

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

XLVIII научная и учебно-методическая Конференция Университета ИТМО

# Разработка методики расчета криогенного блока очистки гелия от высококипящих примесей

Магистрант гр. W4205

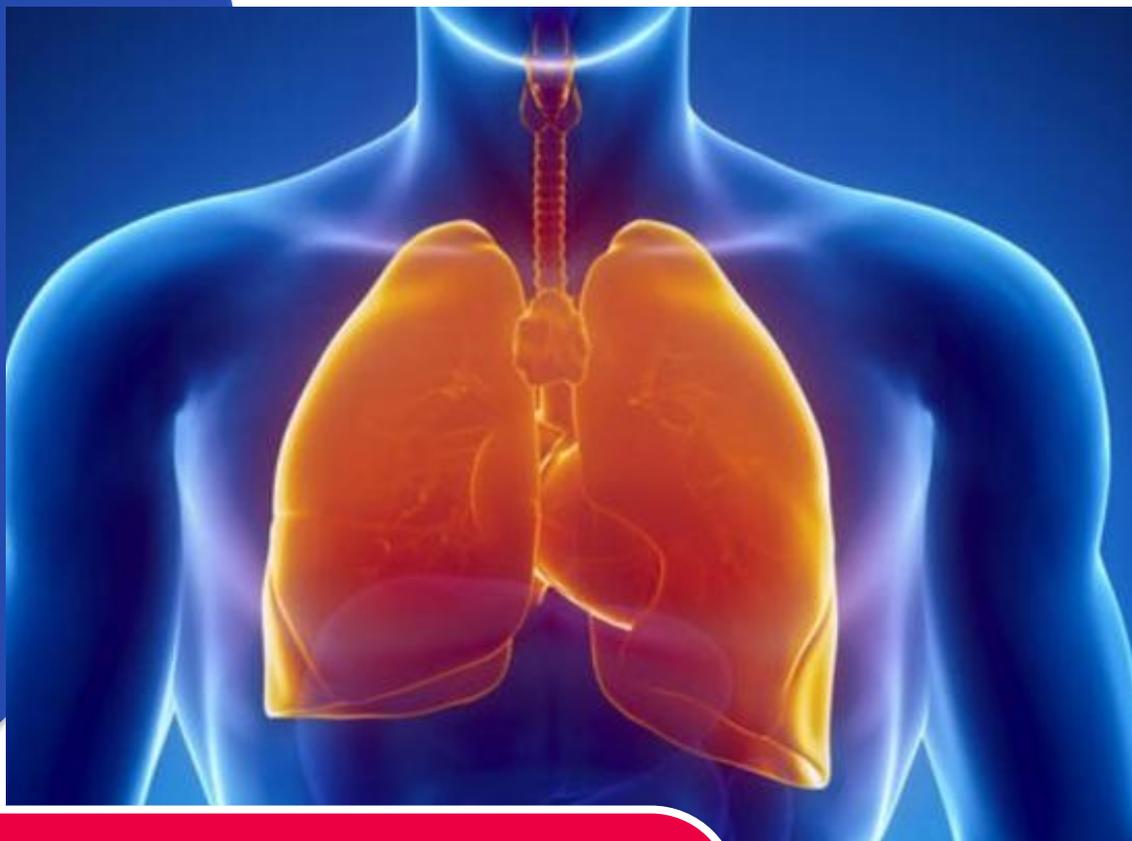
Научный руководитель к.т.н., доц.

Мороз А.Е.

Зайцев А.В.

Санкт-Петербург 2019

## Цель работы

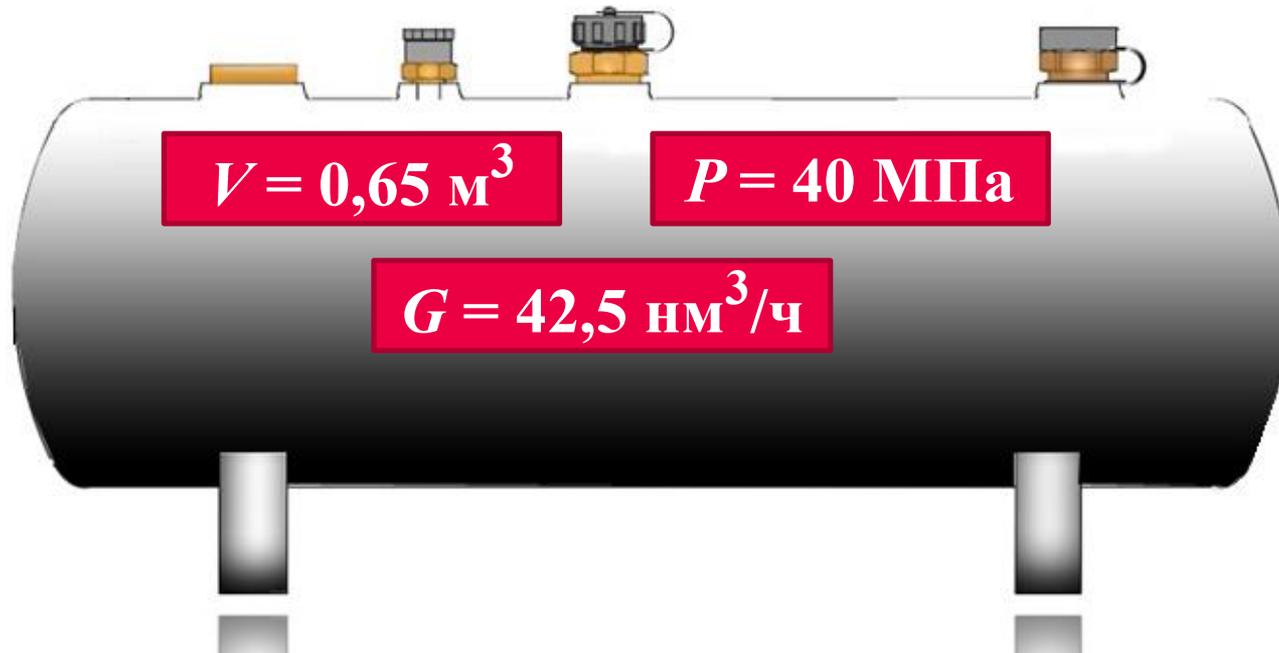


Целью работы является очистка отработанной дыхательной смеси от примесей, с целью получения из неё чистого газообразного гелия для его последующего повторного использования при приготовлении дыхательной смеси, например, применяемой при проведении подводных работ.



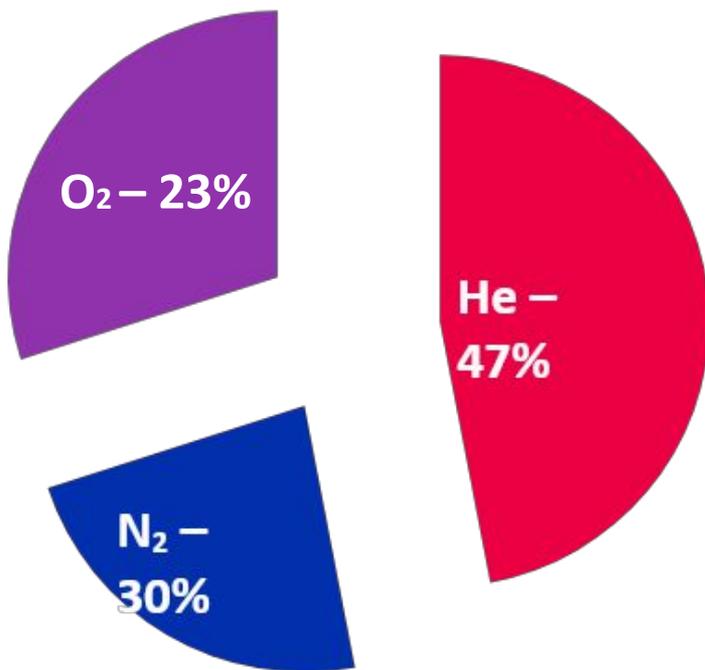
## Основные параметры работы установки

- ✓ время работы установки в режиме очистки – 6 часов;
- ✓ часовая производительность – 37,8 нм<sup>3</sup>/ч;
- ✓ рабочее давление разделяемой смеси – 8,0 МПа;
- ✓ температура газовой смеси на входе в установку – 303 К.



# Объемные концентрации компонентов в смеси

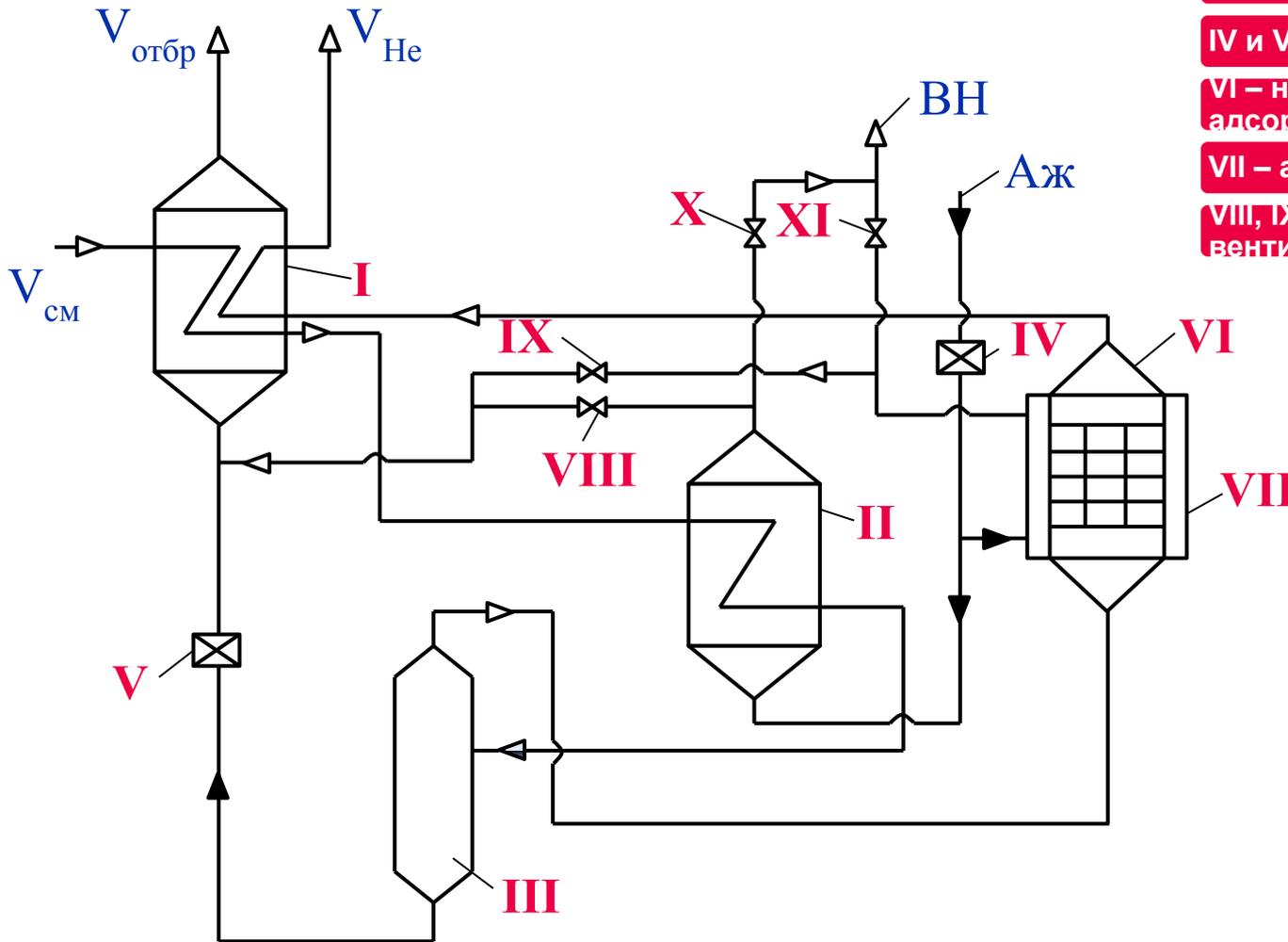
Значения критических параметров  
отдельных компонентов  
разделяемой смеси



Критический параметр Компонент смеси	Критическое давление, МПа	Критическая температура, К
Кислород	5,043	154,58
Гелий	0,229	5,19
Азот	3,40	126,2



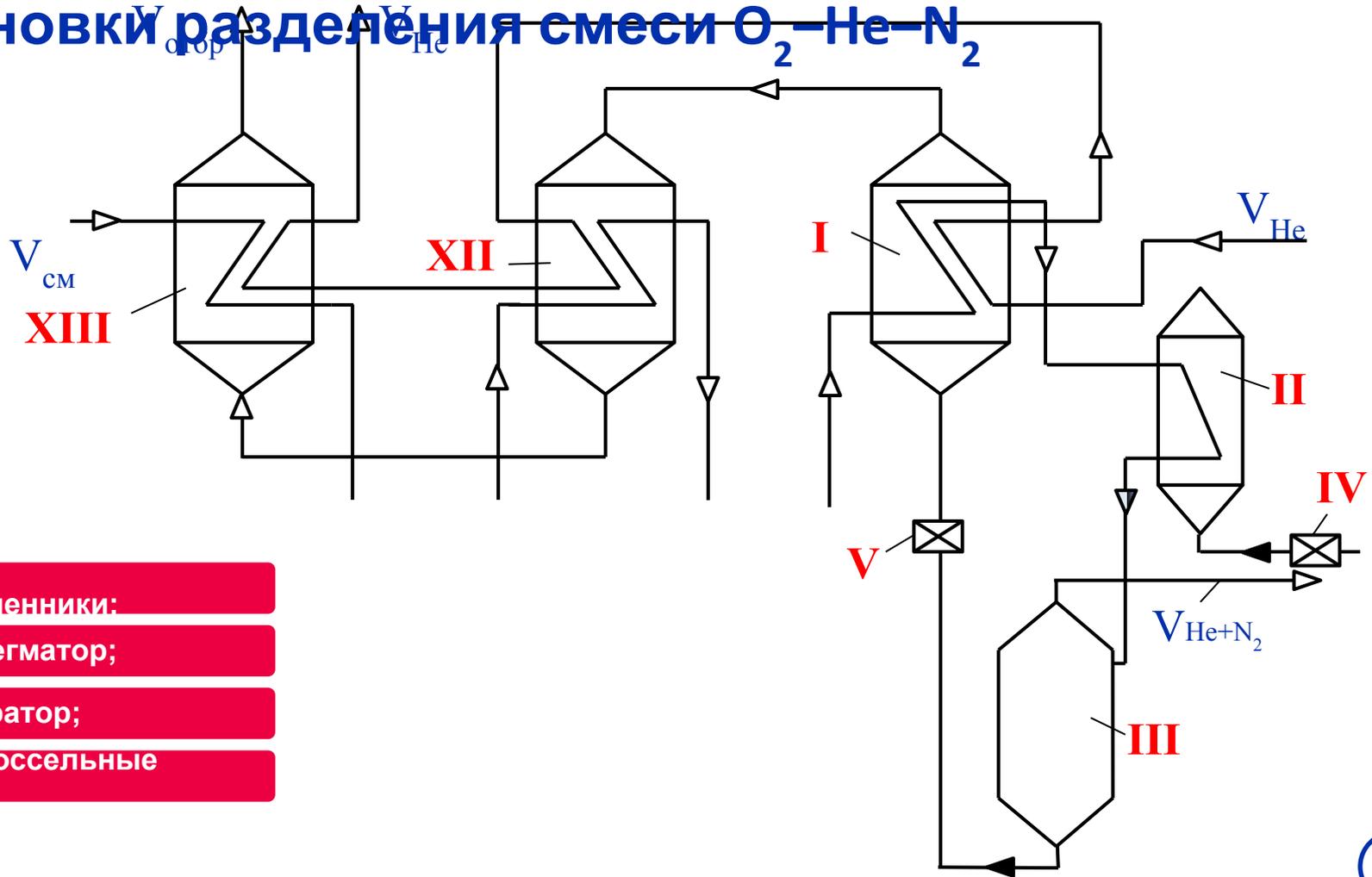
# Схема криогенного блока установки разделения смеси $O_2-He-N_2$



- I – теплообменник;
- II – дефлегматор;
- III – сепаратор;
- IV и V – дроссельные вентили;
- VI – низкотемпературный адсорбер;
- VII – азотная рубашка;
- VIII, IX, X и XI – запорные вентили

# Расчётная схема узла теплообменных аппаратов

## установки разделения смеси $O_2-He-N_2$



- I, XII, XII – теплообменники;
- II – дефлегматор;
- III – сепаратор;
- IV, V – дроссельные вентили;

## Параметры прямого и обратных потоков, проходящих через теплообменник

Поток	Среднее давление, МПа	Средняя температура, К $T_{cp} = 0,5 \cdot (T_{вх} + T_{вых})$
Исходная смесь, $V_{см}$	8,0	290,5
Чистый гелий, $V_{He}$	8,0	274,5
Отбросной поток, $V_{отбр}$	0,12	274,0

### ПОТОКОВ,

Поток	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость $c_p$ , кДж/(кг·К)		
Исходная смесь, $V_{см}$	58,380	1,5549	20,12	40,584
Чистый гелий, $V_{He}$	13,575	5,1880	19,92	157,500
Отбросной поток, $V_{отбр}$	1,664	1,0245	18,60	26,558

# Определение плотности исходной смеси и отбросного газа при $T_{\text{ср}}$ и $P_{\text{ср}}$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n (y_i^M / \rho_i)}$$

где  $y_i^M$  - массовая доля  $i$ -го компонента в смеси.

Поток	Комп онен т	$y_i$	$M_i$ , кг/мол ь	$M_i y_i$		$\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup>		$\rho_{\text{см}}'$ , кг/м <sup>3</sup>
Исходная смесь	He	0,47	4	1,88	0,107	12,86	0,0083	58,38
	N <sub>2</sub>	0,30	28	8,4	0,476	93,44	0,00509	
	O <sub>2</sub>	0,23	32	7,36	0,417	111,6	0,00374	
Отбросн ой поток	He	0,006	4	0,024	0,0008	0,225	0,0036	1,664
	N <sub>2</sub>	0,557	28	15,596	0,5268	1,573	0,3349	
	O <sub>2</sub>	0,437	32	13,984	0,4724	1,80	0,2624	

# Определение теплоёмкости смеси

$$c_{p\text{см}} = \sum_1^n y_i^M \cdot c_{pi}$$

где  $c_{pi}$  – теплоёмкость  $i$ -го компонента при  $T_{\text{ср}}$  и  $P_{\text{ср}}$ , кДж/(кг К).

Поток	Компонент		$c_{pi}'$ кДж/(кг К)		$c_{\text{рсм}}'$ кДж/(кг К)
Исходный поток	He	0,107	5,188	0,5551	1,5549
	N <sub>2</sub>	0,476	1,170	0,5569	
	O <sub>2</sub>	0,417	1,062	0,4429	
Отбросной поток	He	0,0008	5,193	0,0415	1,0245
	N <sub>2</sub>	0,5268	1,041	0,5484	
	O <sub>2</sub>	0,4724	0,920	0,4346	

# Тепловой расчет теплообменника XIII

Определяемая величина	Расчётная формула и численное значение
1	2
<b>Прямой поток (исходная смесь)</b>	
<b>Секундный массовый расход <math>G_{см}</math>, кг/с</b>	$G_{см} = \frac{V_{см} \cdot \rho_{см}}{3600} = \frac{37,8 \cdot 1,21}{3600} = 0,012705$
<b>Скорость смеси в кольцевом пространстве <math>w_{см}</math>, м/с</b>	$w_{см} = \frac{G_{см}}{0,785 \cdot (D_{вн}^2 - d_n^2) \cdot \rho_{см}} = \frac{0,012705}{0,785 \cdot (10^2 - 6^2) \cdot 10^{-6} \cdot 58,38} = 4,33$
<b>Эквивалентный диаметр кольцевого зазора <math>d_э</math>, м</b>	$d_э = D_{вн} - d_n = 0,004$
<b>Критерий Рейнольдса <math>Re_{см}</math></b>	$Re_{см} = \frac{w_{см} \cdot d_э \cdot \rho_{см}}{\mu_{см}} = \frac{4,33 \cdot 0,004 \cdot 58,38}{20,12 \cdot 10^{-6}} = 50188$
<b>Критерий Прандтля <math>Pr_{см}</math></b>	$Pr_{см} = \frac{\mu_{см} \cdot c_{см}}{\lambda_{см}} = \frac{20,12 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5549 \cdot 10^3}{66,8 \cdot 10^{-3}} = 0,458$
<b>Критерий Нуссельта <math>Nu_{см}</math></b>	$Nu_{см} = 0,015 \cdot Re_{см}^{0,8} \cdot Pr_{см}^{0,33} \cdot \left( \frac{D_{вн}}{d_n} \right)^{0,25} =$ $= 0,015 \cdot 5761 \cdot 0,778 \cdot 1,136 = 76,37$

# Тепловой расчет теплообменника XIII

**Определяемая величина**
**Расчётная формула и численное значение**
**Прямой поток (исходная смесь)**

 Коэффициент теплоотдачи от  
 потока исходной смеси к стенке  $\alpha_{см}$ ,  
 Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$\alpha_{см} = \frac{Nu_{см} \cdot \lambda_{см}}{d_э} = \frac{76,37 \cdot 66,8 \cdot 10^{-3}}{0,004} = 1275$$

**Обратный поток (чистый гелий)**

 Скорость потока  $w_{He}$ , м/с

$$w_{He} = \frac{G_{He}}{0,785 \cdot d_{вн}^2 \cdot \rho_{He}} = \frac{17,648 \cdot 0,1785}{3600 \cdot 0,785 \cdot 4^2 \cdot 10^{-6} \cdot 13,575} = 5,13$$

 Критерий Рейнольдса  $Re_{He}$ 

$$Re_{He} = \frac{w_{He} \cdot d_{вн} \cdot \rho_{He}}{\mu_{He}} = \frac{5,13 \cdot 0,004 \cdot 13,575}{19,92 \cdot 10^{-6}} = 13984$$

 Критерий Прандтля  $Pr_{He}$ 

$$Pr_{He} = \frac{\mu_{He} \cdot c_{He}}{\lambda_{He}} = \frac{19,92 \cdot 10^{-6} \cdot 5,188 \cdot 10^3}{0,1575} = 0,656$$

 Критерий Нуссельта  $Nu_{He}$ 

$$Nu_{He} = 0,023 \cdot Re_{He}^{0,8} \cdot Pr_{He}^{0,4} = 0,023 \cdot 2076 \cdot 0,845 = 41,78$$

 Коэффициент теплоотдачи от  
 стенки к гелию  $\alpha_{He}$ , Вт/(м<sup>2</sup> К)

$$\alpha_{He} = \frac{Nu_{He} \cdot \lambda_{He}}{d_{вн}} = \frac{41,78 \cdot 0,1575}{0,004} = 1645$$

# Тепловой расчет теплообменника XIII

Определяемая величина	Расчётная формула и численное значение
<b>Отбросной поток</b>	
Скорость потока $w_{отбр}$ , м/с	$w_{отбр} = 3$
Критерий Рейнольдса $Re_{отбр}$	$Re_{отбр} = \frac{w_{отбр} \cdot D_n \cdot \rho_{отбр}}{\mu_{отбр}} = \frac{3 \cdot 0,012 \cdot 1,664}{18,6 \cdot 10^{-6}} = 3186$
Относительный диаметральный $\tau_1$ и осевой $\tau_2$ шаги навивки	$\tau_1 = 1,1; \tau_2 = 1,2$
Критерий Нуссельта $Nu_{отбр}$	$Nu_{отбр} = c Re_{отбр}^n = 0,083 \cdot 3186^{0,85} = 78,9$
Коэффициент теплоотдачи от стенки к отбросному потоку $\alpha_{отбр}$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	$\alpha_{отбр} = \frac{Nu_{отбр} \cdot \lambda_{отбр}}{D_n} = \frac{78,9 \cdot 26,558 \cdot 10^{-3}}{0,012} = 174,6$
Коэффициент теплопередачи между исходной смесью и отбросным потоком $K_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{см}} \cdot \frac{D_n}{D_{вн}} + \frac{1}{\alpha_{отбр}}} = \frac{1}{\frac{1}{1275} \cdot \frac{12}{10} + \frac{1}{174,6}} = 150$

# Тепловой расчет теплообменника XIII

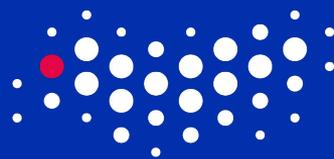
Определяемая величина	Расчётная формула и численное значение
Среднелогарифмическая разность температур между потоками исходной смеси и отбросным газом $\Delta T_1$ , К	$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_{\text{ввлх}} - \Delta T_{\text{вх}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{ввлх}}}{\Delta T_{\text{вх}}}\right)} = \frac{18 - 15}{\ln\left(\frac{18}{15}\right)} = 16,45$
Поверхность теплообмена $F_1$ , м <sup>2</sup>	$F_1 = \frac{Q_{\text{см-отбр}}}{K_1 \Delta T_1} = \frac{769,06}{150 \cdot 16,45 \cdot 3,6} = 0,0864$
Коэффициент теплопередачи между потоками исходной смеси и гелием $K_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{см}}} + \frac{d_n}{d_{\text{вн}}} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{He}}}} = \frac{1}{\frac{1}{1275} + \frac{6}{4} \cdot \frac{1}{164,5}} = 589,6$
Среднелогарифмическая разность температур между потоками исходной смеси и чистым гелием $\Delta T_2$ , К	$\Delta T_2 = \frac{\Delta T_{\text{ввлх}} - \Delta T_{\text{вх}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{ввлх}}}{\Delta T_{\text{вх}}}\right)} = \frac{17 - 15}{\ln\left(\frac{17}{15}\right)} = 15,98$
Поверхность теплообмена $F_2$ , м <sup>2</sup>	$F_2 = \frac{Q_{\text{см-He}}}{K_2 \Delta T_2} = \frac{521,8}{589,6 \cdot 15,98 \cdot 3,6} = 0,01538$

## Тепловой расчет теплообменника XIII

Определяемая величина	Расчётная формула и численное значение
Длина трубки потока исходной смеси $l_1$ , м	$l_1 = \frac{F_1}{\pi \cdot D_n} = \frac{0,0864}{3,14 \cdot 0,012} = 2,29$
Длина гелиевой трубки $l_2$ , м	$l_2 = \frac{F_2}{\pi \cdot d_n} = \frac{0,01538}{3,14 \cdot 0,006} = 0,816$
Окончательная длина труб, м	$l_1 = l_2 = 2,63 \text{ м (с учетом запаса 15 \%)}$

## Заключение

- Проведен выбор и анализ схемы криогенного блока очистки гелия от высококипящих примесей.
- При одностадийном процессе дефлегмации схема разделения смеси более проста, но она требует несколько больших энергетических затрат. Увеличение потерь, растворяющегося в конденсате, при использовании прямоточной конденсации, обычно компенсируются большей простотой и компактностью конденсатора
- Приведена методика и произведен предварительный расчет криогенного блока очистки гелия от высококипящих примесей



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Спасибо за внимание!**

Санкт-Петербург, 2019