УДК 621.594

Анализ влияния геометрических характеристик дисковых насадок регенератора на эффективность работы газовой холодильной машины для вымораживания диоксида углерода

Канд. техн. наук **М. М. ДАНИЛОВ**[1], **Е. Е. ЛЯДОВА**[2],
[1]refmach@mail.ru, [2]elena.lyadova@inbox.ru
Университет ИТМО

Проведено исследование по установлению оптимальных параметров дисковых насадок регенераторов для газовой холодильной машины. Выбраны параметры геометрических характеристик дисковых насадок для сравнения эффективности их применения. Проведена оценка влияния параметров рифленой ленты на удельную поверхность насадки, относительный свободный объем и эквивалентный диаметр насадки. Выполнен анализ влияния геометрических характеристик дисковых насадок на расчетные параметры регенераторов, из которых наиболее важными представляются гидравлическое сопротивление и длина насадки. Данная оценка дисковых насадок с различной геометрией рифленой ленты необходима для повышения эффективности процесса вымораживания диоксида углерода в турбодетандере газовой холодильной машины.

Ключевые слова: дисковая насадка, геометрические характеристики, удельная поверхность насадки, относительный свободный объем, гидравлическое сопротивление, газовая холодильная машина, вымораживание диоксида углерода.

Информация о статье:
Поступила в редакцию 28.01.2019, принята к печати 09.04.2019
DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-29-36
Язык статьи — русский
Для цитирования:
Данилов М. М., Лядова Е. Е. Анализ влияния геометрических характеристик дисковых насадок регенератора на эффективность работы газовой холодильной машины для вымораживания диоксида углерода // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 29–36.

Regenerator disk chequers: the influence of their geometric characteristics on the efficiency of gas refrigerating machine for carbon dioxide freezing out

Ph. D. **M. M. DANILOV**[1], **E. E. LYADOVA**[2]
[1]refmach@mail.ru, [2]elena.lyadova@inbox.ru
ITMO University

The article investigates optimum parameters of regenerator disk chequers for gas refrigerating machine. The parameters of disk chequer geometric characteristics providing their best efficency are selected. The influence of grooved belt parameters on specific surface of the chequer, as well as its relative void and equivalent diameter is evaluated. The influence of disk chequer geometric characteristics on the design parameters of regenerators is analyzed, the most important characteristics being the length of the chequer and its hydraulic resistance. The evaluation of the disk chequers with grooved belts of different geometry is aimed at providing the most effective carbon dioxide freezing out in turbo-expander of gas refrigerating machine.

Keywords: disk chequer, geometric characteristics, specific surface of chequer, relative void, hydraulic resistance, gas refrigerating machine, carbon dioxide freezing out.

Article info:
Received 28/01/2019, accepted 09/04/2019
DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-29-36
Article in Russian
For citation:
Danilov M. M., Lyadova E. E. Regenerator disk chequers: the influence of their geometric characteristics on the efficiency of gas refrigerating machine for carbon dioxide freezing out. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2019. No 1. p. 29–36.

Введение

Газовые холодильные машины, работающие по регенеративному циклу, дают возможность получить весьма низкую температуру, величина которой соответствует температуре насыщения (сублимации) диоксида углерода [1–4]. Если рабочим веществом газовой холодильной машины является газовая смесь, содержащая диоксид углерода, то при ее расширении в турбодетандере, часть диоксида углерода перейдет в твердое состояние в виде кристаллов [5–7].

Эффективность процесса вымораживания диоксида углерода (процесса кристаллообразования) зависит от степени расширения газового потока в турбодетандере, которая будет тем выше, чем больше будет давление перед турбодетандером и чем меньше будет давление на выходе из турбодетандера [8]. Прежде чем поступить в турбодетандер, газовый поток охлаждается до температуры, близкой к температуре насыщения диоксида углерода, в парных регенераторах. Отсюда следует, что чем меньшее сопротивление создает насадка регенераторов, тем большее давление будет иметь газовая смесь, а это значит, что бóльшая степень расширения будет способствовать повышению эффективности процесса вымораживания. С другой стороны, понижению давления за турбодетандером будет способствовать уменьшение противодавления, которое создает опять же насадка регенераторов, куда поступает газовый поток, выходящий из турбодетандера. Поэтому важно стремиться уменьшить сопротивление насадки регенераторов как по прямому потоку, поступающему к турбодетандеру, так и по обратному потоку, выходящему из турбодетандера.

Теплопередача в регенераторах, в отличие от теплообменников, осуществляется передачей тепла от газового потока к холодной насадке (в прямом потоке) с последующей отдачей этого тепла от теплой насадки к холодному обратному газовому потоку. Поэтому для непрерывности процесса используются парные регенераторы, когда по одному регенератору идет прямой поток, а по второму — обратный поток. Через определенное время направление потоков меняется [9–11].

Целью данной работы является установление оптимальных параметров дисковых насадок регенераторов для газовой холодильной машины, обеспечивающих повышение эффективности процесса вымораживания диоксида углерода в турбодетандере.

Геометрические характеристики дисковых насадок

Насадка является главным элементом, определяющим эффективность работы регенератора. В качестве насадки в регенераторах газовых холодильных машин используются диски из намотанных на втулку двух алюминиевых рифленых лент. Гофры на ленте располагаются под углом 45° или 60°. При намотке, ленты складываются так, чтобы их гофры были наклонены в разные стороны.

Шаг рифления t зависит от модуля шестерен, между которыми прокатывается лента. Обычно используются шестерни с модулями 1,5; 1,25 и 1,0 [12, 13]. Это соответствует шагу рифления 4,71 мм; 3,92 мм и 3,14 мм. Соотношение между высотой рифа (гофра) и шагом рифления варьируется в пределах 0,3…0,5. Поэтому, для каждого шага рифления будет рассматриваться три различных значения высоты рифа h, а именно:

для t=4,71 мм — h=1,4 мм, h=1,9 мм, h=2,3 мм;
для t=3,92 мм — h=1,2 мм, h=1,6 мм, h=2,0 мм;
для t=3,14 мм — h=0,9 мм, h=1,2 мм, h=1,6 мм.

Кроме шага рифления и высоты рифа, к геометрическим характеристикам дисковых насадок относится

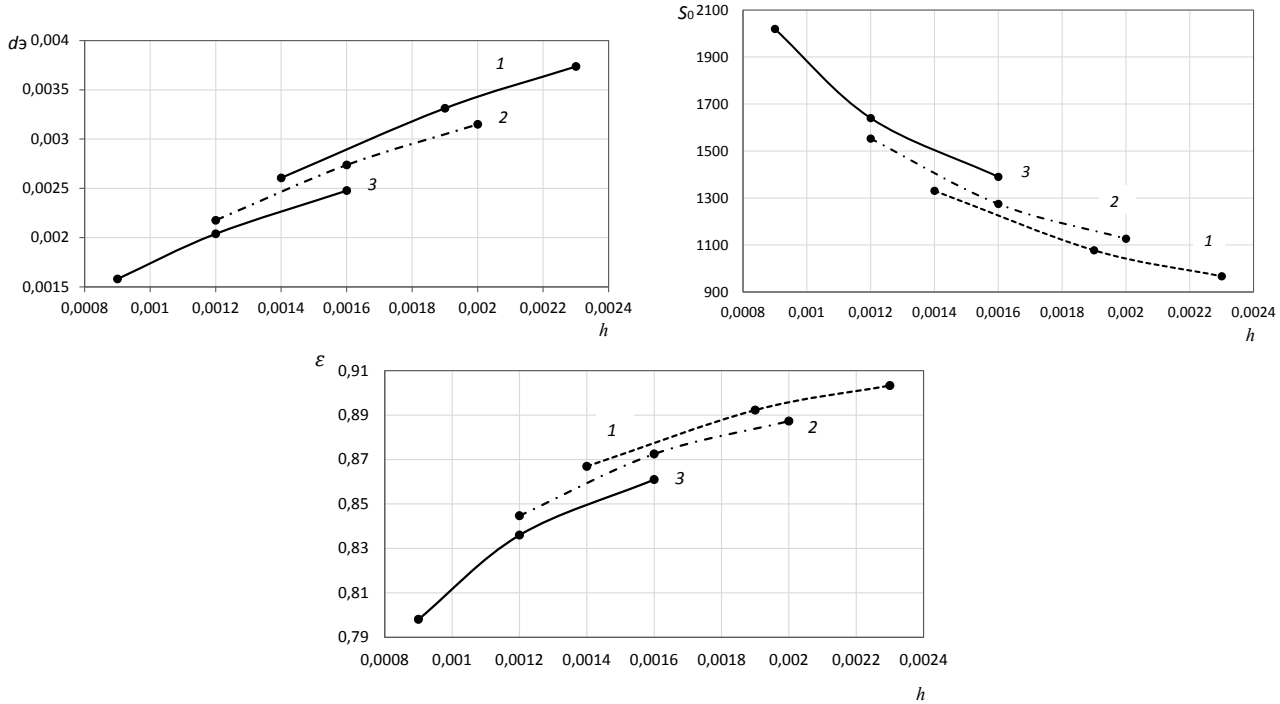

Рис. 1. Геометрические характеристики дисковых насадок с толщиной ленты 0,2 мм: 1 — t_1=4,71 мм; 2 — t_2=3,92 мм; 3 — t_3=3,14 мм

FIg. 1. Geometric characteristics of disc chequers with the belt thickness of 0.2 mm: 1 — t_1=4.71mm; 2 — t_2=3.92 mm; 3 — t_3=3.14 mm

Таблица 1

Геометрические характеристики дисковых насадок

Table 1

Disc chequers geometric characteristics

№ п/п	Наименование	Обозначение	δ=0,0002 м								
			Варианты								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Шаг рифления, м	t	0,00471	0,00471	0,00471	0,00392	0,00392	0,00392	0,00314	0,00314	0,00314
2	Высота гофра, м	h	0,0014	0,0019	0,0023	0,0012	0,0016	0,002	0,0009	0,0012	0,0016
3	Удельная поверхность, м²/м³	S_o	1331	1078	967	1553	1275	1127	2019	1640	1390
4	Относительный свободный объем	ε	0,867	0,892	0,903	0,845	0,873	0,887	0,798	0,836	0,861
5	Эквивалентный диаметр, м	$d_э$	0,00261	0,00331	0,00374	0,00218	0,00274	0,00315	0,00158	0,00204	0,00248
			δ=0,0004 м								
			Варианты								
			10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Шаг рифления, м	t	0,00471	0,00471	0,00471	0,00392	0,00392	0,00392	0,00314	0,00314	0,00314
2	Высота гофра, м	h	0,0014	0,0019	0,0023	0,0012	0,0016	0,002	0,0009	0,0012	0,0016
3	Удельная поверхность, м²/м³	S_o	1288	1036	927	1494	1217	1071	1936	1553	1306
4	Относительный свободный объем	ε	0,742	0,793	0,815	0,701	0,757	0,786	0,613	0,689	0,739
5	Эквивалентный диаметр, м	$d_э$	0,00231	0,00306	0,00351	0,00188	0,00249	0,00293	0,00127	0,00178	0,00226
			δ=0,0005 м								
			Варианты								
			19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Шаг рифления, м	t	0,00471	0,00471	0,00471	0,00392	0,00392	0,00392	0,00314	0,00314	0,00314
2	Высота гофра, м	h	0,0014	0,0019	0,0023	0,0012	0,0016	0,002	0,0009	0,0012	0,0016
3	Удельная поверхность, м²/м³	S_o	1269	1016	908	1469	1190	1045	1903	1515	1267
4	Относительный свободный объем	ε	0,683	0,746	0,773	0,633	0,703	0,739	0,524	0,621	0,683
5	Эквивалентный диаметр	$d_э$	0,00215	0,00294	0,0034	0,00172	0,00236	0,00283	0,00110	0,00164	0,00216

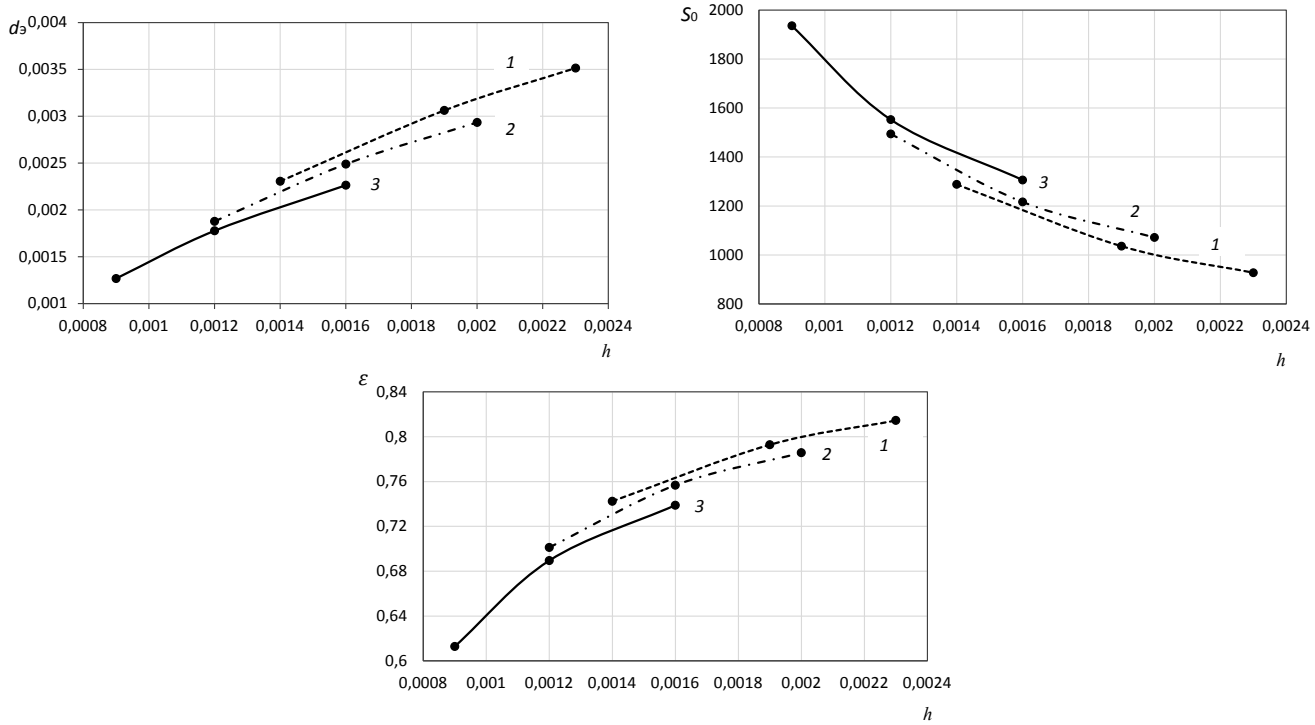

Рис. 2. Геометрические характеристики дисковых насадок с толщиной ленты 0,4 мм: 1 — t_1=4,71 мм; 2 — t_2=3,92 мм; 3 — t_3=3,14 мм

Fig. 2. Geometric characteristics of disc chequers with the belt thickness of 0.4 mm: 1 — t_1=4.71mm; 2 — t_2=3.92 mm; 3 — t_3=3.14 mm

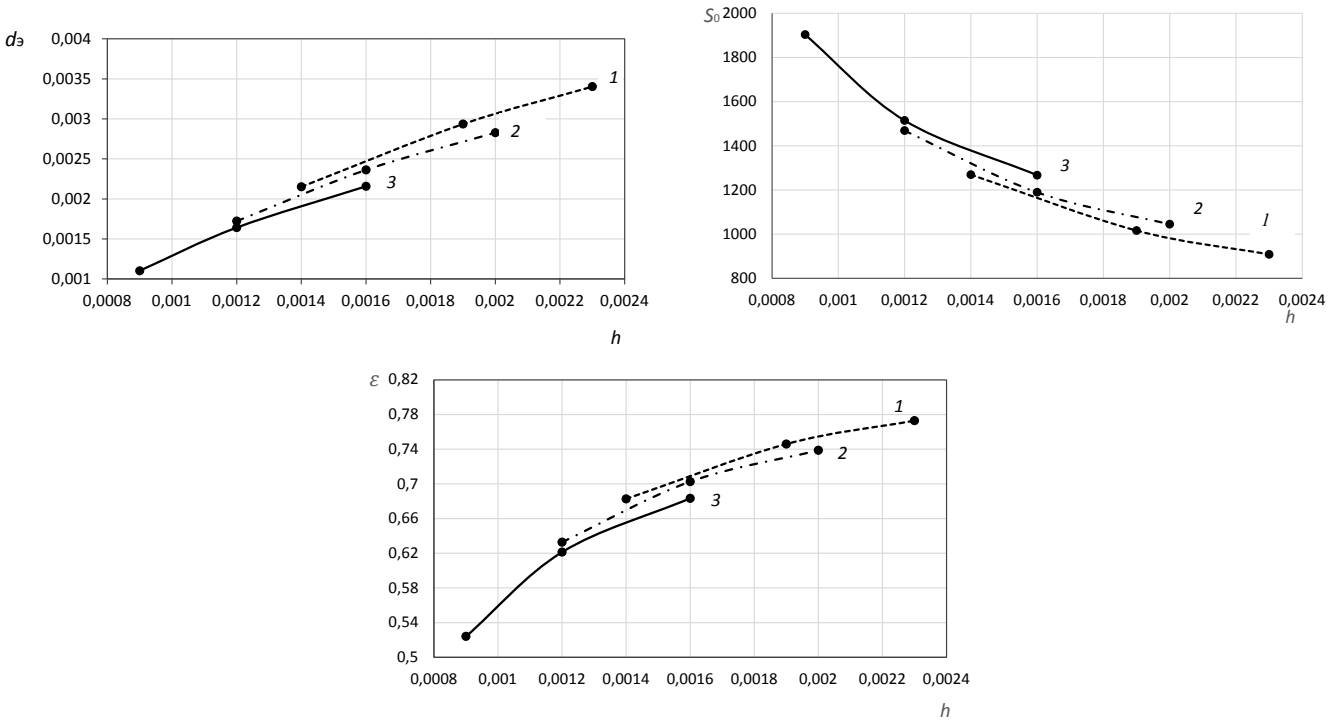

Рис. 3. Геометрические характеристики дисковых насадок с толщиной ленты 0,5 мм: 1 — t_1=4,71 мм; 2 — t_2=3,92 мм; 3 — t_3=3,14 мм

Fig. 3. Geometric characteristics of disc chequers with the belt thickness of 0.5 mm: 1 — t_1=4.71mm; 2 — t_2=3.92 mm; 3 — t_3=3.14 mm

толщина ленты δ, а также такие комплексные параметры как удельная поверхность насадки S_o, м^2/м^3; относительный свободный объем ε и эквивалентный диаметр $d_э$, которые определяются по формулам:

$$S_o = 3{,}32\frac{h-\delta}{h\cdot t\cdot \sin\left\{\operatorname{arctg}\left[\frac{2(h-\delta)}{t}\right]\right\}};$$

Что касается толщины δ, то обычно используется лента толщиной 0,2 мм; 0,4 мм или 0,5 мм.

Рассмотрим 27 вариантов возможных геометрических характеристик дисковых насадок (табл. 1). Зависимость величины комплексных параметров дисковых насадок от толщины ленты, шага рифления и высоты гофра представлены на рис. 1, 2 и 3.

Уменьшение толщины ленты ведет к увеличению всех комплексных параметров — S_o, ε, $d_э$. С точки зрения компактности насадки, наибольшую удельную поверхность имеет лента толщиной 0,2 мм, шагом рифления 3,14 мм и высотой гофра 0,9 мм. Наименьшему сопротивлению насадки должна соответствовать лента с наибольшим свободным объемом, то есть лента толщиной 0,2 мм, шагом рифления 4,71 мм и высотой гофра 2,3 мм.

Влияние геометрических характеристик дисковых насадок на расчетные параметры регенератора

К числу расчетных параметров регенератора, непосредственно зависящих от геометрических характеристик дисковых насадок, относятся:

— скорость фильтрации прямого и обратного потоков $W_{пр}$ и $W_{обр}$;

— критерий Рейнольдса для прямого и обратного потоков $Re_{пр}$ и $Re_{обр}$;

— критерий Нуссельта для прямого и обратного потоков $Nu_{пр}$ и $Nu_{обр}$;

— коэффициент теплоотдачи α;

— коэффициент теплопередачи K;

— длина насадки в регенераторе $L_н$;

— гидравлическое сопротивление насадки регенератора по прямому обратному потоку $\Delta p_{пр}$ и $\Delta p_{обр}$.

Скорость фильтрации:

$$W = \frac{4G}{\rho\pi D_p^2\varepsilon},$$

где G — массовый расход потока;

ρ — плотность потока;

D_p — диаметр регенератора.

Критерий Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{W\cdot d_э\cdot\rho}{\mu},$$

где μ — динамический коэффициент вязкости потока.

Критерий Нуссельта:

$$\mathrm{Nu} = 2{,}36\cdot \mathrm{Re}^{0{,}76}\left(\frac{b}{d_э}\right)^{-m},$$

где b — ширина лента после прокатывания;

$m = 0{,}759 + \frac{7{,}05}{b\cdot 10^2}$ — геометрический коэффициент гофрированной ленты.

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\cdot\lambda}{d_э^2\cdot S_o},$$

где λ — коэффициент теплопроводности потока.

Длина насадки в регенераторе:

$$L_{н} = \frac{4Q_p}{\pi \cdot D_p^2 \cdot S_o \cdot K\left(\Delta T_{ср} - h_{ср}\right)},$$

где Q_p — тепловая нагрузка на регенератор по прямому потоку;

$K=(\alpha/2)\,\eta_р$ — расчетный коэффициент теплопередачи регенератора;

$\eta_р=1-(T_1-T_4)/(T_1-T_2)$ — теоретический КПД регенератора;

$\Delta T_{ср}=0{,}5\,[(T_1-T_4)+(T_2-T_3)]$ — средняя разность температур на концах регенератора;

$h_{ср}=(c/6)\,[(T_1-T_4)+(T_2-T_3)]$ — средняя высота температурной петли «гистерезиса»;

T_1 — температура прямого потока на входе в регенератор;

T_2 — температура прямого потока на выходе из регенератора;

T_3 — температура обратного потока на входе в регенератор;

T_4 — температура обратного потока на выходе из регенератора;

c — постоянная, $c = 1 - \dfrac{2}{\dfrac{\Pi}{2}+2}$;

П — приведенная продолжительность периода переключения потоков, $\Pi = \dfrac{2\alpha \cdot \tau_{1/2}}{\delta \cdot \rho_{ал} \cdot c_{ал}}$;

$\tau_{1/2}$ — время полуцикла (продолжительность движения прямого или обратного потока);

$\rho_{ал}$ — плотность металла ленты (алюминия);

$c_{ал}$ — теплоемкость металла ленты (алюминия).

Коэффициент гидросопротивления:

$$\xi = \left(0{,}37 + \frac{135}{\mathrm{Re}}\right) \cdot \varepsilon \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^{0{,}51},$$

где $\delta_0=0{,}0004$ м — базовая толщина ленты.

Гидравлическое сопротивление насадки регенератора:

$$\Delta p = \xi \frac{W^2 \cdot \rho \cdot L_{н} \cdot \zeta}{2d_э},$$

где $\zeta=2{,}6$ — эмпирический коэффициент увеличения гидросопротивления насадки из-за выпадения влаги и инея.

Зависимость расчетных параметров регенераторов от геометрических характеристик дисковых насадок приведена в табл. 2 и на рис. 4–7. Исходные данные (расход, температура и т. д.) для определения расчетных параметров регенератора соответствуют результатам расчета регене-

Таблица 2

Расчетные параметры регенератора

Table 2

Regenerator design parameters

№ п/п	Наименование	Обозначение	Варианты								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Скорость фильтрации прямого потока, м/с	$W_{пр}$	1,156	1,124	1,110	1,187	1,149	1,130	1,256	1,199	1,164
2	Скорость фильтрации обратного потока, м/с	$W_{обр}$	2,362	2,295	2,267	2,425	2,347	2,308	2,566	2,450	2,379
3	Число Рейнольдса для прямого протока	$\mathrm{Re}_{пр}$	684	845	942	587	714	808	451	555	655
4	Число Рейнольдса для обратного протока	$\mathrm{Re}_{обр}$	678	838	934	581	708	801	447	551	650
5	Критерий Нуссельта для прямого и обратного потоков (практически одинаковы)	$\mathrm{Nu}_{пр}=\mathrm{Nu}_{обр}$	26,2	38,5	46,8	19,7	28,4	35,5	12,0	17,8	24,2
6	Коэффициент теплоотдачи	α	57,43	64,50	68,64	53,03	58,76	62,89	46,93	51,62	56,12
7	Расчетный КПД регенератора	K	28,02	31,47	33,49	25,87	28,67	30,69	22,90	25,19	27,38
8	Длина насадки в регенераторе, м	$L_{н}$	3,305	3,653	3,835	3,055	3,375	3,578	2,638	2,968	3,234
9	Гидравлическое сопротивление насадки регенератора по прямому потоку, кПа	$\Delta p_{пр}$	2,47	1,95	1,74	2,97	2,35	2,05	4,17	3,18	2,60
10	Гидравлическое сопротивление насадки регенератора по обратному потоку, кПа	$\Delta p_{обр}$	4,94	3,90	3,47	5,94	4,70	4,09	8,33	6,35	5,20

№ п/п	Наименование	Обозначение	Варианты								
			10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Скорость фильтрации прямого потока, м/с	$W_{пр}$	1,351	1,265	1,231	1,430	1,325	1,276	1,636	1,454	1,357
2	Скорость фильтрации обратного потока, м/с	$W_{обр}$	2,759	2,583	2,514	2,921	2,707	2,607	3,342	2,970	2,772
3	Число Рейнольдса для прямого протока	$\mathrm{Re}_{пр}$	707	879	982	610	749	850	471	587	698
4	Число Рейнольдса для обратного протока	$\mathrm{Re}_{обр}$	701	872	974	604	742	843	466	582	691
5	Критерий Нуссельта для прямого и обратного потоков (практически одинаковы)	$\mathrm{Nu}_{пр}=\mathrm{Nu}_{обр}$	24,0	36,9	45,6	17,7	26,9	34,5	10,0	16,3	23,3
6	Коэффициент теплоотдачи	α	69,29	75,18	78,89	66,42	70,65	74,14	64,03	65,84	68,99
7	Расчетный КПД регенератора	K	33,81	36,68	38,49	32,41	34,47	36,18	31,24	32,12	33,66
8	Длина насадки в регенераторе, м	$L_{н}$	2,755	3,173	3,387	2,472	2,865	3,108	1,975	2,399	2,729
9	Гидравлическое сопротивление насадки регенератора по прямому потоку, кПа	$\Delta p_{пр}$	3,83	2,90	2,55	4,71	3,55	3,03	7,09	4,99	3,90
10	Гидравлическое сопротивление насадки регенератора по обратному потоку, кПа	$\Delta p_{обр}$	7,65	5,80	5,09	9,41	7,10	6,04	14,17	9,96	7,79

Продолжение таблицы 2

№ п/п	Наименование	Обозначение	Варианты								
			19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Скорость фильтрации прямого потока, м/с	$W_{пр}$	1,469	1,344	1,297	1,584	1,427	1,357	1,913	1,614	1,467
2	Скорость фильтрации обратного потока, м/с	$W_{обр}$	3,000	2,746	2,650	3,237	2,915	2,773	3,907	3,296	2,997
3	Число Рейнольдса для прямого протока	$Re_{пр}$	718	896	1003	620	766	872	479	601	719
4	Число Рейнольдса для обратного протока	$Re_{обр}$	711	888	994	615	759	864	474	596	713
5	Критерий Нуссельта для прямого и обратного потоков (практически одинаковы)	$Nu_{пр}=Nu_{обр}$	22,7	36,0	45,0	16,5	26,0	34,0	8,9	15,4	22,8
6	Коэффициент теплоотдачи	α	76,54	81,29	84,63	74,97	77,66	80,56	76,52	74,83	76,57
7	Расчетный КПД регенератора	K	37,35	39,66	41,29	36,58	37,89	39,30	37,33	36,51	37,36
8	Длина насадки в регенераторе, м	$L_н$	2,513	2,965	3,195	2,214	2,645	2,909	1,676	2,151	2,517
9	Гидравлическое сопротивление насадки регенератора по прямому потоку, кПа	$\Delta p_{пр}$	4,54	3,35	2,91	5,68	4,14	3,48	9,00	5,96	4,53
10	Гидравлическое сопротивление насадки регенератора по обратному потоку, кПа	$\Delta p_{обр}$	9,07	6,70	5,82	11,33	8,27	6,94	17,98	11,91	9,04

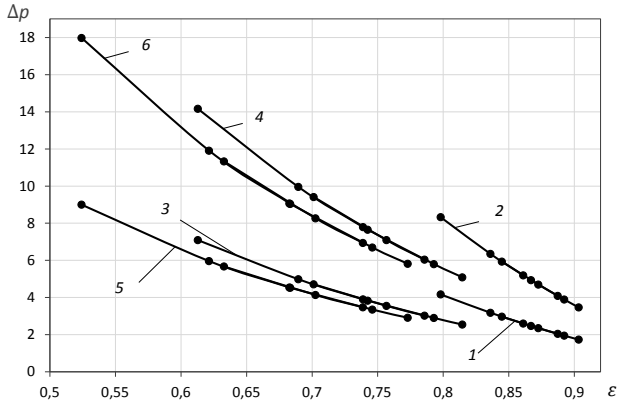

Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления дисковой насадки от относительного свободного объема и толщины ленты: 1 — $\Delta p_{пр}$ при $\delta_1=0{,}0002$ м; 2 — $\Delta p_{обр}$ при $\delta_1=0{,}0002$ м; 3 — $\Delta p_{пр}$ при $\delta_2=0{,}0004$ м; 4 — $\Delta p_{обр}$ при $\delta_2=0{,}0004$ м; 5 — $\Delta p_{пр}$ при $\delta_3=0{,}0005$ м; 6 — $\Delta p_{обр}$ при $\delta_3=0{,}0005$ м

Fig. 4. The dependence of disc chequer hydraulic resistance on relative void and belt thickness: 1 — $\Delta p_{пр}$ by $\delta_1=0.0002$ m; 2 — $\Delta p_{обр}$ by $\delta_1=0.0002$ m; 3 — $\Delta p_{пр}$ by $\delta_2=0.0004$ m; 4 — $\Delta p_{обр}$ by $\delta_2=0.0004$ m; 5 — $\Delta p_{пр}$ by $\delta_3=0.0005$ m; 6 — $\Delta p_{обр}$ by $\delta_3=0.0005$ m

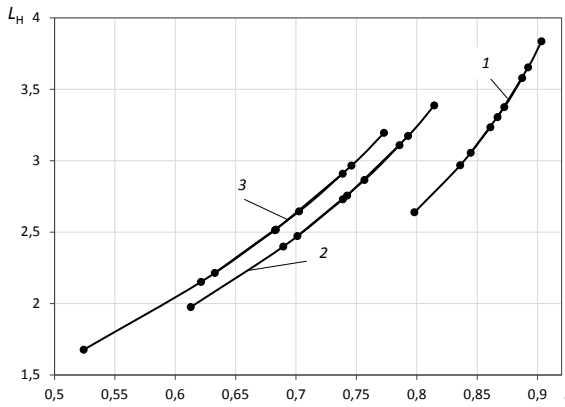

Рис. 5. Зависимость длины насадки от относительного свободного объема и толщины ленты: 1 — $\delta_1=0{,}0002$ м; 2 — $\delta_2=0{,}0004$ м; 3 — $\delta_3=0{,}0005$ м

Fig. 5. The dependence of chequer length on relative void and belt thickness: 1 — $\delta_1=0.0002$ m; 2 — $\delta_2=0.0004$ m; 3 — $\delta_3=0.0005$ m

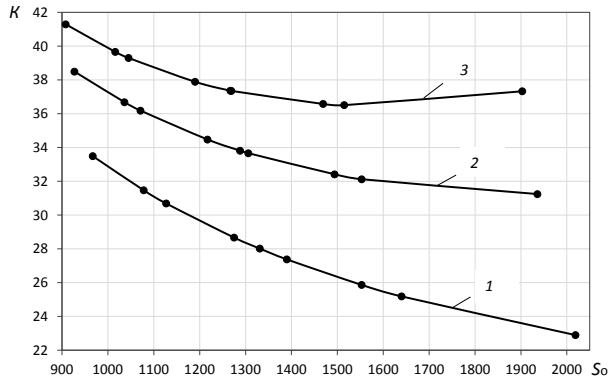

Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопередачи дисковой насадки от удельной поверхности и толщины ленты: 1 — $\delta_1=0{,}0002$ м; 2 — $\delta_2=0{,}0004$ м; 3 — $\delta_3=0{,}0005$ м

Fig. 6. The dependence of disk chequer heat-transfer coefficient on specific surface and belt thickness: 1 — $\delta_1=0.0002$ m; 2 — $\delta_2=0.0004$ m; 3 — $\delta_3=0.0005$ m

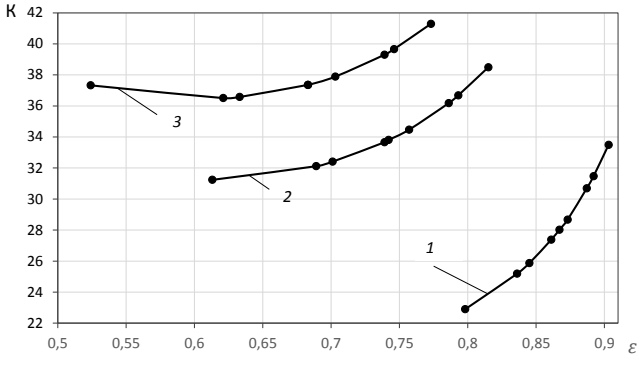

Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопередачи дисковой насадки от относительного свободного объема и толщины ленты: 1 — $\delta_1=0{,}0002$ м; 2 — $\delta_2=0{,}0004$ м; 3 — $\delta_3=0{,}0005$ м

Fig. 7. The dependence of disk chequer heat-transfer coefficient on relative void and belt thickness: 1 — $\delta_1=0.0002$ m; 2 — $\delta_2=0.0004$ m; 3 — $\delta_3=0.0005$ m

ративной газовой холодильной машины, работающей в цикле с вымораживанием твердого диоксида углерода в процессе расширения в детандере [14]. Номера вариантов в табл. 2 соответствуют номерам вариантов табл. 1.

Выводы

В результате проведенного исследования, выявлено, что для комплектования газовой холодильной машины, используемой для вымораживания диоксида углерода, целесообразно выбирать регенераторы с дисковой насадкой, которая обеспечит наименьшее сопротивление движению потоков газовой смеси. Минимальные значения гидравлических сопротивлений по прямому и обратному потокам обеспечит дисковая насадка с толщиной ленты 0,2 мм и относительным свободным объемом 0,9. Этим значениям соответствует лента с шагом рифления 4,71 мм и высотой гофра 2,3 мм. Для обеспечения такой геометрии рифленой ленты необходимо прокатывать гладкую ленту через шестерни с модулем 1,5, а соотношение между высотой гофра и шагом рифления должно быть максимально возможным.

Использование такой дисковой насадки приведет к увеличению длины насадки и, следовательно, к увеличению габаритов регенераторов и всей газовой холодильной машины. Но увеличение капитальных затрат окупается повышением эффективности вымораживания диоксида углерода вследствие увеличения степени расширения газовой смеси в турбодетандере газовой холодильной машины.

Что касается процесса теплообмена, то его интенсивность возрастает с повышением относительного свободного объема и уменьшением удельной поверхности насадки, причем наибольшие значения коэффициента теплопередачи можно получить при использовании более толстой ленты (толщиной 0,5 мм). Это объясняется тем, что коэффициент теплопередачи повышается с уменьшением удельной поверхности и эквивалентного диаметра, а эти комплексные параметры будут тем ниже, чем толще лента. При уменьшении удельной поверхности в 2 раза коэффициент теплопередачи повышается в 1,5 раза, поэтому длина насадки, будучи обратно пропорциональна и удельной поверхности, и коэффициенту теплопередачи, при уменьшении удельной поверхности увеличивается, но в меньшей степени.

Получению конкретных результатов зависимости количества вымораживаемого диоксида углерода от геометрии используемых дисковых насадок будут направлены дальнейшие исследования по данной тематике.

Литература

1. *Порутчиков А. Ф., Крысанов К. С., Королёв И. А.* Новые области применения регенеративных холодильно-газовых машин // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 3. № 3 (21), С. 58–62.
2. *Кузнецов В. В.* Теоретический анализ термогазодинамических параметров газовых холодильных машин на температурный уровень 150-250К / Дис…. канд. техн. наук. Харьков, 2014. С. 24–37.
3. *Цой А. П., Ким И. А.* Холодильная техника и технология потребителей холода. Алматы, 2012. 510 с.
4. *Feliu J. A., Manzulli M., Alós M. A* Determination of Dry-Ice Formation during the Depressurization of a CO_2 Re-Injection System. CETCCUS, 2017.
5. *Данилов М. М., Смирнов А. С.* Основные особенности образования твердой фазы диоксида углерода // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 37–40.
6. *Данилов М. М., Медведев К. А.* Оценка возможности использования выхлопных газов автотранспорта для вымораживания сухого льда // Холодильная техника. 2016. № 6. С. 36–39.
7. *Данилов М. М., Назарова А. С.* Влияние параметров газовой смеси на величину образующихся кристаллов диоксида углерода // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование» 2016. № 4 (24). С. 1–5.
8. *Порутчиков А. Ф.* Разработка и анализ эффективности холодильных машин на диоксиде углерода, работающих на уровне температур –80 до –120 °С. Дис. … канд. техн. наук. М., 2017. 95 с.
9. *Ануров С. А.* Криогенные технологии разделения газов. М.: АР-Консалт, 2017. 233 с.
10. *Антонов А. Н, Архаров А. М., Архаров И. А.* Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты. Учебник для вузов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 536 с.
11. *Иванов А. Н., Белоусов В. Н., Смородин С. Н.* Теплообменное оборудование промпредприятии: учебное пособие. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 184 с.

References

1. Poruchikov A. F., Krysanov K. S., Korolev I. A. New applications of regenerative refrigerating gas machines. *Izvestiya MGTU "MAMI".* 2014, vol. 3, № 3 (21), Pp. 58–62. (in Russian)
2. Kuznetsov V. V. the Theoretical analysis of the thermodynamic parameters of the gas refrigerating machine on a temperature level of 150–250 K. / Thesis PhD. Kharkiv, 2014. P. 24–37. (in Russian)
3. Tsoi A. P., Kim I. A. Refrigeration equipment and technology of consumers of cold. Almaty, 2012. 510 P. (in Russian)
4. *Feliu J. A., Manzulli M., Alós M. A* Determination of Dry-Ice Formation during the Depressurization of a CO_2 Re-Injection System. CETCCUS, 2017.
5. Danilov M. M., Smirnov A. S. the Main features of the formation of the solid phase of carbon dioxide. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2014. No. 2. P. 37–40. (in Russian)
6. Danilov M. M., Medvedev K. A. Evaluation of the possibility of using vehicle exhaust gases for freezing dry ice. *Kholodilnaia tekhnika.* 2016. No. 6. Pp. 36–39. (in Russian)
7. Danilov, M. M., Nazarova A. S. Influence of parameters of gas mixtures on the size of the resulting crystals of carbon dioxide. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriia: Kholodilnaia tekhnika i konditsionirovanie.* 2016. № 4 (24). P. 1–5. (in Russian)
8. Poruchikov A. F. Development and analysis of the effectiveness of refrigeration carbon dioxide, operating at temperatures of –80 to –120 °C. Thesis PhD. Moscow. 2017. 95 p. (in Russian)
9. Anurov S. A. Cryogenic technologies of gas separation. Moscow, AR-consult, 2017. 233 c. (in Russian)
10. Antonov A. N., Arkharov A. M., Arkharov I. A.: Machine low-temperature equipment. Cryogenic machines and tools. Textbook for universities. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2015. 536 p. (in Russian)
11. Ivanov A. N., Belousov V. N., Smorodin S. N. Heat exchange equipment of industrial enterprise: tutorial. SPb.: VSTA SPBGUTD, 2016. 184 p. (in Russian)

12. Кислород. Справочник. Ч. 1 / Под ред. Д. Л. Глизманенко. М.: Металлургия, 1967. 422 с.
13. *Архаров А. М., Беляков В. П., Микулин Е. И. и др.* Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987. 536 с.
14. *Тимофеевский Л. С., Пекарев В. И., Бухарин Н. Н. и др.* Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, тепловых насосов и термотрансформаторов. Ч. 1. Расчет циклов, термодинамических и теплофизических свойств рабочих веществ: Учеб. пособие / Под ред. Л. С. Тимофеевского. СПб.: СпбГУНиПТ, 2006. 260 с.

12. Oxygen. Handbook. Part 1 / ed. by D. L. Glizmanenko. Moscow. Metallurgy, 1967. 422 P. (in Russian)
13. Arkharov A. M., Belyakov, V. P., Mikulin E. I., etc. Cryogenic system. Mscow. Mechanical Engineering, 1987. 536 p. (in Russian)
14. Timofeevsky L. S., Pekarev V. I., Bukharin N. N. etc. Thermal design calculations of refrigeration machines, heat pumps and thermotransformers. Part 1. Calculation of cycles, thermodynamic and thermophysical properties of working substances: Textbook / Under the editorship of S. L. Timofeevskiy. SPb, 2006. 260 P. (in Russian)

Сведения об авторах

Данилов Михаил Михайлович
к. т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, refmach@mail.ru

Лядова Елена Евгеньевна
магистрант, инженер факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, elena.lyadova@inbox.ru

Information about authors

Danilov Mikhail Mikhailovich
Ph. D., Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, refmach@mail.ru

Lyadova Elena Evgenievna
Undergraduate, engineer of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, elena.lyadova@inbox.ru

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

MAX IAR

Приглашают принять участие в работе
IX международной научно-технической конференции

«Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»

13–15 ноября 2019 г.

Конференция проводится на базе
мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем Университета ИТМО
по адресу: 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Низкотемпературная техника и системы низкопотенциальной энергетики;
- Надежность материалов оборудования биотехнологий и низкотемпературных систем;
- Автоматизация процессов и производств;
- Криогенная техника и технологии сжиженного природного газа (СПГ);
- Техника и процессы пищевых производств;
- Системы кондиционирования и жизнеобеспечения;
- Теплофизика и теоретическая тепло- и хладотехника;
- Пищевые и биотехнологии;
- Промышленная экология и техносферная безопасность;
- Экономика и управление производством;
- Инновации цифровой экономики.

Телефон для справок: (812) 607-04-53
Платунова Яна Яковлевна, Быкова Тамара Николаевна
E-mail: rft21@corp.ifmo.ru
Подробная информация на сайте:
www.rft21.ifmo.ru