):250–262. doi: 10.1002/aic.15859

57. Rykov VA, Rykov SV, Sverdlov AV. Fundamental equation of state for R1234yf. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1385(1):012013. doi: 10.1088/1742-6596/1385/1/012013

58. Kolobaev VA, Rykov SV, Kudryavtseva IV, et al. Methodology for constructing the equation of state and thermodynamic tables for a new generation refrigerant. *Measuring equipment*. 2021;2:9–15. (In Russ). doi: 10.32446/0368-1025it.2021-2-9-15

ОБ АВТОРАХ

*** Доля Владимир Владимирович;**

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

Лефортовская наб., д. 1;

ORCID: 0009-0000-0910-7398;

eLibrary SPIN: 7471-9413;

e-mail: dolyavv.publication@gmail.com

Валякина Анна Викторовна,

канд. техн. наук;

ORCID: 0000-0002-7709-1209;

eLibrary SPIN: 7679-2022;

e-mail: valiakina@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

*** Vladimir V. Dolya;**

address: 1 Lefortovskaya naberezhnaya, 105005 Moscow,

Russian Federation;

ORCID: 0009-0000-0910-7398;

eLibrary SPIN: 7471-9413;

e-mail: dolyavv.publication@gmail.com

Anna V. Valiakina,

Cand. Sci. (Tech.);

ORCID: 0000-0002-7709-1209;

eLibrary SPIN: 7679-2022;

e-mail: valiakina@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author