

УДК 543.424.2; 621.564.2

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния в анализе хладагентов, классифицированных как озоноразрушающие вещества

Е. П. ТЮРИКОВА¹, канд. техн. наук М. А. КУСТИКОВА, Е. А. БЫКОВСКАЯ¹eptyurikova@itmo.ru

Университет ИТМО

Выполнена постановка проблемы идентификации озоноразрушающих веществ на основании вызовов в области климатологических исследований. На основании данных о регулируемых озоноразрушающих веществах и парниковых газах было дано описание хладагентов, подверженных учету при транспортировке и хранении на территории РФ. Представлен сравнительный анализ методов хромато-масс-спектрометрии, абсорбционной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния для определения состава хладагентов по точностным и временным показателям. Обоснован выбор метода спектроскопии комбинационного рассеяния света для идентификации многокомпонентных соединений. Рассмотрен пример идентификации хладагента R-12 на основании расчета спектров колебательных процессов связей в молекуле и сравнении с экспериментальными данными. На основании структуры молекулы хладагента R-12 выполнен расчет спектральных линий в зависимости от молекулярных колебаний. Выделенные линии были зафиксированы в спектре комбинационного рассеяния хладагента, зафиксированного с помощью экспериментальной установки идентификации озоноразрушающих веществ. Был сделан вывод о перспективности использования метода комбинационного рассеяния для идентификации многокомпонентных хладагентов.

Ключевые слова: хладагенты, озоноразрушающие вещества, фреоны, аналитические системы, спектроскопия комбинационного рассеяния, хромато-масс-спектрометрия, инфракрасная абсорбционная спектроскопия.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 27.05.2021, принята к печати 15.09.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-59-65

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Тюрикова Е. П., Кустикова М. А., Быковская Е. А. Метод спектроскопии комбинационного рассеяния в анализе хладагентов, классифицированных как озоноразрушающие вещества // Вестник Международной академии холода. 2021. № 4. С. 59–65. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-59-65

Raman spectroscopy for the analysis of refrigerants classified as ozone depleting substances

E. P. TYURIKOVA¹, Ph. D. M. A. KUSTIKOVA, E. A. BYKOVSKAIA¹eptyurikova@itmo.ru

ITMO University

The problem of identification of ozone-depleting substances was formulated because of challenges in the field of climatological research. Based on the data on controlled ozone-depleting substances and greenhouse gases, a description of refrigerants subjected to accounting during transportation and storage on the territory of the Russian Federation was given. A comparative analysis of methods, including chromatography-mass spectrometry, infrared absorption spectroscopy, and Raman spectroscopy for determining the composition of refrigerants by precision and time parameters is presented. The choice of the Raman spectroscopy method for the identification of complex-component compounds is substantiated. An example of R-12 refrigerant identification based on calculating spectra of vibrational processes of bonds in a molecule is considered and compared with recording spectral data. Based on the structure of the R-12 refrigerant molecule, the spectral lines were calculated depending on molecular vibrations. The lines identified were recorded in the Raman spectrum of the refrigerant detected by an experimental setup for the identification of ozone-depleting substances. It was concluded that the Raman method is promising for identification of multicomponent refrigerants.

Keywords: refrigerants, ozone-depleting substances, freons, analytical systems, Raman spectroscopy, chromatography-mass spectrometry, infrared absorption spectroscopy.

Article info:

Received 27/05/2021, accepted 15/09/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-59-65

Article in Russian

For citation:Tyurikova E. P., Kustikova M. A., Bykovskaia E. A. Raman spectroscopy for the analysis of refrigerants classified as ozone depleting substances. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 4. p. 59–65. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-4-59-65**Введение**

Вопрос охраны окружающей среды и безопасного состояния экосистем на планете является одним из важных вызовов 21 века. Особую роль в данном вопросе играет сохранение озонового слоя атмосферы Земли. Молекулы озона выполняют функцию фильтра активных компонентов солнечного излучения, уменьшающего интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучения для сохранения радиационного и термического баланса атмосферы [1].

16 сентября 1987 г. был подписан Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой. После был принят ряд поправок, расширяющих перечень веществ, которые при попадании в атмосферу ведут к уменьшению количества атмосферного озона. Под озоноразрушающими веществами (ОРВ) подразумевают соединения, разлагающиеся под действием ультрафиолетового излучения на атомы хлора и брома, которые в свою очередь преобразуют молекулы озона в молекулы кислорода, тем самым оказывая влияние на состав атмосферы [2].

На данный момент в России принят план по выводу из употребления ОРВ, сокращению использования парниковых газов и перехода на озонобезопасные соединения [3]. С данной целью был сформирован перечень веществ, классифицированных как ОРВ. В список регулируемых веществ входят хлорфторуглероды (ХФУ), гидрохлорфторуглероды (ГХФУ) и гидрофторуглероды (ГФУ). ХФУ и ГХФУ относят к ОРВ, при этом все, перечисленные выше соединения, являются парниковыми газами, способствующим увеличению среднегодовой температуры. Данные вещества используются в качестве хладагентов в системах кондиционирования и охлаждения воздуха, а также в нефтяной, газовой и промышленной отраслях [4]. Согласно законодательству РФ, на территорию России возможен ввоз и вывоз ОРВ по системе квот, ввиду наличия оборудования, работающего за счет учитываемых хладагентов [5].

Законодательство Российской Федерации имеет ряд документов, регулирующих процесс учета транспортируемой через границу продукции, относящейся к ОРВ, а также предъявляет требования по хранению и предоставлению информации в соответствующие ведомства. К ОРВ относят ряд хладагентов, классифицированных как ХФУ, ГХФУ и ГФУ, как фреоны R-12, R-22, R-134a и др. Особо актуален вопрос идентификации сложных смесей, состоящих из нескольких веществ, к примеру фреон R-404, включающий в себя соединения R-125, R-134a и R-143a [6]. Количество транспортируемых и хранимых хладагентов ежегодно регламентируется Постановлениями Правительства.

Однако для точной идентификации состава хранимых и транспортируемых хладагентов необходимо поль-

зоваться достоверными и надежными средствами измерений. По своему принципу построения, в своем большинстве они основываются на существующих оптических и химических методах идентификации состава веществ. Согласно ГОСТ Р 51521–99 «Хладагенты, пропелленты, продукция в аэрозольной упаковке и материалы полимерные. Методы определения озоноразрушающих веществ», для самых распространенных 18 хладагентов закреплен метод хромато-масс-спектрометрии, в качестве рекомендуемого к использованию [7]. Однако, с вводом новых озонобезопасных рабочих веществ, таких как гидрофторолефины (ГФО) — хладагенты R-1234yf и R-1234ze, вопрос идентификации состава провозимых и хранимых веществ становится актуален [8].

Постановлением Правительства РФ от 25 марта 2020 г. № 333 «О принятии Российской Федерацией поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой» был расширен список ОРВ, подлежащих учету ввоза на таможенную территорию Евразийского экономического союза и (или) вывоза с таможенной территории Евразийского экономического союза [9]. Авторами статьи было выдвинуто предложение о необходимости разработки системы идентификации ОРВ для нужд таможенных служб и для учета в местах хранения. Для этого было необходимо определить метод, наиболее подходящий для идентификации состава хладагентов, что и явилось задачей исследования.

Описание хладагентов

Согласно ГОСТ ISO 817–2014, хладагент — это «тепловая среда, используемая для переноса теплоты в компрессионных машинных холодильных установках, которая поглощает теплоту при низкой температуре и низком давлении и, как правило, при изменении фазового состояния отдает ее при более высокой температуре и более высоком давлении» [10].

Для оценки влияния хладагентов на атмосферу были введены понятия озоноразрушающего потенциала (ОРП) и потенциала глобального потепления (ПГП). Вызовом нынешнего времени является переход на озонобезопасные хладагенты с ОРП равным 0 и сравнительно малым ПГП [11].

Список наиболее распространенных производимых и ввозимых хладагентов, регулируемых на территории РФ, представлен в табл. 1.

Наблюдаются тенденции создания многокомпонентных смесей, которые обладают необходимыми значениями ОРП и ПГП для безопасного функционирования в системах различного назначения, а также использование ГФО в качестве холодильных агентов. Примером является фреон R-1234yf, обладающий ОРП равным 0 и ПГП равным 4 [12].

Хладагенты, регулируемые правительством РФ по перемещению через границы, внутри страны, в местах производства и потребления

Refrigerants regulated by the government of the Russian Federation for movement across borders, within the country, and in places of production and consumption

Название	Тип	ПГП (100 лет)	ОРП	Молекулярная масса	Температура кипения при атмосферном давлении, °C
R-11	ХФУ	4750	1	137,4	24
R-12	ХФУ	10890	1	120,9	−30
R-21	ГХФУ	1850	0,05	102,9	9
R-22	ГХФУ	1760	0,055	86,5	−41
R-125	ГФУ	3500	0	120,0	−49
R-134a	ГФУ	1430	0	102,0	−26

Для возможности определять состав сложных хладагентов целесообразно использовать высокоточные методы анализа, способные идентифицировать примеси и малые концентрации веществ.

Методы идентификации ОРВ

На основании проведенных исследований были выделены следующие перспективные методы определения состава хладагентов:

- 1. Хромато-масс-спектрометрический метод.
- 2. Метод инфракрасной абсорбционной спектроскопии.
- 3. Метод спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР).

Хромато-масс-спектрометрический метод основан на разделении вещества на отдельные компоненты и фиксации времени их прохождения через хроматографическую колонку [13]. Метод инфракрасной абсорбционной спектроскопии основывается на фиксировании спектральных линий, поглощаемых образцом, основываясь на переход между колебательными и вращательными уровнями энергии молекул [14]. Метод КР спектроскопии схож с методом инфракрасной спектроскопии, однако в КР спектроскопии происходит детектирование спектров рассеянного излучения от образца [15].

На отечественном и зарубежном рынках присутствует большое количество анализаторов, в том числе и уз-

коспециализированных систем исследования состава хладагентов. Сравнительный анализ методов представлен в табл. 2. Информация о хромато-масс-спектрометре была основана на характеристиках, зафиксированных в ГОСТ Р 51521–99 «Хладагенты, пропелленты, продукция в аэрозольной упаковке и материалы полимерные. Методы определения озоноразрушающих веществ». Данные об абсорбционном спектрометре были получены на основании Патента 186910 РФ «Газоанализатор многокомпонентный для селективного измерения концентрации хладонов в системах жизнеобеспечения». В качестве представителя анализатора хладагентов на основе КР спектроскопии была выбрана аналитическая система ОРТЕС-785-Н.

На основании проведенного сравнительного анализа был сделан вывод, что метод КР спектроскопии является наиболее точным и быстродействующим, а также позволяет определять малые концентрации веществ без перекрытия спектров.

Метод КР спектроскопии

КР спектроскопия базируется на определении разницы энергии между уровнями возбуждения исследуемых молекул веществ. При облучении образца монохроматичным когерентным пучком света молекулы вещества в зависимости от своего изначального состояния могут передавать дополнительную энергию кванту света (получение антистоксовой линии) или поглощать часть

Сравнительный анализ методов идентификации ОРВ

Comparative analysis of methods for ODS identification

Параметр	Хромато-масс-спектрометрия	Инфракрасная абсорбционная спектроскопия	КР спектроскопия
Минимальные определяемые концентрации, %	0,00001–0,01	0,00001–0,1	0,000001–0,001
Допускаемая погрешность результата анализа, %	От 10 до 25	15	2
Перекрытие спектров	да	да	нет
Разрушается проба	да	нет	нет
Время измерения	От 8 мин	5 мин	90 сек
Детектор	Пламенно-ионизационный детектор	Пироприемник	ПЗС-матрица с высокой квантовой эффективностью

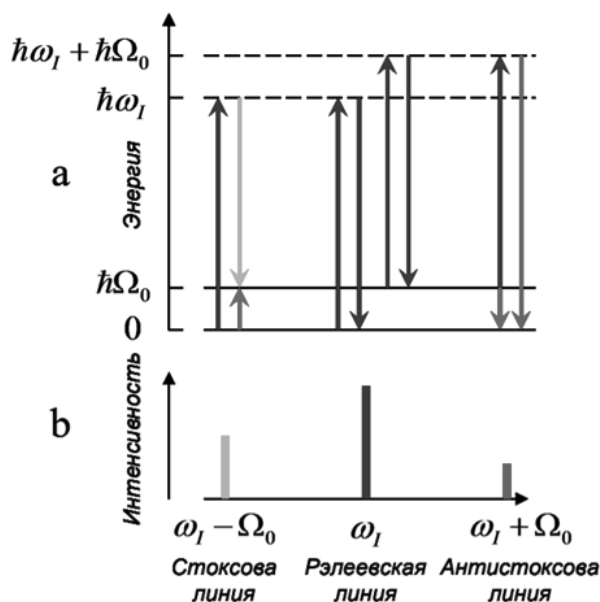


Рис. 1. Изменение энергии кванта света при комбинационном рассеянии

Fig. 1. Change in the energy of a quantum of radiation in Raman scattering

энергии, тем самым уменьшая количество энергии кванта света (стоксова линия) в спектре рассеянного света (рис. 1). С помощью энергии ΔE определяется линия частотного спектра:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hc\tilde{\nu}, \quad (1)$$

где ΔE — разность энергии между двумя квантовыми состояниями; h — постоянная Планка; c — скорость света; $\tilde{\nu}$ — волновое число.

Интенсивность рассеянного излучения:

$$I = \frac{16\pi^4 \nu^4}{3c^2} |\vec{P}|^2, \quad (2)$$

где I — интенсивность излучения; ν — частота колебания; P — дипольный момент молекулы, пропорциональный связан с поляризуемостью молекулы.

При этом вектор дипольного момента будет связан с частотой излучения через следующее соотношение:

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}_0 \cos(2\pi\nu_0 t), \quad (3)$$

где α — поляризуемость молекулы; \vec{E}_0 — вектор электрического поля; t — время, ν_0 — частота падающего на молекулу излучения.

При описании движений атомных связей внутри молекулы, используется модель ангармонического осциллятора в следствии не пропорционального изменения дипольного момента, относительно смещения атомов.

Колебания молекул представляют из себя структурированные движения атомов по типам упорядоченных координат: симметричное и асимметричное валентные, ножничное, маятниковое, веерное и крутильное колебания. При этом каждая молекула обладает своим количеством степеней свободы, зависящим от количества атомов. Обладая n количеством атомов, молекула будет иметь $3n$ степеней свободы. При этом $3n-6$ степеней свободы фиксируют позицию атомов относительно друг друга, а выделенные 6 описывают положение молекулы в пространстве. Для КР спектроскопии возможно наблюдать $3n-6$ полос спектра молекулы, описывающие колебательные движения атомов.

По итогу наблюдается ряд линий в спектрах КР, характеризующих типы колебаний и связей в кристаллах и молекулах. Данные линии обладают разной степенью интенсивностей, при этом создавая индивидуальные отпечатки химических соединений. Каждая отдельная связь будет давать собственную полосу спектра КР. За счет данного метода анализа возможно увеличение точности определяемого вещества, по сравнению с существующими аналогами.

Анализ вибрационных уровней хладагента R-12

В качества примера был взят фреон R-12, имеющий формулу CCl_2F_2 . Молекула имеет в себе 4 связи: 2 связи CF и 2 связи CCl. Данное соединение относится к группе ХФУ. За счет колебания связей в молекуле хладагента возможно произвести теоретическое определение волновых чисел спектра КР. Так как молекула имеет в своей структуре 5 атомов, возможно получение 9 типов коле-

Таблица 3

КР спектры фреона R-12

Table 3

Raman spectra of R-12 freon

Тип симметрии	№ колебательного квантового числа	Тип колебания в молекуле	Волновое число, см^{-1}	Форма полосы
a1	1	CF_2 симметричное валентное	1098	Средняя
	2	CCl_2 симметричное валентное	667,2	Сильно поляризованная
	3	CF_2 ножничное	457,5	Сильная
	4	CCl_2 ножничное	261,5	Деполаризованная
a2	5	CF_2 крутильное	322	Слабая деполаризованная
b1	6	CF_2 асимметричное валентное	1167	Слабая деполаризованная
	7	CF_2 маятниковое	—	—
b2	8	CCl_2 асимметричное валентное	923	Слабая деполаризованная
	9	CF_2 веерное	433	Средняя

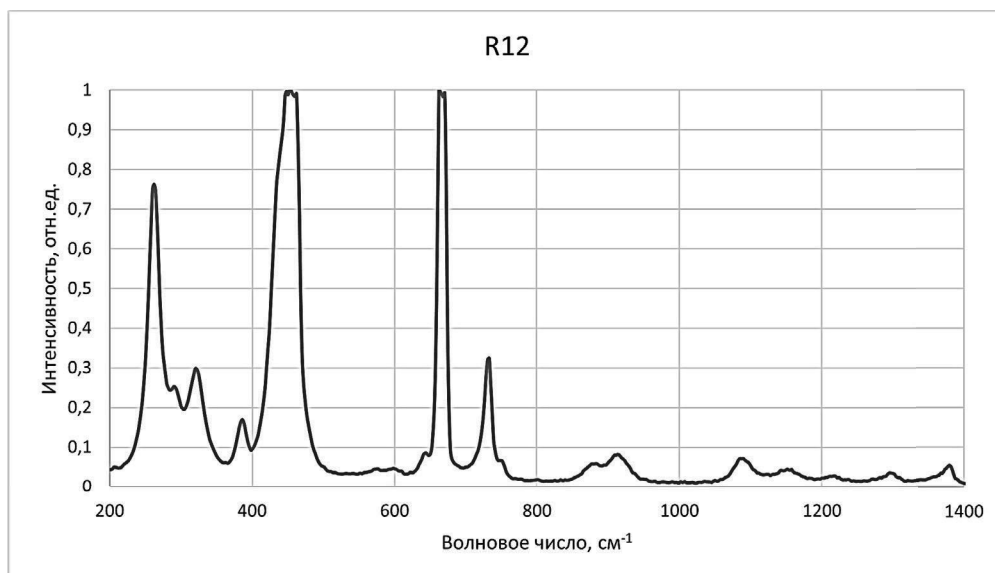


Рис. 2 Спектр комбинационного рассеяния фреона R-12

Fig. 2. Raman spectrum of R-12 freon

баний, которые могут сигнализировать о строении выбранного хладагента.

На основании базы Национального института стандартов и технологий США были получены расчетные данные о спектрах КР фреона R-12 [16].

На основании расчетных данных было выявлено, что наиболее сильные колебания связей внутри молекулы происходят на волновых числах 667,2 см⁻¹, 457,5 см⁻¹ и 261,5 см⁻¹.

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено экспериментальное исследование спектра с помощью экспериментальной системы идентификации ОРВ. Измерение проводилось в течение 90 с. Разрешающая способность детектора составила 2 см⁻¹. Был снят спектр в диапазоне от 0 до 3150 см⁻¹ с помощью лазера на длине волны 785 нм и мощностью 500 мВт. Произведенная обработка спектра выделила диапазон от 200 до 1400 см⁻¹. Итоговый спектр КР фреона R-12 представлен на рис. 2. В спектре можно выделить три области с максимальными значениями интенсивностей: 260–264 см⁻¹, 450–462 см⁻¹ и 662–670 см⁻¹. Данные интервалы соответствуют наиболее сильным колебаниям связей в молекуле фреона R-12. Наибольшее значение интенсивности линии по отношению к ширине пика было достигнуто в области волнового числа 454 см⁻¹.

Выполненное исследование подтверждает возможность точной идентификации хладагентов с помощью метода КР спектроскопии. Актуальным вопросом явля-

ется создание расчетной базы спектров новых хладагентов для их точной идентификации по линиям колебаний связей. Разработка программного комплекса для системы идентификации ОРВ на основе КР спектроскопии является перспективной для практических и фундаментальных исследований.

Заключение

На основании проведенного исследования было выполнено описание объекта исследования — хладагентов широкого спектра, относящихся к ОРВ. По результатам поиска существующих аналитических приборов и систем были выбраны методы хромато-масс-спектрометрии, инфракрасной абсорбционной спектроскопии и КР спектроскопии как наиболее распространенные методы идентификации хладагентов. При сравнении методов был обоснован выбор метода КР спектроскопии для реализации системы идентификации ОРВ за счет высокой точности, избирательности и не разрушения пробы. Анализ методики расчета колебательных спектров молекулярных связей хладагента в результате взаимодействия с лазерным излучением показал перспективы создания программного комплекса для системы идентификации ОРВ на методе КР спектроскопии.

Работа выполнена в рамках НИРМА № 620159 «Разработка и исследование принципов построения цифрового анализатора фреонов».

Литература

References

1. Суходолов Т. В., Блаkitная П. А., Боровская О. П., Smyshlyayev С. П. Модельное исследование одновременных изменений содержания озона и температуры стратосферы // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 22. С. 90–103.
2. McLinden M. O., Huber M. L. (R) Evolution of Refrigerants // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2020. V. 65. Is. 9. P. 4176–4193.
3. Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74756623/> (in Russian)
4. Tsvetkov O. B., Laptev Y. A., Sharkov A. V., Mitropov V. V., Fedorov A. V. Alternative refrigerants with low global warming potential for refrigeration and air-conditioning industries// IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. V. 905. P. 12070.
5. Афонин Д. Н., Кудряшова Е. С. Правовые основы таможенного контроля хладагентов в Российской Федерации (обзор законодательных актов) // Бюллетень инновационных технологий. Юридические науки. 2017. № 4. с. 5–16.
6. Mota-Babiloni A., Makhnatch P., Khodabandeh R. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: Focus on energetic performance and environmental impact// *International Journal of Refrigeration*. 2017. V. 82. P. 288–301.
7. ГОСТ Р 51521–99 Хладагенты, пропелленты, продукция в аэрозольной упаковке и материалы полимерные. Методы определения озоноразрушающих веществ. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200028067>
8. Ghafri S. Z. S. etc. Thermodynamic properties of hydrofluorolefin (R1234yf and R1234ze (E)) refrigerant mixtures: Density, vapour-liquid equilibrium, and heat capacity data and modelling // *International Journal of Refrigeration*. 2019. V. 98. P. 249–260.
9. Постановление Правительства РФ от 25 марта 2020 г. № 333 «О принятии Российской Федерацией поправки к Монреальскому протоколу по веществам, разрушающим озоновый слой». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73706908/>
10. ГОСТ ISO 817–2014 Хладагенты. Система обозначений [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200113021>
11. Eyerer S., Dawo F., Kaendl J., Wieland C., Spliethoff H. Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd (Z) and R1233zd (E) as replacements for R245fa// *Applied Energy*. 2019. V. 240, P. 946–963.
12. McLinden M. O., Brown J. S., Brignoli R., Kazakov A. F., Doman-ski P. A. Limited options for low-global-warming-potential refrigerants // *Nature Communications*. 2017. V. 8. P. 14476.
13. Винарский В. А., Юрченко П. А. Масс-спектрометрия и хромато-масс-спектральный анализ. Минск: БГУ, 2013. 135 с.
14. Asfin R. E., Bulychyev V. P., Buturlimova M. V., Tokhadze K. G. Theoretical and matrix isolation studies of infrared spectra of the H₂CO...HF hydrogen-bonded complex // *Journal of Molecular Structure*. 2021. V. 1225. Is. 9. P. 129080.
15. Zong C. et al. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy for Bioanalysis: Reliability and Challenges // *Chemical Reviews*. 2018. V. 118. Is. 10, P. 4946–4980.
16. Shimanouchi T. et al. Tables of Molecular Vibrational Frequencies Consolidated Volume II // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1977. V. 6. Is. 3. P. 993–1102.
1. Sukhodolov T. V., Blakitnaya P. A., Borovskaya O. P., Smyshlyayev S. P. A model study of the simultaneous stratospheric ozone and temperature variability. *Proceedings of Russian State Hydrometeorological University*. 2011. No 22. P. 90–103. (in Russian)
2. McLinden M. O., Huber M. L. (R) Evolution of Refrigerants. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2020. V. 65. Is. 9. P. 4176–4193.
3. Decree of the President of the Russian Federation dated 04.11.2020 No. 666 «On the reduction of greenhouse gas emissions». [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74756623/> (in Russian)
4. Tsvetkov O. B., Laptev Y. A., Sharkov A. V., Mitropov V. V., Fedorov A. V. Alternative refrigerants with low global warming potential for refrigeration and air-conditioning industries. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. V. 905. P. 12070.
5. Afonin D. N., Kudryashova E. S. Legal Basis for Customs Control of Refrigerants in the Russian Federation (Review of Legislative Acts). *Bulletin of innovative technologies. Legal sciences*. 2017. No 4. P. 5–16. (in Russian)
6. Mota-Babiloni A., Makhnatch P., Khodabandeh R. Recent investigations in HFCs substitution with lower GWP synthetic alternatives: Focus on energetic performance and environmental impact// *International Journal of Refrigeration*. 2017. V. 82. P. 288–301.
7. GOST R 51521–99 Refrigerants, propellants, production in aerosol packing and polymer materials. Test methods of ozone destroying substances. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200028067> (in Russian)
8. Ghafri S. Z. S. etc. Thermodynamic properties of hydrofluorolefin (R1234yf and R1234ze (E)) refrigerant mixtures: Density, vapour-liquid equilibrium, and heat capacity data and modelling. *International Journal of Refrigeration*. 2019. V. 98. P. 249–260.
9. RF Government Regulation of March 25, 2020 № 333 «On the adoption by the Russian Federation of an amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer». [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73706908/> (in Russian)
10. GOST ISO 817–2014 Refrigerants. Designation system [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200113021> (in Russian)
11. Eyerer S., Dawo F., Kaendl J., Wieland C., Spliethoff H. Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd (Z) and R1233zd (E) as replacements for R245fa. *Applied Energy*. 2019. V. 240, P. 946–963.
12. McLinden M. O., Brown J. S., Brignoli R., Kazakov A. F., Doman-ski P. A. Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. *Nature Communications*. 2017. V. 8. P. 14476.
13. Vinarsky V. A., Yurchenko R. A. Mass spectrometry and gas chromatography-mass spectral analysis. Minsk: BSU. 2013. 135 p. (in Russian)
14. Asfin R. E., Bulychyev V. P., Buturlimova M. V., Tokhadze K. G. Theoretical and matrix isolation studies of infrared spectra of the H₂CO...HF hydrogen-bonded complex. *Journal of Molecular Structure*. 2021. V. 1225. Is. 9. P. 129080.
15. Zong C. et al. Surface-Enhanced Raman Spectroscopy for Bioanalysis: Reliability and Challenges. *Chemical Reviews*. 2018. V. 118. Is. 10, P. 4946–4980.
16. Shimanouchi T. et al. Tables of Molecular Vibrational Frequencies Consolidated Volume II. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 1977. V. 6. Is. 3. P. 993–1102.

Сведения об авторах**Тюрикова Екатерина Павловна**

Аспирант факультета энергетики и экотехнологий
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, eptyurikova@itmo.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8492-327X>, Scopus ID 57213519258,
РИНЦ ID 1034402

Кустикова Марина Александровна

К. т. н., доцент факультета энергетики и экотехнологий
Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург,
ул. Ломоносова, 9, marinakustikova@mail.ru,
Scopus ID 8980576700, РИНЦ ID 362592

Быковская Елена Александровна

Старший преподаватель факультета энергетики
и экотехнологий Университета ИТМО, 191002,
Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, eabykovskaia@itmo.ru,
Scopus ID 57213518219, РИНЦ ID 879018

Information about authors**Tyurikova Ekaterina P.**

Graduate student of Faculty of Energy and Ecotechnology
Systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg,
Lomonosov str., 9, eptyurikova@itmo.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8492-327X>, Scopus ID 57213519258,
РИНЦ ID 1034402

Kustikova Marina A.

Ph. D., Associate Professor of Faculty of Energy and
Ecotechnology of ITMO University, 191002, Russia, St.
Petersburg, Lomonosov str., 9, marinakustikova@mail.ru,
Scopus ID 8980576700, РИНЦ ID 362592

Bykovskaia Elena A.

Head teacher of Faculty of Energy and Ecotechnology of ITMO
University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9,
eabykovskaia@itmo.ru, Scopus ID 57213518219,
РИНЦ ID 879018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Национальный комитет по теплофизическим свойствам веществ РАН
Университет ИТМО
Международная академия холода
Рабочая группа НС РАН «Свойства хладагентов и теплоносителей»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
ТЕХНИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР В УСЛОВИЯХ
НОВОЙ ПАРАДИГМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА
01 февраля 2022 г.

ТЕМЫ, ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- инновационные энергосберегающие и экологически безопасные технологии низкотемпературной инженерии; устойчивые холодильной цепи, теплохладоснабжение;
- релевантные проблемы евроарктического региона, сохранение биоразнообразия фауны Земли;
- деградация вечной мерзлоты, замораживание и термостабилизация грунтов;
- теплофизические свойства рабочих веществ техники низких температур, интенсификации теплообмена, наноструктурированные и магнитокалорические материалы;
- технологии сжиженного природного газа в низкотемпературных энергосистемах;
- органические циклы Ренкина;
- ресурсы энергосбережения и стратегии инновационных технологий;
- возобновляемые источники энергии; использование биоэнергии; тепловые насосы;
- тренды глобального развития техники низких температур;
- климатические изменения и влияние на них низкотемпературной техники;
- новые стратегии потребления холодильных агентов; горючие ГФО-хладагенты;
- гидрофторхлоролефины в технике низких температур; водородная энергетика.

Информационная поддержка:

журналы: «Империя холода»
«Вестник Международной академии холода»
Интернет-ресурс: Refportal

Спонсоры:

ООО «А и Т», ООО «Ривсмаш-Т», ООО «Геокриолог»,
ООО «Инженерная геология и геотехника»,
Инженерный центр энергоэффективных холодильных
технологий и автоматики

Заявки на участие в конференции подавать до 15 января 2022 г. на имя Лаптева Ю.А.
E-mail: laptev_yua@mail.ru, max_iar@mail.ru; yualaptev@itmo.ru

Тел.: 8 (812) 764-30-35, +7 (911) 284-21-91

Адрес проведения: Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Университет ИТМО

www.maxiar.spb.ru