

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках научно-исследовательской деятельности была поставлена задача провести сравнительный анализ габаритных и энергетических параметров теплообменных аппаратов для предварительного охлаждения гелия. Вопрос предварительного охлаждения в гелиевых криогенных системах имеет большое значение, поскольку применение азотной ванны позволяет без значительных капитальных затрат понизить температуру гелия до азотного уровня.

Основная проблема, возникающая при применении азотной ступени предварительного охлаждения, – теплообмен в двухфазной среде. Формулы для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении на горизонтальной трубе несут эмпирический характер, минимальная погрешность расчета составляет 20%, что является причиной больших коэффициентов запаса по площади теплообменной поверхности. Рассмотрим процесс кипения жидкого азота при подводе к нему теплоты от нагревателя с температурным потенциалом  $\Delta t$  – разность температур между стенкой нагревателя и жидкостью [1, стр. 154].

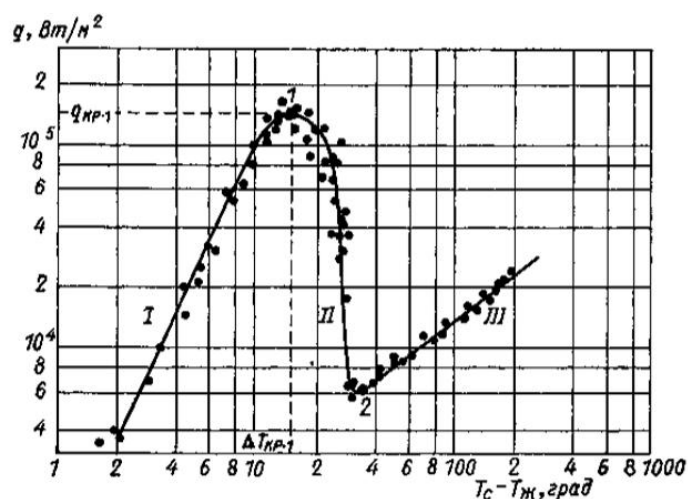


Рисунок 1.1. Кривая зависимости теплового потока от температурного напора при кипении азота в большом объеме. I – пузырьковое кипение, II – переходное кипения, III – пленочное кипение; 1 – точка первого кризиса кипения, 2 – точка второго кризиса кипения.

На рис. 1.1 при тепловом потоке менее  $6000 \text{ Вт/м}^2$  наблюдается область однофазной свободной конвекции при малых значениях  $\Delta t$  и  $q$ . Плотность центров

парообразования в этой области невелика вследствие малых перегревов жидкости, поэтому теплоотвод от стенки осуществляется в режиме свободной конвекции ( $\alpha \sim \Delta t^{0.25}$  или  $\alpha \sim \Delta t^{\frac{1}{3}}$  [2, п. 18.1]).

Режим I – область развитого пузырькового кипения. Интенсивный теплообмен в этой области обусловлен пульсационным движением жидкости у стенки, вынужденным быстрорастущими пузырьками пара. Этот режим наиболее важный в практическом отношении, поскольку характеризуется процессом интенсивной теплоотдачи, при котором  $\alpha \sim \Delta t^2$ ;  $\alpha \sim q^{\frac{2}{3}}$ ;  $q \sim \Delta t^3$  [2, п. 18.1].

Режим II – область, в которой наблюдается парадоксальное, противоречащее обычному опыту явление: тепловой поток уменьшается с ростом температурного напора. Это область расположена между двумя характерными точками кризиса теплообмена и возникает из-за перемещающегося во времени и по поверхности пузырькового и пленочного кипения.

Режим III – область пленочного кипения. Паровая пленка изолирует горячую стенку от жидкости. Для этой области  $\alpha \sim \Delta t^{-0.25}$ . Термическое сопротивление пленки пара весьма велико из-за низкой теплопроводности пара. Отсутствует перемешивание. В результате коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении на порядок ниже, чем при пузырьковом кипении.

Из рассмотрения кривой кипения следует, что при первом контакте трубки с газообразным «горячим» гелием теплообмен будет происходить в условиях пленочного кипения. Исходя из конструкции теплообменного аппарата возможно снижение влияние паровой пленки на поверхности змеевика.

В том случае, если в радиальном направлении будет только один слой змеевика или радиальный шаг навивки будет много больше характерного размера ( $t \gg 1.5d_n$ ), возможно обеспечить непрерывную подачу жидкости к поверхности стенки с учетом земной гравитации. Руководствуясь данным решением и методикой расчета разработанной С.С. Будневичем [3. стр. 127] для азотных ванн предварительного охлаждения, применяемых в сателлитных рефрижераторах, был рассчитан, спроектирован и конструктивно проработан змеевиковый теплообменный аппарат, чертеж которого представлен в Приложении А.

## 1. Выбор уравнения состояния

Поскольку для расчета термодинамических циклов режимов работы и альтернативных вариантов реализации ожижения гелия применяется программный комплекс HYSYS, был проведен анализ уравнений состояния и обоснована возможность применения выбранного пакета свойств.

На инженерном вебинаре 17 октября 2006 года компания AspenTech представила презентацию, в которой приведены основные положения по применяемым в HYSYS термодинамическим моделям [8]. В рамках данной работы для моделирования процессов используются чистые вещества. Процессы смешения и разделения не рассчитываются, поэтому требуется пакет свойств, параметры которого обеспечивают сходимость термодинамических свойств в широком диапазоне температуры и давления. Наиболее подходящий и рекомендуемый AspenTech пакет свойств – MBWR.

MBWR – моделированное уравнение Бенедикта-Вебба-Рубина, названное в честь Мэнсона Бенедикта, Дж. Б. Вебба и Л.С. Рубина. Разработка велась компанией M.W. Kellogg. В результате удалось модифицировать уравнение Битти-Бриджмена с увеличением определенных коэффициентов уравнения до 8. [9]. Базовое уравнение состояния MBWR:

$$P = \rho RT + \left( B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \rho^2 + (bRT - a) \rho^3 + \alpha a \rho^6 + \frac{c \rho^3}{T^2} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2), \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура;

$P$  – давление;

$\rho$  – молярная плотность.

Модифицированное уравнение, используемое в HYSYS:

$$\begin{aligned}
P = & \rho RT + \left( B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \\
& + \left( bRT - a - \frac{d}{T} \right) \rho^3 + \alpha \left( a + \frac{d}{T} \right) \rho^6 + \\
& + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2),
\end{aligned} \tag{2}$$

Значения коэффициентов:

$$A_0 = \sum_i \sum_j x_i x_j A_{0i}^{\frac{1}{2}} A_{0j}^{\frac{1}{2}} (1 - k_{ij}) \tag{3}$$

$$B_0 = \sum_i x_i B_{0i} \tag{4}$$

$$C_0 = \sum_i \sum_j x_i x_j C_{0i}^{\frac{1}{2}} C_{0j}^{\frac{1}{2}} (1 - k_{ij})^3 \tag{5}$$

$$D_0 = \sum_i \sum_j x_i x_j D_{0i}^{\frac{1}{2}} D_{0j}^{\frac{1}{2}} (1 - k_{ij})^4 \tag{6}$$

$$E_0 = \sum_i \sum_j x_i x_j E_{0i}^{\frac{1}{2}} E_{0j}^{\frac{1}{2}} (1 - k_{ij})^5 \tag{7}$$

$$\alpha = \left[ \sum_i x_i \alpha_i^{\frac{1}{3}} \right]^3 \tag{8}$$

$$\gamma = \left[ \sum_i x_i \gamma_i^{\frac{1}{3}} \right]^2 \tag{9}$$

$$a = \left[ \sum_i x_i a_i^{\frac{1}{3}} \right]^3 \quad (10)$$

$$b = \left[ \sum_i x_i b_i^{\frac{1}{3}} \right]^3 \quad (11)$$

$$c = \left[ \sum_i x_i c_i^{\frac{1}{3}} \right]^3 \quad (12)$$

$$d = \left[ \sum_i x_i d_i^{\frac{1}{3}} \right]^3, \quad (13)$$

где  $i, j$  – индексы компонентов, суммирование осуществляется по всем компонентам;

$B_{0i}, A_{0i} \dots$  и т.д. – параметры чистых компонентов для  $i$ -того компонента;

$x_i$  – мольная доля  $i$ -того компонента;

$k_{ij}$  – коэффициент бинарного взаимодействия.

Значения параметров и коэффициентов приведены в [10].

Область применимости уравнения состояния MBWR [11] для веществ, применяемых в расчетах, отражена в таблице 1.1:

Таблица 1.1 – Область допустимых параметров для уравнения MBWR

Компонент	Диапазон температур, K	Максимальное давление, МПа
<i>He</i>	0.8 – 1500	200
<i>N<sub>2</sub></i>	63 – 1900	1000

Для обоснования применимости уравнения состояния проводится сравнение значение термодинамических свойств, рассчитанных с применением уравнения и полученных из справочника [12]. Результат представлен в таблице 1.2:

Таблица 1.2 – Относительные отклонения значений теплофизических свойств

Вещество Парметр	He Табл.	He MBWR	N <sub>2</sub> Табл.	N <sub>2</sub> MBWR
Плотность при 0 °С и 1013 гПа, кг/м <sup>3</sup>	0.17846	0.1785	1.2505	1.250
Отклонение, %	0.022		0.040	
Теплоемкость изобарная при 20 °С и 1013 гПа, кДж/(кг · К)	5.276	5.193	1.041	1.041
Отклонение, %	1.573		0	
Теплоемкость изохорная при 20 °С и 1013 гПа, кДж/(кг · К)	3.182	3.115	0.737	0.7438
Отклонение, %	2.106		0.914	
Температура кипения при 1013 гПа, К	4.215	4.221	77.35	77.36
Отклонение, %	1.421		0.129	
Теплота испарения при температуре кипения, кДж/кг	20.43	20.712	197.6	198.63
Отклонение, %	1.362		0.519	
Плотности жидкости (в скобках температура, К), кг/м <sup>3</sup>	125.0 (4.215)	125.1 (4.215)	807 (77.36)	808.5 (77.36)
Отклонение, %	0.080		1.854	
Критическая температура, К	5.189	5.190	126.2	126.2
Отклонение, %	0.519		0	
Критическое давление, МПа	0.229	0.227	3.4	3.394
Отклонение, %	0.873		0.176	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	69.64	69.83	313.1	311.22
Отклонение, %	0.272		0.600	

На основании проведенного анализа для моделирования процессов и проведения расчетов циклов принимается уравнение термодинамического состояния MBWR. Погрешность определения теплофизических свойств менее 2% удовлетворяет инженерной точности расчета.

## 2. Расчет змеевиковой азотной ванны

Схема термодинамического цикла и таблица значений параметров точек спутникового рефрижератора представлены на рис. 2.1 и в табл. 2.1:

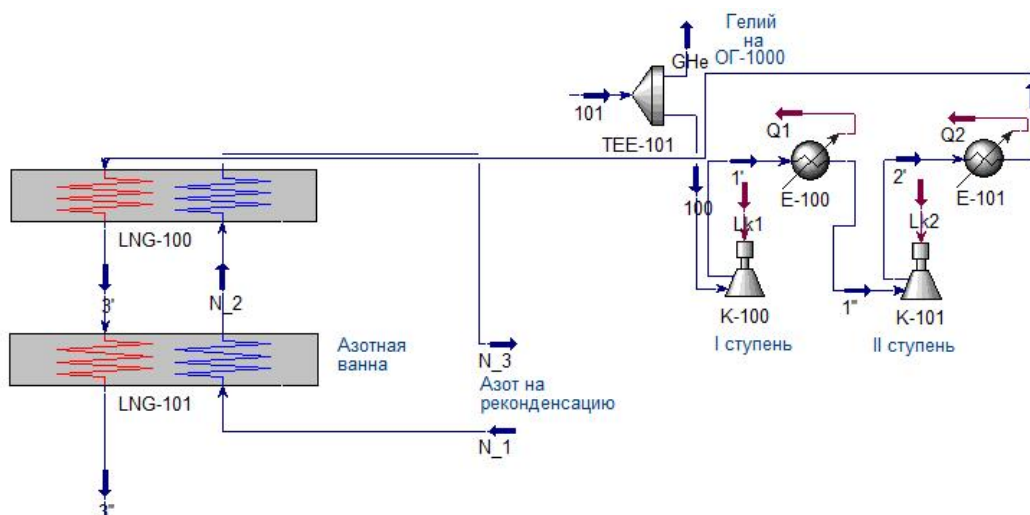


Рис. 2.1. Упрощенная схема рефрижератора в спутном режиме работы

Таблица 2.1 – Параметры точек упрощенного цикла спутникового рефрижератора

Точка	Доля пара	Температура, К	Давление, МПа	Расход, кг/ч
100	1,0	300,0	0,1	180,0
1'	1,0	663,3	0,5	180,0
2	1,0	300,0	2,0	180,0
2'	1,0	641,8	2,0	180,0
1''	1,0	300,0	0,5	180,0
3'	1,0	177,9	2,0	180,0
3''	1,0	84,2	2,0	180,0
GHe	1,0	300,0	0,1	0,0
N_2	0,9	79,2	0,1	500,0
N_3	1,0	282,5	0,1	500,0
N_1	0,0	79,2	0,1	500,0
101	1,0	300,0	0,1	180,0

Поток газообразного гелия с массовым расходом  $G_{He} = 180 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$  сжимается в винтовом компрессоре «Каскад-110/30» от давления  $p_0$  до давления  $p$ . Сжатый гелий, охлажденный до температуры окружающей среды, проходит предварительный теплообменный аппарат LNG-100, где охлаждается до состояния 3' и затем проходит

ванну с жидким азотом LNG-101, кипящем при давлении  $p_{N_2} = 0.125$  МПа, охлаждаясь до состояния 3'', захлаживает криостаты с магнитами до температуры  $T_m = 90^\circ\text{K}$ . По мере понижения температуры обратного потока из магнитов включается прямой поток гелия, установка переходит на пусковой режим с подачей дополнительного расхода жидкого гелия из центрального ожижителя ОГ-1000.

- Температура гелия на входе в азотную ванну:  $T_{He_{\text{вх}}} = 177.9 \text{ K}$ ;
- Температура жидкого азота при давлении 0.125 МПа:  $T_{N_2} = 79.2 \text{ K}$  ;
- Недорекуперация на холодном конце:  $\Delta T_2 = 5.18 \text{ K}$ ;
- Максимальный температурный напор:  $T_1 = 98.72 \text{ K}$ ;
- Расход гелия:  $G_{He} = 180 \text{ кг/ч}$ ;
- Расход жидкого азота:  $G_{N_2} = 500 \text{ кг/ч}$ , с учетом рекуперации холода паров.

*Давление.* Давление сжатого гелия на входе в криогенный блок принимается равным  $p_2 = 2$  МПа. Давление на входе в азотную ванну считаем равным  $p_2$ , т.к. практически величина потеря давления невелика.

*Температуры и разность температур.* Температура кипения жидкого азота  $T_{0N_2} = 79.18 \text{ K}$ . Разность температур на теплом конце предварительного теплообменника между потоком сжатого гелия и обратным потоком сжатого гелия, и обратным потоком низкого давления  $\Delta T^{II} = 15 \text{ K}$ . Разность температур между кипящим азотом и гелием, выходящим из азотной ванны,  $\Delta T_{79K} = 4 \text{ K}$ . Температура азота на выходе из ванны предварительного охлаждения  $T_{1N_2} = 81 \text{ K}$ .

*Теплопритоки из окружающей среды.* Принимаем следующие значения теплопритоков по данным [3, табл. 1.6]: для цикла жидкого азота – 20%.

*Теплоемкая масса.* Теплоемкая масса сателлитного рефрижератора и элементов ускорителя – 80 тонн. Расчетное время захлаживания – 80-100 часов (предпусковой и пусковой режимы).

*Расходы потоков.* Расход сжимаемого гелия  $G_{He} = 180 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ , расход жидкого азота в ванне предварительного охлаждения  $G_{N_2} = 500 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$  (в режиме реконденсации). Поток жидкого азота, идущего на предварительное охлаждение, расходуется на



компенсацию тепловой нагрузки, которая складывается из тепла, отнимаемого от сжатого гелия при предварительном охлаждении, холодопроизводительности, вводимой в цикл в интервале изменения температуры от  $T_3$  до  $T_{0N_2}$ , а также теплопритоков извне к азотному экрану, азотной ванне и к части работающей на этом уровне сателлитному рефрижератору. Теплоприток из окружающей среды к той части рефрижератора, которая расположена в зоне температур  $T_3$  до  $T_{0N_2}$ :

$$q_3^{T>79^\circ K} = 0.2 \cdot (h_3 - h_4) \quad (14)$$

$$q_3^{T>79^\circ K} = 0.2 \cdot (-969.4 + 1123) = 0.2 \cdot 148.6 \approx 29.72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}_{He}}$$

Расход жидкого азота на увеличение холодопроизводительности:

$$G_{xN_2} = \frac{G_{N_2}}{G_{He}} + \frac{q_3^{T>79^\circ K}}{h_{1N_2} - h_{0N_2}} \quad (15)$$

$$G_{xN_2} = \frac{500}{180} + \frac{29.72}{-224 + 422.2} \approx 2.78 + 0.15 \approx 2.93 \frac{\text{кг}_{LN_2}}{\text{кг}_{He}}$$

Пересчитанный расход жидкого азота:

$$G_{N_2} = G_{xN_2} \cdot G_{He} = 2.93 \cdot 180 = 527.4 \text{ кг}_{LN_2} \quad (16)$$

Таблица 2.2 – Сводные данные материальных и тепловых потоков азотной ванны

Аппарат/Х-ка	Поток	Расход, кг/ч	Температура, К		Тепловая нагрузка
			Вход	Выход	
Азотная ванна (предпусковой режим)	Гелий высокого давления	180	177.9	84.36	25.61 кВт
	Азот	527.4	79.2	79.2	
Аппарат/Х-ка	Поток	Расход, кг/ч	Температура, К		Тепловая нагрузка
			Вход	Выход	
Азотная ванна (пусковой режим)	Гелий высокого давления	180	109.3	84.2	6.89 кВт
	Азот	527.4	79.2	79.2	

Охлаждение гелия высокого давления в азотной ванне осуществляется за счет кипения жидкого азота при  $p_{N_2} = 0.125$  МПа. Для подобного аппарата характерно наличие высокого значения коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего азота  $\alpha_{\text{кип}} = (1750 \div 2300) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$  и более низкого  $\alpha$  от потока газа к стенке, который и является определяющим при расчете коэффициента теплопередачи.

Среднелогарифмическая разность температур:

$$\tau_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{98.7 - 5.18}{\ln\left(\frac{98.7}{5.18}\right)} = 31.74 \text{ K} \quad (17)$$

$\Delta T_1$  – разность температур между входящим в азотную ванну потоком гелия высокого давления и кипящим азотом на входе,  $\Delta T_1 = T_3 - T_{0N_2} = 177.9 - 79.2 = 98.7 \text{ K}$ ,  $\Delta T_2$  – разность температур между потоками гелия высокого давления и азота, выходящим из ванны:  $\Delta T_2 = T_4 - T_{1N_2} = 84.18 - 79.18 = 5.18 \text{ K}$ .

Основные параметры гелия высокого давления:

*Средняя температура*

$$T_{\text{срHe}} = \frac{T_3 + T_4}{2} = \frac{177.9 + 84.18}{2} = 131.1 \text{ K} \quad (18)$$

*Среднее значение теплоемкости*

$$C_{P_{\text{He}}} = 5.21 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

*Среднее значение теплопроводности*

$$\lambda_{\text{He}} = 0.0903 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

*Среднее значение вязкости*

$$\mu_{\text{He}} = 1.16 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

*Удельный объем*

$$\nu_{\text{He}} = 0.139 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Параметры трубок:

$$d_{\text{BH}} = 16 \text{ мм}; \quad \delta = 1 \text{ мм}; \quad D_{\text{ЗМ}} = 480 \text{ мм}$$

$$d_{\text{H}} = d_{\text{BH}} + 2 \cdot \delta = 16 + 2 = 18 \text{ мм} \quad (19)$$

Определим критический удельный тепловой поток для обоснования принимаемых в дальнейшем формул [3, стр. 109]:

$$q_{\text{кр}} = 1.7 \cdot 10^4 \cdot \frac{0.138^{0.5} \cdot (\gamma_1 - \gamma_2)^{\frac{13}{24}} \cdot (\gamma_2 \cdot 48 \cdot 80.1)^{\frac{1}{3}} \cdot (1.12 \cdot 10^{-3})^{\frac{1}{24}}}{\gamma_1^{\frac{5}{12}} \cdot 0.48^{\frac{1}{6}}} \quad (20)$$

$$q_{\text{кр}} = 178974.9 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

где:  $\gamma_1 = \frac{1}{0.001192};$

$$\gamma_2 = \frac{1}{1.3};$$

$$q_{\text{кр}} = 208008.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Заходность змеевика:  $n_3 = 5$

Скорость потока в трубках:

$$w = \frac{4 \cdot G_{\text{He}} \cdot \nu_{\text{He}}}{n_3 \cdot \pi \cdot d_{\text{BH}}^2} = \frac{4 \cdot 180 \cdot 0.139}{5 \cdot 3.14 \cdot 0.016^2} = 6.92 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (21)$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{w \cdot d_{\text{BH}}}{\mu_{\text{He}} \cdot \nu_{\text{He}}} = \frac{6.92 \cdot 0.016}{1.16 \cdot 10^{-5} \cdot 0.139} = 68351.3 \quad (22)$$

тогда, течение – турбулентное.

Критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_{\text{He}} \cdot C_{p_{\text{He}}}}{\lambda_{\text{He}}} = \frac{1.16 \cdot 10^{-5} \cdot 5.21}{0.0903} = 0.672 \quad (23)$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 0.023 \cdot 68351.3^{0.8} \cdot 0.672^{0.4} = 114.68 \quad (24)$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{He} = \frac{Nu \cdot \lambda_{He}}{d_{вн}} = \frac{114.68 \cdot 0.0903}{0.016} = 816.2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}} \quad (25)$$

Величину удельной тепловой нагрузки определим графически. При этом исходим из того, что удельные тепловые потоки со стороны гелия и азота равны между собой. Для удобства относим удельный тепловой поток к единице внешней поверхности трубки [3, стр. 108]:

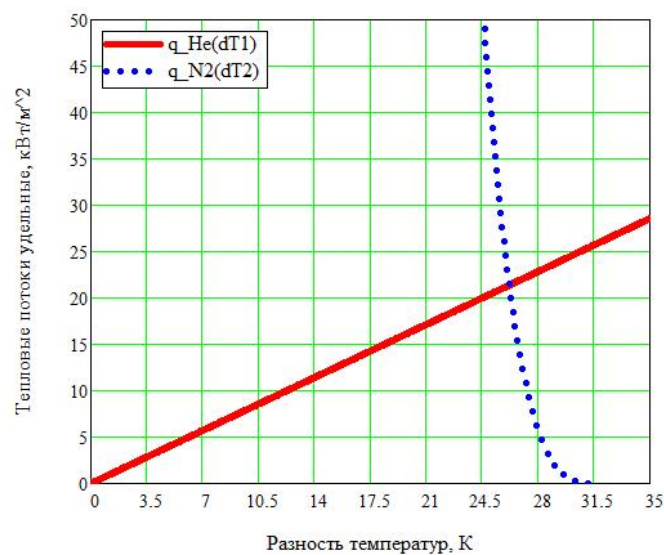


Рис. 2.2. Графическое определение  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $q$

Из графического решения:

$$q = 21389.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; \quad \Delta T_{1\text{ср}} = 26.2 \text{ К}; \quad \Delta T_{2\text{ср}} = 5.53 \text{ К}$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему азоту:

$$\alpha_{N_2} = A_1 \cdot q^{0.7} = 3.6 \cdot 21389.1^{0.7} = 3867.3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (26)$$

где,  $A_1$  [3, стр. 107], с учетом пересчета в Вт из ккал:

$$A_1 = 7.22 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\gamma_2 \cdot 48}{\gamma_1 \cdot \gamma_2} \right)^{\frac{1}{30}} \cdot \left( \frac{\gamma_1}{1.12 \cdot 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{0.138^{0.75}}{(2.25 \cdot 10^{-5})^{0.45} \cdot 0.48^{\frac{7}{60}} \cdot 80.1^{0.37}} \quad (27)$$

Коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{He}} + \frac{1}{\alpha_{N_2}}} = \frac{1}{\frac{1}{816.2} + \frac{1}{3867.3}} = 673.98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}} \quad (28)$$

Площадь теплообменной поверхности одной трубки:

$$F = \frac{Q}{n_3 \cdot k \cdot \tau_m} = \frac{25610}{5 \cdot 673.98 \cdot 31.74} = 0.239 \text{ м}^2 \quad (29)$$

Длина одной трубки:

$$l_1 = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{вн}}} = \frac{0.239}{3.14 \cdot 0.016} = 4.76 \text{ м} \quad (30)$$

С учетом запаса 50% [3, стр. 109]:

$$L = 1.5 \cdot l_1 = 1.5 \cdot 4.76 = 7.14 \text{ м} \quad (31)$$

Принимается:  $L = 7.15 \text{ м}$

Число витков одной трубки:

$$n_B = \frac{L}{\pi \cdot D_{\text{зм}}} = \frac{7.15}{3.14 \cdot 0.48} = 4.74 \quad (32)$$

Принимается:  $n_B = 4.8$

Принимаем пятизаходный двухслойный змеевик, тогда высота навивки и диаметры навивок – из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} L_H + L_B = L; \quad H_H = H_B \\ H_H = \frac{L_H}{\pi \cdot D_{3M}} \cdot d_H \cdot n_{3M} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{L_H}{\pi \cdot D_{3M}} \cdot n_{3M} \\ H_B = \frac{L_B}{\pi \cdot D_{BH3M}} \cdot d_H \cdot n_{3M} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{L_B}{\pi \cdot D_{BH3M}} \cdot n_{3M} \end{cases} \quad (33)$$

$$H = 0.31 \text{ м}; \quad D_{3M} = 480 \text{ мм}; \quad D_{BH3M} = 400 \text{ мм} \quad (34)$$

Падение напора при прохождении змеевика. Коэффициент Дарси [3, стр. 110]:

$$\zeta = \frac{1}{(1.82 \cdot \lg(Re) - 1.64)^2}$$

$$\zeta = \frac{1}{(1.82 \cdot \lg(68351.3) - 1.64)^2} = 0.0195 \quad (35)$$

Падение давления:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{w^2}{2 \cdot \nu_{He}} \cdot \frac{L}{d_{BH}} = 0.0195 \cdot \frac{6.92^2}{2 \cdot 0.139} \cdot \frac{7.15}{0.018} = 1.47 \text{ кПа} \quad (36)$$

Методика расчета, приведенная выше, основывается на определении коэффициента теплоотдачи для среднего логарифмического температурного напора, значение которого на кривой кипения попадает в область переходного режима кипения. Данное допущение способствует завышенному коэффициенту запаса по теплообменной поверхности – 50%.

Габаритные размеры спроектированного аппарата: высота – 865 мм; ширина – 640 мм.

### 3. Расчет витой азотной ванны

Для расчета витой азотной ванны используются исходные данные, описанные в разделе 2. Расчет условно разбит на две части, в первой представлены зависимости для построения кривой кипения азота по методике, изложенной в [4] и [5]. Во второй – расчет коэффициента теплоотдачи от гелия к стенке, и на основе двух частей проведен расчет коэффициента теплопередачи.

Особенностью расчета является то, что для определения площади теплообмена применяются численные методы. Располагаемый температурный напор разбивается на  $n$  частей, на каждой из которых находятся величины необходимые для расчета коэффициента теплопередачи, затем определяется необходимая площадь поверхности для выбранного внешнего диаметра трубок и числа слоев трубок в радиальном направлении.

Параметры трубок витой азотной ванны:

- Наружный диаметр трубок:  $D_H = 12$  мм;
- Толщина стенки трубки:  $\delta = 0.8$  мм;
- Число трубок в радиальном направлении:  $n_{сл} = 6$ ;
- Число трубок в трубном пучке:  $n_{п} = 12$ ;

Полный расчет представлен в Приложении Б, ниже рассмотрены основные соотношения, принятые для расчета. Первый критический тепловой поток – переход развитого пузырькового кипения в переходную область, рассчитывается по формуле:

$$q_{кр1}(p) = 0.145 \cdot r(p) \cdot \rho'(p)^{0.5} \cdot [\sigma(p) \cdot (\rho'(p) - \rho''(p)) \cdot g]^{0.25} \quad (37)$$

где:  $r(p)$  – теплота парообразования;

$\rho'(p), \rho''(p)$  – плотность жидкости и пара соответственно;

$\sigma(p)$  – поверхностное натяжения;

$g$  – ускорение свободного падения.

Для унификации и обеспечения возможности дальнейшего использования расчетных соотношений критический поток определен в виде функции от давления над поверхностью кипящей жидкости.

Далее определяется приведенная скорость парообразования:

$$W_{\text{кр}}(p) = \frac{q_{\text{кр}1}(p)}{r(p) \cdot \rho''(p)} \quad (38)$$

Характерный линейный размер пузырькового кипения:

$$l_{\text{пуз}}(p) = c'(p) \cdot \rho'(p) \cdot \sigma(p) \cdot \frac{T_{\text{н}}(p)}{(r(p) \cdot \rho''(p))^2} \quad (39)$$

где:  $c'(p)$  – теплоемкость жидкости;

$T_{\text{н}}(p)$  – температура насыщения жидкости при давлении  $p$ .

Критерий Рейнольдса:

$$Re(p) = \frac{W_{\text{кр}}(p) \cdot \lambda'(p)}{v'(p)} \quad (40)$$

где:  $\lambda'(p)$  – коэффициент теплопроводности жидкости;

$v'(p)$  – удельный объем жидкости.

Критерий Нуссельта:

$$Nu(p) = \begin{cases} 0.125 \cdot Re(p)^{0.65} \cdot Pr(p)^{\frac{1}{3}}, & Re(p) > 0.01 \\ 0.065 \cdot Re(p)^{0.5} \cdot Pr(p)^{\frac{1}{3}}, & Re(p) \leq 0.01 \end{cases} \quad (41)$$

где:  $Pr(p)$  – число Прандтля, определенное по параметрам жидкости.

Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении:

$$\alpha_{\text{кр}1}(p) = \frac{Nu(p) \cdot \lambda'(p)}{l_{\text{пуз}}(p)} \quad (42)$$

Первый критический температурный напор:



$$\Delta t_{\text{кр1}}(p) = \frac{q_{\text{кр1}}(p)}{\alpha_{\text{кр1}}(p)} \quad (43)$$

Второй критический тепловой поток:

$$q_{\text{кр2}}(p) = 0.125 \cdot r(p) \cdot \rho'' \cdot \left[ \sigma(p) \cdot \frac{(\rho'(p) - \rho''(p))}{\rho'(p)^2} \right]^{0.25} \quad (44)$$

Второй критический температурный напор:

$$\Delta t_{\text{кр2}}(p) = \left[ \frac{q_{\text{кр1}}(p)}{0.62 \cdot \left[ \frac{\lambda''(p)^3 \cdot r(p) \cdot (\rho'(p) - \rho''(p)) \cdot g}{v''(p) \cdot D_{\text{H}}} \right]^{0.25}} \right]^{\frac{4}{3}} \quad (45)$$

где:  $v''(p)$  – удельный объем пара;

$\lambda''(p)$  – коэффициент теплопроводности пара.

Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении:

$$\alpha_{\text{кр2}}(p) = \frac{q_{\text{кр2}}(p)}{\Delta t_{\text{кр2}}(p)} \quad (46)$$

Коэффициент теплоотдачи при закритическом режиме:

$$\alpha_{\text{зкр}}(\Delta t) = 0.62 \cdot \frac{\lambda''(p)^3}{D_{\text{H}}} \left[ \frac{g \cdot (h_p'' + 0.8 \cdot c'' \cdot \Delta t) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot D_{\text{H}}^3}{\mu_p \cdot \lambda'' \cdot \Delta t} \right]^{0.25} \quad (47)$$

где:  $h_p''$  – энтальпия пара;

$c''$  - теплоемкость пара;

$\mu_p$  – динамическая вязкость пара.

Объединение определенных функций для тепловых потоков позволяет построить кривую кипения в логарифмическом масштабе:

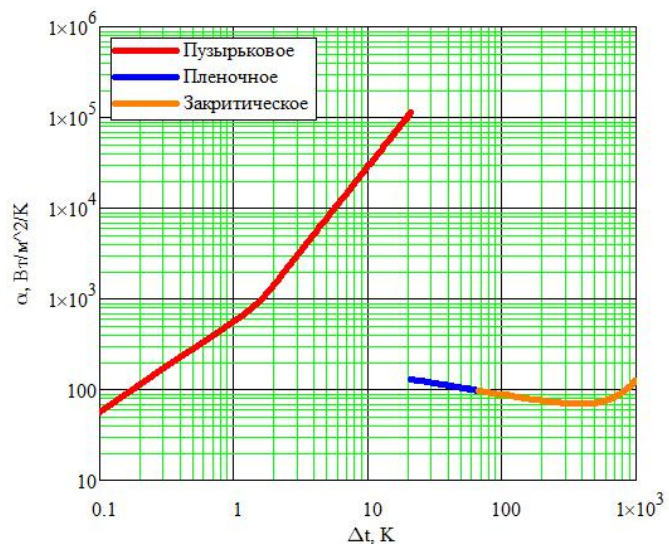


Рис. 3.1. Кривая кипения азота при давлении 0.1 МПа

Для потока гелия расчет аналогичен представленному в разделе 2. Тогда:

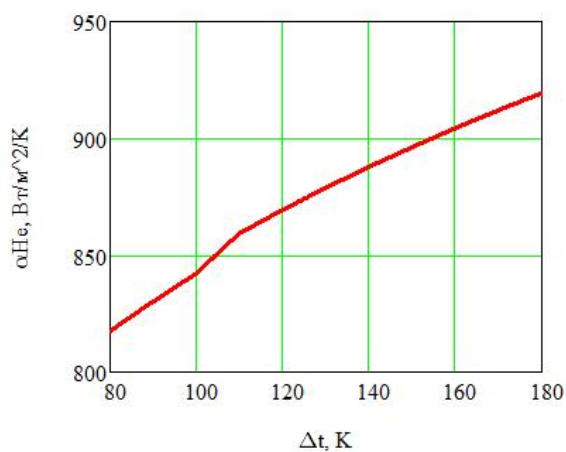


Рис. 3.2. Коэффициент теплоотдачи для гелия

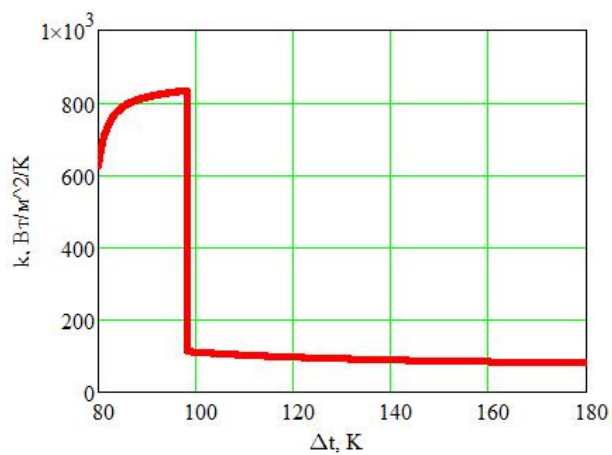


Рис. 3.3. Коэффициент теплопередачи

Полный располагаемый температурный напор разбивается на 10 равных интервалов, для которых с учетом определенного коэффициента теплопередачи необходимая площадь поверхности теплообмена:

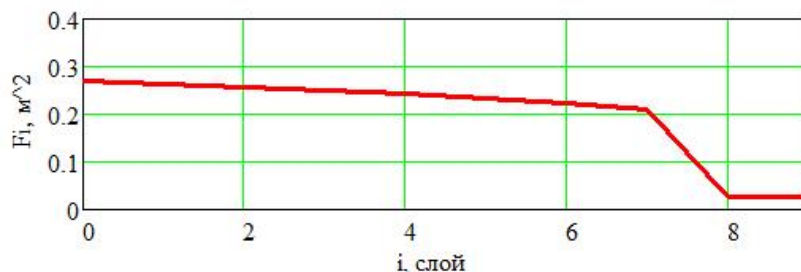


Рис. 3.4. Распределение поверхности теплообмена по слоям. Слева направо – уменьшение температурного напора.

Переход от слоев к температурному напору:

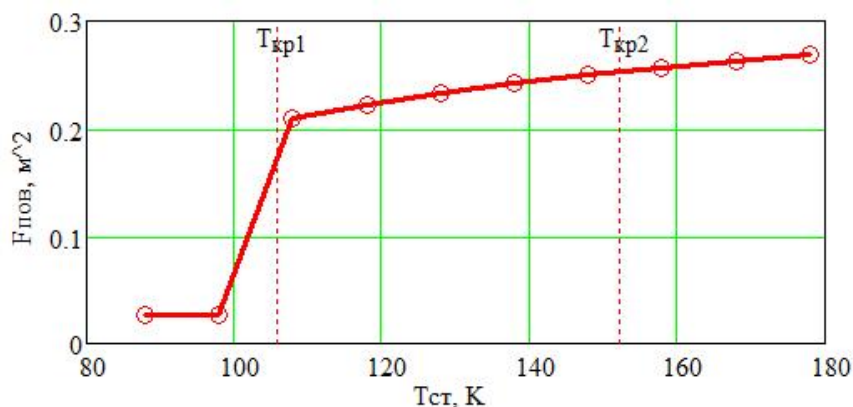


Рис. 3.5. Распределение поверхности теплообмена по температурному уровню поверхности стенки

Требуемая расчетная площадь поверхности:  $F_{тр} = 23.97 \text{ м}^2$

Расчетная длина трубки:  $l_{тр1} = 52.99 \text{ м}$ ;

Длина трубки с учетом запаса 20% (отклонения формул от экспериментальных данных):  $l_{тр1} = 63.6 \text{ м}$ ;

Конструктивные параметры витого теплообменника:

— Диаметр сердечника:  $D_c = 320 \text{ мм}$ ;

— Средний диаметр намотки:  $D_{ср} = 371 \text{ мм}$ ;

— Продольный шаг намотки:  $t_2 = 18$  мм;

— Число витков одной трубки в слое:  $n_{\text{трсл}} = 0.5$ .

Ниже представлена таблица намотки аппарата, рассчитанного по изложенной методике:

Таблица 3.1 – Таблица намотки аппарата

№	$D_{\text{слоя}}$ , мм	$l_{\text{трсл}}$ , мм	$l_{1\text{трсл}}$ , мм
1	326	1029.8	514.9
2	344	1086.1	543.1
3	362	1142.4	571.2
4	380	1198.7	599.3
5	398	1255.0	627.5
6	416	1311.4	655.7

где:  $D_{\text{слоя}}$  – диаметр  $i$ -того слоя;

$l_{\text{трсл}}$  – длина витка трубки в слое;

$l_{1\text{трсл}}$  – длина одной трубки в слое.

Число продольных слоев навивки:  $n_{\text{пр}} = 36$ ;

Высота навивки:  $h_{\text{нв}} = 648$  мм;

Высота аппарата с учетом подвода и отвода трубного пучка от трубной доски до намотки:  $H \cong 1050$  мм;

Ширина аппарата с учетом свободного погружения навивки в область, заполненную жидким азотом:  $D \cong 480$  мм.

Гидравлические потери в трубном пространстве:  $\Delta p = 25.9$  кПа.

#### 4. Выводы

Анализируя полученные результаты по двум методикам, можно прийти к выводу, что конструктивно аппараты будут иметь схожие габаритные и массовые характеристики.

С одной стороны, в случае витого теплообменного аппарата гидравлическое сопротивление выше, поскольку длина трубного пучка значительно больше. С другой – для змеевиковой ванны принимается значительный коэффициент запаса, составляющий 50%, по сравнению с витым вариантом, где погрешность расчетных формул  $\pm 20\%$ .

Для формирования строгих выводов необходимо изготовление двух вариантов различных типоразмеров с последующим проведением испытаний и определением истинных значений коэффициентов теплопередачи.

Поскольку в ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ», который выполняет заказы на производство криогенного оборудования ОИЯИ, отработана технология и налажено производство витых аппаратов, то для разрабатываемых криогенных систем целесообразно проектирование и производство теплообменного оборудования именно такой конфигурации, но для единичного производства наиболее предпочтителен вариант ванны змеевикового типа из-за относительной простоты изготовления и низкой стоимости.

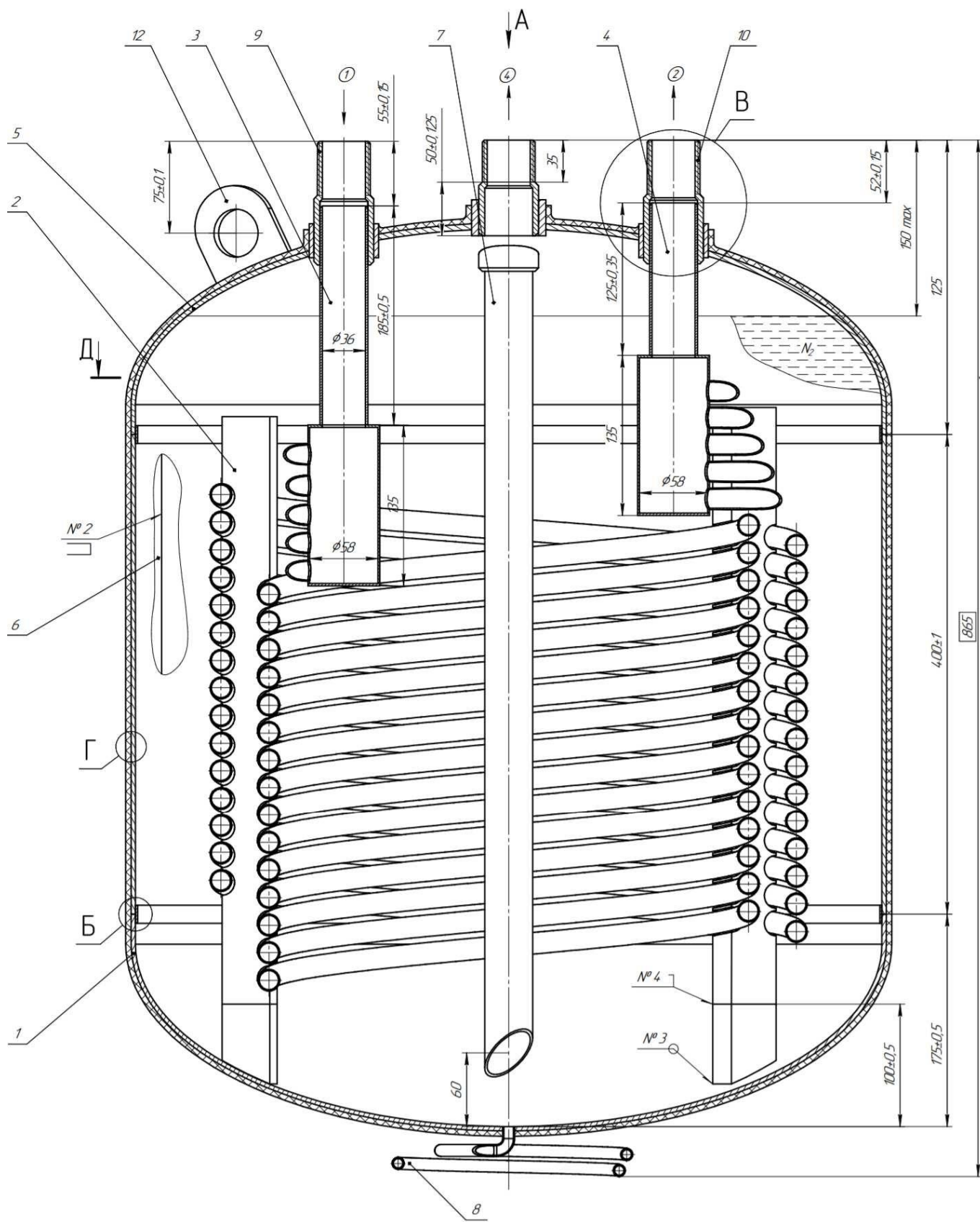
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.И. Безмасляные вакуумные насосы. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1980. – 160 с., ил.
2. Солодов. А.П. Тепломассообмен в энергетических установках. Электронный курс. [twt.mpei.ac.ru](http://twt.mpei.ac.ru/): [сайт]. URL: [twt.mpei.ac.ru/~ochkov/Diff\\_MC/web\\_HMT/index\\_HMT\\_E-Book.htm](http://twt.mpei.ac.ru/~ochkov/Diff_MC/web_HMT/index_HMT_E-Book.htm) (дата обращения 16.02.2020).
3. Будневич С.С., Акулова Л. А., Борзенко Е.И., Головкин Г.А. Примеры расчетов установок глубокого охлаждения. Уч. пос. для вузов по специальности «Компрессорные и холодильные машины и установки». Под ред. д-ра техн. наук проф. С.С. Будневича. Л., «Машиностроение». 1972 г. 288 стр. Табл. 117. Илл. 82. Библ. 66 назв.
4. Шаров Ю.И., Бородихин И.В. Построение кривой кипения жидкости. Методические указания к РГР для студентов 3 курса ФЭН: учеб.-метод. пособие / Ю.И. Шаров, И.В. Бородихин. –: Новосибирск: НГТУ, 2002. - 18 с.
5. Шаров Ю.И. Расчет кривой кипения жидкости: учеб.-метод. пособие / Ю. И. Шаров. –: Новосибирск: НГТУ, 2011. - 16 с.
6. Агеев А.И. , Шамичев. А.Н. Термодинамический анализ рефрижераторного цикла с избыточным обратным потоком. Серпухов, 1982. 12 стр. с рис. Библиогр. 6.
7. Иньков А.Г., Коваленко В.Д., Морковник. И.М. Анализ схем криогенных рефрижераторных установок с избыточным обратным потоком / Сб. науч. тр.: Процессы в криогенных установках и системах. – М.: НПО «Криогенмаш», 1981. – С. 14-22.
8. Aspen Process Engineering Webinar. Aspen HYSYS Property Packages: Overview and Best Practices for Optimum Simulations//POLI.USP.BR: Политехническая школа обучения инженеров и лидеров (Escola Politécnica da USP). URL:

<http://sites.poli.usp.br/d/pqi2408/BestPracticesOptimumSimulationsHYSYSPropertyPackages.pdf> (дата обращения 14.04.2020).

9. Benedict, Manson; Webb, George B.; Rubin, Louis C. (1940), «An Empirical Equation for Thermodynamic Properties of Light Hydrocarbons and Their Mixtures: I. Methane, Ethane, Propane, and n-Butane», Journal of Chemical Physics, doi:10.1063/1.1750658, ISSN 0021-9606.
10. Starling, Kenneth E. (1973), Fluid Properties for Light Petroleum Systems, Gulf Publishing Company, p. 270, ISBN 978-0872012936.
11. Robert P. Hesketh. Which Property Package should I use? Rowan University, стр. A-41.
12. Справочник по физико-техническим основам криогеники/ М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков; Под ред. М. П. Малкова. – 3-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1985. –432 с., ил.

## Приложение А. Змеевиковая ванна ПО





## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Расчет режимов кипения азота



Давление кипения, Па:  $p_{\text{boil}} := 1 \cdot 10^5$

Диаметр трубы, м:  $D_{\text{тр}} := 0.012$        $\delta := 0.0008$

Свойства кипящего вещества

Плотность насыщенной жидкости  $\rho'(p) := \frac{\rho_{s\_px}(p, xN2)}{\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}}$

Плотность насыщенного пара  $\rho''(p) := \frac{\rho_{s\_py}(p, xN2)}{(\text{кг} \cdot \text{м}^{-3})}$

Температура насыщенной жидкости  $T_H(p) := \frac{T_{s\_px}(p, xN2)}{\text{К}}$

Теплоемкость (изобарная)

жидкости:  $C'(p) := \frac{C_{p\_Tdx}[T_{s\_px}(p, xN2), \rho'(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}}$

пара:  $C''(p) := \frac{C_{p\_Tdx}[T_{s\_py}(p, xN2), \rho''(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{(\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1})}$

Энтальпия жидкости  $h'(p) := \frac{h_{Tdx}[T_{s\_px}(p, xN2), \rho'(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{(\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1})}$

Энтальпия пара  $h''(p) := \frac{h_{Tdx}[T_{s\_py}(p, xN2), \rho''(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{(\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1})}$

Теплота парообразования  $r(p) := |h'(p) - h''(p)|$

Поверхностное натяжение  $\sigma(p) := \frac{\sigma_{Tdx}[T_H(p) \cdot \text{К}, \rho'(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{\text{Н} \cdot \text{м}}$

Коэфф. теплопроводности

жидкости:  $\lambda'(p) := \frac{\lambda_{Tdx}[T_H(p) \cdot \text{К}, \rho'(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}}$

пара:  $\lambda''(p) := \frac{\lambda_{Tdx}[T_H(p) \cdot \text{К}, \rho''(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), xN2]}{(\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1})}$

Динамическая вязкость

$$\text{жидкости:} \quad \mu'(p) := \frac{\mu_{\text{Tdx}}[T_{\text{H}}(p) \cdot K, \rho'(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), \text{xN2}]}{\text{Па} \cdot \text{с}}$$

$$\text{пара:} \quad \mu''(p) := \frac{\mu_{\text{Tdx}}[T_{\text{H}}(p) \cdot K, \rho''(p) \cdot (\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}), \text{xN2}]}{(\text{Па} \cdot \text{с})}$$

Кинематическая вязкость

$$\text{жидкости:} \quad v'(p) := \frac{\mu'(p)}{\rho'(p)}$$

$$\text{пара:} \quad v''(p) := \frac{\mu''(p)}{\rho''(p)}$$

$$\text{Коэфф. темп. проводности жидкости:} \quad a'(p) := \frac{\lambda'(p)}{C'(p) \cdot \rho'(p)}$$

$$\text{Число Прандтля:} \quad \text{Pr}'(p) := \frac{v'(p)}{a'(p)}$$

Первый критический тепловой поток:

$$q_{\text{кр1}}(p) := 0.145 \cdot r(p) \cdot \rho'(p)^{0.5} \cdot [\sigma(p) \cdot (\rho'(p) - \rho''(p)) \cdot g]^{0.25}$$

Здесь:

$$r(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 199319.68 \quad \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$$

$$\rho''(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 4.56 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

$$\rho'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 806.59 \quad \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

$$\sigma(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 0.0089 \quad \text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$q_{\text{кр1}}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 2374444.61 \quad \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

Приведенная скорость парообразования (кипения):

$$W_k(p) := \frac{q_{\text{кр1}}(p)}{r(p) \cdot \rho''(p)}$$

$$W_k(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 2.61446 \quad \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$$

Характерный линейный размер для пузырькового кипения:

$$l_{\text{пуз}}(p) := C'(p) \cdot \rho'(p) \cdot \sigma(p) \cdot \frac{T_{\text{H}}(p)}{(r(p) \cdot \rho''(p))^2}$$

Здесь:

$$C'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 2040.96 \quad \text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$T_{\text{н}}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 77.24 \quad \text{К}$$

$$l_{\text{пуз}}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 1.372 \times 10^{-6} \quad \text{м}$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{расч}}(p) := \frac{W_k(p) \cdot l_{\text{пуз}}(p)}{v'(p)}$$

Здесь:

$$v'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 2.001 \times 10^{-7} \quad \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

$$\text{Re}_{\text{расч}}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 17.931$$

Число Нуссельта

$$\text{Nu}(p) := \begin{cases} 0.125 \cdot \text{Re}_{\text{расч}}(p)^{0.65} \cdot \text{Pr}'(p)^{\frac{1}{3}} & \text{if } \text{Re}_{\text{расч}}(p) > 0.01 \\ 0.0625 \cdot \text{Re}_{\text{расч}}(p)^{0.5} \cdot \text{Pr}'(p)^{\frac{1}{3}} & \text{if } \text{Re}_{\text{расч}}(p) \leq 0.01 \end{cases}$$

$$\text{Nu}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 1.0728$$

Здесь:

$$\text{Pr}'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 2.27$$

Коэфф. теплоотдачи при пузырьковом кипении

$$\alpha_{\text{кп1}}(p) := \frac{\text{Nu}(p) \cdot \lambda'(p)}{l_{\text{пуз}}(p)}$$

$$\alpha_{\text{кп1}}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 113364.83 \quad \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}$$

Здесь:

$$\lambda'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 0.145 \quad \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

Температурный напор

$$\Delta t_{\text{кп1}}(p) := \frac{q_{\text{кп1}}(p)}{\alpha_{\text{кп1}}(p)}$$

$$\Delta t_{\text{кр}1}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 20.95 \quad \text{К}$$

Второй критический тепловой поток:

$$q_{\text{кр}2}(p) := 0.125 \cdot r(p) \cdot \rho''(p) \cdot \left[ \frac{[\sigma(p) \cdot (\rho'(p) - \rho''(p))]}{\rho'(p)^2} \right]^{0.25}$$

$$q_{\text{кр}2}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 6533.76 \quad \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$$

Температурный напор

$$\Delta t_{\text{кр}2}(p) := \left[ \frac{q_{\text{кр}2}(p)}{0.62 \cdot \left[ \frac{\lambda''(p)^3 \cdot r(p) \cdot (\rho'(p) - \rho''(p)) \cdot g}{v''(p) \cdot D_{\text{тр}}} \right]^{0.25}} \right]^{\frac{4}{3}}$$

$$\Delta t_{\text{кр}2}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 67.3 \quad \text{К}$$

Коэфф. теплоотдачи при пленочном кипении

$$\alpha_{\text{кр}2}(p) := \frac{q_{\text{кр}2}(p)}{\Delta t_{\text{кр}2}(p)}$$

$$\alpha_{\text{кр}2}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па}) = 97.08$$

Расчетные значения

$$Pr_p := Pr'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$l_{\text{п}3\_p} := l_{\text{п}3}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$r_p := r(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$v'_p := v'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\rho''_p := \rho''(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\lambda'_p := \lambda'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\rho'_p := \rho'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\lambda''_p := \lambda''(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$v''_p := v''(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\mu'_p := \mu'(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$h''_p := h''(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$c''_p := C''(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$T_{\text{H}_p} := T_{\text{H}}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\Delta t_{\text{кр}1\_p} := \Delta t_{\text{кр}1}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

$$\Delta t_{\text{кр}2\_p} := \Delta t_{\text{кр}2}(p_{\text{boil}} \cdot \text{Па})$$

Зависимости для построения кривой кипения (**пузырьковое**):

$$\text{Nu}_{\text{пач}}(\text{Re}) := \begin{cases} 0.125 \cdot \text{Re}^{0.65} \cdot \text{Pr}_p^{\frac{1}{3}} & \text{if } \text{Re} > 0.01 \\ 0.0625 \cdot \text{Re}^{0.5} \cdot \text{Pr}_p^{\frac{1}{3}} & \text{if } \text{Re} \leq 0.01 \end{cases}$$

$$q1 := 1000000$$

Given

$$q1 = \Delta t \cdot \frac{\text{Nu}_{\text{пач}} \left( \frac{\frac{q1}{r_p \cdot \rho''_p} \cdot l_{\text{пуз}_p}}{v'_p} \right) \cdot \lambda'_p}{l_{\text{пуз}_p}}$$

$$q1(\Delta t) := \text{Find}(q1)$$

Зависимости для построения кривой кипения (**пленочное**):

$$q2 := 100000$$

Given

$$\Delta t = \left[ \frac{q2}{\left[ 0.62 \cdot \left[ \frac{\lambda''_p{}^3 \cdot r_p \cdot (\rho'_p - \rho''_p) \cdot g}{v''_p \cdot D_{\text{тр}}} \right]^{0.25} \right]} \right]^{\frac{4}{3}}$$

$$q2(\Delta t) := \text{Find}(q2)$$

Зависимости для построения кривой кипения (**закритическое**):

$$\alpha_{\text{FilmBoil}}(\Delta t) := 0.62 \cdot \frac{\lambda''_p{}^3}{D_{\text{тр}}} \cdot \left[ \frac{g \cdot |h''_p + 0.8 \cdot c''_p \cdot \Delta t| \cdot (\rho'_p - \rho''_p) \cdot D_{\text{тр}}^3}{\mu'_p \cdot \lambda''_p \cdot \Delta t} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$q(\Delta t) := \begin{cases} q1(\Delta t) & \text{if } 0.1 \leq \Delta t \leq \Delta t_{\text{кп1}_p} \\ q2(\Delta t) & \text{if } \Delta t_{\text{кп1}_p} \leq \Delta t \leq \Delta t_{\text{кп2}_p} \\ q2(\Delta t) + c_{\text{St}_\text{Bo}} \cdot \left[ (T_{\text{H}_p} + \Delta t)^4 - T_{\text{H}_p}^3 \right] & \text{if } \Delta t_{\text{кп2}_p} \leq \Delta t \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha_{N2}(T) := \frac{q(T - T_{H\_p})}{(T - T_{H\_p})} \cdot \frac{B_T}{M^2 \cdot K}$$

$$\Delta t1 := 0.1, 0.1 + 0.25 \dots \Delta t_{kp1\_p} + 0.1$$

$$\Delta t2 := \Delta t_{kp1\_p}, \Delta t_{kp1\_p} + 1 \dots \Delta t_{kp2\_p}$$

$$\Delta t3 := \Delta t_{kp2\_p}, \Delta t_{kp2\_p} + 10 \dots 1000$$

