



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

***Эффективность и дальнейшие  
перспективы развития спирального  
компрессора в аспекте решения вопросов  
экологической безопасности.***

Докладчик:

аспирант А.В. КОВАНОВ

Руководитель:

профессор, д. т. н. В. А. ПРОНИН

Санкт-Петербург

2021 г.

# Сравнение компрессоров. Сфера и область применения.

Рабочая область СПК:

В режиме охлаждения –  $T_0 = -40...+5^{\circ}\text{C}$ ;  $T_k \leq 55(65)^{\circ}\text{C}$ ;

В режиме нагрева –  $T_0 = -25...+25^{\circ}\text{C}$ ;  $T_k \leq 65^{\circ}\text{C}$ ;

Холодопроизводительность – 2...160 кВт;

Теплопроизводительность – 4...47 кВт;

- Бытовое (комфортное) и коммерческое кондиционирование
- Кондиционирование на транспорте
- Рефрижераторные установки
- Холодильные агрегаты для компьютерных центров и АТС
- Автономные агрегаты “руф-топ”
- Тепловые насосы
- Коммерческий холод (централизованное и выносное холодоснабжение)

Холодильный коэффициент —  $\varepsilon = \frac{Q_0}{N}$ ,  
масса и габариты компрессоров

Средние/Высокие температуры  
(-10/45, всасываемый газ 20°C)



(\*) Условия по EN12900 R404a 50Гц

Модель		Спиральный компрессор	Витовой компрессор	Поршневой компрессор 1	Поршневой компрессор 2
		ZB220KCE	HSK5353-35	6MLS1-27X	6HE-28Y
Мощность привода	л.с	30	38	33	25
Описанный объем	м³/час	88	100	104,5	111
Холодопроизводительность (*)	кВт	53	50	55	57
Холодильный коэффициент	-10/45	2,16	1,74	2,26	2,29
Холодильный коэффициент	-10/30	3,63	3,05	3,52	3,51
Холодильный коэффициент	-10/20	4,85	4,14	4,77	4,75
Холодильный коэффициент	-10/10	6,07	-	-	-
Уровень звукового давления	дБ	89	74	83	82
Длина	мм	448	765	738	765
Ширина	мм	392	439	552	502
Высота	мм	715	363	445	439
Вес		176	178	215	233
Рабочий Ток	А	42	44	41,3	43
Максимальный рабочий ток	А	69	58	51,9	53

# Конструктивные инновации.

## Технологические зазоры и узлы трения.

Контролируемые параметры:

- Геометрические размеры спиралей;
- Эксцентриситет;
- Выбор конструкционных материалов;
- Оптимальность системы подачи масла;

Особое внимание обращают на себя:

- Узлы трения (подшипниковые узлы и муфту Ольдхема);
- Сопряжение спиральных элементов, выбор технологических зазоров;
- Согласование спиралей.

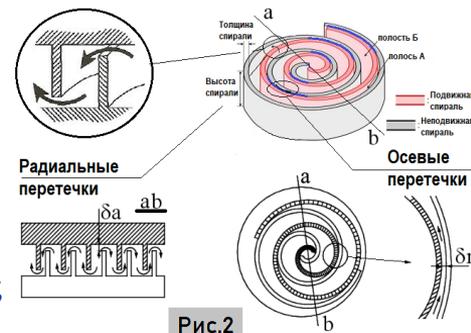


Рис.2

### ПОДШИПНИКИ И БАЛАНСИРОВКА



Рис.3

Зависимые параметры:

- Производительность;
- Потребляемая мощность;
- Шум и вибрация;
- Ресурс;
- Масса и габариты.



Рис.1



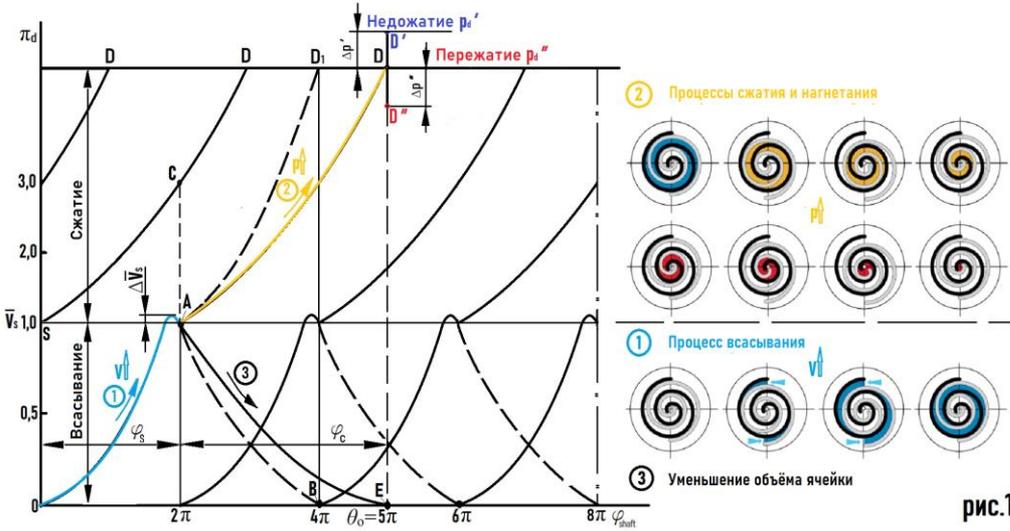


рис.1

**Рис. 1** Совмещённая диаграмма рабочих процессов СПК (для угла закрутки  $\theta_n = 5\pi$ ) и положение спиралей для моментов поворота вала: 1.  $\theta_n = 0 - 2\pi$ ; 2.  $\theta_n = 2\pi - 5\pi$  ( $4\pi$ ).

$\Delta \bar{V}^\pi$  - изменение относительного объёма ячейки всасывания;

OA – в процессе всасывания; AE в процессе

сжатия AD – изменения  $\pi_n$ ; (AB и AD<sub>1</sub> - аналогично, при  $\theta_n = 4\pi$ )

- Рабочий процесс может идти с недожатием и пережатием.
- Наличие явления наддува в процессе всасывания. Плотность р.в. выше на 1-2%.
- процесс сжатия будет проходить при переменной массе рабочего тела
- Степень политропы в процессе сжатия меняться и отлична от изоэнтропы.
- Процессы всасывания, сжатия и нагнетания протекают одновременно и растянуты по углу поворота вала.

$$\lambda = \frac{W_B - W_{пр}}{W_{пр}}$$

# Величина зазоров и влияние перетечек

## рабочего вещества на характеристики СПК.

- Повторное сжатие в рабочих полостях низкого давления;

- Подогрев рабочего тела на всасывании и в процессе сжатия;

В конечном счёте растёт температура нагнетания.

$$G_{\text{пр}} = \sum_1^i (f_i q_i)_{\text{щ}}$$

где  $f_{\text{щ}}$  - сечение  $i$ -й щели;  $q_{\text{щ}}$  - масса перетечек через единицу площади поперечного сечения, нормально к потоку рабочего вещества за единицу времени.



Величины зазоров рабочих полостей СПК влияют:

### 1) на производительность СПК:

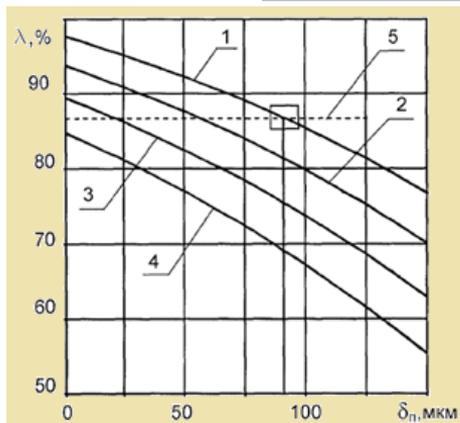
- за счет влияния подогрева всасываемого рабочего вещества;

- за счет уменьшения массы компримируемой среды в рабочих полостях.

Увеличение зазоров приводит к уменьшению коэффициента подачи  $\lambda$ , а, следовательно, и производительности СПК.

Рис.2 График зависимости коэффициента подачи от величины зазора

1 -  $\delta=0$ ; 2 -  $\delta=5$  мкм; 3 -  $\delta=10$  мкм; 4 -  $\delta=15$  мкм; 5 - экспериментально



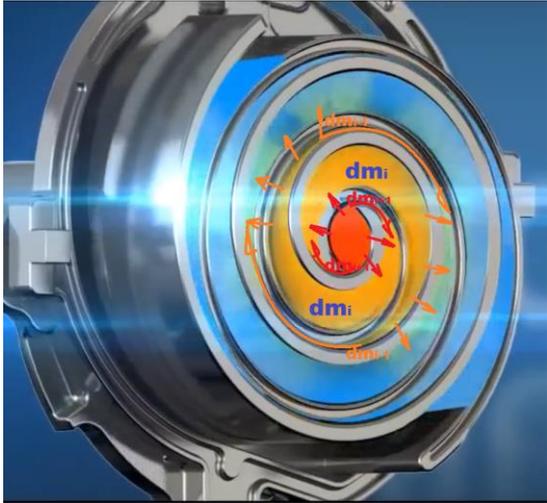
### 2) на потребляемую мощность СПК:

- за счет сжатия рабочей среды с более высокой температурой (подогрев на всасывании);

- за счет повторного сжатия при перетечках в промежуточных рабочих полостях.

Увеличение зазоров приводит к снижению индикаторного КПД и увеличению потребляемой мощности.

# Влияние подвижности стенок щели на процесс перетечек



- Методики, использующие допущение о стационарности стенок щели, имеют погрешности в расчётах порядка 10%-60%.

- Исследования проведённые Проф. И.П. Гинзбургом, ставят под сомнение данное допущение

- Результаты работ проведённых в отношении винтовых компрессоров, подтверждают обоснованность выводов о влиянии подвижности стенок щели на расход рабочего тела.

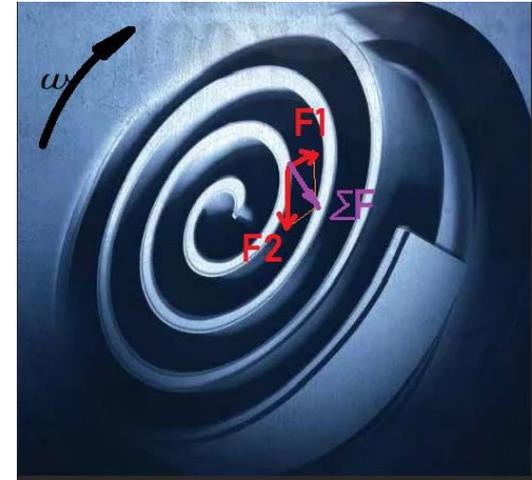
$$G = \frac{P_1 F}{\sqrt{R_r T_1}} \bar{q}$$

$$\vartheta = \frac{5l\eta\sqrt{R_r T_1}}{\delta^2 P_1}$$

Характер рабочих процессов СПК, предполагает наличие как попутного движения стенки и рабочего вещества, когда расход рабочего вещества увеличивается, так и встречного движения, когда его расход уменьшается. Соответственно данный факт должен быть учтён, а его

ITMO *re than a*  
UNIVERSITY

количественный вопрос и зависимость от различных факторов обязательно исследованы!



# Эффективность СПК. Регулирование холодопроизводительности.

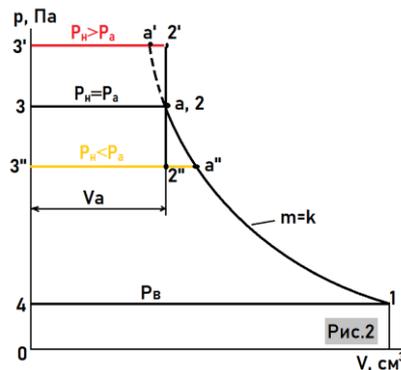
## Действительный компрессор.

$$Q_0 = \lambda V_h q_0 / v_I = \lambda V_h q_v \quad (1);$$

$$N_e = N_i + N_{\text{тр}} \quad (2)$$

$$N_i = N_{\text{уз}} / \eta_i, \text{ или } N_i = N_{\text{ад}} / \eta_i \quad (3);$$

$$N_e = N_i / \eta_{\text{мех}} \quad (4); \quad \eta_e = \eta_i \eta_{\text{мех}} \quad (5)$$



## Теоретический компрессор.

$$\varepsilon_T = Q_{0T} / N_{iT} \quad (1);$$

$$Q_{0T} = G_{aT} q_0 \quad (2)$$

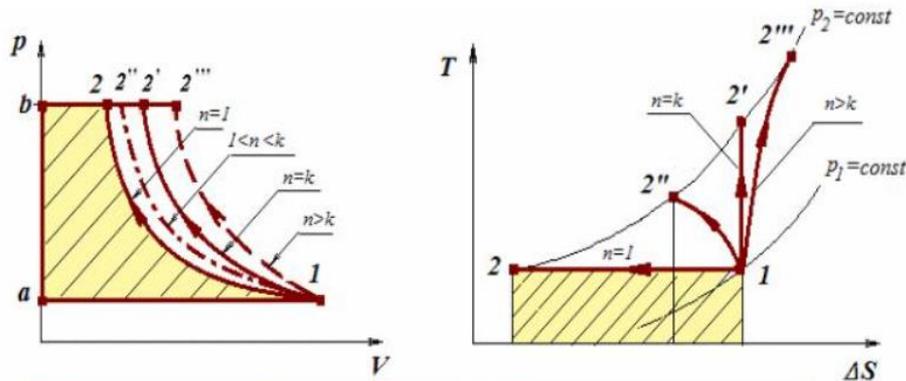
$$N_{iT} = p_{iT} V_T \quad (3)$$

## Регулирование холодопроизводительности:

- Пуск-остановка;
- Байпасирование;
- Дросселирование всасываемого р.в.;
- Изменение частоты вращения Э.Д.;
- Впрыск жидкости (пара);

Энергоэффективность способа регулирования

$$X = \frac{q_{0P}}{q_{0H}}, \quad X = f(t_0)$$



1-2 - изотермический процесс;

1-2'' - политропное сжатие;

1-2' - адиабатическое сжатие;

1-2''' - политропное сжатие;

Рис.1

# Интенсификация процесса теплообмена

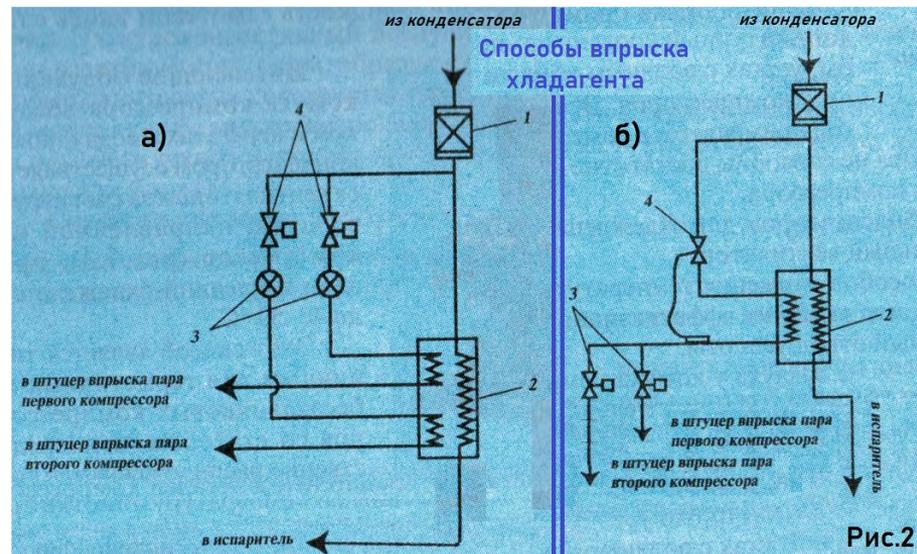
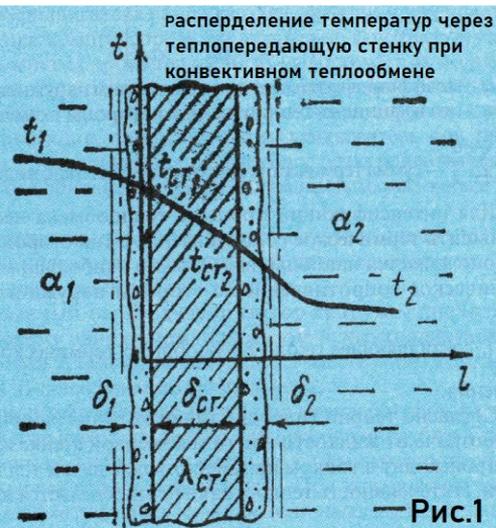
## в СПК

$Q = k F(t_1 - t_2)$  – процесс теплопередачи

С повышением  $k$  уменьшаются габариты, масса, стоимость КМ, т.е. потребность интенсификации процессов теплообмена обусловлена необходимостью экономии энергетических и материальных ресурсов.

Где  $R_{\alpha_1}, R_{\lambda}, R_{\alpha_2}$  –  
частные  
термические  
сопротивления,  
теплоотдачи со  
стороны горячей  
среды,  
теплопроводности  
стенки,  
охлаждающей  
среды.

$$k = \frac{1}{R_{\alpha_1} + R_{\lambda} + R_{\alpha_2}}$$



а) с помощью капиллярной трубки:  
1 - фильтр-осушитель; 2 - теплообменник;  
3 - капиллярная трубка; 4 - соленоидные вентили;

б) с помощью TRV:  
1 - фильтр-осушитель; 2 - теплообменник;  
3 - соленоидные вентили; 4 - TRV;

# Влияние свойств хладагентов на работу спирального компрессора

## Термодинамические свойства хладагентов

Холодильный коэффициент —  $\varepsilon = \frac{Q_0}{N}$ ; Скрытая теплота парообразования -  $r$ , кДж/кг;

Удельный объем пара -  $v$ , м<sup>3</sup>/кг; Давление и температура насыщения при кипении -  $P_0$  и  $t_0$  и конденсации -  $P_k$  и  $t_k$  хладагента; степень повышения давления —  $\pi = P_k / P_0$ ;

Разность  $P_k - P_0$ ; Критические значения  $P_{кр}$  и  $t_{кр}$ .

## Теплофизические свойства хладагентов

коэффициента теплопроводности -  $\lambda$ , Вт/м•К; плотность -  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> и динамическая вязкость -  $\mu$ , Па•с; теплоёмкость -  $C_p$  и  $C_v$ , кДж/кг•К; отношение -  $C_p / C_v$

## Физико-химические свойства хладагентов

растворимость в масле и воде, электропроводность и коэффициент токсичной опасности, который равен делению плотности паров при 20 град С на предельно допустимую концентрацию (мг/м<sup>3</sup>):  $K_{Т0} = \rho_{20} / \text{ПДК}$ .

# Свойства некоторых хладагентов

В СПК используются:

Высокотемпературные (кондиционирование): R407C, R134A,

R410A, R513A;

Среднетемпературные: R134A, R404a, R407A/C/F,

R448A/449A, R450A, R513A;

Низкотемпературные: R404A, R407A/F, R448A/449A

\*В компрессорах с впрыском жидкости

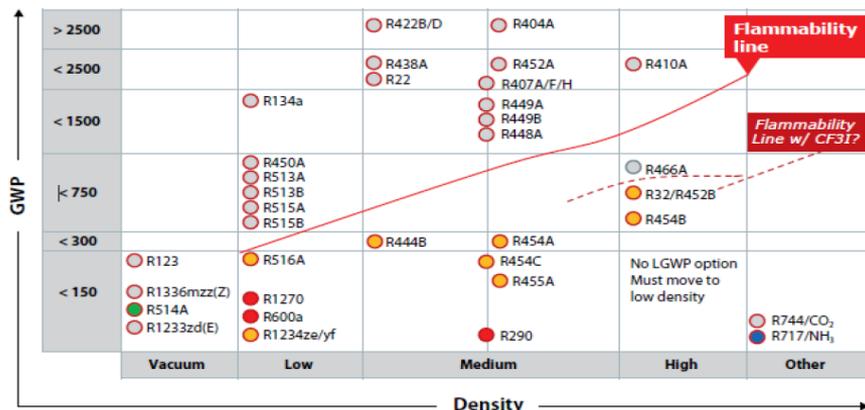


Рис.1

## Таблица свойств некоторых хладагентов.

Хладагент	Формула	Темпер. глайд	GWP	Класс безопасности	Температура кипения при 1 атм.	Критич. давление МПа и темпер. С
R134a	CF3-CH2F	0	1300	A1	-26,1	4,1/101,2
R404A	R125+R134a+R143A	0,7	3780	A1	-46,5	3,73/72,1
R410A	R32+R125	<0,17	1980	A1	-52,7	4,95/72,5
R407A	R32+R125+R134a	6,6	2100	A1	-45,8	4,2/82,75
R407C	R32+R125+R134a	≈5	1530	A1	-43,7	4,82/87,3
R407F	R32+R125+R134a		1824	A1		5/96,1
R448A	R32+R125+R134a+R1234yf	≈5,5	1330	A1	-46,12	4,7/83,7
R449A	R32+R125+R134a+R1234yf	≈5,5	1397	A1	-46	4,5/81,5
R450A	R134a+R1234ze	8	600	A1	-23,1	3,82/104,4
R507A	R143+R125	0,7	3850		-47	3,79/70,9
R513A	R134a+R1234yf	0	630	A1	-28	3,8/96,5
R290	C3H8	0	3	A3	-42,1	4,2/96,7
R600	(CH3) 3 CH	0	3	A3	-11,6	3,6/135
R744	CO2	0	1	A1	-57	7,4/31,1
HFO1234yf	CH2FCF3	0	4	A2L	-29	3,4/94,7
HFOR1234ze	C3H2F4	<1	6	A2L	-19	3,64/109,35
Solstice L-41	R32/R1234yf+R1234ze		698	A2L	-51	5,2/77,1

Рис.1 – Экологичность и безопасность хладагентов.

# Монреальский протокол и Кигалийская поправка

Монреальский протокол + Кигалийская поправка (15 октября 2016 года в г. Кигали)

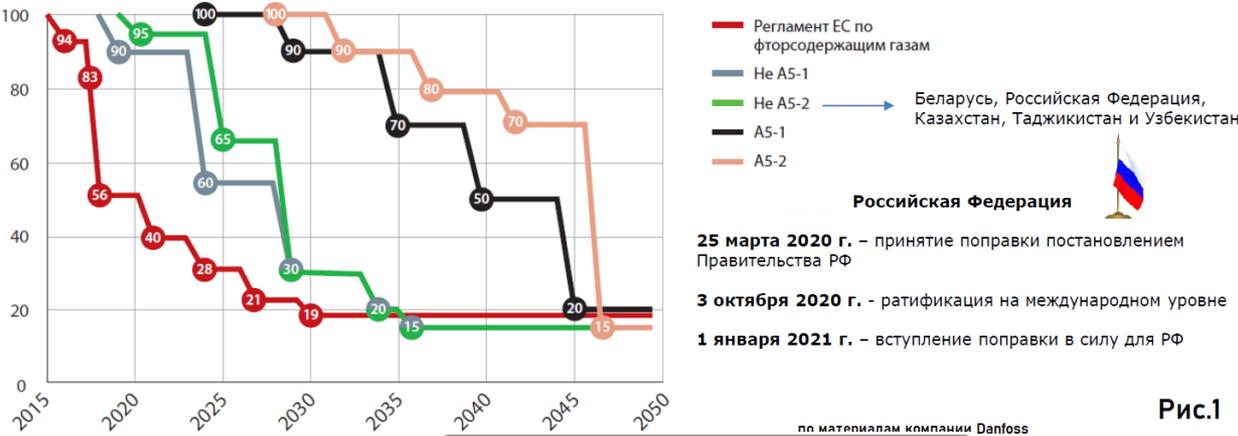


Рис.1 – График сокращения ГФУ.

Рис.2 – Перспектива использования хладагентов.

Рис.3 – Некоторые отличия CO2

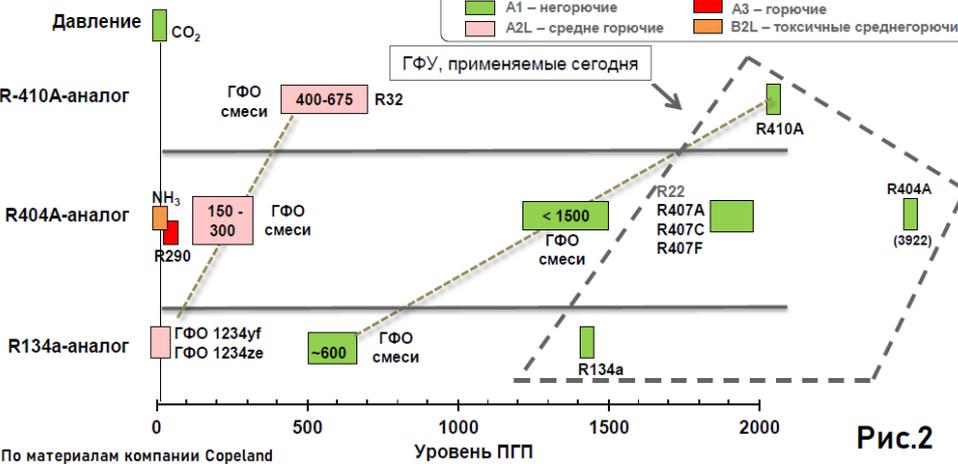


Рис.2

Рис.1

Хладагент	Эффективность vs. R22 [%]		Удельная объемная холодопроизвод. vs. R22 [%]		Давление vs. R22 [%] SDT 45°C ⊕	Темп. глайд [K]	GWP	Категория безопасности ⊕
	MT ⊕	LT ⊕	MT ⊕	LT ⊕				
HFC хладагенты								
R134a	102	--	62	--	67	0	1300	A1
R404A (R507A)	95	105	102	112	118 (122)	0.7	3780 (3850)	A1
R407A	99	106	96	95	108	6.6	1990	A1
R410A	95	94	140	145	157	< 0.2	1980	A1
Природные хладагенты NH <sub>3</sub> , R290, R1270 в обзоре на рассматриваются								
CO <sub>2</sub>	85	100	470	720	500 (транскритический)	0	1	A1

# Особенности работы СПК на R744

# CO<sub>2</sub>

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

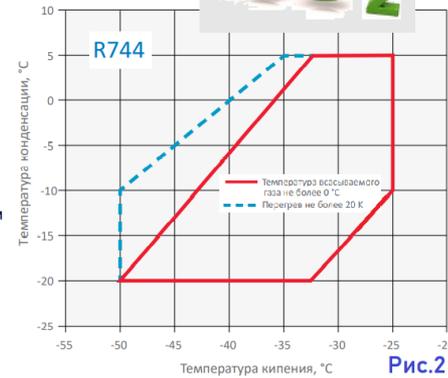
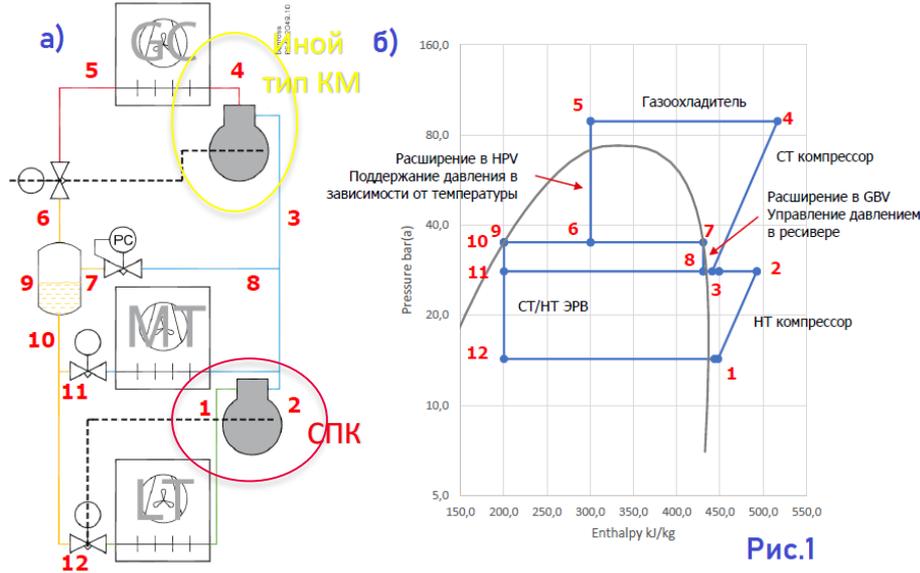
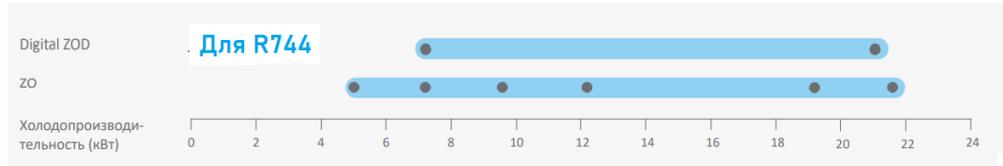


Рис.1 CO<sub>2</sub> Транскритическая бустерная система

Рис.2 – Рабочая область низкотемпературных СПК для R744

Рис.3 Диапазон холодопроизводительности СПК для R744



Условия по EN12900 для R744: кипение -35 °С, конденсация -5 °С, перегрев на всасывании 10 К, переохлаждение 0 К

- Высокая удельная холодопроизводительность;
- Малая объёмная производительность и металлоёмкость;
- Эффективная работа СПК с малым числом ступеней сжатия.

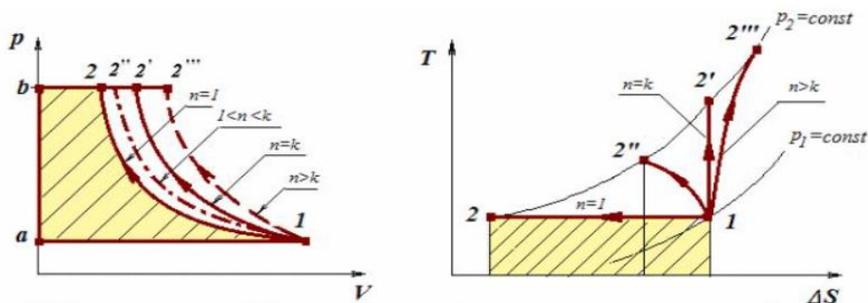
- Высокая температура нагнетания;
- Высокие нагрузки на механизмы;
- Чувствителен к пульсациям давлений в камерах всасывания и нагнетания;
- Существенное влияние перегрева на массовый расход хладагента;
- Значительное влияние перетечек на характеристики СПК;

# Перспектива развития технологии спирального компрессора

Перспективу развития спиральной технологии можно с достаточной точностью прогнозировать основываясь на модели рабочих процессов, в рамках сопутствующих задач, стоящих перед исследователями. А перспектива развития конкретных серийных образцов в той или иной сфере их применения, в том числе будет зависеть от конкретных требований предъявляемых в ней, что окажет влияние прежде всего на производителя в плане адаптации или разработки новых образцов конструкций и поиска новых конструкционных материалов. Общим же трендом, задающим тон развитию технологии сегодня оказывается экологическая составляющая.

$$\frac{dP}{d\varphi} = \frac{k-1}{\omega \cdot V} \left( \omega \cdot \frac{d\theta}{d\varphi} + m_{np} \cdot i_{np} - m_{ym} \cdot i - \frac{k}{k-1} \cdot \omega \cdot p \cdot \frac{dV}{d\varphi} \right)$$

$$\frac{dT}{d\varphi} = \frac{(k-1) \cdot T}{p \cdot V \cdot \omega} \cdot \left[ \omega \cdot \frac{d\theta}{d\varphi} + \frac{k-1}{k} \cdot (m_{np} - m_{ym}) \cdot i + m_{np} \cdot (i_{np} - i) - p \cdot \omega \cdot \frac{dV}{d\varphi} \right]$$



1-2 – изотермический процесс;

1-2'' – политропное сжатие;

1-2' – адиабатическое сжатие;

1-2''' – политропное сжатие;

Рис.1



Рис.2

**Спасибо за внимание!**

[www.ifmo.ru](http://www.ifmo.ru)

**IT'S**MO *re than a*  
**UNIVERSITY**