## Семинар 3. Расчет пластинчато-ребристого аппарата



### Темы для подготовки к семинарскому занятию

- 1. Методики расчета пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов с однофазными и многофазными потоками. Особенности расчета процесса теплообмена.
- 2. Преимущества и недостатки конструкции пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов в процессе сборки и эксплуатации.
- 3. Варианты конструктивного исполнения пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов в зависимости от взаимного направления потоков, рабочих веществ и их фазового состава, исполнения ребер и т.д.
- 4. Последовательность технологических процессов, реализуемых при изготовлении и сборке пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов.

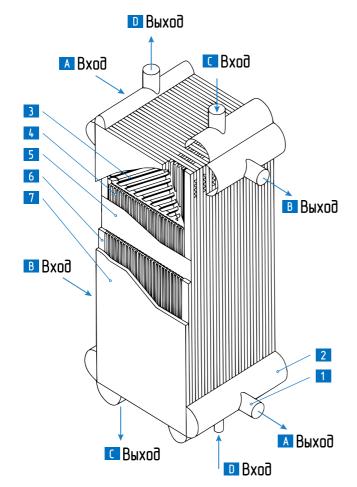


Пластинчато-ребристый ТОА (ПРТОА) – теплообменный аппарат, в котором движение рабочих веществ происходит по каналам, образованными ребрами между разделительными пластинами. Каждый поток рабочего вещества проходит определенное число каналов, ориентированных соответствующим образом и имеющих дистрибьютер на входе и коллектор на выходе. Грамотное размещение каналов позволяет реализовывать эффективный процесс теплообмена между двумя и более потоками.

### Особенности конструктивного исполнения ПРТОА



Ниже представлен четырехпоточный ПРТОА, в котором два «теплых» и два «холодных» потока, при этом в одном из «холодных» потоков происходит кипения, а в одном из «горячих» – конденсация.



#### Обозначения на схеме

## Потоки:

- А «теплый» поток (конденсация);
- В «холодный» поток (кипение);
- С «теплый» поток;
- D «холодный» поток.

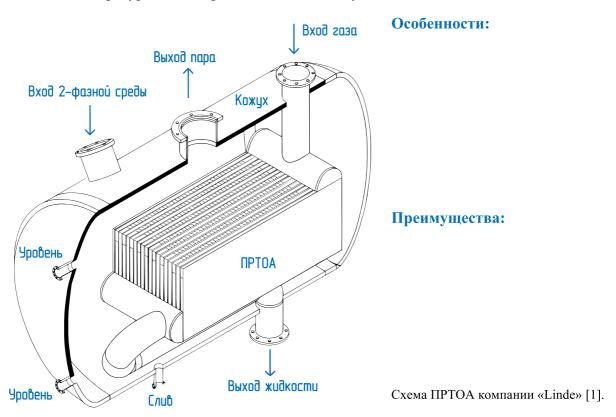
## Элементы:

- 1 штуцер;
- 2 -коллектор/дистрибьютер;
- 3 распределительное ребро;
- 4 теплообменное ребро;
- 5 разделительная пластина;
- 6 торцевая планка;
- 7 покрывная пластина;

Схема ПРТОА компании «Linde» [1].



Для реализации предварительного охлаждения прямого потока в криогенных циклах используется теплота фазового перехода технологического потока. В этом случае целесообразно использование аппаратов, реализующих кипение в большом объеме с наибольшей эффективностью процесса теплообмена. Для этого один или несколько ПРТОА помещаются в стальной кожух, заполненный кипящим веществом, а конфигурация аппарата называется кожухоблочной.



### Материалы, применяемые при изготовлении ПРТОА



Для изготовления всех основных элементов конструкции пластинчато-ребристого аппарата используют алюминиевые сплавы.

**АМц ГОСТ 4784-2019** — детали аппарата, образующие теплообменную поверхность. Легирующие элементы: марганец — обеспечивает контролируемый равномерный рост зерна; медь — повышает механическую прочность.

**АМГ5 ГОСТ 4784-2019** — коллекторы, дистрибьютеры и штуцеры. Легирующий элемент: магний — высокая коррозионная стойкость при хорошей свариваемости и обрабатываемости резанием. Повышает прочностные характеристики при термической обработке, может быть подвергнут анодированию.

**АМГ2 ГОСТ 4784-2019** – коллекторы, дистрибьютеры и штуцеры. Высокотемпературный аналог сплава АМГ5 для аппаратов с рабочей температурой потоков до плюс 90 градусов Цельсия.

Повышение коррозионной стойкости, светоотражательной способности и термостойкости, а также снижение электропроводности и придание декоративных особенностей элементам конструкции из алюминиевых сплавов применяются различные методы нанесения покрытий [2]: горячий, газотермический, диффузионный, плакирование, осаждение из газовой фазы, гальваническое алюминирование и т.д.

#### Особенности выполнения паяных соединений



Бесфлюсовая пайка криогенных пластинчато-ребристых аппаратов осуществляется при помощи алюминиевых припоев с присадками кремния, который снижает температуру его плавления. Припой наносится на торцевые планки, покрывные пластины и распределительные ребра с двух сторон методом плакирования.

Пайка элементов теплообменной поверхности — ребер в пакеты осуществляется в вакуумных печах. Максимальные размеры аппарата, который может быть спаян в вакуумной печи [1]: до 8.2 метров в длину, 1.5 метров в ширину и 3.4 метров в высоту.

Максимальное расчетное давление — 130 бар, рабочая температура потоков — от минус 269 до плюс 90 градусов Цельсия.

Изготовители и марки алюминиево-кремниевого припоя: Chemet Aluminium 13 (Германия), Castolin AluFlam 190 (Швейцария); алюминиевомедного припоя: 34A (ТУ 1-92-46-76, Россия).

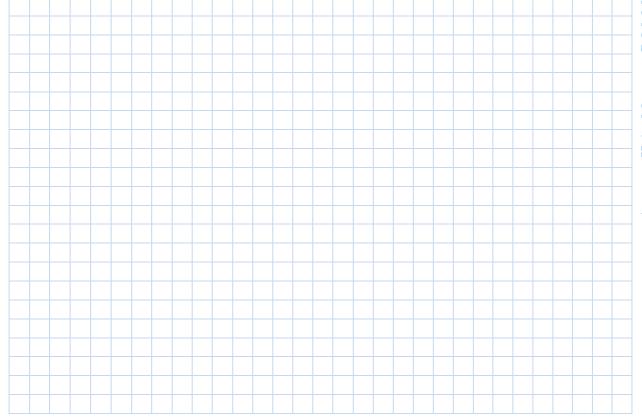


Плакирование — процесс создания покрытия, при котором осуществляется одностороннее и двухстороннее нанесение на поверхность металлических листов, плит, проволоки, труб тонкого слоя другого расплавленного металла или сплава механическим способом.

### Задание для обсуждения на семинаре



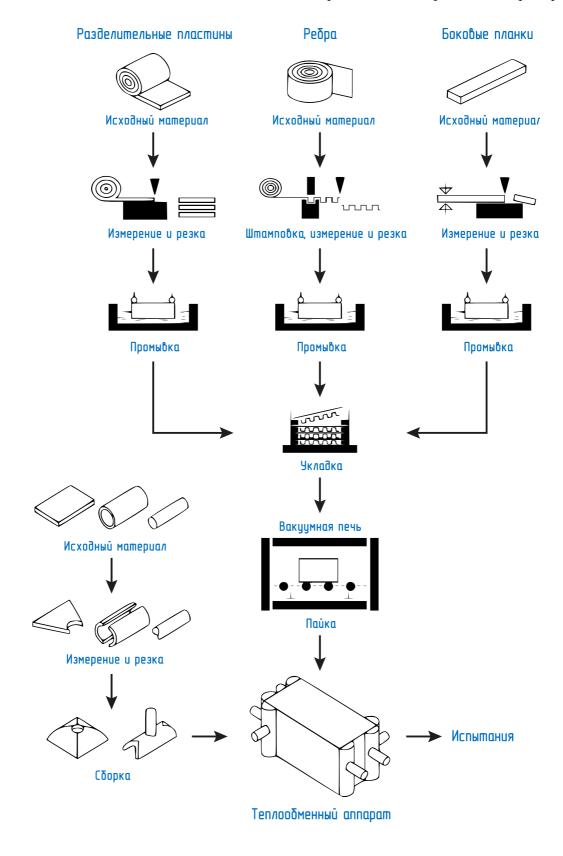
Укажите сферы применения пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов и их функциональное назначение в составе энергетических установок. Обоснуйте целесообразность выбора этого типа теплообменных аппаратов.

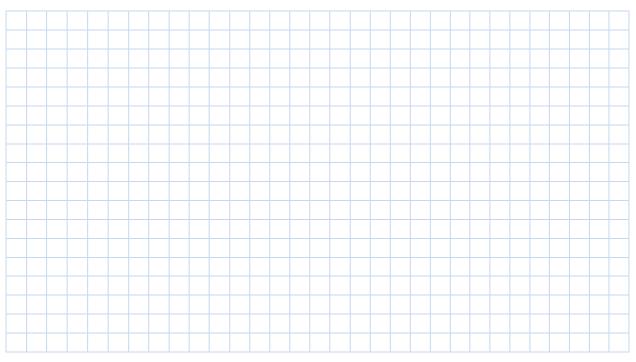


## Задание для обсуждения на семинаре



Рассмотрите последовательность технологических процессов изготовления пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов. Назовите требования, устанавливаемые к оборудованию и квалификации рабочего персонала, для выполнения указанных технологических операций. Укажите контрольные мероприятия, выполняемые после каждой операции, а также необходимые для их выполнения контрольные и измерительные приборы.





### Конфигурация теплообменной поверхности

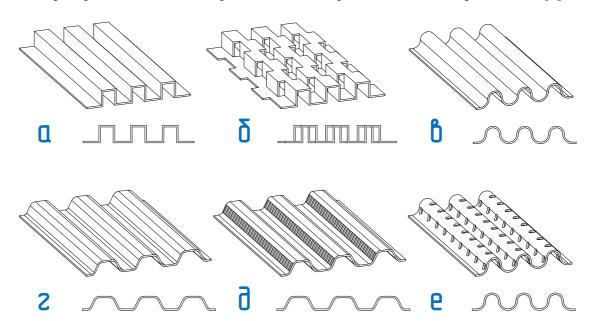


В пластинчато-ребристых теплообменных аппаратах для организации каналов, вдоль которых перемещаются потоки рабочих веществ, используются ребра с различными конструктивными особенностями.

Благодаря развитой поверхности теплообмена удается обеспечить показатели [1, 3]:

- компактность от 600 до 3000 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;
- удельная масса от 2 до 4 кг/ $M^2$ .

На рисунке представлены некоторые возможные конфигурации ребер:  $\mathbf{a}$  — гладкие непрерывные;  $\mathbf{б}$  — гладкие прерывистые;  $\mathbf{g}$  ,  $\mathbf{r}$  — волнистые непрерывные;  $\mathbf{q}$  — волнистые чешуйчатые непрерывные;  $\mathbf{e}$  — волнистые перфорированные непрерывные. Рекомендации по выбору конструкции ребер в зависимости от фазового состава рабочих потоков приведено в [4].



Геометрические параметры пластинчато-ребристых поверхностей, применяемых в аппаратах криогенных установок, а также коэффициенты для расчетных зависимостей процесса теплообмена и гидравлических сопротивлений представлены ниже [3].

Если в процессе расчета значение критерия Рейнольдса не попадает в указанные в таблице диапазоны для конкретного типа ребра, следует изменить заданную скорость потока. Размеры в таблице геометрических параметров указаны в мм, если не указано другое.

Ребра	l/t	Толщина ребер $\delta_{ m p}$	Расстояние между прорезями Δ	Эквивалентный диаметр $d_{\scriptscriptstyle 9}$		Компактность по ${\rm свободномy}$ объему ${\rm m}^2/{\rm m}^3$		Степень стеснения у
			Рас	(.)	$S_{ m cB.p}$	$S_{{ m cb.}\Pi}$	$S_{ ext{cB}}$	
Гладкие непрерывные	-	0.15	-	4.64	520	342	862	0.196
	6/4	0.15	1.5	4.64	520	342	862	0.196
	12/4	0.25	2.0	5.69	534	169	702	0.153
Проргируатура	12/2	0.25	2.0	3.05	1143	169	1312	0.209
Прерывистые	4/2	0.15	1.0	2.50	1081	519	1600	0.285
	6/2	0.25	1.0	2.68	1143	342	1485	0.282
	6/2.3	0.20	1.0	3.08	952	342	1297	0.244
Чешуйчатые	7/4	0.15	5.0	4.22	604	342	946	0.175

Ребра	l/t	Процесс теплообмена		Гидравлическое сопротивление			
		Re	A	n	Re	В	m
		500-2000	0.21	0.48	700-2000	32.7	-1.03
Непрерывные	6/4	2000-6500	0.0089	0.905	2000-3000	0.065	-0.21
		6500-25000	0.027	0.78			
	6/4	700-2000	0.088	1.067	600-2000	0.73	-0.32
	0/4	2000-13000	0.076	0.77	2000-17000	0.12	-0.085
	12/4	1800-6000	0.10	0.74	1800-6000	0.21	-0.15
	12/4	6000-22000	0.23	0.65	6000-30000	0.12	-0.08
	12/2	700-2500	0.0031	1.15	700-2500	0.37	-0.21
	12/2	2500-7500	0.19	0.64	2500-10000	0.23	-0.15
Прерывистые	4/2	700-4500	0.0022	1.16	400-900	89.6	-1.0
	4/2				900-6500	0.24	-0.13
	6/2	800-2000	0.002	1.19	600-1200	5.95	-0.62
	0/2	2000-5500	0.0113	0.962	1200-6500	0.22	-0.15
		160-1600	0.0043	1.098	200-950	22.5	-0.93
	6/2.3	1600-4500	0.0512	0.76	950-3000	1.18	-0.49
					3000-5000	0.2	-0.27
Чешуйчатые	7/4	2400-10500	0.19	0.63	2600-14500	0.23	-0.14

## Методика расчета



Расчет пластинчато-ребристого теплообменного аппарата проводится по методике, описанной в [3]. Выбор типа и размера ребер осуществляется на основе анализа конструктивных, технологических и эксплуатационных показателей. Автоматизированный расчет ПРТОА, выполненный в MathCAD, доступен в [5].

Критерий оптимального выбора типа теплообменной поверхности и скоростей течения – отклонение длин пакетов каналов по всем потокам не более чем на 5%.

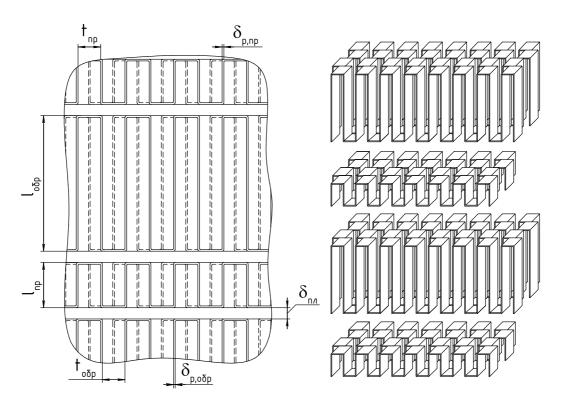
### Исходные данные

Параметр		Прямой поток	Обратный поток
Рабочее вещество	-	Аргон	Аргон
Давление на входе, р	бар	$p_1 = 4.00$	$p_3 = 0.88$
Температура на входе, Т	K	$T_1 = 310.0$	$T_3 = 110.0$
Температура на выходе, р	K	$T_2 = 123.5$	$T_4 = 300.0$
Возможное падение давления, $\Delta p$	кПа	$\Delta p_{\mathrm{np}} = 20$	$\Delta p_{ m o 6p} = 10$
Расход, G	кг/с	$G_{\rm np} = 1.08$	$G_{\rm ofp} = 1.08$
Тип ребер	-	Прерывистые 4/2	Прерывистые 12/2

## Параметры ребер

Параметр		Прямой поток	Обратный поток
Ширина ребра, t	ММ	2	2
Длина ребра, $l$	ММ	4	12
Толщина ребра, $\delta_{ m p}$	MM	0.15	0.25
Расстояние между прорезями, Δ	MM	1	2
Эквивалентный диаметр, $d_{\mathfrak{p}}$	MM	2.50	3.05
Компактность $S_{{ m cB.p}}-{ m pe}$ бер $S_{{ m cB.n}}-{ m пластин}$ $S_{{ m cB}}-{ m суммарная}$	м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	1081 519 1600	1143 169 1312
Степень стеснения, у	-	0.285	0.209
Процесс теплообмена	-	700-4500 0.0022 1.16	2500-7500 0.19 0.64
Гидравлические сопротивления $Re$ $B$ $m$	-	900-6500 0.24 -0.13	700-2500 0.23 -0.15

Схема выбранных в качестве теплообменной поверхности непрерывных ребер в комбинации 4/2 (прямой поток) и 12/2 (обратный поток) представлены ниже. Обозначения, указанные на схеме, применяются в расчете.



В таблицах ниже выделены строки, в которых значения параметров задаются на этапе выполнения расчета из собственного опыта, рекомендаций в литературе или по указанию преподавателя.

Перерасчет эквивалентных диаметров, компактностей и других параметров теплообменной поверхности выполняется в случае использования ребер без справочных данных или пластин с толщиной, отличной от 1 мм.

## Характеристика теплообменной поверхности

Параметр	Прямой поток	Обратный поток
Компактность поверхностей ребер, $ {\rm M}^2/{\rm M}^3 $ $ {\rm S_{cB,p}} = \frac{2}{t-\delta_{\rm p}} $	$S_{\text{CB.p.}\pi p} = 1081$	$S_{cb,p.o6p} = 1143$
Компактность поверхностей пластин, ${\rm M}^2/{\rm M}^3$ ${\rm S_{\rm cb.n}} = \frac{2}{l-\delta_{\rm p}}$	$S_{\text{CB.\Pi.\Pi p}} = 519.5$	S <sub>св.п.обр</sub> = 170.2
Компактность по свободному объему, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$S_{CB.\Pi p} = 1600.5$	$S_{cb.ofp} = 1313.2$

$S_{cB} = S_{cB,p} + S_{cB,p}$		
Эквивалентный диаметр, мм		
$d_{9} = \frac{4 \cdot A}{P} = \frac{4}{S_{CB}}$	$d_{\rm 9.\pi p} = 2.50$	$d_{\text{э.обр}} = 3.05$

#### Обозначения:

А – площадь свободного поперечного сечения канала;

Р – суммарный смачиваемый периметр всех ребер в поперечном сечении.

Коэффициент оребрения		
$K_{\rm p} = \frac{S_{\rm cB,p}}{S_{\rm cB}}$	$K_{\rm p.np} = 0.675$	$K_{\text{p.o6p}} = 0.870$
Толщина пластин, мм $\delta_{\scriptscriptstyle \Pi J}$	$\delta_{ ext{пл.пр}}=1$	$\delta_{ m пл.обр}=1$
Материал пластин	АМц	АМц
Теплопроводность материала пластин, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot K}$	$\lambda_{\text{пл.пр}} = 126$	$\lambda_{\text{пл.обр}} = 126$
$\gamma = \frac{\left(\delta_{\rm p} + \delta_{\rm пл}\right) \cdot t + (l - \delta_{\rm пл}) \cdot \delta_{\rm p}}{(l + \delta_{\rm пл}) \cdot t}$	$\gamma_{ m \pi p}=0.275$	$\gamma_{ m ofp}=0.202$
Удельная площадь свободного сечения, мм $\psi = (l + \delta) \cdot (1 - \gamma)$	$\psi_{\pi p} = 3.625$	$\psi_{ m o6p}=10.375$

## Тепловые характеристики потоков и параметры ребер

Параметр	Прямой поток	Обратный поток
Температурный напор на «горячей» стороне аппарата, $K$ $\Delta T_1 = T_1 - T_4$	$\Delta T_1 = 310$	- 300 = 10
Температурный напор на «холодной» стороне аппарата, $K$ $\Delta T_2 = T_2 - T_3$	$\Delta T_2 = 123.5$	- 110 = 13.5
Среднелогарифмическая разность температур, $K$ $\Delta T_{\rm cp} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$	$\Delta T_{\rm cp} = \frac{13.5}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}$	$\frac{-10}{3.5} = 11.7$
Средняя температура потока, $K$ $T_m = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2}$	$T_{\rm np} = 216.8$	$T_{\rm o6p} = 205$

Плотность рабочего вещества при средней температуре и давлении, $\frac{\kappa \Gamma}{M^3}$	$ ho_{\pi \mathrm{p}} = 8.95$	$ ho_{ m o6p}=2.07$
Динамическая вязкость рабочего вещества при средней температуре и давлении, $10^6$ Па $\cdot$ с	$\mu_{\rm np} = 17.27$	$\mu_{ m ofp} = 16.35$
Коэффициент теплопроводности рабочего вещества при средней температуре и давлении, $10^3  \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$	$\lambda_{ m np}=13.61$	$\lambda_{ m o6p}=12.82$
Теплоемкость изобарная рабочего вещества при средней температуре и давлении, $\frac{\kappa \mathcal{J}^{\mathcal{H}}}{\kappa_{\Gamma} \cdot K}$	$C_{p.\pi p} = 0.531$	$C_{p.\text{oбp}} = 0.523$
Тепловая нагрузка на аппарат, к $B$ т $Q = G \cdot (h_{ ext{BX}} - h_{ ext{BMX}})$	$Q_{\rm np} = 107.24$	$Q_{ m o6p} = 107.25$
Скорость обратного потока, м/с	-	$V_{\text{ofp}} = 6$
$V_{ m np} = rac{ ho_{ m o6p}}{ ho_{ m np}} \cdot rac{\psi_{ m o6p}}{\psi_{ m np}} \cdot rac{G_{ m o6p} \cdot V_{ m o6p}}{G_{ m np}}$	$V_{\rm np} = 3.97$	-
Критерий Рейнольдса $Re = \frac{V \cdot \rho \cdot d_{\scriptscriptstyle 3}}{\mu}$	$Re_{\rm np} = 5138$	$Re_{\text{oбp}} = 2310$
Критерий Прандтля $Pr = rac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$	$Pr_{\rm np} = 0.674$	$Pr_{06\pi} = 0.667$
Критерий Нуссельта $Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	$Nu_{\rm np} = 38.887$	$Nu_{\text{oбp}} = 23.604$

### Обозначения:

A, n – параметры теплообменной поверхности при соответствующих числах Re.

### Примечание:

При приближении числа Рейнольдса к пограничным значениям целесообразно выбирать коэффициенты процесса теплообмена из области больших значений. Поэтому для обратного потока, коэффициенты A и n взяты из области  $Re \in 2500...7500$  при расчетном значении 2310.

Коэффициенте теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot K}$ $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_3}$	$\alpha_{ m np}=211.8$	$\alpha_{\rm o6p} = 99.3$
Параметр ребра, 1/м		
$\mathrm{m} = \sqrt{rac{2 \cdot lpha}{\lambda_{\scriptscriptstyle \Pi \Pi} \cdot \delta_{\mathrm{p}}}}$	$m_{ m np} = 149.7$	$m_{\rm o6p} = 79.4$

КПД ребра		
$\eta_{\text{pe6}} = \left(1 + \frac{\left(m \cdot \frac{l}{2}\right)^2}{3}\right)^{-1}$	$\eta_{ m pe6.\pi p} = 0.971$	$\eta_{ m pe6.06p}=0.930$
КПД оребренной поверхности		
$\eta_{ m op} = 1 - rac{S_{ m \scriptscriptstyle CB.p}}{S_{ m \scriptscriptstyle CB}} \cdot \left(1 - \eta_{ m  m pe6} ight)$	$\eta_{ m op.\pi p}=0.980$	$\eta_{ m op.o6p}=0.939$
Коэффициент теп	лопередачи, $\frac{BT}{M^2 \cdot K}$	
$k_{\mathrm{T}} = \left(\frac{1}{\alpha_{\mathrm{np}} \cdot \eta_{\mathrm{op,np}}} + \frac{\delta_{\mathrm{nn,np}} \cdot S_{\mathrm{cB,np}}}{\lambda_{\mathrm{an}} \cdot S_{\mathrm{cB,n,np}}} + \frac{\delta_{\mathrm{cm,np}}}{\alpha_{\mathrm{op,np}}} + \frac{\delta_{\mathrm{nn,np}}}{\alpha_{\mathrm{op,np}}} + \frac{\delta_{\mathrm{nn,np}}}{\alpha$	$rac{1}{\chi_{ ext{ofp}} \cdot rac{S_{ ext{cb.ofp}}}{S_{ ext{cp.up}}} \cdot \eta_{ ext{op.ofp}}}$	$\left(\frac{F_{\text{ofp}}}{F_{\text{rm}}}\right)^{-1} = 95$
Коэффициент теплопередачи по	СВ.ПР	пр
обратному потоку, $\frac{B_{\mathrm{T}}}{M^2 \cdot K}$ $k_{\mathrm{T.o6p}} = \frac{k_{\mathrm{T}}}{F_{\mathrm{o6p}}}$	-	$k_{\text{т.обр}} = 41.3$
Площадь теплообменной поверхности, м $^2$ $F = \frac{1.1 \cdot Q}{k \cdot \Delta T_{\mathrm{cp}}}$	$F_{\rm np} = 106.3$ $npu \ k_{\rm \scriptscriptstyle T}$	$F_{\text{o6p}} = 244.8$ $npu \ k_{\text{T.o6p}}$
Площадь канала во фронтальном сечении, м $^2$ $F_{\rm \phi p} = \frac{G}{\rho \cdot V \cdot (1-\gamma)}$	$F_{\text{фр.пр}} = 0.042$	$F_{\rm \phi p.o6p} = 0.109$
Общая площадь фронтального сечения, м $^2$ $F_{ m \phi p} = F_{ m \phi p. np} + F_{ m \phi p. o6p}$	0.151	
Сторона квадратного сечения, м $H = \sqrt{F_{\rm \varphi p}}$	0.388	
Длина теплообменной поверхности во фронтальном сечении, м $L = \frac{F \cdot V \cdot \rho}{S_{\text{CB}} \cdot G}$	$L_{\rm np} = 2.189$	$L_{ m o6p} = 2.145$
Относительное отклонение длин теплообменной поверхности		7%
$arDelta_L = rac{L_{ m np} - L_{ m ofp}}{L_{ m np}}$	тип теплообменной поверхности и скорости потоков заданы корректно	

Усредненная по потокам длина теплообменной поверхности во фронтальном сечении, м $L_{\rm np} = L_{\rm oбp} = \frac{L_{\rm np} + L_{\rm oбp}}{2}$	L = 2.167
Число слоев теплообменных поверхностей $z = \frac{H}{\left(l_{\rm np} + l_{\rm o6p} + 2 \cdot \delta_{\rm пл. np}\right)}$	$z = 21.57 \rightarrow 22$
Высота сечения во фронтальной плоскости, м $H = z \cdot \left(l_{\rm пp} + l_{\rm обр} + 2 \cdot \delta_{\rm пл.пр}\right)$	H = 0.396
Ширина сечения во фронтальной плоскости, м $B = \frac{F_{\rm \varphi p}}{H}$	B = 0.381

### Гидравлические характеристики потоков и патрубков

Параметр	Прямой поток	Обратный поток
Фактор трения	$f_{\text{тр.пр}} = 0.079$	$f_{\rm Tp.o6p} = 0.073$
$f_{\mathrm{rp}} = B \cdot Re^{m}$	npu B = 0.24, m = -0.13	npu B = 0.37, m = -0.21
Гидравлическое сопротивление, кПа $\Delta p = 4 \cdot f_{\rm Tp} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot \frac{L}{d_{\rm B}}$	$\Delta p_{ m np} = 19.3$ $< 20  \kappa \Pi a$	$\Delta p_{ m oбp} = 7.7$ $<$ 10 κΠa

Гидравлическое сопротивление, Па на входе в аппарат (внезапное сужение):

$$\Delta p_1 = (1 - \gamma_{\pi p}^2 + K_{c.\pi p}) = 100.3$$

$$\Delta p_3 = (1 - \gamma_{\text{ofp}}^2 + K_{\text{c.ofp}}) = 55.4$$

на выходе из аппарата (внезапное расширение):

$$\Delta p_2 = (1 - \gamma_{\pi p}^2 - K_{p.\pi p}) \cdot \frac{\rho_{\pi p} \cdot V_{\pi p}^2}{2} = 28.5$$

$$\Delta p_4 = (1 - \gamma_{\text{ofp}}^2 - K_{\text{p.ofp}}) \cdot \frac{\rho_{\text{ofp}} \cdot V_{\text{ofp}}^2}{2} = 13.0$$

при повороте потока на 90°:

$$\Delta p_{\text{пов}} = 2 \cdot \left( \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \right) + 2 \cdot \sin^4 \left( \frac{\pi}{2} \right) \right) \cdot \frac{\rho_{\text{пр}} \cdot V_{\text{пр}}^2}{2} = 422.6$$

Обозначения:

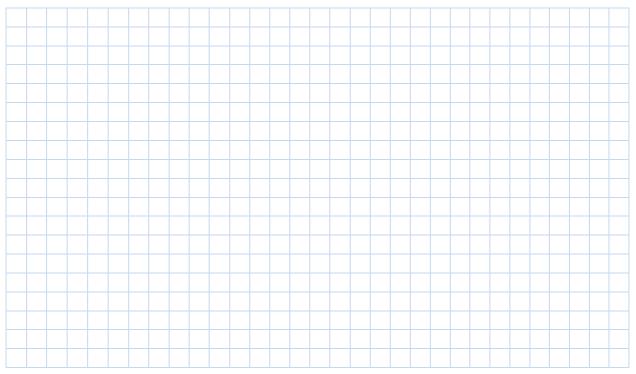
 $K_{\rm c.np} = 0.5$  – коэфф. местного сопротивления при сужении для прямого потока;  $K_{\rm c.o6p} = 0.53$  – коэфф. местного сопротивления при сужении для обратного потока;

$K_{\mathrm{p.np}} = 0.52$ – коэфф. местного сопротивления при расширении для прямого потока; $K_{\mathrm{p.oбp}} = 0.61$ – коэфф. местного сопротивления при расширении для обратного потока;			
Общее гидравлическое сопротивление, кПа	$\Delta p_{\Sigma,\pi p} = 19.86$	$\Delta p_{\Sigma.ofp} = 8.19$	
$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p + \Delta p_{BX} + \Delta p_{\Pi OB} + \Delta p_{B IJX}$	< 20 кПа	< 10 кПа	

# Геометрические характеристики аппарата

Параметр	Прямой поток	Обратный поток
Объем аппарата, м <sup>3</sup>	$V_{\text{TOA}} = 0.327$	
$V_{\text{TOA}} = L_{\text{np}} \cdot H \cdot B$		
Объем одного слоя, м <sup>3</sup>		
$V_{ m c}_{ m T} = rac{V_{ m TOA}}{z}$	$V_{\rm c}$ = 0.015	
Ориентировочные площади входного/выходного патрубков, м <sup>2</sup>	$S_{ ext{narp}} = \frac{G}{V \cdot \rho}$	
Ориентировочные диаметры входного/выходного патрубков, м	$d_{ ext{namp}} = \sqrt{rac{4 \cdot S_{ ext{namp}}}{\pi}}$	
Ориентировочная скорость рабочего		G
вещества во входных/выходных патрубках, м	$w = \frac{G}{\rho \cdot S_{\text{narp}}}$	

# Заметки к методике расчета аппарата

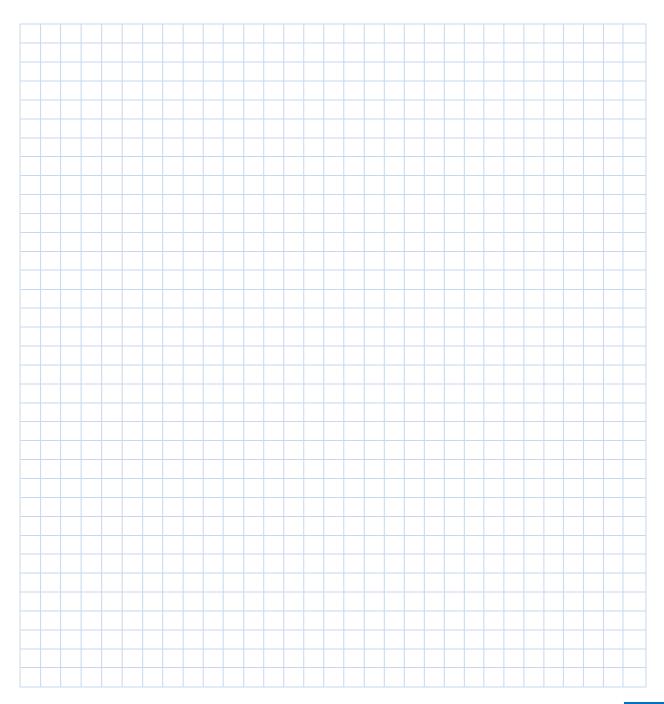


### Задание для обсуждения на семинаре

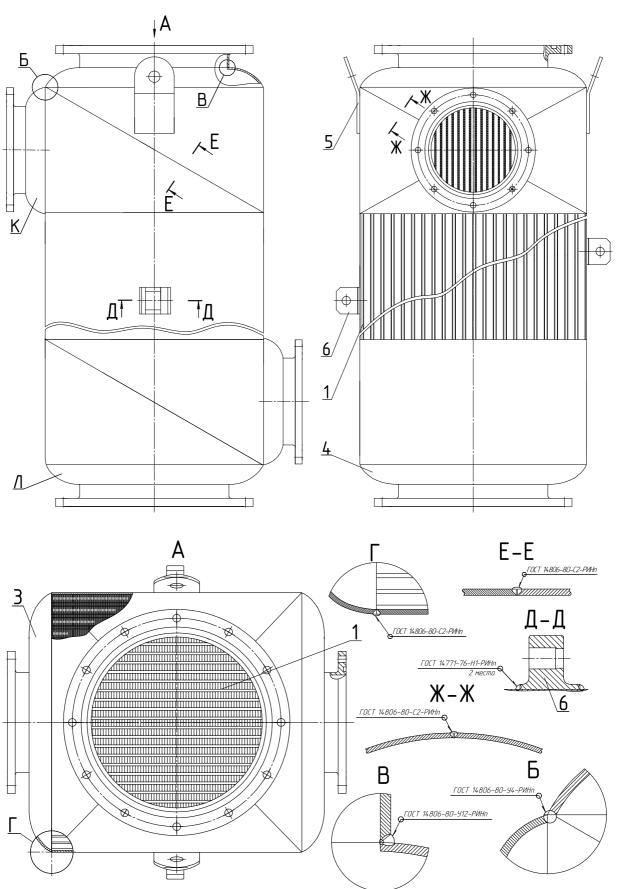


Для элементов конструкции пластинчато-ребристого теплообменного аппарата сделайте необходимые подписи: материал, назначение, особенности и т.д. Рассмотрите технические требования, назначенные на сборку аппарата, и проведите технологический анализ, включающий обоснование необходимости выполнения требований и вероятные последствия в случае их невыполнения.

- 1. Пример чертежа пластинчато-ребристого теплообменного аппарата с указанием необходимых габаритных, монтажных и присоединительных размеров; разрезов и сечений; данных о сварных соединениях и последовательностью укладки ребер представлен в [6].
- 2. Дополнительная информация: приведенная ниже структура аппарата не является сборочным чертежом и представлена для демонстрации элементов конструкции по месту. Сборочный чертеж демонстрируется преподавателем и представлен в [6].



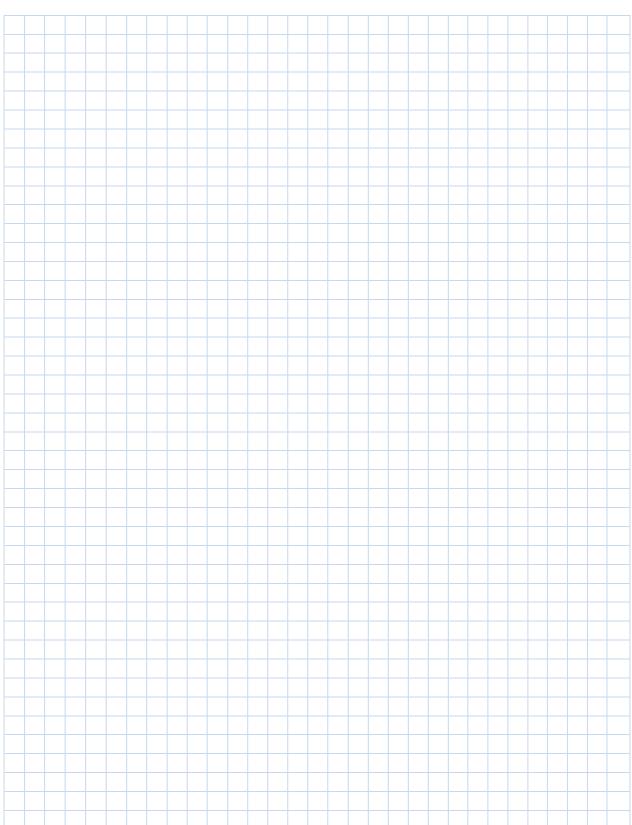
## Схема пластинчато-ребристого аппарата



# Задание для обсуждения на семинаре



Запишите конструктивные, технологические, эксплуатационные преимущества и недостатки ПРТОА. Проведите анализ технологичности изготовления и сборки аппарата в условиях мелкосерийного, среднесерийного и крупного производства.





### Вопросы для самоконтроля

- 1. Возможно ли в ПРТОА реализовать эффективный теплообмен между тремя и более потоками в условиях фазового перехода? Какие конструктивные особенности должен иметь такой аппарат?
- 2. Какие значения может принимать компактность ПРТОА? Чем объясняется широкий диапазон возможных значений компактности?
- 3. Почему сборка ПРТОА осуществляется бесфлюсовой пайкой? Каким образом исключается образование оксидной пленки в месте расплавления припоя?
- 4. Какие критерии оптимального выбора типа теплообменной поверхности могут быть приняты в тепловом и гидравлическом расчете ПРТОА?
- 5. Какие материалы применяются для изготовления ПРТОА? Почему элементы, образующие теплообменную поверхность, и другие детали аппарата изготавливаются из разных материалов?
- 6. Каким образом можно объяснить выбор того или иного типа ребер для набора теплообменной поверхности ПРТОА?
- 7. Какие факторы ограничивают максимальный размер ПРТОА?



### Литература и материалы к семинару

- 1. Загрузить материалы по ПРТОА компании «Linde» URL: ionium.ru/l/d-pdf-prtoa-linde
- 2. Ильин В.А., Панарин А.В. Алюминиевые покрытия и способы их получения //Авиационные материалы и технологии. 2014. №4 (33).
- 3. Архаров А.М. и др. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальностям «Техника и физика низких температур» и «Холодильная, криогенная техника и кондиционирование»: в 2 т. Т.2 Основы проектирования аппаратов, установок и систем / А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.; Под общ. ред. А.М. Архарова и А.И. Смородина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1999. 720 с.: ил.
- 4. Смородин А.И. Пластинчато-ребристые теплообменники для охлаждения однофазных потоков: Методические указания к выполнению домашних заданий. Курсовых и дипломных проектов по курсу «Машины и аппараты криогенных установок» / Под ред. А.М. Архарова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 32 с.: ил.
- 5. Загрузить пример расчета ПРТОА в MathCAD URL: ionium.ru/l/d-mcd-prtoa
- 6. Загрузить пример сборочного чертежа ПРТОА URL: ionium.ru/l/d-drawing-prtoa
- 7. Смородин А.И. Пластинчато-ребристые конденсаторы-испарители: Методические указания к выполнению домашних заданий, курсовых и дипломных проектов по курсу «Машины и аппараты криогенных установок» / Под ред. А.М. Архарова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 34 с.: ил.
- 8. Шевич Ю.А., Пуртов С.Н. Проектный расчет пластинчато-ребристы теплообменников с противоточно-прямоточным и перекрестноточным движением потоков: Учеб. Пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 44 с.: ил.