

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики
Высшая школа энергетического машиностроения

Работа допущена к защите
Руководитель ОП
_____Л. В. Гилева
«__»_____2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНОГО НАСОСА ОБЩЕГО
НАЗНАЧЕНИЯ

по направлению подготовки (специальности) 13.04.03 – Энергетическое
машиностроение

Направленность (профиль) 13.04.03_05 – Вакуумная и компрессорная техника
физических установок

Выполнил
студент гр. 3241303/80501



Аксенова А. Г.

Руководитель
доцент ВШЭМ ИЭ,
к. т. н., доцент

Садовский Н. И.

Консультант
по нормоконтролю

Янин И. С.

Санкт-Петербург

2020

РЕФЕРАТ

На 88 с., 12 рисунков, 4 таблицы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ВАКУУМНЫЙ НАСОС, КРИОАДСОРБЦИОННЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС, ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС, ФОРВАКУУМ, АДСОРБЕНТ, КРИОПАНЕЛЬ.

Тема выпускной квалификационной работы: «Расчет и проектирование вакуумного насоса общего назначения».

В настоящей работе представлены основные понятия вакуумной техники, современные средства получения и измерения высокого и сверхвысокого вакуума. Приведены физико-механические характеристики материалов, применяемых для изготовления элементов вакуумных систем. Рассмотрена методика расчета вакуумных систем, сопровождаемая практическими примерами.

1. Зафиксированы результаты расчетов;
2. Подобрано оборудование турбомолекулярного и криоадсорбционного вакуумных насосов;
3. Произведен подробный расчет высоковакуумного криогенного насоса, включая термодинамический, газодинамический и прочностные расчеты;
4. Рассмотрена экономическая целесообразность разработки конструкции и производства криоадсорбционного насоса.

Сопоставлены технико-экономические характеристики криоадсорбционного и турбомолекулярного насосов, определена результативность проекта при заданных исходных данных.

ABSTRACT

On 88 p., 12 figures, 4 tables.

KEYWORD: VACUUM PUMP, CRYOADSORPTION VACUUM PUMP, TURBOMOLECULAR VACUUM PUMP, FOREVACUUM.

Topic of the final qualifying work: "Calculation and design of a General-purpose vacuum pump".

This paper presents the basic concepts of vacuum technology, modern means of obtaining and measuring vacuum. The physical and mechanical characteristics of materials used for manufacturing elements of vacuum systems are given. The method of calculating vacuum systems, accompanied by practical examples, is considered.

1. The results of calculations;
2. Matched equipment turbomechanica and cryoadsorption vacuum pump;
3. A detailed calculation of the high-vacuum cryogenic pump was made, including thermodynamic, gas-dynamic and strength calculations;
4. The economic feasibility of developing the design and production of a cryoadsorption pump is Considered.

The technical and economic characteristics of cryoadsorption and turbomolecular pumps are compared, and the effectiveness of the design is determined for the given initial data.

СОДЕРЖАНИЕ

Ведение.....	7
Глава 1. Литературный обзор.....	8
1 Высоковакуумные крионасосы.....	8
Глава 2. Описание конструкции насоса.....	10
Глава 3. Расчет криoadсорбционного вакуумного насоса.....	12
1 Исходные данные для расчета.....	12
2 Газодинамический расчет.....	13
2.1 Определение количества газа, откачиваемого криoadсорбционным насосом.....	13
2.2 Необходимое количество адсорбента в криoadсорбционном насосе.....	14
2.3 Определение объема адсорбента.....	14
2.4 Определение площади соприкосновения сорбента с газом.....	14
3 Конструкция и геометрические параметры криoadсорбционного насоса.....	15
3.1 Схема криoadсорбционного насоса.....	15
3.2 Геометрические параметры насоса.....	15
4 Тепловой расчет.....	17
4.1 Определение лучистого теплового потока к внутреннему сосуду.....	17
4.2 Определение теплопритока к внутреннему сосуду криoadсорбционного насоса по тепловому мосту.....	19
4.3 Определение количества теплоты, принимаемой криопанелью адсорбционного насоса от сорбируемого газа.....	20
4.4 Определение количества теплоты, поступающей в криопанель адсорбционного насоса за все время работы.....	21

4.5	Определение расхода азота.....	22
4.6	Определение количества теплоты, идущей на охлаждение адсорбента.....	22
4.7	Определение толщины тарелок.....	23
4.8	Применение парлифта для равномерного охлаждения внутреннего сосуда.....	29
4.9	Определение количества теплоты, которое отводится от внутреннего сосуда с тарелками и экраном.....	30
4.10	Определение массы азота, необходимого для охлаждения адсорбента и внутреннего сосуда с тарелками адсорбционного насоса.....	34
4.11	Расчет градиента температуры по экрану.....	35
5	Расчет процесса регенерации.....	39
5.1	Расчет количества теплоты, необходимой для проведения регенерации.....	39
5.2	Определение мощности электронагревателя.....	42
6	Расчет кожуха на устойчивость.....	42
6.1	Определение допускаемого напряжения.....	42
6.2	Расчет обечайки.....	43
6.3	Расчет днища.....	45
6.4	Расчет крышки.....	46
	Глава 4. Описание процесса работы криoadсорбционного насоса...	48
1	Монтажно-технологическая схема.....	48
2	Описание процесса криостатирования.....	49
3	Подбор оборудования.....	49
4	Техническое задание.....	52
5	Расчет ТВН.....	53
5.1	Определение геометрических размеров насоса.....	53
5.2	Площади поверхности газовыделения.....	62

5.3 Определение суммарной величины газовыделений.....	63
6 Определение отношения давления каждого рабочего колеса.....	64
7 Построение откачной характеристики.....	75
8 Выбор форвакуумного насоса.....	76
Глава 5. Экономическая часть.....	78
1 Введение.....	78
2 Технико-экономическое обоснование.....	78
3 Определение себестоимости криoadсорбционного насоса.....	78
4 Рыночная цена продажи.....	82
5 Сопоставление криoadсорбционного и турбомолекулярного насосов.....	82
6 Единовременные затраты в сфере использования.....	83
7 Определение результативности проекта.....	83
Заключение.....	86
Список литературы.....	87

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время очень много внимания уделяется вопросам повышения качества промышленного оборудования и выпускаемых изделий. На многих предприятиях разрабатываются специальные программы повышения качества, а именно совершенствование технологии производства, в частности, в направлении повышения чистоты среды, сопровождающей протекание технологического процесса.

Огромное распространение получили технологические процессы, проводящиеся в условиях вакуума. Такие как, электронная литография, ионная имплантация, имитационные испытания космических аппаратов. Срок службы электронных приборов и стабильность вольтамперных характеристик определяются вакуумом и спектром остаточных газов, сопровождающим тренировку прибора. Качество такого рода производств во многом определяется чистотой и уровнем вакуума.

Получение "чистого" вакуума, т.е. без углеводородов в спектре, достигается применением средств безмасляного вакуумирования, к которым относятся криоадсорбционные вакуумные насосы.

Эффективность криоадсорбционных вакуумных средств откачки подтверждена многочисленными исследованиями, широкой практикой использования для вакуумирования лабораторных приборов и промышленным применением для поддержания вакуума в теплоизоляционных полостях криогенного оборудования. Развитие и совершенствование криогенного оборудования требует разработку эффективных средств вакуумной тепловой защиты.

В настоящей дипломной работе будет рассмотрена, спроектирована и рассчитана конструкция криоадсорбционного вакуумного насоса.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1 Высоковакуумные крионасосы

Основной принцип работы крионасосов заключается в использовании низких температур для осаждения откачиваемых газов на специально сформированных криогенных поверхностях, размещенных в объеме насоса или непосредственно в вакуумной камере. Принципиальная конструктивная схема насоса состоит из четырех основных элементов: криопанель, теплозащитный экран, охлаждающее устройство и герметичный корпус (рис.1.1).

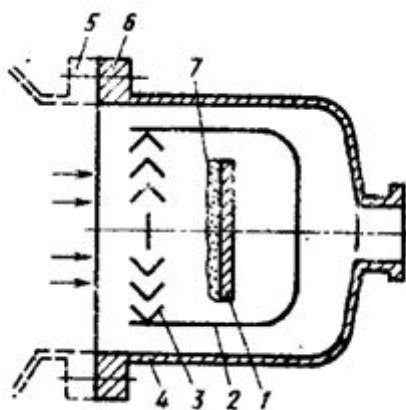


Рис.1.1. Принципиальная схема крионасоса [1]:

1 – криопанель; 2 – экран; 3 – жалюзи; 4 – корпус; 5 и 6 – фланцы камеры и насоса;
7 – конденсат (криоосаждение)

Криопанель- это основной рабочий элемент насоса, представляет собой поверхность, охлажденную до криогенной температуры ($T < 120$ К). Сама же температура определяется составом откачиваемых газов и уровнем рабочих давлений. Криопанели бывают в виде сложных ребренных систем, цилиндров, дисков, змеевиков и т.п.

Криооткачка – эндотермический процесс, и для поддержания температуры криопанели на требуемом уровне необходимо обеспечить отвод теплоты десублимации. Дополнительно нужно отводить тепловую энергию, которая поступает от поверхностей, имеющих более высокую температуру. Эти задачи

решаются с помощью установки теплозащитных экранов и охлаждающих устройств.

Теплозащитный экран, выполненный, как правило, в виде жалюзийных решеток, устанавливают между корпусом и криопанелью. Температура экрана является промежуточной между температурами корпуса и криопанели. Эффективность экрана не только определяются его температурой, но и зависит от того, насколько полно поглощается падающее со стороны корпуса тепловое излучение, что достигается специальным чернением поверхностей, обращенных к корпусу, например путем покрытия черным лаком или созданием на поверхности высокопористой фактуры с интегральной степенью черноты до 0,95.[2]

Другим показателем работоспособности экрана является отражательная способность поверхностей, обращенных на криопанель: чем она выше, тем эффективнее будет действие экрана. Для этой цели применяют электролитическое золочение или серебрение поверхностей.

Система охлаждения служит для предварительного понижения температуры от нормального до рабочего уровня и для отвода тепловой энергии, выделяющейся при работе крионасоса. Корпус предназначен для монтажа и герметизации конструктивных элементов крионасоса. В вакуумных установках, имитирующих условия космического пространства, где скорости откачки превышают сотни кубических метров в секунду, криопанели вместе с экранами размещают непосредственно в объеме вакуумной камеры, что позволяет добиться максимально эффективной быстроты откачки из-за отсутствия сопротивлений промежуточных коммуникаций. Такие насосы называют встроенными.

ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НАСОСА

Конструкция насоса представляет собой вертикальный сосуд для жидкого азота, на котором по высоте размещены тарелки (рис.2). Тарелки выполняются из материала, обладающего высокой теплопроводностью (алюминиевый сплав АМг6М). На тарелках слоем 10 мм размещается адсорбент – цеолит NaX.

Вертикальный сосуд подвешен на заливной трубке, выведенной через крышку корпуса. Кожух насоса имеет боковые фланцы: один, большего диаметра предназначен для подсоединения криоадсорбционного насоса к откачиваемому объекту; другой фланец, меньшего диаметра необходим для подключения к системе предварительного вакуумирования и системе регенерации.

На кожухе также имеется разрывная мембрана для защиты корпуса от избыточного давления при десорбции газа во время проведения регенерации; указательные уровнемеры; узел подсоединения вакуумметра; узел подсоединения масс-спектрометра.

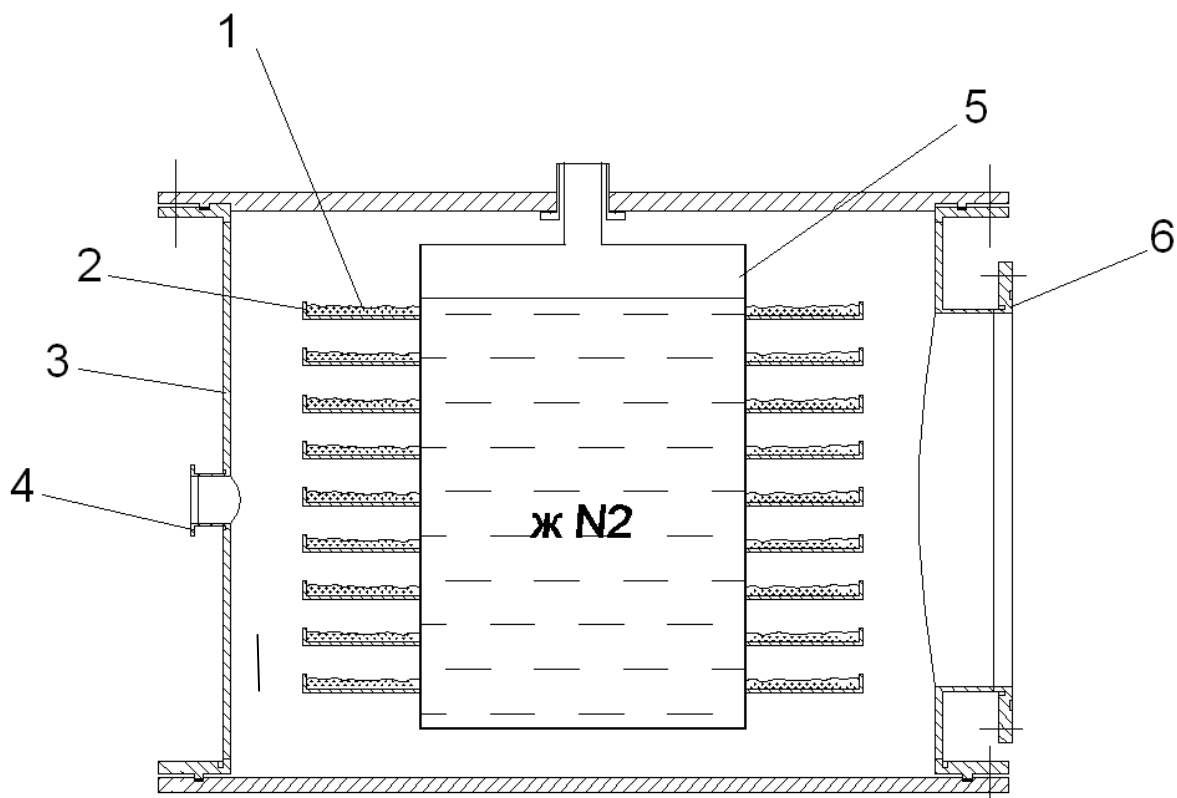


Рис.2 Конструкция насоса [1]:

1 – адсорбент; 2 – тарелка; 3 – корпус насоса; 4 – фланец для подсоединения к системе предварительной откачки; 5 – внутренний сосуд с жидким азотом; 6 – фланец для подсоединения к объекту откачки.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ КРИОАДСОРБЦИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

1 Исходные данные для расчета

1. Объем откачиваемого объекта $V = 90,7 \text{ м}^3$;
2. Начальное давление $p_H = 10^3 \text{ Па}$;
3. Конечное давление $p_K = 10^{-1} \text{ Па}$;
4. Натекание (газовая нагрузка) $Q = 0,25 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Определение продолжительности откачки.

Время откачки по формуле (1.1):

$$\tau = \frac{V}{S} \cdot \ln \left(\frac{p_H - Q/S}{p_K - Q/S} \right), \quad (1.1)$$

где $V = 90,7 \text{ м}^3$ – объем откачиваемого объекта;

$Q = 0,25 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ – натекание (газовая нагрузка);

S – скорость откачки.

Отношение $Q/S = p_{min}$, которое достигается при продолжительности откачки равной бесконечности. Чтобы продолжительность откачки была конечна, следует иметь скорость откачки, обеспечивающую следующее условие (1.2):

$$\frac{Q}{S} > p_K. \quad (1.2)$$

Примем

$$\frac{Q}{S} = 0,5 \cdot p_K \Rightarrow S = \frac{Q}{0,5 \cdot p_K} = \frac{0,25}{0,5 \cdot 10^{-1}} = 5 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда по формуле (1.1),

$$\tau = \frac{90,7}{5} \cdot \ln \left(\frac{10^3 - 0,25/5}{10^{-1} - 0,25/5} \right) = 179 \text{ с}.$$

2 Газодинамический расчет

2.1 Определение количества газа, откачиваемого криoadсорбционным насосом

$$V = V^I + V^{II}, \quad (2.1.1)$$

где V – количество газа, откачиваемого криoadсорбционным насосом;

V^I – объем газа, приведенный к нормальным условиям, который необходимо откачать для обеспечения необходимого вакуума;

V^{II} – объем газа от газовой нагрузки.

V^I определяется по формуле (2.1.2):

$$V^I = \frac{V_k \cdot (P_n - P_k)}{P_{бар}}, \quad (2.1.2)$$

где $V_k=90,7 \text{ м}^3$ – объем камеры;

$P_n=10^3 \text{ Па}$ – начальное давление;

$P_k=10^{-1} \text{ Па}$ – конечное давление;

$P_{бар}=10^5 \text{ Па}$ – барометрическое давление.

$$V^I = \frac{90,73 \cdot (10^3 - 10^{-1})}{10^5} = 0,907 \text{ нм}^3.$$

V^{II} определяется по формуле (2.1.3):

$$V^{II} = \frac{Q \cdot \tau}{P_{бар}}, \quad (2.1.3)$$

где $Q = 0,25 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ – газовая нагрузка в камере;

$\tau = 179 \text{ с}$ – время откачки;

$$V^{II} = \frac{0,25 \cdot 179}{10^5} = 0,44 \times 10^{-3} \text{ нм}^3;$$

Откуда V по формуле (2.1.1):

$$V = 0,907 + 0,00044 = 0,907 \text{ нм}^3.$$

2.2 Необходимое количество адсорбента в криоадсорбционном насосе

В качестве сорбента используется цеолит NaX. По изотерме адсорбции [9] определяется адсорбционная способность цеолита NaX:

$$a = 100 \frac{\text{нм}^3}{\text{кг}} \text{ при } p = 10^{-1} \text{ Па.}$$

Необходимая масса адсорбента в криоадсорбционном насосе по формуле (2.2.1):

$$G = \frac{V \cdot 1,5}{a}; \quad (2.2.1)$$

$$G = \frac{0,907 \cdot 1,5}{0,1} = 13,6 \text{ кг.}$$

где 1,5– коэффициент, учитывающий продолжительность откачки[9].

2.3 Определение объема адсорбента

Объем адсорбента определяется по формуле (2.3.1):

$$V_a = \frac{G}{\rho}, \quad (2.1.3)$$

где $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ – плотность засыпки [8].

Отсюда по (2.3.1):

$$V_a = \frac{13,6}{800} = 0,017 \text{ м}^3.$$

2.4 Определение площади соприкосновения сорбента с газом

Площадь соприкосновения сорбента с газом определяется по формуле (2.4.1):

$$F_{\Pi} = \frac{V_a}{\delta}, \quad (2.4.1)$$

где δ –высота засыпки сорбента.

В адсорбционных насосах сорбент насыпается толщиной не более 30 мм. Для обеспечения высокой динамики сорбции принимаем высоту засыпки сорбента 10 мм. Отсюда по формуле (2.4.1):

$$F_{\text{п}} = \frac{0,017}{0,01} = 1,7 \text{ м}^2.$$

3 Конструкция и геометрические параметры криoadсорбционного насоса

3.1 Схема криoadсорбционного насоса

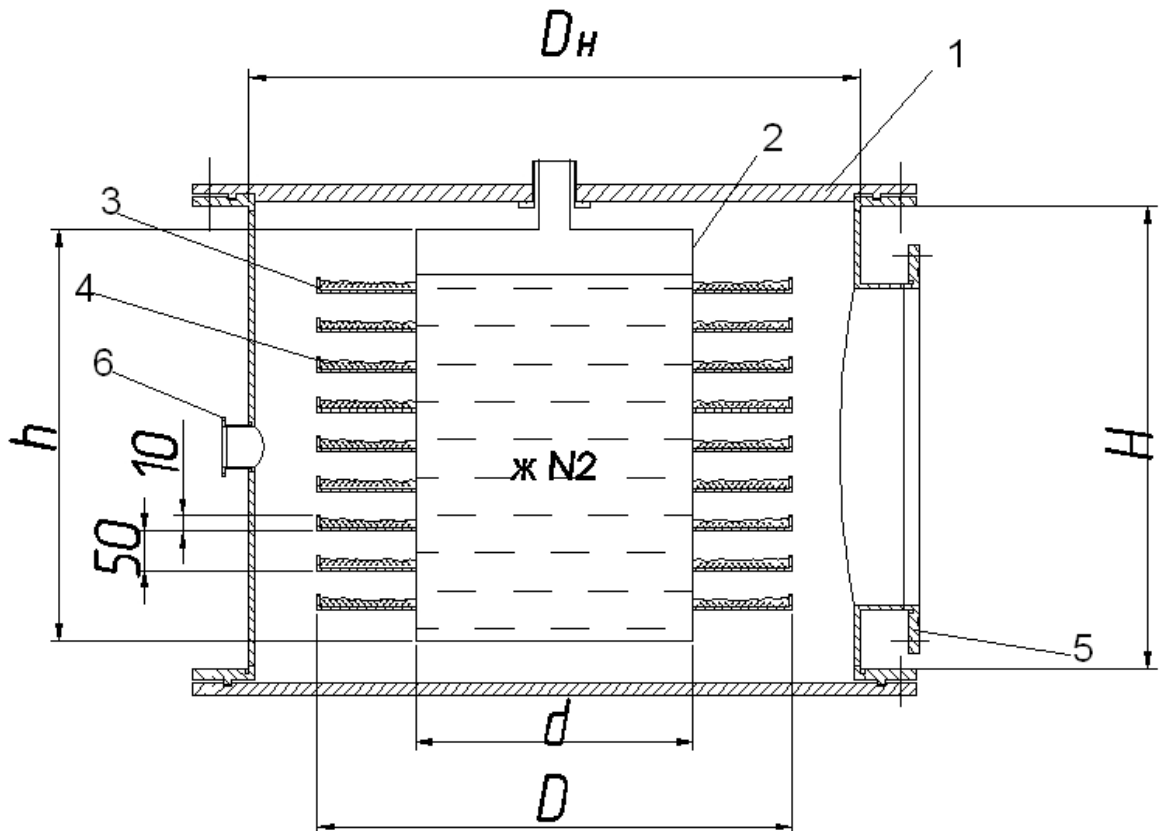


Рис.3.1.1. Схема криoadсорбционного насоса [1]: 1– корпус насоса, 2–сосуд с жидким азотом, 3–тарелка, 4–насыпной сорбент (NaX), 5–фланец для подключения к объекту откачки, 6 – фланец для подсоединения форвакуумного механического насоса.

3.2 Геометрические параметры насоса

Геометрические параметры криoadсорбционного насоса принимаются из формулы (3.2.1):

$$F_{\text{п}} = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot n; \tag{3.2.1}$$

где $F_{\text{п}} = 1,7 \text{ м}^2$ – площадь панелей;

D – диаметр тарелки;

d –диаметр сосуда;

n –число тарелок.

Принимаем $D=0,6$ м, $d=0,35$ м.

Тогда число тарелок будет определяться по формуле (3.2.2)

$$n = \frac{4 \cdot F_{\Pi}}{\pi \cdot (D^2 - d^2)}; \quad (3.2.2)$$

:

$$n = \frac{4 \cdot 1,7}{\pi \cdot (0,6^2 - 0,35^2)} = 9,1.$$

Принимаем число тарелок $n = 9$.

Высота сосуда определяется по формуле (3.2.3):

$$h = n \cdot 10 + n \cdot 50 + 60, \quad (3.2.3)$$

где 10 – высота бортика тарелки, мм;

50 – расстояние между тарелками, мм;

Отсюда по (3.2.3):

$$h = 9 \cdot 10 + 9 \cdot 50 + 60 = 500 \text{ мм.}$$

Высота корпуса определяется по формуле (3.2.4):

$$H = h + 50 + 50, \quad (3.2.4)$$

где 50 – величины зазоров между внутренним сосудом, днищем и крышкой корпуса, мм.

Отсюда по (3.2.4):

$$H = 500 + 50 + 50 = 600 \text{ мм.}$$

Диаметр корпуса определяется по формуле (3.2.5):

$$D_H = D + 150, \quad (3.2.5)$$

где 150 – расстояние от тарелок до корпуса, мм.

Отсюда по формуле (3.2.5):

$$D_n = 600 + 150 = 750 \text{ мм.}$$

Окончательно принимаем:

–диаметр сосуда: $d = 0,35 \text{ м}$;

–диаметр тарелок: $D = 0,6 \text{ м}$;

–диаметр корпуса: $D_n = 0,75 \text{ м}$;

–высота сосуда: $h = 0,5 \text{ м}$;

–высота корпуса: $H = 0,6 \text{ м}$;

–число тарелок: $n = 9$.

Площадь холодной поверхности насоса определяется по формуле (3.2.6):

$$F_x = \pi \cdot D \cdot h + \frac{\pi \cdot D^2}{2}; \quad (3.2.6)$$

$$F_x = \pi \cdot 0,6 \cdot 0,5 + \frac{\pi \cdot 0,6^2}{2} = 1,51 \text{ м}^2.$$

Площадь теплой поверхности по формуле (3.2.7):

$$F_T = \pi \cdot D_n \cdot H + \frac{\pi \cdot D_n^2}{2}; \quad (3.2.7)$$

$$F_T = \pi \cdot 0,75 \cdot 0,6 + \frac{\pi \cdot 0,75^2}{2} = 2,3 \text{ м}^2.$$

4 Тепловой расчет

4.1 Определение лучистого теплового потока к внутреннему сосуду

Лучистый тепловой поток определяется по формуле (4.1.1):

$$Q_l = \varepsilon_n \cdot C \cdot 10^{-8} \cdot (T_T^4 - T_x^4) \cdot F_x, \quad (4.1.1)$$

где ε_n – приведенный коэффициент теплового излучения;

$C = 5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная излучения для абсолютно черного тела;

$T_T = 300 \text{ К}$ – температура теплой поверхности;

$T_x = 78 \text{ К}$ – температура холодной поверхности;

$F_x=1,508 \text{ м}^2$ – площадь холодной поверхности насоса.

Принимаем материал корпуса сталь марки 12X18H10T ГОСТ 5632-72 с обработкой поверхности путем шлифования, степень черноты для данного материала $\varepsilon_2 = 0,08$ [8].

Поскольку холодная поверхность имеет сложную форму, ее степень черноты принимаем $\varepsilon_1 = 0,8$, материал– алюминий.

Приведенный коэффициент теплового излучения определяется по формул (4.1.2):

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \varepsilon_1}, \quad (4.1.2)$$

где $\varepsilon_1 = 0,8$ – степень черноты холодной поверхности;

$\varepsilon_2 = 0,08$ – степень черноты теплой поверхности;

$F_1 = 1,508 \text{ м}^2$ – площадь холодной поверхности;

$F_2 = 2,089 \text{ м}^2$ – площадь теплой поверхности;

По (4.1.2):

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{0,8 \cdot 0,08}{0,08 + (1 - 0,08) \cdot \frac{1,51}{2,3} \cdot 0,8} = 0,1.$$

Количество теплоты в этом случае из (4.1.1):

$$Q_{\text{л}} = 0,1 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot (300^4 - 78^4) \cdot 1,51 = 73,763 \text{ Вт}.$$

Для уменьшения лучистого теплового потока к внутреннему сосуду принимается решение поставить экран с тепловым контактом с криопанелью. Экран выполняется из алюминия, геометрические параметры следующие:

$h_э=0,57\text{м}$ –высота экрана;

$d_э=0,66\text{м}$ –диаметр экрана;

$\delta_э=0,002\text{м}$ –толщина экрана.

Уменьшение лучистого теплового потока определяется по формуле (4.1.3):

$$Q_{\text{л}}' = \varepsilon_{\text{п}} \cdot C \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{Т}}^4 - T_{\text{Э}}^4) \cdot F_{\text{Э}}, \quad (4.1.3)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенный коэффициент теплового излучения;

$C=5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^4\text{К})$ —постоянная излучения для абсолютно черного тела;

$T_x = 100 \text{ К}$ —температура поверхности экрана;

$F_э$ —площадь поверхности экрана, м^2 .

Площадь поверхности крана определяем по формуле (4.1.4):

$$F_э = \pi \cdot d_э \cdot h_э; \quad (2.1.3)$$

$$F_э = \pi \cdot 0,66 \cdot 0,57 = 1,18 \text{ м}^2.$$

Степень черноты поверхности экрана принимаем $\varepsilon_1 = 0,018$, материал – алюминиевый лист с обработкой поверхности электрополировкой.

Приведенный коэффициент теплового излучения определяется по (4.1.5):

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \varepsilon_1}, \quad (4.1.5)$$

где $\varepsilon_1 = 0,018$ — степень черноты холодной поверхности;

$\varepsilon_2 = 0,08$ — степень черноты теплой поверхности;

$F_1 = 0,376 \text{ м}^2$ — площадь холодной поверхности;

$F_2 = 2,3 \text{ м}^2$ — площадь теплой поверхности;

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{0,018 \cdot 0,08}{0,08 + (1 - 0,08) \cdot \frac{1,18}{2,1} \cdot 0,018} = 0,016.$$

Количество теплоты в этом случае по (4.1.1):

$$Q_{\text{л}} = 0,016 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot (300^4 - 100^4) \cdot 1,18 = 8,71 \text{ Вт}.$$

4.2 Определение теплопритока к внутреннему сосуду криoadсорбционного насоса по тепловому мосту

Принимаем материал трубки подвеса: нержавеющая сталь 12X18H10T ГОСТ 5632-72, закаленная.

Принимаем трубу $d_{\text{т}} = 40 \times 5 \text{ мм}$;

– внутренний диаметр трубы: $d_{\text{трвн}}=0,039 \text{ м}$;

– наружный диаметр трубы: $d_{\text{трн}}=0,04 \text{ м}$;

Принимаем длину теплового моста: $l=0,2 \text{ м}$

Теплоприток по тепловому мосту определяется как (4.2.1):

$$Q_{\text{ТМ}} = \frac{\lambda}{l} \cdot (T_{\text{Ттр}} - T_{\text{Хтр}}) \cdot F, \quad (4.2.1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности закаленной нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72 при $T_{\text{сртр}}$;

$T_{\text{сртр}}$ – средняя температура трубы, К;

$T_{\text{Ттр}} = 300$ К – температура теплого конца трубы;

$T_{\text{Хтр}} = 80$ К – температура холодного конца трубы;

F – площадь поперечного сечения трубы;

Средняя температура трубы определяется по формуле (4.2.2):

$$T_{\text{ср тр}} = \frac{T_{\text{Т тр}} + T_{\text{Х тр}}}{2}; \quad (4.2.2)$$

$$T_{\text{ср тр}} = \frac{300 + 80}{2} = 190 \text{ К} \Rightarrow \lambda = \frac{13,1 \text{ Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \quad [8]$$

Площадь поперечного сечения трубы находим по формуле (4.2.3):

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{нтр}}^2 - d_{\text{внтр}}^2); \quad (4.2.3)$$

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (0,04^2 - 0,039^2) = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2;$$

Отсюда по (4.2.1) теплоприток равен:

$$Q_{\text{ТМ}} = \frac{13,1}{0,2} \cdot (300 - 80) \cdot 6,2 \cdot 10^{-5} = 0,893 \text{ Вт.}$$

4.3 Определение количества теплоты, принимаемой криопанелью адсорбционного насоса от сорбируемого газа

Количество теплоты, принимаемой криопанелью адсорбционного насоса от сорбируемого газа определяется по формуле (4.3.1):

$$Q_c = M_r \cdot \left[c_p \cdot (T_2 - T_1) + \frac{r_c}{M_{N_2}} \right], \quad (4.3.1)$$

где M_r – масса откачиваемого газа;

$c_p = 1,07$ кДж/(кг · К) [10]– изобарная теплоемкость откачиваемого газа;

$T_2=300$ К– начальная температура откачиваемого газа;

$T_1=80$ К– конечная температура откачиваемого газа;

$r_c = 14000 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$ [8]– теплота адсорбции откачиваемого газа;

$M_{N_2} = 28$ кг/кмоль– молекулярная масса откаченного газа (азота).

Массу откачиваемого газа находим по формуле (4.3.2):

$$M_{\Gamma} = \frac{V \cdot (p_H - p_K)}{P_{\text{бар}}} \cdot \rho_{\Gamma}, \quad (4.3.2)$$

где $V = 90,7$ м³– объем камеры;

$p_H = 10^3$ Па– начальное давление,

$p_K = 10^{-1}$ – конечное давление,

$p_{\text{бар}} = 10^5$ Па– барометрическое давление,

$\rho_{\Gamma} = 1,25$ кг/м³ [10]– плотность откачиваемого газа при нормальных условиях.

$$M_{\Gamma} = \frac{90,7 \cdot (10^3 - 10^{-1})}{10^5} \cdot 1,25 = 1,134 \text{ кг};$$

Отсюда по (4.3.1) количество теплоты, принимаемой криопанелью адсорбционного насоса от сорбируемого газа будет равно:

$$Q_c = 1,134 \cdot \left[1,07 \cdot (300 - 80) + \frac{14000}{28} \right] = 833,944 \text{ кДж.}$$

4.4 Определение количества теплоты, поступающей в криопанель адсорбционного насоса за все время работы

Количество теплоты, поступающей в криопанель адсорбционного насоса за все время работы определяется по формуле (4.4.1):

$$Q = \frac{(Q_{\text{л}} + Q_{\text{тм}}) \cdot \tau}{10^3} + Q_c, \quad (4.4.1)$$

где $Q_{\text{л}} = 8,71$ Вт– лучистый тепловой поток;

$Q_{\text{тм}} = 0,893$ Вт– теплоприток по мосту;

$\tau = 179$ с– время откачки газа криoadсорбционным насосом;

$Q_c = 833,944$ кДж–теплота от сорбируемого газа.

Тогда, количество теплоты за все время работы по (4.4.1):

$$Q = \frac{(8,71 + 0,893) \cdot 179}{10^3} + 833,944 = 835,6 \text{ кДж.}$$

4.5 Определение расхода азота

Расход азота определяется по формуле (4.5.1):

$$G_{N_2} = \frac{Q}{r_{N_2}}, \quad (4.5.1)$$

где $Q = 835,6$ кДж–количество теплоты, поступающей в криопанель адсорбционного насоса за все время работы;

$r_{N_2} = 196$ кДж/кг[10]– теплота испарения азота при температуре кипения $T=80$ К.

Тогда, расход азота по (4.5.1):

$$G_{N_2} = \frac{835,6}{196} = 4,2 \text{ кг.}$$

4.6 Определение количества теплоты, идущей на охлаждение адсорбента

Количество теплоты, идущей на охлаждение адсорбента может быть определено по формуле (4.6.1):

$$Q_{\text{сорб}} = G \cdot c_{p\text{с}} \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.6.1)$$

где $G = 13,6$ кг– масса адсорбента;

$c_{p\text{с}} = 0,51$ кДж/(кг · К)–удельная теплоемкость цеолита NaX;

$T_2=300$ К– начальная температура адсорбента;

$T_1=80$ К– конечная температура адсорбента.

Тогда количество теплоты, идущей на охлаждение сорбента составит по (4.6.1):

$$Q_{\text{сорб}} = 13,6 \cdot 0,51 \cdot (300 - 80) = 1526 \text{ кДж.}$$

4.7 Определение толщины тарелок

Делаем допущение, что тепловая нагрузка равномерно распределяется по всей площади тарелок (рис. 4.7.1).

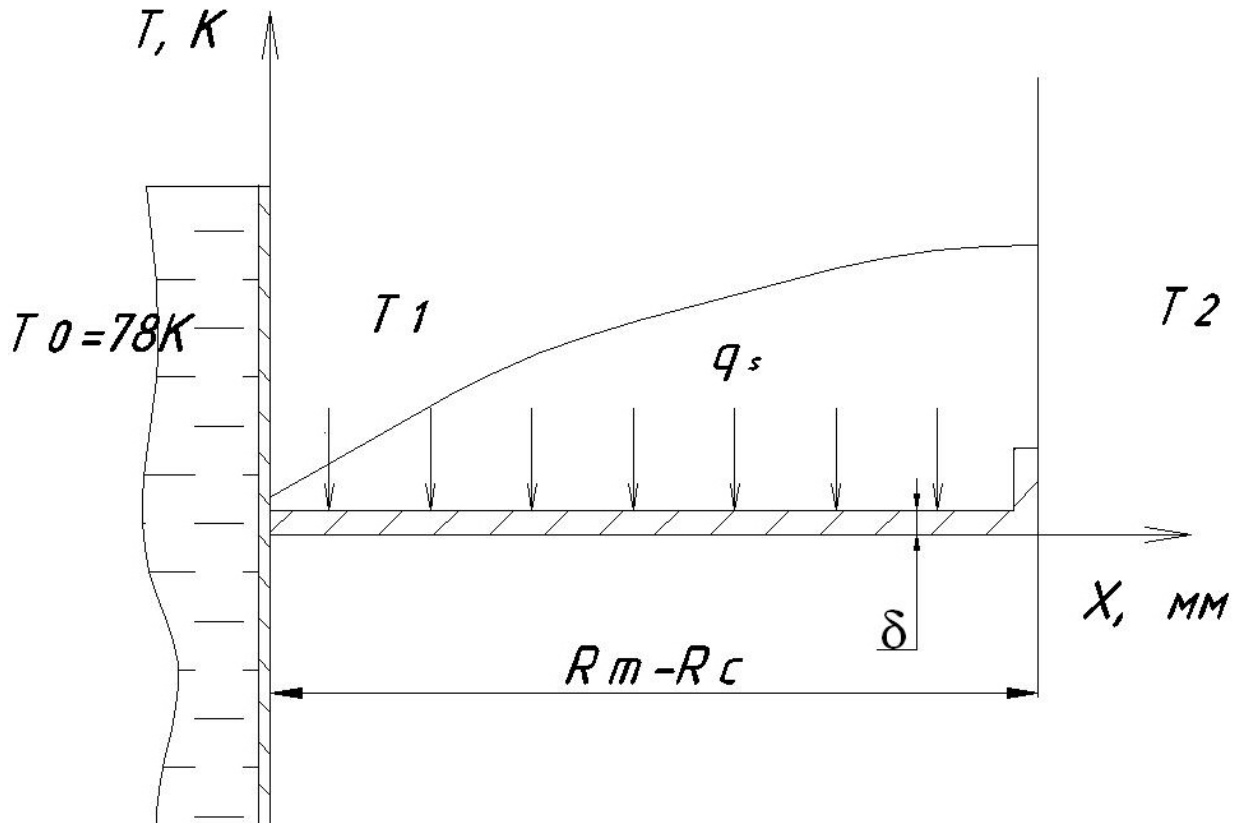


Рис.4.7.1. Схематичное изображение тарелки криoadсорбционного насоса с распределением температуры по всей длине[1].

Удельная тепловая нагрузка на тарелки определяется по формуле (4.7.1):

$$q_s = \frac{Q_c}{F_{\Pi} \cdot \tau}, \tag{4.7.1}$$

где $Q_c = 833944$ Дж–количество теплоты от сорбируемого газа;

$F_{\Pi} = 1,7\text{м}^2$ –площадь тарелок криoadсорбционного насоса;

$\tau = 179$ с–время откачки газа криoadсорбционным насосом.

Тогда, удельная тепловая нагрузка по (4.7.1):

$$q_s = \frac{833944}{1,7 \cdot 179} = 2740 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура тарелки на расстоянии R от центра тарелки определяется по формуле (4.7.2):

$$T_R = T_0 + \frac{q_s \cdot R_1^2}{\delta \cdot 4 \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{2 \cdot \lambda}{\alpha \cdot R_1} \cdot \left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - 1 \right] + 1 - \left(\frac{R}{R_1} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{R}{R_1} \right)^2 \right], \quad (4.7.2)$$

где $T_0 = 80$ К– температура вблизи стенки сосуда;

$\lambda = 248$ Вт/(м · К) [8]– коэффициент теплопроводности тарелки;

$\delta = 0,001$ м– толщина тарелок;

R_1 – внутренний радиус тарелки;

R_2 – наружный радиус тарелки;

R – радиус сечения тарелки, на котором рассчитывается температура тарелки;

α – коэффициент теплоотдачи от азота к стенке сосуда.

$$R_1 = \frac{d}{2} = 0,175 \text{ м},$$

$$R_2 = \frac{D}{2} = 0,3 \text{ м}.$$

На начальной стадии расчета принимаем α равное бесконечности, тогда (4.7.2) примет вид (4.7.3):

$$T_R = T_0 + \frac{q_s \cdot R_1^2}{\delta \cdot 4 \cdot \lambda} \cdot \left[1 - \left(\frac{R}{R_1} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{R}{R_1} \right)^2 \right] \quad (4.7.3)$$

При $R_{\text{пр}} = 0,2$ м получим из (4.7.3):

$$T_{R_{\text{пр}}} = 80 + \frac{2740 \cdot 0,175^2}{10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 4 \cdot 248} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,2}{0,175} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{0,2}{0,175} \right)^2 \right],$$

$$T_{R_{\text{пр}}} = 105,055 \text{ К}.$$

При $R_{\text{пр}} = R_2 = 0,3$ м получим из (4.7.3):

$$T_{R_2} = 80 + \frac{2740 \cdot 0,175^2}{10^{-3} \cdot 1,7 \cdot 4 \cdot 248} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \right],$$

$$T_{R_2} = 144,33 \text{ К}.$$

Температура на краю тарелки слишком высокая и сорбент работать не будет. Необходимо принять новую толщину тарелки.

Принимаем толщину равную 4 мм.

Распределение температур при новой толщине тарелок по формуле (4.7.3)

при:

$$R_1 = 0,175 \text{ м,}$$

$$R_2 = 0,3 \text{ м,}$$

$$R_{\text{пп}} = 0,2 \text{ м.}$$

$$T_{R_{\text{пп}}} = 80 + \frac{2740 \cdot 0,175^2}{10^{-3} \cdot 4 \cdot 1,7 \cdot 4 \cdot 248} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,2}{0,175} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{0,2}{0,175} \right)^2 \right],$$

$$T_{R_{\text{пп}}} = 86,264 \text{ К.}$$

$$T_{R_2} = 80 + \frac{2740 \cdot 0,175^2}{10^{-3} \cdot 4 \cdot 1,7 \cdot 4 \cdot 248} \cdot \left[1 - \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \right],$$

$$T_{R_2} = 96,083 \text{ К.}$$

Производим расчет для случая, когда α не равно бесконечности.

Для расчета α принимаем формулу (4.7.4), приведенную в [11], критериальное уравнение Кутателадзе для кипения в большом объеме.

$$Nu = 7 \cdot 10^{-4} \cdot Pr^{-0,35} \cdot (Pe \cdot Kp)^{0,7}, \quad (4.7.4)$$

где $Kp = \frac{p}{\sqrt{\sigma \cdot g \cdot (\rho^I - \rho^{II})}}$,

p – давление, Па;

ρ^I и ρ^{II} – плотности соответственно жидкости и пара, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м²/с.

$Pe = \frac{q \cdot b}{r \cdot \rho^{II} \cdot a}$ – число Пекле,

$Nu = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda_L}$ – число Нуссельта,

$Pr = \frac{\nu_L}{a}$ – число Прандтля,

$b = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho^I - \rho^{II})}}$ – постоянная Лапласа.

q – поверхностная плотность теплового потока, кВт/м²

α – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·К);

λ_L – теплопроводность жидкости, кВт/(м·К);

ν_L – кинематическая вязкость, м²/с;

a – температуропроводность, м²/с;

σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

r – удельная теплота испарения, кДж/кг.

$\sigma = 8,35 \cdot 10^{-3}$ Н/м;

$\rho^I = 807,1$ кг/м³;

$\rho^{II} = 4,432$ кг/м³;

$\lambda = 138,2$ мВт/(м·К);

$\nu_L = \frac{\mu}{\rho}$, где μ – динамическая вязкость, ρ – плотность жидкости.

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле (4.7.5):

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (4.7.5)$$

$$a = \frac{138,2 \cdot 10^{-3}}{2,114 \cdot 10^3 \cdot 807,1} = 8,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Число Прандтля равно $Pr = 2,468$;

Постоянная Лапласа определяется по формуле (4.7.6):

$$b = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho^I - \rho^{II})}} \quad (4.7.6)$$

$$b = \sqrt{\frac{8,35 \cdot 10^{-3}}{9,8 \cdot (807,1 - 4,432)}} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Число Пекле определяется по формуле (4.7.7):

$$Pe = \frac{q \cdot b}{r \cdot \rho^{II} \cdot a} \quad (4.7.7)$$

$$Pe = \frac{1695 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3}}{196 \cdot 10^3 \cdot 4,432 \cdot 8,1 \cdot 10^{-8}} = 24,812;$$

Коэффициент Kp определяется по формуле (4.7.8):

$$Kp = \frac{p}{\sqrt{\sigma \cdot g \cdot (\rho^I - \rho^{II})}}, \quad (4.7.8)$$

$$Kp = \frac{10^5}{\sqrt{8,35 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot (807,1 - 4,432)}} = 1,234 \cdot 10^4;$$

Число Нуссельта определяется по формуле (4.7.9):

$$Nu = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda_L} \quad (4.7.9)$$

$$Nu = 7 \cdot 10^{-4} \cdot 2,468^{-0,35} \cdot (24,812 \cdot 1,234 \cdot 10^4)^{0,7} = 3,532;$$

Из (4.7.9) найдем коэффициент теплоотдачи по (4.7.10):

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{b}, \quad (4.7.10)$$

$$\alpha = \frac{3,532 \cdot 138,2 \cdot 10^{-3}}{1,03 \cdot 10^{-3}} = 473,905 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

Определим Q по формуле (4.7.11):

$$Q = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \cdot F; \quad (4.7.11)$$

Разница температур определяется по формуле (4.7.12):

$$T_1 - T_2 = \frac{Q}{\alpha \cdot F} = \frac{q}{\alpha} \quad (4.7.12)$$

$$\Delta T = \frac{1695}{473,905} = 3,577 \text{ K}$$

Таким образом, температура тарелки у основания будет следующая по (4.7.13):

$$T_0 = 77 + 3,577 = 80,577 \text{ K} \quad (4.7.11)$$

$x=0,175, 0,18..0,3$

Подставляем в формулу (4.7.3):

$$T_{R(x)} = 80,577 + \frac{2882 \cdot 0,175^2}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 1,7 \cdot 248} \times$$

$$\times \left[\frac{2 \cdot 138,2 \cdot 10^{-3}}{473,905 \cdot 0,175} \cdot \left[\left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 - 1 \right] + 1 - \left(\frac{x}{0,175} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0,3}{0,175} \right)^2 \right]$$

$$\times \ln \left(\frac{x}{0,175} \right)^2 \Big].$$

После проведения расчетов получим график зависимости температуры тарелки от сечения (рис. 4.7.2).

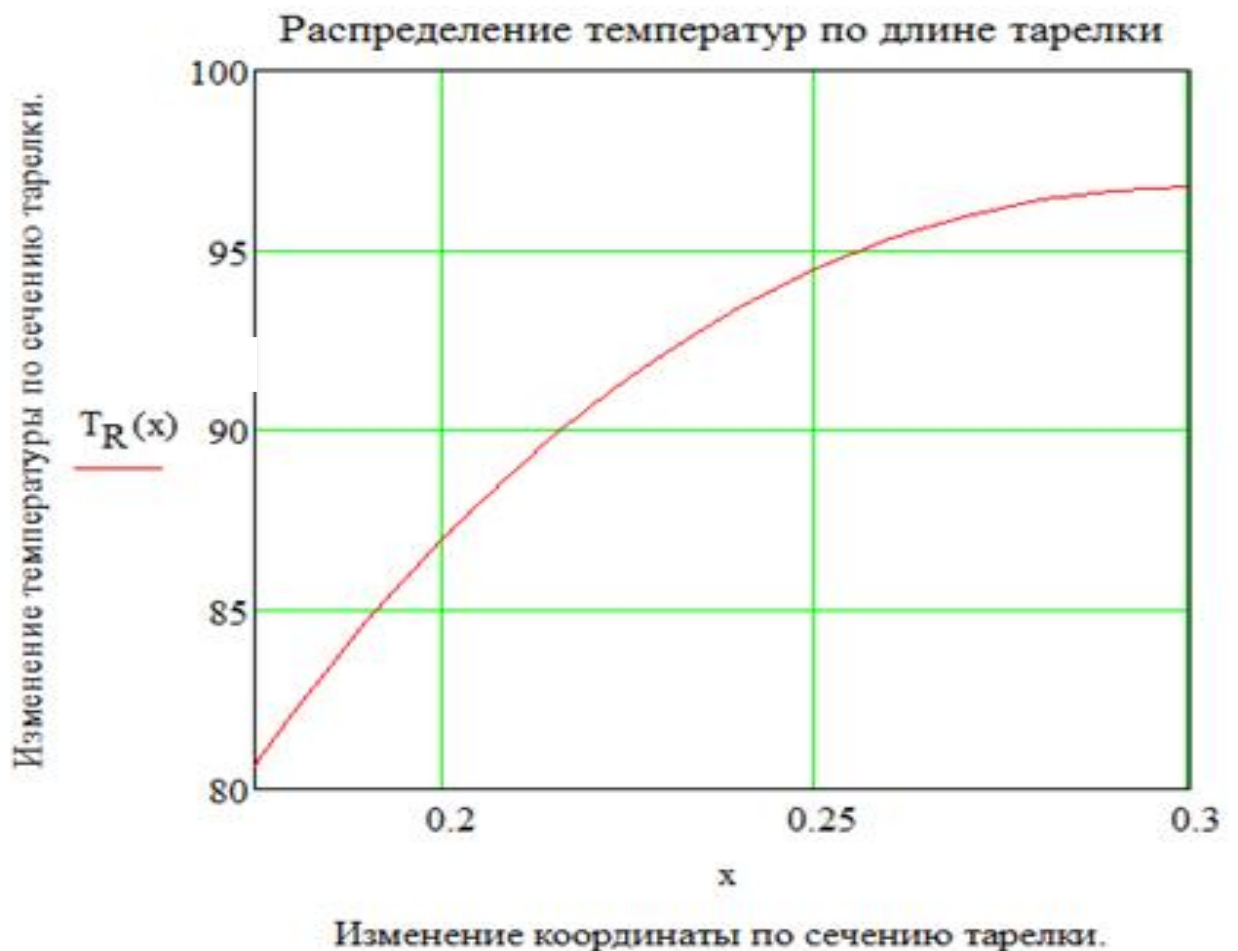


Рис.4.7.2. График зависимости температуры тарелки от сечения [1].

4.8 Применение парлифта для равномерного охлаждения внутреннего сосуда

В процессе работы насоса уровень жидкого азота во внутреннем сосуде снижается. В связи с этим, верх сосуда отогревается, а сорбционная способность адсорбента ухудшается.

В адсорбционном насосе данной конструкции (рис. 4.8.1) используется принцип работы парлифта для равномерного охлаждения внутреннего сосуда.

На внутреннюю поверхность сосуда припаяно 6 трубок с хорошим тепловым контактом, которые воспринимают 2/3 теплового потока, поступающего к внутреннему сосуду. Жидкий азот поступает трубки, воспринимает тепловой поток и кипит. Образующаяся парожидкостная смесь омывает стенки сосуда и обеспечивает достаточное охлаждение сорбента.

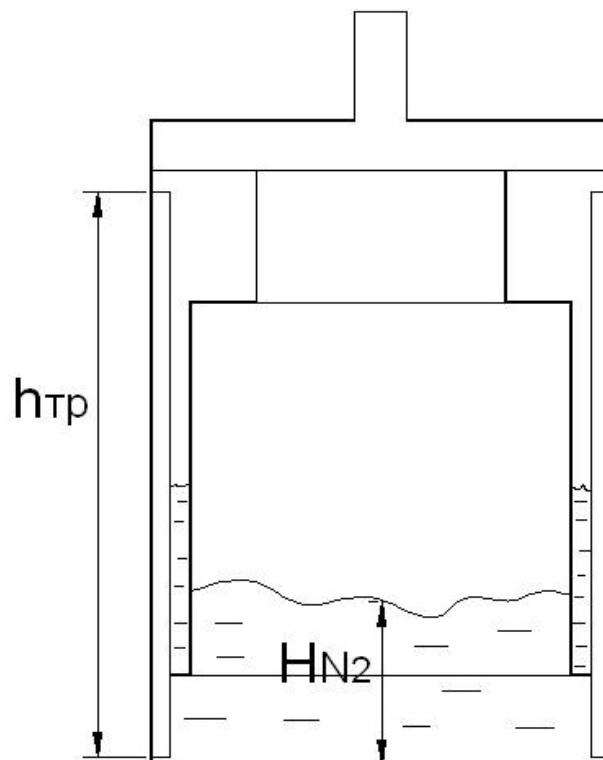


Рис.4.8.1. Схематичное изображение внутреннего сосуда. [4]

К внутренней поверхности сосуда также приварен карман – сборник выкипающего из трубок азота.

Рассчитаем минимальную высоту залива жидкого азота, обеспечивающую работу парлифта по формуле (4.8.1).

$$g \cdot \rho_{\text{тр}} \cdot h_{\text{тр}} \leq g \cdot \rho_{N_2} \cdot H_{N_2}, \quad (4.8.1)$$

где g – ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{тр}} = 357 \text{ кг/м}^3$ – плотность парожидкостной смеси в трубках;

$h_{\text{тр}} = 0,45 \text{ м}$ – высота трубки;

$\rho_{N_2} = 807 \text{ кг/м}^3 [10]$ – плотность жидкого азота;

H_{N_2} – высота залива азота.

Высота залива азота определяется по формуле (4.8.2):

$$H_{N_2} \geq \frac{\rho_{\text{тр}} \cdot h_{\text{тр}}}{\rho_{N_2}}; \quad (4.8.2)$$

Подставляя необходимые значения получим:

$$\frac{\rho_{\text{тр}} \cdot h_{\text{тр}}}{\rho_{N_2}} = \frac{357 \cdot 0,45}{807} = 0,19 \text{ м};$$

$$H_{N_2} \geq 0,19 \text{ м}.$$

Минимальная высота заливки азота для обеспечения работы парлифта – $H_{N_2} = 0,19 \text{ м}$.

4.9 Определение количества теплоты, которое отводится от внутреннего сосуда с тарелками и экрана

Зададимся из конструктивных соображений:

- толщина сосуда $\delta_c = 0,001 \text{ м}$;
- толщина карманов для азота $\delta_k = 0,001 \text{ м}$;
- толщина трубки для парлифта $\delta_{\text{тр}} = 0,0005 \text{ м}$;
- толщина экрана $\delta_3 = 0,002 \text{ м}$;
- толщина тарелки $\delta_t = 0,004 \text{ м}$;
- материал сосуда: сталь углеродистая;

– материал тарелок: алюминий.

Принятые и рассчитанные выше величины:

– диаметр сосуда: $d=0,35$ м;

– диаметр тарелок: $D=0,6$ м;

– диаметр экрана: $D_э=0,66$ м;

– диаметр карманов: $D_{к1}=0,19$ м;

$$D_{к2}=0,29 \text{ м};$$

– диаметр трубки для парлифта: $d_{тр}=0,007$ м;

– высота сосуда: $h=0,5$ м;

– высота тарелок: $h_{тар}=0,015$ м;

– высота экрана: $h_э=0,57$ м;

– высота карманов: $h_{к1}=0,11$ м;

$$h_{к2}=0,3 \text{ м};$$

– высота трубки для парлифта: $h_{тр}=0,45$ м;

– число трубок для парлифта: $n_{тр}=6$;

– число тарелок: $n=9$.

Масса сосуда определяется по формуле (4.9.1):

$$M_{\text{сос}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{сос}}, \quad (4.9.1)$$

где $V_{\text{сос}}$ – объем сосуда (объем стали);

$$\rho_{\text{ст}} = 7850 \text{ кг/м}^3 [8] \text{ – плотность стали};$$

Объем сосуда определяется по формуле (4.9.2):

$$V_{\text{сос}} = F_{\text{сос}} \cdot \delta_{\text{сос}}, \quad (4.9.2)$$

где $F_{\text{сос}}$ – площадь сосуда.

Площадь сосуда определяется по формуле (4.9.3):

$$F_{\text{сос}} = \pi \cdot d \cdot h + \frac{\pi \cdot d^2}{4}; \quad (4.9.3)$$

Из формул (4.9.1), (4.9.2) и (4.9.3) получим:

$$F_{\text{сос}} = \pi \cdot 0,35 \cdot 0,5 + \frac{\pi \cdot 0,35^2}{4} = 0,645 \text{ м}^2;$$

$$V_{\text{сос}} = 0,645 \cdot 0,001 = 0,000645 \text{ м}^3;$$

$$M_{\text{сос}} = 7850 \cdot 0,000645 = 5,06 \text{ кг}.$$

Масса тарелок определяется по формуле (4.9.4):

$$M_{\text{T}} = V_{\text{T}} \cdot \rho_{\text{Al}}, \quad (4.9.4)$$

где V_{T} – объем тарелок (объем алюминия);

$$\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3 [8] \text{– плотность алюминия};$$

Объем тарелок определяется по формуле (4.9.5):

$$V_{\text{T}} = F_{\text{T}} \cdot \delta_{\text{T}}, \quad (4.9.5)$$

где F_{T} – площадь тарелок.

Площадь тарелок определяется по формуле (4.9.6):

$$F_{\text{T}} = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} + \pi \cdot D \cdot h_{\text{T}} \right) \cdot n; \quad (4.9.6)$$

Отсюда по формулам (4.9.4), (4.9.5) и (4.9.6) получим:

$$F_{\text{T}} = \left(\frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,35^2}{4} + \pi \cdot 0,6 \cdot 0,015 \right) \cdot 9 = 1,94 \text{ м}^2;$$

$$V_{\text{T}} = 1,94 \cdot 0,004 = 0,00776 \text{ м}^3;$$

$$M_{\text{T}} = 0,00776 \cdot 2700 = 20,9 \text{ кг}.$$

Масса экрана определяется по формуле (4.9.7):

$$M_{\text{э}} = V_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{Al}}, \quad (4.9.7)$$

где $V_{\text{э}}$ –объем экрана (объем алюминия);

$$\rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ кг/м}^3 \text{– плотность алюминия};$$

Объем экрана определяется по формуле (4.9.8):

$$V_{\text{э}} = F_{\text{э}} \cdot \delta_{\text{э}}, \quad (4.9.8)$$

где $F_{\text{э}}$ – площадь экрана.

Площадь экрана определяется по формуле (4.9.9):

$$F_{\text{э}} = \pi \cdot D_{\text{э}} \cdot h_{\text{э}}; \quad (4.9.9)$$

Отсюда по формулам (4.9.7), (4.9.8) и (4.9.9) получим:

$$F_T = \pi \cdot 0,66 \cdot 0,57 = 1,18 \text{ м}^2;$$

$$V_T = 1,18 \cdot 0,002 = 0,00236 \text{ м}^3;$$

$$M_T = 0,00236 \cdot 2700 = 6,37 \text{ кг}.$$

Масса трубок определяется по формуле (4.9.10):

$$M_{\text{тр}} = V_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (4.9.10)$$

где $V_{\text{тр}}$ —объем трубок (объем стали);

$$\rho_{\text{ст}} = 7850 \text{ кг/м}^3 \text{— плотность стали};$$

Объем трубок определяется по формуле (4.9.11):

$$V_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot \delta_{\text{тр}}, \quad (4.9.11)$$

где $F_{\text{тр}}$ — площадь поверхности трубок.

Площадь трубок определяется по формуле (4.9.12):

$$F_{\text{тр}} = \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot h_{\text{тр}} \cdot n_{\text{тр}}; \quad (4.9.12)$$

Отсюда по формулам (4.9.10), (4.9.11) и (4.9.12) получим:

$$F_{\text{тр}} = \pi \cdot 0,007 \cdot 0,45 \cdot 6 = 0,059 \text{ м}^2;$$

$$V_{\text{тр}} = 0,059 \cdot 0,0005 = 0,029 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$M_{\text{тр}} = 0,029 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 = 0,23 \text{ кг}.$$

Масса азотного кармана определяется по формуле (4.9.13):

$$M_K = V_K \cdot \rho_{\text{ст}}, \quad (4.9.13)$$

где V_K —объем кармана (объем стали);

$$\rho_{\text{ст}} = 7850 \text{ кг/м}^3 \text{— плотность стали};$$

Объем кармана определяется по формуле (4.9.14):

$$V_K = F_K \cdot \delta_K, \quad (4.9.14)$$

где F_K — площадь поверхности кармана.

Площадь поверхности кармана определяется по формуле (4.9.15):

$$F_k = \pi \cdot D_{k1} \cdot h_{k1} + \pi \cdot D_{k2} \cdot h_{k2} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_{k1}^2}{4}; \quad (4.9.15)$$

Отсюда по формулам (4.9.13), (4.9.14) и (4.9.15) получим:

$$F_k = \pi \cdot 0,19 \cdot 0,11 + \pi \cdot 0,29 \cdot 0,3 + \frac{\pi \cdot 0,35^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,19^2}{4} = 0,46 \text{ м}^2$$

$$V_k = 0,46 \cdot 0,001 = 0,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

$$M_k = 0,46 \cdot 10^{-3} \cdot 7850 = 3,6 \text{ кг.}$$

Количество теплоты, отводящейся от сосуда с тарелками и экрана определяется по формуле (4.9.16):

$$Q_{Me} = \left((M_{\text{сос}} + M_{\text{тр}} + M_k) \cdot c_{\text{ст}} + (M_{\text{т}} + M_{\text{э}}) \cdot c_{\text{Al}} \right) \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.9.16)$$

где $c_{\text{ст}} = 0,397$ кДж/кг · К[8]—удельная теплоемкость стали;

$c_{\text{Al}} = 0,760$ кДж/кг · К[8]—удельная теплоемкость алюминия;

$T_2 = 300$ К— начальная температура сосуда с тарелками;

$T_1 = 80$ К— конечная температура сосуда с тарелками.

Тогда, количество теплоты, отводящейся от сосуда с тарелками по (4.9.16):

$$Q_{Me} = \left((5,06 + 0,23 + 3,6) \cdot 0,397 + (20,9 + 6,37) \cdot 0,76 \right) \cdot (300 - 80) = 6311 \text{ кДж}$$

4.10 Определение массы азота, необходимого для охлаждения адсорбента и внутреннего сосуда с тарелками адсорбционного насоса

Масса азота необходимая для охлаждения адсорбента определяется по формуле (4.10.1):

$$G_{N_2} = \frac{Q_{Me} + Q_{\text{сорб}}}{r_{N_2}}, \quad (4.10.1)$$

где $Q_{\text{сорб}} = 1526$ кДж—количество теплоты, идущей на охлаждение адсорбента;

$Q_{Me} = 6311$ кДж– количество теплоты, отводящейся от сосуда с тарелками;

$r_{N_2} = 196$ кДж/кг[10]–теплота испарения азота при температуре кипения $T=80$ К.

Тогда масса азота, необходимого для охлаждения адсорбента и внутреннего сосуда с тарелками по (4.10.1) равна:

$$G_{N_2} = \frac{6311 + 1526}{196} = 39,9 \text{ кг.}$$

4.11 Расчет градиента температуры по экрану

Делаем допущение, что тепловая нагрузка равномерно распределяется по всей площади экрана (рис. 4.11.1).

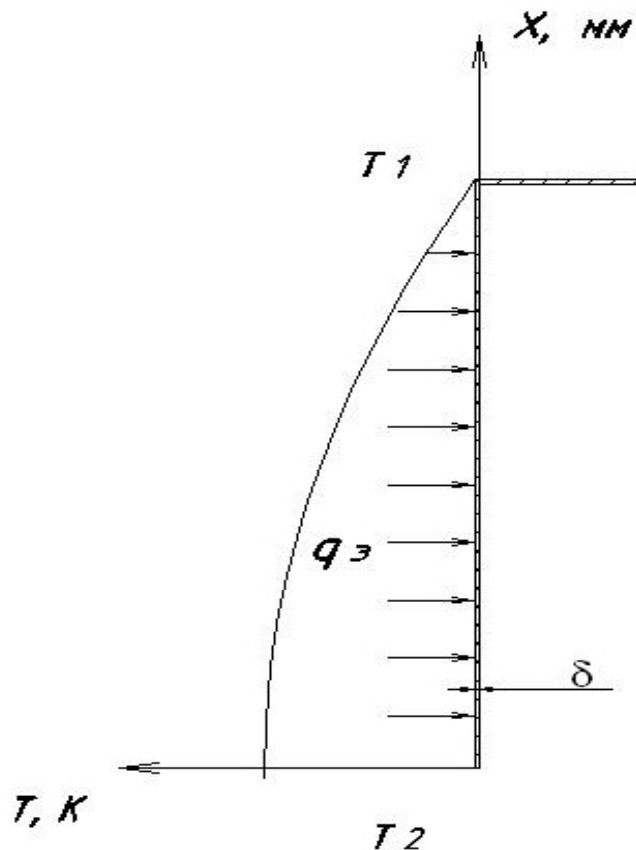


Рис. 4.11.1. Схематичное изображение тарелки криоадсорбционного насоса с распределением температуры по всей длине [4].

а) Определение теплопритока к экрану

Теплоприток к экрану определяется по формуле (4.11.1):

$$Q_{\text{э}} = Q_{\text{л}} + Q_{\text{о.г.}}, \quad (4.11.1)$$

где $Q_{\text{л}}$ – лучистый тепловой поток;

$Q_{\text{о.г.}}$ – теплоприток от остаточных газов;

Теплоприток от остаточных газов определяется по формуле (4.11.2):

$$Q_{\text{о.г.}} = \frac{\lambda_{N_2}}{\delta} \cdot F_{\text{э}} \cdot (T_{\text{о.с.}} - T_{\text{э}}), \quad (4.11.2)$$

где $\lambda_{N_2} = 18,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м · К) [1] – коэффициент теплопроводности азота;

$\delta = 0,046$ м – расстояние от экрана до корпуса;

$F_{\text{э}} = 1,18$ м² – площадь поверхности экрана;

$T_{\text{о.с.}} = 300$ К – температура окружающей среды;

$T_{\text{э}} = 100$ К – средняя температура по экрану.

Тогда, теплоприток от остаточных газов по (4.11.2):

$$Q_{\text{о.г.}} = \frac{18,3 \cdot 10^{-3}}{0,046} \cdot 1,18 \cdot (300 - 100) = 93,8 \text{ Вт.}$$

Лучистый тепловой поток находится по формуле (4.11.3):

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} \cdot C \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{к}}^4 - T_{\text{э}}^4) \cdot F_{\text{э}}, \quad (4.11.3)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенный коэффициент теплового излучения;

$C = 5,77$ Вт/(м⁴К) – постоянная излучения для абсолютно черного тела;

$F_{\text{э}}$ – площадь холодной поверхности (экрана);

$T_{\text{к}} = 300$ К – температура корпуса;

$T_{\text{э}} = 100$ К – температура экрана;

Приведенный коэффициент теплового излучения найдем по формуле (4.11.4):

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{F_{\text{э}}}{F_{\text{к}}} \cdot \varepsilon_1}, \quad (4.11.4)$$

где $F_{\text{к}}$ – площадь теплой поверхности (корпуса);

Материал корпуса – алюминиевый сплав марки АМг6М ГОСТ4734-74 с обработкой поверхности путем шлифования, степень черноты для данного материала $\varepsilon_2 = 0,03$ [7]

Степень черноты экрана принимаем $\varepsilon_1 = 0,018$, материал– алюминий[7].

Подставляя все значения в формулу (4.11.4), получим:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{0,03 \cdot 0,018}{0,03 + (1 - 0,03) \cdot \frac{1,18}{1,353} \cdot 0,018} = 0,01$$

Количество теплоты в этом случае по (4.11.3):

$$Q_{\text{л}} = 0,01 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot (300^4 - 100^4) \cdot 1,18 = 5,44 \text{ Вт}$$

И теплоприток к экрану будет равен по (4.11.1):

$$Q_3 = 93,8 + 5,44 = 99,24 \text{ Вт}$$

б) Определение удельной тепловой нагрузки на экран

Удельная тепловая нагрузка на экран определяется по формуле (4.11.5) и равна:

$$q_3 = \frac{Q_3}{F_3} = \frac{99,24}{1,18} = 84,1 \text{ Вт/м}^2 \quad (4.11.5)$$

в) Задаемся толщиной экрана.

Принимаем толщину экрана $\delta_3 = 0,002 \text{ м}$

г) Температурное поле по экрану

Температурное поле по экрану определяется по формуле (4.11.6):

$$T_x = T_0 + \frac{q_3 \cdot (h^2 - x^2)}{2 \cdot \lambda_{Al} \cdot \delta_3}, \quad (4.11.6)$$

где $\lambda_{Al} = 248 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [8]– коэффициент теплопроводности алюминия;

$h = 0,57 \text{ м}$ – высота экрана;

$T_0 = 80 \text{ К}$ – температура экрана в верхнем сечении;

x – изменение координаты по сечению экрана.

Рассчитаем температурное поле по экрану в различных координатах по сечению согласно (4.11.6):

1) $x = 0,5 \text{ м}$

$$T_{x(0,5)} = 80 + \frac{84,1 \cdot (0,57^2 - 0,5^2)}{2 \cdot 248 \cdot 0,002} = 86,34 \text{ К}$$

2) x=0,4 м

$$T_{x(0,4)} = 80 + \frac{84,1 \cdot (0,57^2 - 0,4^2)}{2 \cdot 248 \cdot 0,002} = 93,9 \text{ К}$$

3) x=0,3м

$$T_{x(0,3)} = 80 + \frac{84,1 \cdot (0,57^2 - 0,3^2)}{2 \cdot 248 \cdot 0,002} = 99,8 \text{ К}$$

4) x=0,2м

$$T_{x(0,2)} = 80 + \frac{84,1 \cdot (0,57^2 - 0,2^2)}{2 \cdot 248 \cdot 0,002} = 104,1 \text{ К}$$

5) x=0,1 м

$$T_{x(0,1)} = 80 + \frac{84,1 \cdot (0,57^2 - 0,1^2)}{2 \cdot 248 \cdot 0,002} = 106,6 \text{ К}$$

6) x=0 м

$$T_{x(0)} = 80 + \frac{84,1 \cdot 0,57^2}{2 \cdot 248 \cdot 0,002} = 107,4 \text{ К.}$$

Из полученных расчетов получим график зависимости распределения температур по экрану в различных точках сечения (рис. 4.11.2):

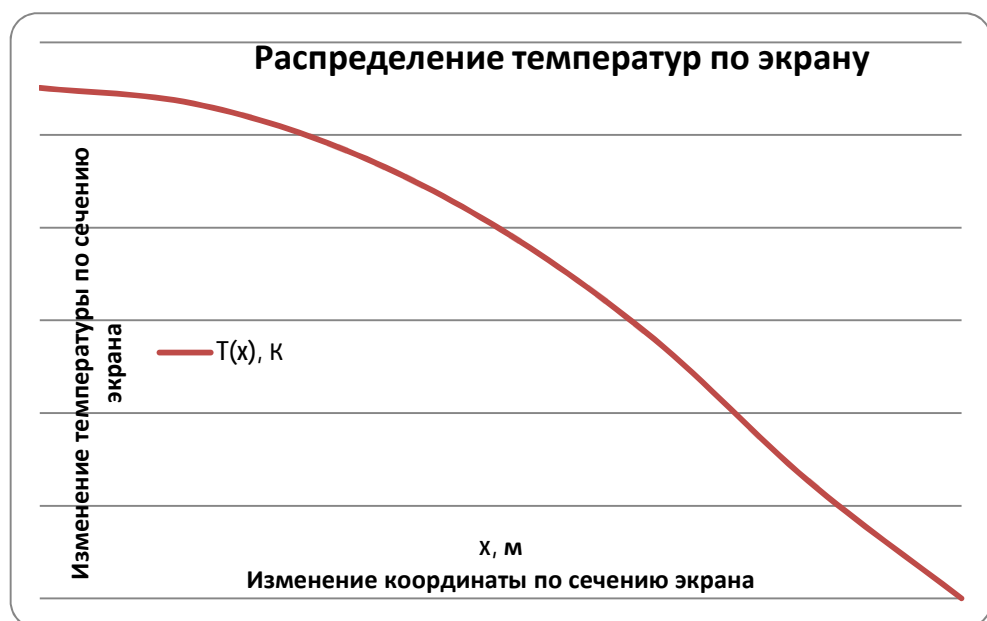


Рис.4.11.2. График зависимости температуры экрана от сечения [14].

5 Расчет процесса регенерации

В качестве греющего газа используется воздух. Температура воздуха на входе в электроподогреватель $T_{нач}=300$ К. Температура греющего газа на входе в насос $T_{вх}=580$ К.

5.1 Расчет количества теплоты, необходимой для проведения регенерации

Количество теплоты для регенерации определяется по формуле (5.1.1):

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (5.1.1)$$

где Q_1 – количество теплоты, расходуемой на нагревание металла;

Q_2 – количество теплоты, затраченной на нагревание адсорбента;

Q_3 – потери теплоты в окружающую среду.

а) Расчет количества теплоты, расходуемой на нагревание металла производится по формуле (5.1.2):

$$Q_1 = (G_{ст} \cdot c_{ст} + G_{Al} \cdot c_{Al}) \cdot (T'_{ср} - T'_{нач}), \quad (5.1.2)$$

где $G_{ст}=8,89$ кг – масса внутреннего сосуда, выполненного из стали;

$c_{ст}=0,397$ кДж/(кг·К)[8] – теплоемкость стали;

$G_{Al}=27,27$ кг – суммарная масса тарелок и экрана, выполненных из алюминия;

$c_{Al}=0,76$ кДж/ (кг·К) [8]– теплоемкость алюминия;

$T'_{нач} = 80$ К– температура металла в начале регенерации;

$T'_{ср}$ – средняя температура металла в конце процесса регенерации
(5.1.3):

$$T'_{ср} = \frac{T_{вх} + T_{вых2}}{2}, \quad (5.1.3)$$

где $T_{вых2}$ – температура воздуха на выходе из насоса в конце процесса регенерации, принятая равной 473 К. Тогда по (5.1.3),

$$T'_{ср} = \frac{580 + 474}{2} = 527\text{К.}$$

Т отсюда по (5.1.2):

$$Q_1 = (8,89 \cdot 0,397 + 27,27 \cdot 0,76) \cdot (527 - 80) = 10841 \text{ кДж.}$$

б) Расчет количества теплоты, затраченной на нагревание адсорбента

Количество теплоты затрачиваемой на нагревание адсорбента определяется по формуле (5.1.4):

$$Q_2 = G_{ц} \cdot c_{ц} \cdot (T'_{ср} - T'_{нач}), \quad (5.1.4)$$

где $G_{ц}=13,7$ кг – масса цеолита;

$c_{ц}=0,51$ кДж/(кг·К) – теплоемкость цеолита;

Отсюда по (5.1.4):

$$Q_2 = 13,7 \cdot 0,51 \cdot (527 - 80) = 3123,2 \text{ кДж.}$$

в) Расчет потерь теплоты в окружающую среду

Расчет потерь в окружающую среду производится по формуле (5.1.5):

$$Q_3' = Q_{\lambda} + Q_{л}, \quad (5.1.5)$$

где Q_{λ} – теплотери за счет теплопроводности остаточного газа;

Теплотери за счет теплопроводности остаточного газа можно определить по формуле (5.1.6):

$$Q_{\lambda} = \lambda_{N_2} \cdot \frac{F_3}{\delta} (T'_{ср} - T_{к}), \quad (5.1.6)$$

где $\lambda_{N_2} = 18,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) [8] – коэффициент теплопроводности азота;

$F_3 = 1,18$ м² – площадь поверхности экрана;

$\delta = 0,046$ м – расстояние от экрана до корпуса;

$T_{к} = 300$ К – температура корпуса.

Тогда по (5.1.6),

$$Q_{\lambda} = 18,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,18}{0,046} (527 - 300) = 106,5 \text{ Вт.}$$

$Q_{л}$ – лучистый тепловой поток от экрана к корпусу.

Лучистый тепловой поток от экрана к корпусу определяется по формуле (5.1.7):

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{п}} \cdot C \cdot 10^{-8} \cdot ((T'_{\text{ср}})^4 - T_{\text{к}}^4) \cdot F_{\text{к}}, \quad (5.1.7)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ – приведенный коэффициент теплового излучения;

$C=5,77$ Вт/(м⁴К) – постоянная излучения для абсолютно черного тела;

$F_{\text{к}}=1,353$ м² – площадь холодной поверхности (корпуса).

Приведенный коэффициент теплового излучения определяется по формуле (5.1.8):

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \cdot \frac{F_{\text{к}}}{F_3} \cdot \varepsilon_1} \quad (5.1.8)$$

Материал корпуса – алюминиевый сплав марки АМгбМ ГОСТ4734-74 с обработкой поверхности путем шлифования, степень черноты для данного материала $\varepsilon_1 = 0,03$ [7].

Степень черноты экрана принимаем $\varepsilon_2 = 0,03$ [7], материал – алюминий.

Отсюда по (5.1.8):

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{0,03 \cdot 0,03}{0,03 + (1 - 0,03) \cdot \frac{1,353}{1,18} \cdot 0,03} = 0,014$$

Количество теплоты в этом случае по (5.1.7):

$$Q_{\text{л}} = 0,014 \cdot 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot (527^4 - 300^4) \cdot 1,353 = 75,4 \text{ Вт}$$

И по (5.1.5):

$$Q_3' = 106,5 + 75,4 = 181,9 \text{ Вт}$$

Рассчитаем потери теплоты в окружающую среду за все время регенерации по формуле (5.1.9):

$$Q_3 = \frac{Q_3' \cdot \tau_{\text{р}}}{10^3}, \quad (5.1.9)$$

где $\tau_{\text{р}} = 5$ ч – время проведения регенерации. Тогда по (5.1.9),

$$Q_3 = \frac{181,9 \cdot 3600 \cdot 5}{10^3} = 3274,2 \text{ кДж}$$

Следовательно, после всех проведенных расчетов по (5.1.1) получим:

$$\Sigma Q = 10839 + 3123,2 + 3274,2 = 17263 \text{ кДж}$$

5.2 Определение мощности электронагревателя

С учетом 20%-го запаса на неравномерность потока, колебания напряжения и т.п. мощность электронагревателя определяется по формуле (5.2.1):

$$N = \frac{1,2 \cdot \Sigma Q}{3600 \cdot \tau_p} = \frac{1,2 \cdot 17263}{3600 \cdot 5} = 1,15 \text{ кВт} \quad (5.2.1)$$

6 Расчет кожуха на устойчивость

Материал кожуха – алюминиевый сплав АМг6М ГОСТ 4734-74.

Предел прочности – $\sigma_B=320$ МПа[7].

Предел текучести – $\sigma_T=160$ МПа[7].

Модуль упругости – $E=0,718 \cdot 10^5$ МПа[7].

6.1 Определение допускаемого напряжения

Нормативное допускаемое напряжение σ^* определяется из условий (6.1.1) и (6.1.2):

$$\sigma^* = \frac{\sigma_B}{n_B} \quad (6.1.1)$$

или

$$\sigma^* = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (6.1.2)$$

где $n_B=2,6$ [7] коэффициенты запаса прочности;

$n_T=1,5$ [7].

Отсюда найдем по (6.1.1) и (6.1.2):

$$\sigma^* = \frac{\sigma_B}{n_B} = \frac{320}{2,6} = 123 \text{ МПа}$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_T}{n_T} = \frac{160}{1,5} = 106,7 \text{ МПа}$$

За нормативное допускаемое напряжение принимается меньшее из этих значений, т.е.

$$\sigma^* = 106,7 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение $\sigma_{\text{доп}} = \sigma^* = 106,7 \text{ МПа.}$

6.2 Расчет обечайки

Расчет цилиндрической обечайки, работающей под наружным давлением, сводится к определению допускаемого наружного давления.

Обечайка конструктивно выполнена с толщиной стенки $s = 0,008 \text{ м.}$

Допускаемое наружное давление, Па, (6.2.1):

$$[p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + ([p]_p/[p]_E)^2}}, \quad (6.2.1)$$

где $[p]_p$ – допускаемое давление из условия прочности, Па;

$[p]_E$ – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, Па.

Допускаемое давление определяется по формуле (6.2.2):

$$[p]_p = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot (s - c)}{D_B + (s - c)}, \quad (6.2.2)$$

где $\sigma_{\text{доп}} = 106,7 \text{ МПа}$ – допускаемое напряжение;

$s = 0,008 \text{ м}$ – толщина обечайки;

$c = 0,00048 \text{ м}$ – сумма прибавок к расчетной толщине для компенсации коррозии, эрозии, минусового допуска на изготовление;

$D_B = 0,756 \text{ м}$ – внутренний диаметр обечайки.

Отсюда найдем по (6.2.2):

$$[p]_p = \frac{2 \cdot 106,7 \cdot 10^6 \cdot (0,008 - 0,00048)}{0,756 + (0,008 - 0,00048)} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Допускаемое давление определяется по формуле (6.2.3):

$$[p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D_B}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D_B}{l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B} \right]^2 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot (s - c)}{D_B}}, \quad (6.2.3)$$

где $E=0,718 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости;

$n_y=1,8$ – коэффициент запаса устойчивости по нижним критическим напряжениям в пределах упругости;

$l=0,584$ м – расчетная длина гладкой обечайки, принимается равной расстоянию между фланцами;

Безразмерный коэффициент B_1 определяется по формуле (6.2.4):

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 8,15 \cdot \frac{D_B}{l} \cdot \sqrt{\frac{D_B}{100 \cdot (s - c)}} \right\} \quad (6.2.4)$$

$$B_1 = 8,15 \cdot \frac{D_B}{l} \cdot \sqrt{\frac{D_B}{100 \cdot (s - c)}} = 8,15 \cdot \frac{0,756}{0,584} \cdot \sqrt{\frac{0,756}{100 \cdot (0,008 - 0,00048)}} =$$

$$= 10,58.$$

⇒ $B_1=1.$

$$[p]_E = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 0,718 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{1,8 \cdot 1} \cdot \frac{0,756}{0,584} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,008 - 0,00048)}{0,756} \right]^2 \times$$

$$\times \sqrt{\frac{100 \cdot (0,008 - 0,00048)}{0,756}} = 0,917 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Тогда, допускаемое наружное давление по (6.2.1):

$$[p] = \frac{2,1 \cdot 10^6}{\sqrt{1 + (2,1 \cdot 10^6 / 0,917 \cdot 10^6)^2}} = 0,84 \cdot 10^6 \text{ Па} = 0,84 \text{ МПа.}$$

Наружное давление $P=0,1$ МПа.

$$[p] > P$$

Следовательно, гладкая обечайка может противостоять наружному давлению $P=0,1$ МПа.

6.3 Расчет днища

Толщина стенки днища конструктивно принята $s_1^* = 0,015$ м.

Расчет на прочность днищ и крышек заключается в определении допускаемой толщины s плоских круглых днищ и крышек вакуумных камер по формуле (6.3.1):

$$s_1 = K_1 \cdot K_{o1} \cdot D_{в1} \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{доп}}} + c_1, \quad (6.3.1)$$

где $K_1=0,40$ – коэффициент конструкции плоских круглых днищ и крышек;

$K_{o1}=1$ – коэффициент ослабления плоских днищ и крышек отверстиями; днище изготавливается без отверстий, следовательно, коэффициент ослабления принимается равным 1;

$D_{в1}=0,756$ м – внутренний диаметр днища;

$p=0,1$ МПа – расчетное давление;

$\sigma_{доп}=106,7$ МПа – допускаемое напряжение;

$c_1=0,00052$ м – сумма прибавок к расчетной толщине для компенсации коррозии, эрозии, минусового допуска на изготовление.

Тогда, допускаемая толщина днища по (6.3.1):

$$s_1 = 0,4 \cdot 1 \cdot 0,756 \cdot \sqrt{\frac{0,1}{106,7}} + 0,00052 = 0,0098 \text{ м}$$

$$s_1^* > s_1$$

Следовательно, условие прочности выполнено.

6.4 Расчет крышки

Толщина стенки крышки конструктивно принята $s_2^* = 0,02$ м.

Толщину крышки можно определить по формуле (6.4.1):

$$s_2 = K_2 \cdot K_{o2} \cdot D_{B2} \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{\text{доп}}}} + c_2, \quad (6.4.1)$$

где $K_2 = 0,40$ – коэффициент конструкции плоских круглых днищ и крышек;

$D_{B2} = 0,756$ м – внутренний диаметр крышки;

$p = 0,1$ МПа – расчетное давление;

$\sigma_{\text{доп}} = 106,7$ МПа – допускаемое напряжение;

$c_2 = 0,00054$ м – сумма прибавок к расчетной толщине для компенсации коррозии, эрозии, минусового допуска на изготовление.

K_{o2} – коэффициент ослабления плоских днищ и крышек отверстиями;

Коэффициент ослабления плоских днищ и крышек отверстиями определяется по формуле (6.4.2):

$$K_{o2} = \sqrt{\frac{\left[1 - \sum \left(\frac{d_i}{D_{B2}}\right)^3\right]}{\left(1 - \sum \left(\frac{d_i}{D_{B2}}\right)\right)}}, \quad (6.4.2)$$

где $\sum d_i = 0,056$ м – максимальная сумма диаметров в наиболее ослабленном диаметральной сечении.

Отсюда по (6.4.2):

$$K_{o2} = \sqrt{\frac{\left[1 - \left(\frac{0,056}{0,756}\right)^3\right]}{\left(1 - \left(\frac{0,056}{0,756}\right)\right)}} = 1,04.$$

Тогда, допускаемая толщина крышки по (6.4.1):

$$s_2 = 0,4 \cdot 1,04 \cdot 0,756 \cdot \sqrt{\frac{0,1}{106,7}} + 0,00054 = 0,01 \text{ м.}$$

$$s_2^* > s_2$$

Следовательно, условие прочности выполнено.

ГЛАВА 4. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАБОТЫ КРИОАДСОРБЦИОННОГО НАСОСА

1 Монтажно-технологическая схема

Процесс работы криоадсорбционного насоса описывается технологической схемой (рис. 5.1).

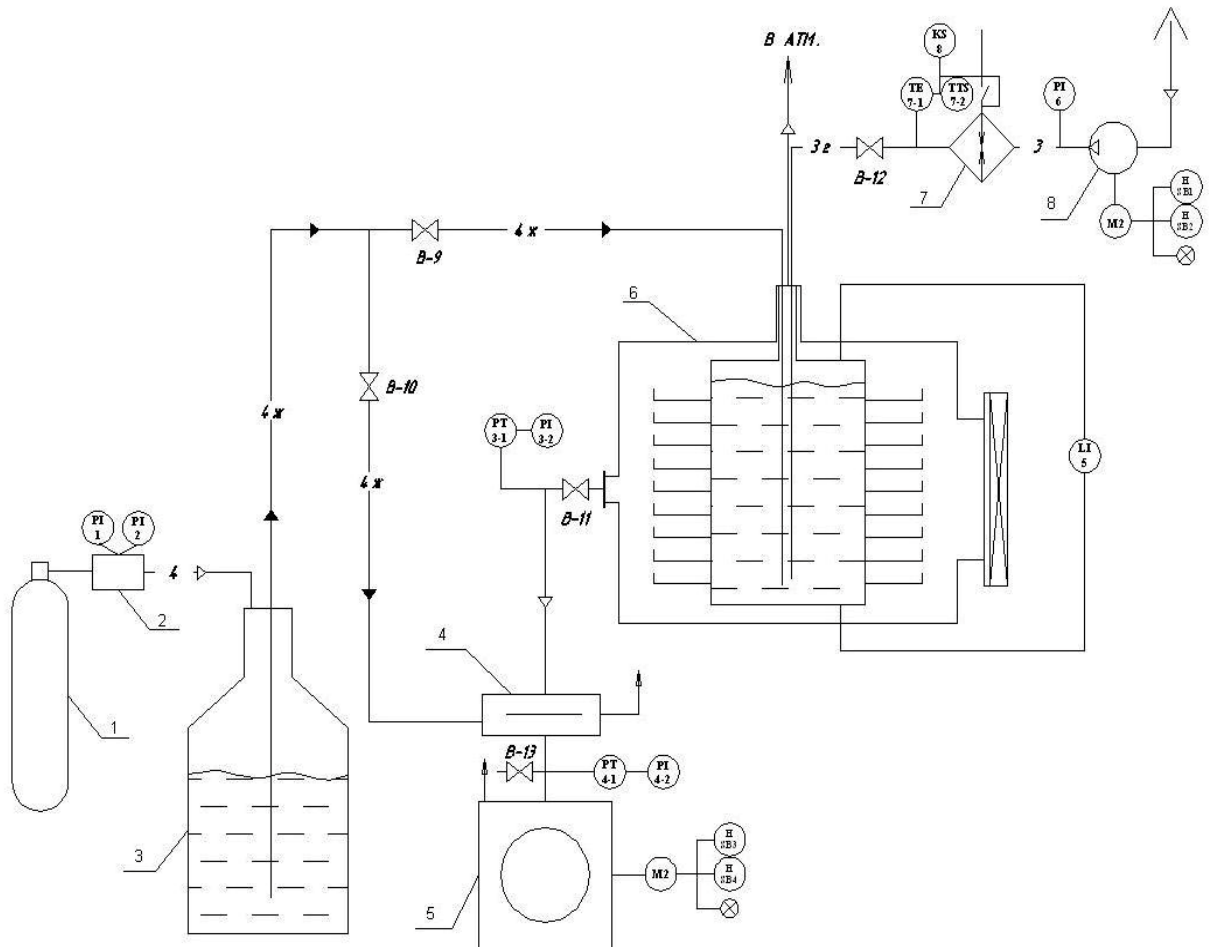


Рис. 5.1. Технологическая схема криоадсорбционного насоса [4]:

- 1 - баллон с газообразным азотом; 2 – редуктор; 3 - сосуд Дьюара с жидким азотом; 4 - азотная форвакуумная ловушка; 5 - форвакуумный механический насос; 6 - криоадсорбционный насос; 7 – электроподогреватель; 8 – газодувка.

2 Описание процесса криостатирования

По рис. 18 заполнение внутреннего сосуда жидким азотом:

Газообразный азот из баллона 1 проходит через редуктор 2, где создается избыточное давление 0,2 атм, и подается в сосуд Дьюара 3 с жидким азотом. Над поверхностью жидкого азота создается избыточное давление, за счет которого криоагент вытесняется из сосуда и по трубопроводу через вентиль 9 поступает во внутренний сосуд криoadсорбционного насоса.

Перед началом работы криoadсорбционного насоса для создания предварительного вакуума и во время проведения регенерации для откачки газа, выделяемого сорбентом при высокой температуре, необходимо использование форвакуумного насоса. Предварительный вакуум достигается за счет работы механического насоса 5. Однако, механический форвакуумный насос с масляным уплотнением источник большого перемещения паров масла и продуктов его разложения в откачиваемую систему. Для защиты откачиваемой системы применяется азотная форвакуумная ловушка 4, охлаждаемая азотом. Азот подается способом, аналогичным заполнению внутреннего сосуда криoadсорбционного насоса через вентиль 10.

3 Подбор оборудования

Турбомолекулярный насос (рис. 5.1) - один из видов вакуумных насосов, служащий для создания и поддержки высокого вакуума. Действие турбомолекулярного насоса основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в направлении откачки вращающимся ротором. Ротор состоит из системы дисков. Вакуум, создаваемый турбомолекулярным насосом, до 10^{-8} н/м² (10^{-10} мм рт. ст.). Скорость вращения ротора - десятки тысяч оборотов в минуту. Для работы требует применения форвакуумного насоса.

ТМН рассчитан на работу в условиях молекулярного режима течения газа. Для обеспечения работоспособности ТМН необходимо обеспечить на выхо-

де из его последней ступени молекулярный режим течения газа любым насосом предварительного разрежения (форвакуумным насосом) с выхлопом в атмосферу. Молекулярный насос (МН) состоит из молекулярных ступеней, установленных на одном роторе. Для обеспечения его работоспособности возможно применение форвакуумного насоса (в зависимости от конструкций ступеней МН). Гибридный ТМН (ГТМН) содержит первые ступени от турбомолекулярного насоса, а последние ступени от молекулярного насоса. Роторные ступени ГТМН закреплены на общем валу. Назначение молекулярных ступеней - обеспечить нормальную работу последним ступеням ТМН при повышении давления на входе в ТМН, а также возможность применения более дешёвых одноступенчатых форвакуумных насосов с большим предельным давлением. [14, с. 14].

Порядок расчета откачной характеристики ТМН:

а) Газодинамический и прочностной расчеты рабочих колес, определение их объемных характеристик и геометрических размеров.

б) Определение суммарного потока газовыделения с внутренней поверхности корпуса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания насоса, а также между рабочими колесами.

в) Проверка предельного остаточного давления.

г) Выбор форвакуумного насоса, обеспечивающего за последним колесом ТМН молекулярный режим течения газа.

д) Определение числа рабочих колес (роторных и статорных) последовательным подсчетом отношения давлений для каждого колеса, начиная с первого, до достижения форвакуумного давления, а также определение общего отношения давлений. При этом считают, что быстрота откачки первого рабочего колеса, а, следовательно, быстрота действия всего насоса $SH = 0$, что соответствует минимальному потоку газа. Таким образом, быстрота откачки первого колеса определяется потоком газовыделения на всасывании и потоком газа, протекающего через радиальный зазор.

е) Приняв поток газа в пределах от $Q_{minФ}$ до $S_{maxPФ}$ определяют расчетные точки откачной характеристики ТМН во всем диапазоне давления всасывания. Далее в той же последовательности определяют значения τ , S , P для всех колес до первого. Таким образом, находят истинное значение p_0 .

ж) Задаваясь значениями рабочей быстроты откачки в пределах от S_{max} до 0 определяют расчетные точки откачной характеристики ТМН во всем диапазоне давления всасывания [16, с. 98].

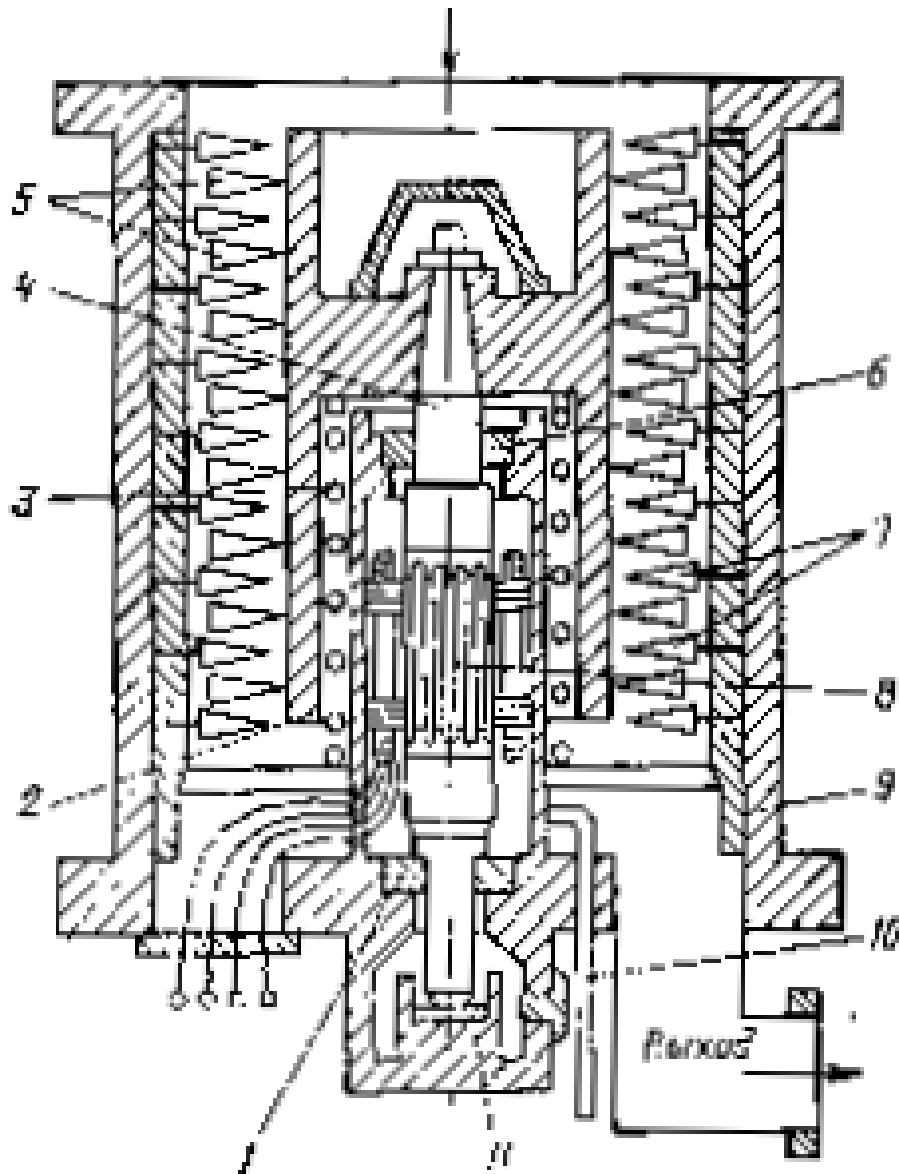


Рис. 5.1. Турбомолекулярный вакуумный насос с вертикальной осью [14].

4 Техническое задание

Техническое задание на проектирование представлено в табл. 4.1

Таблица 4.1

Параметр	Значение		Параметр	Значение
Быстрота откачки:	$S = 0.2 \text{ м}^3 / \text{сек}$		Расположение ротора:	вертикальное
Запас прочности:	$K_{np} = 5$		Материал роторных дисков:	Д16
Плотность:	$\rho_{D16} = 2.7 \times 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$		Структура пакета:	пакет состоит из колес с одинаковыми геометрическими параметрами
Радиальный зазор:	$d = 0.7 \text{ мм}$		Газ:	Смесь газов
Окружная скорость рабочего колеса:	$U_2 = 225 \text{ м/с}$		Отношение диаметров:	$l = 0.75$
Угол наклона паза:	$\alpha = 35^\circ$		Давление форвакуумного насоса:	$P_f = 0.133 \text{ Па.}$
Молярная масса:	32 г/моль		Минимальное создаваемое давление всасывания:	$P_{\min} = 5 \times 10^{-9} \text{ мм рт. ст.}$
Температура на входе:	$T = 320 \text{ К}$			
Толщина дискового колеса:	$h = 2 \times 10^{-3} \text{ м}$		Удельное газовыделение:	$q_{D16} = 5 \times 10^{-10} \frac{\text{л} \times \text{ммртст}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Предел текучести на растяжение:	$\sigma_{D16} = 2.74 \times 10^8 \text{ Па}$			$q_{X18H10T} = 2 \times 10^{-10} \frac{\text{л} \times \text{ммртст}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Отношение скоростей:	$U/Vh = 0,35$		Относительное перекрытие:	$f / S_0 = 0,2$

5 Расчет ТВН

5.1 Определение геометрических размеров насоса

Определим углы f_1 и f_2 .

Из числа всех молекул на сторону II-II перейдут те молекулы, векторы скорости теплового движения которых лежат в плоскости угла f_1 (5.1.1):

$$f_1 = g - i + b_g - b_i \tag{5.1.1}$$

где g и i - углы между векторами относительных скоростей и торцевой поверхностью колеса, b_g и b_i - углы между векторами абсолютной и относительной скоростей.

Определим эти углы по формулам (5.1.2) - (5.1.5):

$$g_{cp} = \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \arccos \left(\frac{f \cdot \frac{1}{S_0} \cos(a)}{\sqrt{\left(\frac{f}{S_0}\right)^2 + (tg(a))^2}} \right) + \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \arcsin \left(\frac{tg(a)}{\sqrt{\left(\frac{f}{S_0}\right)^2 + (tg(a))^2}} \right) \tag{5.1.2}$$

$$= \frac{1}{1+0.2} (0.610 + 0.2 \cdot \pi) + \frac{1}{1+0.2} \arcsin \left(\frac{0.2}{\sqrt{(0.2)^2 + (tg(35^\circ))^2}} \right) = 1.118$$

Так как $\frac{f}{S_0} < \tan(a)^2$, то $n = (\sin(a))^2 - \frac{f}{S_0} \cos(a)^2 = (\sin(35^\circ))^2 - 0.2 \cos(35^\circ)^2 = 0.194$

$$i_{cp} = \arcsin \left(\frac{n \cdot tg(a)}{\sqrt{\left(\frac{f}{S_0}\right)^2 + 2 \cdot \frac{f}{S_0} \cos(a) + \frac{n^2}{(\cos(a))^2}}}\right) + \arctg \left(\frac{1 + n + \frac{f}{S_0}}{n \cdot tg(a)} \right) + \arctg \left(\frac{1}{tg(a)} \right) \tag{5.1.3}$$

$$+ 0.5 \times \frac{n}{1 + \frac{f}{S_0}} \cdot tg(a) \cdot \frac{1 + \frac{f}{S_0} + 2 \cdot \frac{f}{S_0} \cos(a) + n^2 (1 + (tg(a))^2)}{n^2 (1 + (tg(a))^2)}$$

$$= \arcsin \frac{0.194 \times \sin(35)}{\sqrt{(1+0.2)^2 + 2 \times (1+0.2) \times 0.194 + \frac{0.194^2}{(\cos(35))^2}}} + \frac{1}{1+0.2} \times 0.194 \times \arctg \frac{0.194 \times \sin(35)}{0.194 \times \cos(35)}$$

$$- \arctg \frac{0.194}{\cos(35)} + 0.5 \times \frac{0.194}{1+0.2} \times \ln \frac{1+(0.2)^2 + 2(1+0.2) \times 0.194 + 0.194^2 (1+(\sin(35))^2)}{n^2 (1+(\sin(35))^2)} = 0.2157$$

$$b_{гр} = \frac{1}{1+\frac{f}{S_0}} \times \arcsin \frac{U}{V_H} \times \sin(a) + \frac{f}{S_0} \arcsin \frac{U}{V_H} \times \sin(a) + \frac{1}{1+\frac{f}{S_0}} \times \frac{U}{V_H} \times \arctg(a)$$

$$\cdot \ln \frac{\sqrt{1+(\sin(a))^2 \times \left(1 - \frac{U^2}{V_H^2} + 1\right)}}{\sqrt{\frac{f}{S_0} + (\sin(a))^2 \times \left(1 - \frac{U^2}{V_H^2} - \frac{f}{S_0}\right)}} - 0.5 \times \frac{1}{1+\frac{f}{S_0}} \times \arctg(a) \times \ln \frac{\sqrt{1+(\sin(a))^2 \times \left(1 - \frac{U^2}{V_H^2} + \frac{U}{V_H}\right)}}{\sqrt{1+(\sin(a))^2 \times \left(1 - \frac{U^2}{V_H^2} - \frac{U}{V_H}\right)}}$$

$$+ 0.5 \times \frac{1}{1+\frac{f}{S_0}} \times \arctg(a) \times \ln \frac{\sqrt{\frac{f}{S_0} + (\sin(a))^2 \times \left(1 - \frac{U^2}{V_H^2} - \frac{f}{S_0} \times \frac{U}{V_H}\right)}}{\sqrt{\frac{f}{S_0} + (\sin(a))^2 \times \left(1 - \frac{U^2}{V_H^2} - \frac{f}{S_0} \times \frac{U}{V_H}\right)}} \quad (5.1.4)$$

$$= \frac{1}{1+0.2} \times \arcsin(0.35 \times \sin(35)) + \frac{0.2}{1+0.2} \arcsin \frac{0.35 \times \sin(35)}{\sqrt{(0.2)^2 + \sin(35)^2}} + \frac{1}{1+0.2} \times 0.35 \times \arctg(35)$$

$$\cdot \ln \frac{\sqrt{1+(\sin(35))^2 \times (1-0.1225)} + 1}{\sqrt{0.2+(\sin(35))^2 \times (1-0.1225)} - 0.2} - 0.5 \times \frac{1}{1+0.2} \times \arctg(35) \times \ln \frac{\sqrt{1+(\sin(35))^2 \times (1-0.1225)} + 0.35}{\sqrt{1+(\sin(35))^2 \times (1-0.1225)} - 0.35}$$

$$+ 0.5 \times \frac{1}{1+0.2} \times \arctg(35) \times \ln \frac{\sqrt{0.2+(\sin(35))^2 \times (1-0.1225)} - 0.2 \times 0.1225}{\sqrt{0.2+(\sin(35))^2 \times (1-0.1225)} - 0.2 \times 0.1225} = 0.298$$

$$\begin{aligned}
 b_{кр} = \arcsin & \frac{\frac{U}{V_H} \times \operatorname{tg}(a)}{\sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + 2 \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right) \times n + \frac{n^2}{(\cos(a))^2}}} \\
 - \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times \frac{U}{V_H} \times \frac{U}{V_H} \times \operatorname{tg}(a) \times n & \times \frac{1 + \frac{f}{S_0} + n + \sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\tan(a))^2}}{n + n \times \sqrt{1 + (\operatorname{tg}(a))^2}} \times \frac{U^2}{V_H^2} \\
 - \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times \operatorname{arctg} & \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\tan(a))^2}}{n \times \frac{U}{V_H} \times \operatorname{tg}(a)} \\
 + \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times \frac{U}{V_H} \times \operatorname{arctg} & \frac{\sqrt{1 + (\tan(a))^2}}{\operatorname{tg}(a) \times \frac{U}{V_H}} + 0.5 \times \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times \operatorname{tg}(a) \times n \times \frac{n^2 + (\tan(a))^2}{\left(1 + \frac{f}{S_0} + n\right)^2 \times (\tan(a))^2}
 \end{aligned} \tag{5.1.5}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\frac{U^3}{V_H^3} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2 \times \frac{U^3}{V_H^3} + 2 \times \frac{U}{V_H} \times \sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2} \times \frac{U^2}{V_H^2}}{\frac{U^3}{V_H^3} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2 \times \frac{U^3}{V_H^3} + 2 \times \frac{U}{V_H} \times \sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2} \times \frac{U^2}{V_H^2}} \\
 & \times \frac{\frac{U^3}{V_H^3} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2 \times \frac{U^3}{V_H^3}}{\frac{U^3}{V_H^3} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2 \times \frac{U^3}{V_H^3} + 2 \times \frac{U}{V_H} \times \sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2} \times \frac{U^2}{V_H^2}} \\
 & \times \frac{\frac{U^3}{V_H^3} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2 \times \frac{U^3}{V_H^3}}{\frac{U^3}{V_H^3} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2 \times \frac{U^3}{V_H^3} + 2 \times \frac{U}{V_H} \times \sqrt{\left(1 + \frac{f}{S_0}\right)^2 + n^2 \times (\operatorname{tg}(a))^2} \times \frac{U^2}{V_H^2}}
 \end{aligned}$$

для отношения скоростей $U/V_n=0,4$, что отличается от найденного $U/V_n=0,35$ значения для углов посчитанных по эмпирическим формулам. В дальнейших расчетах будет принята величина, полученная с экспериментального графика, т.к. эмпирические данные считаются менее точными.

Безразмерный комплекс постоянных величин определяется по формуле (5.1.8):

$$BD''_2 = U_2^2 \frac{4 \times r_{D16} \times k_{np}}{s_{D16}} = 225^2 \frac{4 \times 2.7 \times 10^3 \times 5}{2.74 \times 10^3} = 11 \quad (5.1.8)$$

Ширина паза определяется по формуле (5.1.9):

$$a = \frac{h}{\operatorname{tg}(\alpha)} \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right) = \frac{2 \times 10^{-3}}{\operatorname{tg}(35^\circ)} \times (1 + 0.2) = 3,43 \times 10^{-3} \text{ м} \quad (5.1.9)$$

Длина паза определяется по формуле (5.1.10):

$$b = \frac{a}{\cos \alpha \times \left(1 + \frac{f}{S_0}\right)} = \frac{3,43}{\cos 35^\circ \times (1 + 0,2)} = 3,49 \times 10^{-3} \text{ м} \quad (5.1.10)$$

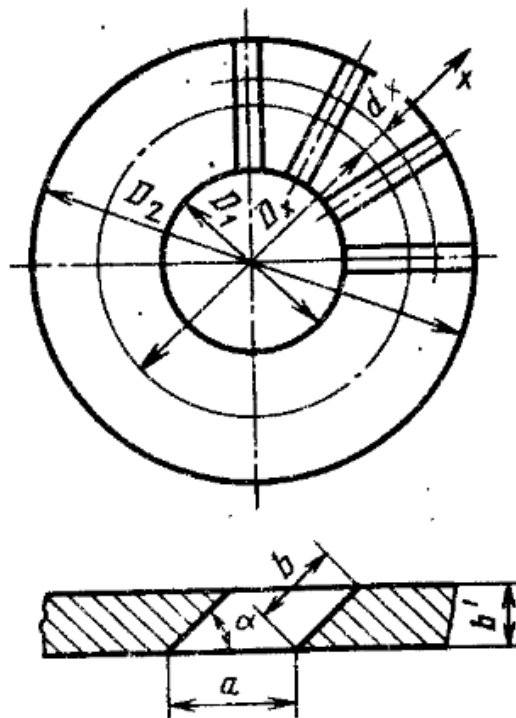


Рис. 5.1.1. Вид РК ТВН [16]

Постоянная для определения D_2 для определения наружного диаметра дискового рабочего колеса определяется по формуле (5.1.11):

$$C = \sqrt{\frac{24 - 3(1 - l^2) \times BD''_2}{U_2 \times (1 - l^2) \times \frac{48}{e} - 4(1 - l^3) \times BD''_2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{24 - 3(1 - 0.75^2) \times 1}{225 \times (1 - 0.75^2) \times \frac{48}{e} - 4(1 - 0.75^3) \times 1}} = 0.096 \tag{5.1.11}$$

Переопределим по графику $C = f(\lambda)$ (Приложение 2) значение отношений диаметров с заданной окружной скоростью u_2 и найденному $C = 0.096$: $l = 0.7$

Средняя скорость рабочего колеса на наружном диаметре определяется по формуле (5.1.12):

$$U_{2cp} = U_2 \frac{1+l}{2} = 225 \times \frac{1+0.7}{2} = 191,25 \text{ м/с} \tag{5.1.12}$$

Скорость теплового движения молекул определяется по формуле (5.1.13):

$$V_H = \frac{U_2}{0.35} = \frac{225}{0.35} = 643 \text{ м/с} \tag{5.1.13}$$

Уточняем отношение скоростей определяется по формуле (5.1.14):

$$\frac{U_{2cp}}{V_H} = \frac{191,25}{643} = 0.297 \approx 0.4 \tag{5.1.14}$$

Уточнение полученных углов в связи с изменением $\frac{U_{2cp}}{V_H}$ определяется по формуле (5.1.15) (5.1.16):

$$\begin{aligned}
 b_{gp} &= \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \arcsin \frac{U_{2cp}}{V_H} \sin(a) + \frac{f}{S_0} \arcsin \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} + \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} \cdot \\
 &\cdot \ln \frac{\sqrt{1 + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + 1\right) - 0.5 \times \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + 1\right)}{\sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + 1\right) - \frac{f}{S_0} \times \frac{U_{2cp}}{V_H}} + \\
 &+ 0.5 \times \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} \times \ln \frac{\sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + 1\right) - \frac{f}{S_0} \times \frac{U_{2cp}}{V_H}}{\sqrt{\frac{f}{S_0} + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + 1\right) - \frac{f}{S_0} \times \frac{U_{2cp}}{V_H}} = \\
 &= \frac{1}{1 + 0.2} \arcsin(0.297 \times \sin(35)) + \frac{0.297}{1 + 0.297} \arcsin \frac{0.297 \times g(35)}{\sqrt{(0.297)^2 + tg(tg(35))^2}} + \frac{1}{1 + 0.297} \times 0.297 \times g(35) \cdot \\
 &\cdot \ln \frac{\sqrt{1 + (tg(35))^2} \times (1 - 0.194) + 1}{\sqrt{0.2 + (tg(35))^2} \times (1 - 0.194) - 0.2} - 0.5 \times \frac{1}{1 + 0.2} \times g(35) \times \ln \frac{\sqrt{1 + (tg(35))^2} \times (1 - 0.194) + 0.297}{\sqrt{1 + (tg(35))^2} \times (1 - 0.194) - 0.297} + \\
 &+ 0.5 \times \frac{1}{1 + 0.2} \times g(35) \times \ln \frac{\sqrt{0.2 + (tg(35))^2} \times (1 - 0.194) - 0.2 \times 0.297}{\sqrt{0.2 + (tg(35))^2} \times (1 - 0.194) + 0.2 \times 0.297} = 0.251
 \end{aligned} \tag{5.1.15}$$

$$\begin{aligned}
 b_{gp} &= \arcsin \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) + \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) \times \ln \frac{\sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times \left(1 + \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + n^2 \times (tg(a))^2\right) - \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2}}{n + n \sqrt{1 + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + n^2\right)}} \\
 &- \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times n \times \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) + \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) \times \ln \frac{\sqrt{1 + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + n^2\right) - \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2}}{tg(a) \times \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2}} \\
 &+ 0.5 \times \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times n \times \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) \times \ln \frac{\sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times \left(1 + \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + n^2 \times (tg(a))^2\right) - \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2}}{n + n \sqrt{1 + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + n^2\right)}} \\
 &- \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \times n \times \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) + \frac{1}{1 + \frac{f}{S_0}} \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2} \times g(a) \times \ln \frac{\sqrt{1 + (tg(a))^2} \times \left(1 - \frac{U_{2cp}^2}{V_H^2} \frac{f}{S_0} + n^2\right) - \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2}}{tg(a) \times \frac{U_{2cp}}{V_H} \sqrt{\frac{f}{S_0} + n^2}}
 \end{aligned} \tag{5.1.16}$$

$$\begin{aligned}
 &= \arcsin \frac{0,297 \times 0,194 \times \operatorname{tg}(35)}{\sqrt{(1+0,2)^2 + 2 \times (1+0,2) \times 0,194 + \frac{0,194^2}{(\cos(35))^2}}} \times \frac{1}{1+0,2} \times \frac{1}{0,297 \times 0,194 \times 0,297 \times \operatorname{tg}(35) \times 0,194 \times \operatorname{tg}(35)} \times \frac{\sqrt{0,2^2 + 0,194^2 + \sqrt{(1+0,2+0,194)^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088)}}{0,194 + 0,194 \times \sqrt{1 + (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088)}} \\
 &- \frac{1}{1+0,2} \times \frac{1}{0,194 \times \operatorname{tg}(35)} \times \frac{\sqrt{(1+0,2+0,194)^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088)}{0,194 \times 0,297 \times \operatorname{tg}(35)} \times \frac{1}{1 + \frac{f}{V_n}} \times \frac{U}{S_0} \times \frac{1}{\operatorname{tg}(35) \times 0,297} \\
 &= \frac{0,194 \times \sqrt{0,2^2 + 0,194^2 + \sqrt{(1+0,2+0,194)^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088)}}{0,194 + 0,194 \times \sqrt{1 + (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088)}} \times \frac{1}{1+0,2} \times \frac{1}{0,194 \times \operatorname{tg}(35)} \times \frac{- (1+0,088) \times \sqrt{0,2^2 + 0,194^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2}}{\sqrt{- (1+0,088) \times 0,194^2 \times \sqrt{0,2^2 + 0,194^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088) \times (1 + (\operatorname{tg}(35))^2) + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} + 2 \times 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2 \times 0,297 \times \sqrt{0,2^2 + 0,194^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088) \times (1 + (\operatorname{tg}(35))^2) + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} + 2 \times 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2 \times 0,297 \times \sqrt{0,2^2 + 0,194^2 + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \times (1-0,088) \times (1 + (\operatorname{tg}(35))^2) + 0,194^2 \times (\operatorname{tg}(35))^2} \\
 &= 0,08
 \end{aligned}$$

По (5.1.1):

$$\begin{aligned}
 f_{Icp} &= g_{cp} - i_{cp} + b_{gcp} - b_{icp} = 1.074 \\
 f_{IIcp} &= g_{cp} - i_{cp} - b_{gcp} + b_{icp} = 0.731
 \end{aligned}$$

Уточненная вероятность перехода молекул через рабочее колесо определяется по формуле (5.1.6):

$$K = \frac{f_{Icp} - f_{IIcp}}{\rho} = 0.109, \quad K_{cp} = 0.21$$

Погрешность рассчитанного и найденного из графика значения вероятности перехода молекул через рабочее колесо определяется по формуле (5.1.7):

$$DK = \frac{K_{cp} - K}{K_{cp}} \times 100\% = \frac{0,21 - 0,109}{0,21} \times 100\% = 48,1\%$$

Вывод: получилось расхождение в 48,1% между полученным значением вероятности и найденным из графика по ряду причин: график для вероятности получен экспериментально для отношения скоростей $\frac{u}{V_H} = 0,4$, что отличается от найденного $\frac{u}{V_H} = 0,297$, значения для углов посчитаны по эмпирическим формулам.

Максимальная быстрота откачки определяется по формуле (5.1.17):

$$S_{\max} = \frac{S}{0.85} = \frac{0.2}{0.85} = 0.235 \quad (5.1.17)$$

Наружный диаметр дискового рабочего колеса определяется по формуле (5.1.18):

$$D_2 = \sqrt{\frac{\frac{S}{0.9}}{3.64 \times \frac{p}{8} \times A \times \frac{1}{V_H} \sqrt{\frac{T}{M}}}} \times C = \sqrt{\frac{\frac{0.2}{0.85}}{3.64 \times \frac{p}{8} \times 0.831 \times \frac{1}{644} \sqrt{\frac{310}{32 \times 10^{-3}}}}} \times 0.096 = 0.109 \text{ м}, \quad (5.1.18)$$

где $A = \frac{K_{zp}}{\frac{U_2}{V_H} \times \frac{1+l}{2}} = \frac{0.21}{0.297 \times \frac{1+0.7}{2}} = 0.831 \quad (5.1.19)$

(5.1.19) это коэффициент для определения диаметров дисков.

Внутренний диаметр рабочего колеса определяется по формуле (5.1.20):

$$D_1 = l \times D_2 = 0.076 \text{ м} \quad (5.1.20)$$

Суммарная торцевая площадь пазов дискового рабочего колеса определяется по формуле (5.1.21):

$$F = \frac{p \times D_2^2}{4} \times \frac{e \times 48 \times l - 4 \times (1-l^3) \times BD_2 \times u}{e \times 24 \times l - 3 \times (1-l^2) \times BD_2 \times u} \times (1-l) = \frac{p \times 0.109^2}{4} \times \frac{e \times 48 \times 0.7 - 4 \times (1-0.7^3) \times 1 \times u}{e \times 24 \times 0.7 - 3 \times (1-0.7^2) \times 1 \times u} \times (1-0.7) = 0.00176 \text{ м}^2 \quad (5.1.21)$$

Число пазов определяется по формуле (5.1.22):

$$z = \frac{p \times D_2}{a} \times \frac{e \times 24 \times l - 2 \times (1-l^3) \times BD_2 \times u}{e \times 24 \times l - 3 \times (1-l^2) \times BD_2 \times u} = \frac{p \times 0.109}{3.43 \times 10^{-3}} \times \frac{e \times 24 \times 0.7 - 2 \times (1-0.7^3) \times 1 \times u}{e \times 24 \times 0.7 - 3 \times (1-0.7^2) \times 1 \times u} = 31.59 \quad (5.1.22)$$

Величина z принимается таким образом из полученного диапазона, чтобы обеспечить валидное значение $S_{\text{пнк}}$.

Принимаем z=32 шт.

Уточнение суммарной торцевой площади определяется по формуле (5.1.23):

$$F^{\wedge} = z \times \frac{D_2 \times a}{2} \times (1 - l) = 32 \times \frac{0.109 \times 3,43 \times 10^{-3}}{2} \times (1 - 0.7) = 0.00179 \text{ м}^2 \quad (5.1.23)$$

Уточнение максимальной быстроты откачки определяется по формуле (5.1.24):

$$S_{\max} = 3.64 \times K \times F \times \sqrt{\frac{T}{M}} = 3.64 \times 0.21 \times 0.00179 \times \sqrt{\frac{310}{32 \times 10^{-3}}} = 0.137 \quad (5.1.24)$$

Площадь пазов определяется по формуле (5.1.25):

$$F^{\wedge} - F = 0.00179 - 0.00176 = 0.00002 \text{ м}^2 \quad (5.1.25)$$

5.2 Площади поверхности газовыделения

Площадь поверхности газовыделения определяется по формулам (5.2.1)- (5.2.6):

$$F_{\text{всД16}} = \frac{\rho \times D_2^2 - \rho \times (0.5 \times D_2)^2 - 4 \times (F^{\wedge} - F)}{4} = \frac{\rho \times 0.109^2 - \rho \times (0.5 \times 0.109)^2 - 4 \times (0.00002)}{4} = 0.00693 \text{ м}^2 \quad (5.2.1)$$

$$F_{\text{всХ18}} = \frac{\rho \times (0.5 \times D_2)^2 + 2 \times \rho \times D_2^2 + 2 \times \rho \times D_1 \times D_2}{4} = \frac{\rho \times (0.5 \times 0.109)^2 + 2 \times \rho \times 0.109^2 + 2 \times \rho \times 0.076 \times 0.109}{4} = 0.0338 \text{ м}^2 \quad (5.2.2)$$

$$F_{\text{срД16}} = 2 \times F_{\text{всД16}} = 2 \times 0.00693 = 0.01386 \text{ м}^2 \quad (5.2.3)$$

$$F_{\text{срХ18}} = \rho \times D_2 \times 10^{-3} - \rho \times D_1 \times 10^{-3} = \rho \times 0.109 \times 10^{-3} - \rho \times 0.076 \times 10^{-3} = 0.00041 \text{ м}^2 \quad (5.2.4)$$

$$F_{\text{ФД16}} = \frac{\rho \times D_2^2 - \rho \times (0.5 \times D_2)^2 - 4 \times (F^{\wedge} - F)}{4} = \frac{\rho \times 0.109^2 - \rho \times (0.5 \times 0.109)^2 - 4 \times (0.00002)}{4} = 0.00693 \text{ м}^2 \quad (5.2.5)$$

$$F_{\text{ФХ18}} = \frac{\rho \times (0.2 \times D_2)^2 + 0.8 \times \rho \times D_2^2 + 0.8 \times \rho \times D_1 \times D_2}{4} = \frac{\rho \times (0.2 \times 0.109)^2 + 0.8 \times \rho \times 0.109^2 + 0.8 \times \rho \times 0.076 \times 0.109}{4} = 0.01298 \text{ м}^2 \quad (5.2.6)$$

5.3 Определение суммарной величины газовыделений

Определим суммарную величину газовыделений с внутренней поверхности корпуса и деталей ротора, расположенных в полости всасывания насоса, а также между рабочими колесами.

Газовыделение со стороны всасывания для роторных дисков D-16 определяется по формуле (5.3.1):

$$Q_{вс} = q_{D16} \times F_{всD16} + q_{X18} \times F_{всX18} = 6.67 \times 10^7 \times 0.00093 + 2.67 \times 10^7 \times 0.0338 = 1.36 \times 10^8 \text{ м}^3 \text{Па/с} \quad (5.3.1)$$

Газовыделение между рабочими колесами определяется по формуле (5.3.2):

$$Q_{р} = q_{D16} \times F_{рD16} + q_{X18} \times F_{рX18} = 6.67 \times 10^7 \times 0.01386 + 2.67 \times 10^7 \times 0.00041 = 9.35 \times 10^9 \text{ м}^3 \text{Па/с} \quad (5.3.2)$$

Газовыделение после последнего рабочего колеса определяется по формуле (5.3.3):

$$Q_{ф} = q_{D16} \times F_{фD16} + q_{X18} \times F_{фX18} = 6.67 \times 10^7 \times 0.00093 + 2.67 \times 10^7 \times 0.01298 = 8.08 \times 10^9 \text{ м}^3 \text{Па/с} \quad (5.3.3)$$

Быстрота газовыделения после последнего рабочего колеса определяется по формуле (5.3.4):

$$S_{газ} = \frac{Q_{ф}}{P_{ф}} = \frac{8.08 \times 10^9}{0.133} = 6.08 \times 10^8 \text{ м}^3/\text{с} \quad (5.3.4)$$

Длина окружности РК определяется по формуле (5.3.5):

$$p \times D_2 = p \times 0.109 = 0.341 \text{ м} \quad (5.3.5)$$

Длина всех пазов определяется по формуле (5.3.6):

$$z \times b = 32 \times 3.49 \times 10^{-3} = 0.112 \text{ м} \quad (5.3.6)$$

Пропускная способность кольцевого зазора между роторным колесом и корпусом определяется по формуле (5.3.7):

$$U_{рот} = \frac{8}{3} \times \frac{\sqrt{R \times T}}{\sqrt{2p \times \frac{M}{1000}}} \times \frac{p \times D_2 d_r^2}{h} \times 0.5 = \frac{8}{3} \times \frac{\sqrt{8.3 \times 310}}{\sqrt{2p \times \frac{32}{1000}}} \times \frac{p \times 0.109 \times (0.7 \times 10^{-3})^2}{2 \times 10^{-3}} \times 0.5 = 0.0128 \text{ м}^3/\text{с} \quad (5.3.7)$$

Пропускная способность кольцевого зазора между статорным колесом и валом определяется по формуле (5.3.8):

$$U_{СТАТ} = \frac{8}{3} \times \sqrt{\frac{RT}{2p \times \frac{M}{1000}}} \times \frac{p \times D_1 d_1^2}{h} \times 0.5 = \frac{8}{3} \times \sqrt{\frac{8.3 \times 310}{2 \times 10^3}} \times \frac{p \times 0.076 \times (0.7 \times 10^{-3})^2}{2 \times 10^3} \times 0.5 = 0.00897 \text{ м}^3/\text{с} \quad (5.3.8)$$

По графику $t = f(f/S_0)$ (Приложение 3) определяем значение максимального повышения давлений

$$t_{\max} = 1.9$$

Максимальное отношение давлений роторного диска с учетом $U_{РОТ}$ определяется по формуле (5.3.9):

$$t_{\text{MAX.РОТ}} = \frac{S_{\max} \times t_{\max} + U_{РОТ} \times (t_{\max} - 1)}{S_{\max} + U_{РОТ} \times (t_{\max} - 1)} = \frac{0.137 \times 1.9 + 0.0128 \times (1.9 - 1)}{0.137 + 0.0128 \times (1.9 - 1)} = 1.83 \quad (5.3.9)$$

Максимальное отношение давлений статорного диска с учетом $U_{СТАТ}$ определяется по формуле (5.3.10):

$$t_{\text{MAX.СТАТ}} = \frac{S_{\max} \times t_{\max} + U_{СТАТ} \times (t_{\max} - 1)}{S_{\max} + U_{СТАТ} \times (t_{\max} - 1)} = \frac{0.137 \times 1.9 + 0.00897 \times (1.9 - 1)}{0.137 + 0.00897 \times (1.9 - 1)} = 1.85 \quad (5.3.10)$$

6 Определение отношения давления каждого рабочего колеса

Первая роторная ступень, параметры для которой определяются по формулам (6.1)-(6.3):

$$P_1 = P_{1\min} = 6.67 \times 10^{-7} \text{ Па} \quad (6.1)$$

$$S_1 = \frac{Q_{всД16}}{P_1} = \frac{1.36 \times 10^{-8}}{6.67 \times 10^{-7}} = 0.0204 \text{ м}^3/\text{с} \quad (6.2)$$

$$t_1 = t_{\text{MAX.РОТ}} - \frac{S_1}{S_{\max}} \times (t_{\text{MAX.РОТ}} - 1) = 1.83 - \frac{0.0204}{0.137} \times (1.83 - 1) = 1.706 \quad (6.3)$$

Вторая статорная ступень, параметры которой, а также остальных ступеней определяются по формулам (6.4)-(6.6) с индексами соответствующими номеру ступени:

$$P_2 = P_1 \chi_1 = 6.67 \times 10^{-7} \times 1.706 = 1.14 \times 10^{-6} \text{ Па} \quad (6.4)$$

$$S_2 = \frac{S_1 Q_{cpD16.X18}}{t_1 P_2} = \frac{0.0204 \cdot 1.38 \times 10^{-8}}{1.706 \cdot 1.14 \times 10^{-6}} = 0.0202 \text{ м}^3/\text{с} \quad (6.5)$$

$$t_2 = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_2}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.85 - \frac{0.0202}{0.137} \times (1.85 - 1) = 1.724 \quad (6.6)$$

Третья роторная ступень:

$$P_3 = P_2 \chi_2 = 1.14 \times 10^{-6} \times 1.724 = 1.96 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$S_3 = \frac{S_2 Q_{cpD16.X18}}{t_2 P_3} = \frac{0.0202 \times 9.35 \times 10^{-9}}{1.56 \cdot 1.96 \times 10^{-6}} = 0.0165 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$t_3 = t_{MAX.POT} - \frac{S_3}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.9 - \frac{0.0165}{0.137} \times (1.9 - 1) = 1.73$$

Четвертая статорная ступень:

$$P_4 = P_3 \chi_3 = 1.96 \times 10^{-6} \times 1.73 = 3.39 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$S_4 = \frac{S_3 Q_{cpD16.X18}}{t_3 P_4} = \frac{0.0165 \times 9.35 \times 10^{-9}}{1.73 \cdot 3.39 \times 10^{-6}} = 0.01229$$

$$t_4 = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_4}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.9 - \frac{0.01229}{0.137} \times (1.9 - 1) = 1.773$$

Пятая роторная ступень:

$$P_5 = P_4 \chi_4 = 3.39 \times 10^{-6} \times 1.773 = 6.01 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$S_5 = \frac{S_4 Q_{cpD16.X18}}{t_4 P_5} = \frac{0.01229 \times 9.35 \times 10^{-9}}{1.773 \cdot 6.01 \times 10^{-6}} = 0.00849$$

$$t_5 = t_{MAX.POT} - \frac{S_5}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.9 - \frac{0.00849}{0.137} \times (1.9 - 1) = 1.778$$

Шестая статорная ступень:

$$P_6 = P_5 \chi_5 = 6.01 \times 10^{-6} \times 1.778 = 1.07 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$S_6 = \frac{S_5 Q_{cpD16.X18}}{t_5 P_6} = \frac{0.00849}{1.778} \times \frac{9.35 \times 10^{-9}}{1.07 \times 10^{-5}} = 0.00565$$

$$t_6 = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_6}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.9 - \frac{0.00565}{0.137} \times (1.9 - 1) = 1.815$$

Седьмая роторная ступень:

$$P_7 = P_6 \times t_6 = 1.07 \times 10^{-5} \times 1.815 = 1.94 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$S_7 = \frac{S_6 Q_{cpD16.X18}}{t_6 P_7} = \frac{0.00565}{1.815} \times \frac{9.35 \times 10^{-9}}{1.94 \times 10^{-5}} = 0.00359$$

$$t_7 = t_{MAX.POT} - \frac{S_7}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.9 - \frac{0.00359}{0.137} \times (1.9 - 1) = 1.808$$

Восьмая статорная ступень:

$$P_8 = P_7 \times t_7 = 1.94 \times 10^{-5} \times 1.808 = 3.51 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$S_8 = \frac{S_7 Q_{cpD16.X18}}{t_7 P_8} = \frac{0.00359}{1.808} \times \frac{9.35 \times 10^{-9}}{1.94 \times 10^{-5}} = 0.00225$$

$$t_8 = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_8}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.9 - \frac{0.00225}{0.137} \times (1.9 - 1) = 1.836$$

Девятая роторная ступень:

$$P_9 = P_8 \times t_8 = 3.51 \times 10^{-5} \times 1.836 = 6.44 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$S_9 = \frac{S_8 Q_{cpD16.X18}}{t_8 P_9} = \frac{0.00225}{1.836} \times \frac{9.35 \times 10^{-9}}{6.44 \times 10^{-5}} = 0.00137$$

$$t_9 = t_{MAX.POT} - \frac{S_9}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.83 - \frac{0.00137}{0.137} \times (1.83 - 1) = 1.822$$

Десятая статорная ступень:

$$P_{10} = P_9 \times t_9 = 6.44 \times 10^{-5} \times 1.822 = 1.17 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$S_{10} = \frac{S_9 Q_{cpD16.X18}}{t_9 P_{10}} = \frac{0.00137}{1.822} \times \frac{9.35 \times 10^{-9}}{1.17 \times 10^{-4}} = 0.00083$$

$$t_{10} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{10}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.85 - \frac{0.00083}{0.137} \times (1.85 - 1) = 1.845$$

Одиннадцатая роторная ступень:

$$P_{11} = P_{10} \times t_{10} = 1.17 \times 10^{-4} \times 1.845 = 2.16 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$S_{11} = \frac{S_{10} Q_{cpD16.X18}}{t_{10} P_{11}} = \frac{0.00083}{1.845} \times \frac{9.5 \times 10^{-9}}{2.16 \times 10^{-4}} = 0.00049$$

$$t_{11} = t_{MAX.POT} - \frac{S_{11}}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.83 - \frac{0.00049}{0.147} \times (1.83 - 1) = 1.827$$

Двенадцатая статорная ступень:

$$P_{12} = P_{11} \times t_{11} = 2.16 \times 10^{-4} \times 1.827 = 3.95 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$S_{12} = \frac{S_{11} Q_{cpD16.X18}}{t_{11} P_{12}} = \frac{0.00049}{1.827} \times \frac{3.95 \times 10^{-9}}{3.95 \times 10^{-4}} = 0.00029$$

$$t_{12} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{12}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.85 - \frac{0.00049}{0.137} \times (1.85 - 1) = 1.848$$

Тринадцатая роторная ступень:

$$P_{13} = P_{12} \times t_{12} = 3.95 \times 10^{-4} \times 1.848 = 7.31 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$S_{13} = \frac{S_{12} Q_{cpD16.X18}}{t_{12} P_{13}} = \frac{0.00029}{1.848} \times \frac{9.35 \times 10^{-9}}{7.31 \times 10^{-4}} = 0.00015$$

$$t_{13} = t_{MAX.POT} - \frac{S_{13}}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.83 - \frac{0.00029}{0.137} \times (1.83 - 1) = 1.829$$

Четырнадцатая статорная ступень:

$$P_{14} = P_{13} \times t_{13} = 7.31 \times 10^{-4} \times 1.829 = 1.34 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$S_{14} = \frac{S_{13} Q_{cpD16.X18}}{t_{13} P_{14}} = \frac{0.00015}{1.829} \times \frac{9.5 \times 10^{-9}}{1.34 \times 10^{-3}} = 0.00009$$

$$t_{14} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{14}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.85 - \frac{0.00009}{0.137} \times (1.85 - 1) = 1.849$$

Пятнадцатая роторная ступень:

$$P_{15} = P_{14} \times t_{14} = 1.34 \times 10^{-3} \times 1.849 = 2.47 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$S_{15} = \frac{S_{14} Q_{cpD16.X18}}{t_{14} P_{15}} = \frac{0.00009}{1.849} \times \frac{9.3 \times 10^{-9}}{2.47 \times 10^{-3}} = 0.00005$$

$$t_{15} = t_{MAX.POT} - \frac{S_{15}}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.83 - \frac{0.00005}{0.137} \times (1.83 - 1) = 1.83$$

Шестнадцатая статорная ступень:

$$P_{16} = P_{15} \times t_{15} = 2.47 \times 10^{-3} \times 1.83 = 4.52 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$S_{16} = \frac{S_{15} Q_{cpD16.X18}}{t_{15} P_{16}} = \frac{0,00005}{1,83} \times \frac{9,3 \times 10^{-9}}{4,52 \times 10^{-3}} = 0,00003$$

$$t_{16} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{15}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1,85 - \frac{0,00003}{0,137} \times (1,85 - 1) = 1,85$$

Семнадцатая роторная ступень:

$$P_{17} = P_{16} \times t_{16} = 4,52 \times 10^{-3} \times 1,85 = 8,36 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$S_{17} = \frac{S_{16} Q_{cpD16.X18}}{t_{16} P_{17}} = \frac{0,00003}{1,85} \times \frac{9,3 \times 10^{-9}}{8,36 \times 10^{-3}} = 1,73 \times 10^{-5}$$

$$t_{17} = t_{MAX.POT} - \frac{S_{16}}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1,83 - \frac{0,00003}{0,137} \times (1,83 - 1) = 1,83$$

Восемнадцатая статорная ступень:

$$P_{18} = P_{17} \times t_{17} = 8,36 \times 10^{-3} \times 1,83 = 1,53 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

$$S_{18} = \frac{S_{17} Q_{cpD16.X18}}{t_{17} P_{18}} = \frac{1,73 \times 10^{-5}}{1,83} \times \frac{9,3 \times 10^{-9}}{1,53 \times 10^{-2}} = 0,00001$$

$$t_{18} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{18}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1,85 - \frac{0,00001}{0,137} \times (1,85 - 1) = 1,85$$

Девятнадцатая роторная ступень:

$$P_{19} = P_{18} \times t_{18} = 1,53 \times 10^{-2} \times 1,83 = 2,83 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

$$S_{19} = \frac{S_{18} Q_{cpD16.X18}}{t_{18} P_{19}} = \frac{0,00001}{1,83} \times \frac{9,3 \times 10^{-9}}{2,83 \times 10^{-2}} = 5,77 \times 10^{-6}$$

$$t_{19} = t_{MAX.POT} - \frac{S_{19}}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1,83 - \frac{5,77 \times 10^{-6}}{0,137} \times (1,83 - 1) = 1,83$$

Двадцатая статорная ступень:

$$P_{20} = P_{19} \times t_{19} = 2,83 \times 10^{-2} \times 1,83 = 5,18 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

$$S_{20} = \frac{S_{19} Q_{cpD16.X18}}{t_{19} P_{20}} = \frac{5,77 \times 10^{-6}}{1,83} \times \frac{9,3 \times 10^{-9}}{5,18 \times 10^{-2}} = 3,33 \times 10^{-6}$$

$$t_{20} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{20}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1,85 - \frac{3,33 \times 10^{-6}}{0,137} \times (1,85 - 1) = 1,85$$

Двадцать первая роторная ступень:

$$P_{21} = P_{20} \times t_{20} = 5,18 \times 10^{-2} \times 1,85 = 0,0958 \text{ Па}$$

$$S_{21} = \frac{S_{20} Q_{CPD16.X18}}{t_{20} P_{21}} = \frac{3.33 \times 10^{-6}}{1.85} \times \frac{9.3 \times 10^{-9}}{0.09582} = 1.90 \times 10^{-6}$$

$$t_{21} = t_{MAX.POT} - \frac{S_{21}}{S_{max}} \times (t_{MAX.POT} - 1) = 1.83 - \frac{1.90 \times 10^{-6}}{0.137} \times (1.83 - 1) = 1.83$$

Двадцать вторая статорная ступень:

$$P_{22} = P_{21} \times t_{21} = 0.0958 \times 1.83 = 0.175 \text{ Па}$$

$$S_{22} = \frac{S_{21} Q_{CPD16.X18}}{t_{21} P_{22}} = \frac{3.96 \times 10^{-5}}{1.684} \times \frac{0.308 \times 10^{-7}}{0.0254} = 2.47 \times 10^{-5}$$

$$t_{22} = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{22}}{S_{max}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.689 - \frac{2.47 \times 10^{-5}}{0.389} \times (1.689 - 1) = 1.688$$

Так как $P_{22} > P_{\phi}$ принимаем количество ступеней насоса 21.

Для уточнения значения P_0 производим расчет в обратном порядке по формулам (7.7) и (7.8) с индексами соответствующими номеру ступени:

$$S_F = \frac{Q_{F.D16.X18}}{P_F} + \frac{Q_{BC.D16.X18}}{P_F} + \frac{24 \times Q_{CP.D16.X18}}{P_F} = 1.85 \times 10^{-6} \quad (7.7)$$

$$t_F = t_{MAX.CTAT} - \frac{S_{F0}}{S_{MAX}} \times (t_{MAX.CTAT} - 1) = 1.85 - \frac{1.85 \times 10^{-6}}{0.137} \times (1.85 - 1) = 1.85 \quad (7.8)$$

Расчет в обратном порядке с индексами соответствующими номеру ступени по формулам (7.9)-(7.11):

21 роторная

$$p'_{21} = \frac{p'_{\phi}}{t'_{\phi}} = \frac{0.0133}{1.85} = 0.0719 \text{ Па} \quad (7.9)$$

$$t'_{21} = \frac{t_{MAX.CTAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{\phi}} \times (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.389}{0.137 + (1.85 \times 10^{-6} - 6.08 \times 10^{-8}) \times (1.85 - 1)} = 1.85 \quad (7.10)$$

$$S'_{21} = \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{\phi}} \times t'_{21} = (1.85 \times 10^{-6} - 1.3 \times 10^{-7}) \times 1.85 = 3.29 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} \quad (7.11)$$

20 статорная

$$p'_{20} = \frac{p'_{21}}{t'_{21}} = \frac{0.0719}{1.85} = 3.89 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

$$t_{20}' = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha S_{21}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{21}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.389}{0.137 + (3.29 \times 10^{-6} - 1.3 \times 10^{-7}) \times (1.83 - 1)} = 1.83$$

$$S_{20}' = \frac{\alpha S_{21}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{21}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_{20}' = (3.29 \times 10^{-6} - 1.3 \times 10^{-7}) \times 1.83 = 5.79 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$$

19 роторная

$$p_{19}' = \frac{p_{20}'}{t_{20}'} = \frac{3.89 \times 10^{-2}}{1.83} = 2.12 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

$$t_{19}' = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha S_{20}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{20}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (5.79 \times 10^{-6} - 2.4 \times 10^{-7}) \times (1.83 - 1)} = 1.85$$

$$S_{19}' = \frac{\alpha S_{20}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{20}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_{19}' = (5.79 \times 10^{-6} - 2.4 \times 10^{-7}) \times 1.85 = 0,00001 \text{ м}^3/\text{с}$$

18 статорная

$$p_{18}' = \frac{p_{19}'}{t_{19}'} = \frac{2.12 \times 10^{-2}}{1.85} = 1.15 \times 10^{-2} \text{ Па}$$

$$t_{18}' = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha S_{19}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{19}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (0,00001 - 4.4 \times 10^{-7}) \times (1.83 - 1)} = 1.83$$

$$S_{18}' = \frac{\alpha S_{19}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{19}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_{18}' = (0,00001 - 4.4 \times 10^{-7}) \times 1.83 = 0,00002 \text{ м}^3/\text{с}$$

17 роторная

$$p_{17}' = \frac{p_{18}'}{t_{18}'} = \frac{1.15 \times 10^{-2}}{1.83} = 6.28 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$t_{17}' = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha S_{18}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{18}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0,00002 - 8.14 \times 10^{-7}) \times (1.85 - 1)} = 1.85$$

$$S_{17}' = \frac{\alpha S_{18}'}{e} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_{18}'} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_{17}' = (0,00002 - 8.14 \times 10^{-7}) \times 1.85 = 0,00003 \text{ м}^3/\text{с}$$

16 статорная

$$p'_{16} = \frac{p'_{17}}{t'_{17}} = \frac{6.28 \times 10^{-3}}{1.85} = 3.39 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$t'_{16} = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{17} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{17}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (0.3 \times 10^{-4} - 1.49 \times 10^{-6}) \times (1.83 - 1)} = 1.83$$

$$S'_{16} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{17} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{17}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} t'_{16} = (0.3 \times 10^{-4} - 1.49 \times 10^{-6}) \times 1.83 = 0.6 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

15 роторная

$$p'_{15} = \frac{p'_{16}}{t'_{16}} = \frac{3.39 \times 10^{-3}}{1.83} = 1.85 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$t'_{15} = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{16} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{16}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0.6 \times 10^{-4} - 2.75 \times 10^{-6}) \times (1.85 - 1)} = 1.85$$

$$S'_{15} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{16} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{16}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} t'_{15} = (0.6 \times 10^{-4} - 2.75 \times 10^{-6}) \times 1.85 = 1 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

14 статорная

$$p'_{14} = \frac{p'_{15}}{t'_{15}} = \frac{1.85 \times 10^{-3}}{1.85} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Па}$$

$$t'_{14} = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{15} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{15}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (1 \times 10^{-4} - 5.04 \times 10^{-6}) \times (1.83 - 1)} = 1.83$$

$$S'_{14} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{15} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{15}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} t'_{14} = (1.0 \times 10^{-4} - 5.04 \times 10^{-6}) \times 1.83 = 1.7 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

13 роторная

$$p'_{13} = \frac{p'_{14}}{t'_{14}} = \frac{1.0 \times 10^{-3}}{1.83} = 5.48 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$t'_{13} = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{14} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{14}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (1.7 \times 10^{-4} - 9.32 \times 10^{-6}) \times (1.85 - 1)} = 1.848$$

$$S'_{13} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{14} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{14}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_{13} = (1.7 \times 10^{-4} - 9.32 \times 10^{-6}) \times 1.848 = 2.9 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$$

12 статорная

$$p'_{12} = \frac{p'_{13}}{t'_{13}} = \frac{5.48 \times 10^{-4}}{1.848} = 2.97 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$t'_{12} = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{13} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{13}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (2.9 \times 10^{-4} - 1.7 \times 10^{-4}) \times (1.83 - 1)} = 1.827$$

$$S'_{12} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{13} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{13}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_{12} = (2.9 \times 10^{-4} - 1.7 \times 10^{-4}) \times 1.827 = 0,00051 \text{ м}^3/\text{с}$$

11 роторная

$$p'_{11} = \frac{p'_{12}}{t'_{12}} = \frac{2.97 \times 10^{-4}}{1.827} = 1,62 \times 10^{-4} \text{ Па}$$

$$t'_{11} = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{12} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{12}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0,00051 - 3.15 \times 10^{-5}) \times (1.85 - 1)} = 1.844$$

$$S'_{11} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{12} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{12}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_{11} = (0,00051 - 3.15 \times 10^{-5}) \times 1.844 = 0,00088 \text{ м}^3/\text{с}$$

10 статорная

$$p'_{10} = \frac{p'_{11}}{t'_{11}} = \frac{1.62 \times 10^{-4}}{1.844} = 8.81 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$t'_{10} = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{11} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{11}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.830 \times 0.137}{0.137 + (0,00088 - 5.75 \times 10^{-4}) \times (1.83 - 1)} = 1.821$$

$$S'_{10} = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{11} - \frac{Q_{CPD16X18}}{P'_{11}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_{10} = (0,00088 - 5.75 \times 10^{-4}) \times 1.821 = 0,00149 \text{ м}^3/\text{с}$$

9 роторная

$$p'_9 = \frac{p'_{10}}{t'_{10}} = \frac{8.81 \times 10^{-5}}{1.821} = 4.84 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$t'_9 = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{10} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{10}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0,00149 - 1,06 \times 10^{-4}) \times (1.85 - 1)} = 1.834$$

$$S'_9 = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_{10} - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_{10}} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_9 = (0,00149 - 1,06 \times 10^{-4}) \times 1.834 = 0,00254 \text{ м}^3/\text{с}$$

8 статорная

$$p'_8 = \frac{p'_9}{t'_9} = \frac{4.84 \times 10^{-5}}{1.821} = 2.64 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$t'_8 = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_9 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_9} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (0,00254 - 1,93 \times 10^{-4}) \times (1.83 - 1)} = 1.804$$

$$S'_8 = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_9 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_9} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_8 = (0,00254 - 1,93 \times 10^{-4}) \times 1.804 = 0,00423 \text{ м}^3/\text{с}$$

7 роторная

$$p'_7 = \frac{p'_8}{t'_8} = \frac{2.64 \times 10^{-5}}{1.804} = 1.46 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$t'_7 = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S'_8 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_8} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0,00423 - 3,54 \times 10^{-4}) \times (1.85 - 1)} = 1.806$$

$$S'_7 = \frac{\alpha}{\epsilon} S'_8 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p'_8} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t'_7 = (0,00423 - 3,54 \times 10^{-4}) \times 1.806 = 0.0070 \text{ м}^3/\text{с}$$

6 статорная

$$p'_6 = \frac{p'_7}{t'_7} = \frac{1.46 \times 10^{-5}}{1.806} = 8.09 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$t_6' = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S_7' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_7'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (0.0070 - 6.39 \times 10^{-4}) \times (1.83 - 1)} = 1.762$$

$$S_6' = \frac{\alpha}{\epsilon} S_7' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_7'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_6' = (0.0070 - 6.39 \times 10^{-4}) \times 1.762 = 0,01121 \text{ м}^3/\text{с}$$

5 роторная

$$P_5' = \frac{P_6'}{t_6'} = \frac{8.09 \times 10^{-6}}{1.762} = 4.59 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$t_5' = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S_6' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_6'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0,01121 - 9.98 \times 10^{-4}) \times (1.85 - 1)} = 1.741$$

$$S_5' = \frac{\alpha}{\epsilon} S_6' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_6'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_5' = (0,01121 - 9.98 \times 10^{-4}) \times 1.741 = 0,0175 \text{ м}^3/\text{с}$$

4 статорная

$$P_4' = \frac{P_5'}{t_5'} = \frac{4.59 \times 10^{-6}}{1.741} = 2.64 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$t_4' = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S_5' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_5'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (0,01750 - 1.76 \times 10^{-3}) \times (1.83 - 1)} = 1.673$$

$$S_4' = \frac{\alpha}{\epsilon} S_5' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_5'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_4' = (0,0175 - 1.76 \times 10^{-3}) \times 1.673 = 0.02588 \text{ м}^3/\text{с}$$

3 роторная

$$P_3' = \frac{P_4'}{t_4'} = \frac{2.64 \times 10^{-6}}{1.673} = 1.58 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

$$t_3' = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S_4' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_4'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0.02588 - 3.06 \times 10^{-3}) \times (1.85 - 1)} = 1.624$$

$$S_3' = \frac{\alpha}{\epsilon} S_4' - \frac{Q_{CPD16X18}}{P_4'} \cdot \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \times t_3' = (0.02588 - 3.06 \times 10^{-3}) \times 1.624 = 0.03627 \text{ м}^3/\text{с}$$

2 статорная

$$p_2 = \frac{p_3}{t_3} = \frac{1.58 \times 10^{-6}}{1.624} = 9.71 \times 10^{-7} \text{ Па}$$

$$t_2 = \frac{t_{MAX.POT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S_3 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p_3} \times (t_{MAX.POT} - 1)} = \frac{1.83 \times 0.137}{0.137 + (0.03627 - 5.12 \times 10^{-3}) \times (1.83 - 1)} = 1.545$$

$$S_2 = \frac{\alpha}{\epsilon} S_3 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p_3} \times t_2 = (0.03627 - 5.12 \times 10^{-3}) \times 1.545 = 0.04689 \text{ м}^3/\text{с}$$

1 роторная

$$p_1 = \frac{p_2}{t_2} = \frac{9.71 \times 10^{-7}}{1.545} = 6.28 \times 10^{-7} \text{ Па}$$

$$t_1 = \frac{t_{MAX.STAT} \times S_{MAX}}{S_{MAX} + \frac{\alpha}{\epsilon} S_2 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p_2} \times (t_{MAX.STAT} - 1)} = \frac{1.85 \times 0.137}{0.137 + (0.04689 - 8.32 \times 10^{-3}) \times (1.85 - 1)} = 1.502$$

$$S_1 = \frac{\alpha}{\epsilon} S_2 - \frac{Q_{CPD16X18}}{p_2} \times t_1 = (0.04689 - 8.32 \times 10^{-3}) \times 1.502 = 0.05596 \text{ м}^3/\text{с}$$

7 Построение откачной характеристики

Для построения откачной характеристики необходимо учесть заданную быстроту откачки. Зависимость быстроты откачки от диапазона рабочих давлений дисков имеет вид:

$$S_{Hi} = S_{max} - S_{max} \times \frac{p_{пред}}{p_i}$$

На рис. 7.1 показана откачная характеристика нашего турбомолекулярного насоса.

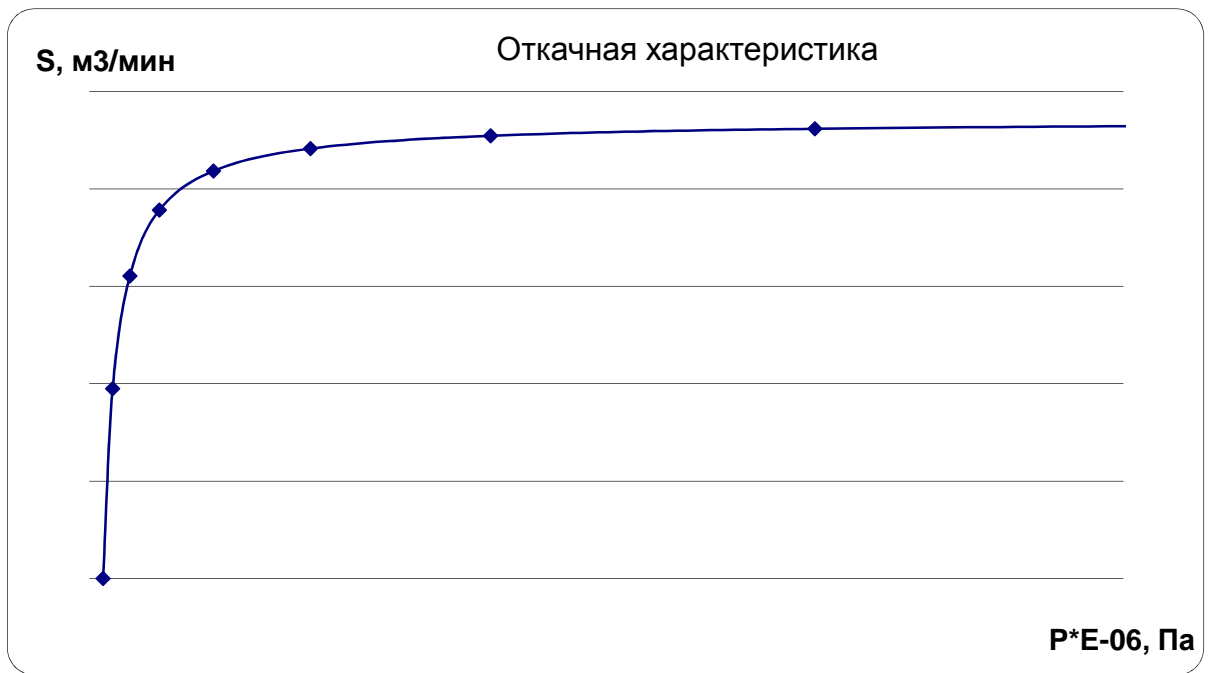


Рис. 7.1. Откачная характеристика

8 Выбор форвакуумного насоса

Форвакуумный насос должен обеспечивать молекулярный режим течения газа за последним рабочим колесом на стороне нагнетания ТМН. При этом во всем диапазоне изменения давления всасывания ТМН быстрота действия форвакуумного насоса не должна быть меньше быстроты действия ТМН, приведенной к условиям нагнетания.

а) Форвакуумная ловушка, ЛС2 [7]

Поток паров масла за ловушкой, $\text{г}/(\text{ч} \cdot \text{см}^2)$	10^{-6}
Срок службы до замены сорбента, ч	1000
Габаритные размеры, мм	$\text{Ø}120 \times 210$
Масса сорбента, кг	0,1
Масса ловушки с сорбентом, кг	1,5

б) Криососуд с вакуумно-порошковой изоляцией,

АСД-25, 3 шт.[8]

Объем, л	25
----------	----

Геометрические размеры:

Наружный диаметр, мм	386
Высота, мм	805
Диаметр горловины, мм	25
Масса порожнего сосуда, кг	11,4
Потери жидкого азота от испарения, г/ч	37
в) Газодувка, 1Г21-30-2В[3]	
Мах разность давлений в напорном режиме, кПа	30
Мах разность давлений в вакуумном режиме, кПа	30
Производительность, м ³ /мин	432
Мощность двигателя, кВт	4.0
Масса, кг	249
Габаритные размеры, мм	1050×450×545
г) Форвакуумный механический насос, ВН-2МП[1]	
Быстрота откачки, л/сек	7,15
Минимальное остаточное давление, мм.рт.ст	3·10 ⁻³
Марка масла	ВМ-4 ГОСТ 7903-56
Количество масла, заливаемого в насос, л	2
Тип электродвигателя	А-4И-4
Напряжение, кВт	1,7
Число оборотов, об/мин	1500
Масса, кг	187
Габаритные размеры, мм	748×486×575
д) Воздушный трубчатый электронагреватель, ТЭН 170А 13/1,6 ОФ2 R30	
Мощность, кВт	1,6
Материал оболочки	углеродистая сталь
Напряжение, В	22

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1 Введение

Определение себестоимости проектируемой техники является одним из главных вопросов при экономическом обосновании технических решений. К основным методам расчёта себестоимости новой техники на разных стадиях проектирования относятся: расчёт себестоимости по удельным показателям затрат, по статьям калькуляции.

В данном разделе определяется себестоимость криoadсорбционного вакуумного насоса по статьям калькуляции.

2 Технико-экономическое обоснование

Криoadсорбционный насос применяют в системах безмасляной откачки для получения давления до 10^{-1} Па. Скорость откачки достигает $5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Также, в системах безмасляной откачки может применяться турбомолекулярный насос. В настоящее время на российском рынке представлен насос модели ВМН-500, обладающий скоростью откачки $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

В данной главе дипломного проекта будет рассматриваться экономическая целесообразность разработки конструкции и производства криoadсорбционного насоса. Будут рассмотрены следующие показатели: себестоимость, определение затрат на материалы, покупные изделия и полуфабрикаты, на технологическое топливо, на оплату труда, на налоговые и социальные отчисления, определение общезаводских расходов, включая покупку оборудования, внепроизводственные расходы. По результатам рассмотрения указанных показателей будет определена целесообразность разработки конструкции и производства криoadсорбционного насоса.

3 Определение себестоимости криoadсорбционного насоса

Исходные данные для проекта:

Скорость откачки - $S=5 \text{ м}^3/\text{с}$;

Потребляемая мощность:

Форвакуумный насос - $N_{\phi 1} = 1,7$ кВт;

Электроподогревателя - $N_3 = 1,15$ кВт;

Масса насоса - $G_M = 119$ кг;

Расход материалов:

сталь 12X18H10T - $M_1 = 11$ кг;

алюминий АМгбМ - $M_3 = 108$ кг.

Исходные данные для базы:

Скорость откачки - $S = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$;

Потребляемая мощность:

Турбомолекулярный насос - $N_T = 0,28$ кВт;

Форвакуумный насос - $N_{\phi 2} = 1,7$ кВт;

Масса насоса - $G_M = 44$ кг;

Себестоимость насоса - 67 200 руб.

Принимаем следующие коэффициенты использования материалов: 0,85 (для сталей), 0,92 (для алюминия). [26]

Дополнительная заработная плата составляет 35 % от основной заработной платы. Отчисления на социальное страхование установлены в размере 26 % от заработной платы.

Цеховые расходы принимаем в размере 250 % от заработной платы, общезаводские расходы в размере 90 %. Внепроизводственные расходы устанавливаем в размере 5 % от заводской себестоимости.

Полная себестоимость проектируемого насоса может быть представлена в виде суммы, руб. по формуле (3.1) [26]:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6, \quad (3.1)$$

где C_1 – стоимость основных материалов и полуфабрикатов с учётом транспортно-заготовительных расходов;

C_2 – затраты на технологическое топливо;

C_3 – заработная плата производственных рабочих с отчислениями на социальное страхование;

C_4 – цеховые расходы;

C_5 – общезаводские расходы;

C_6 – внепроизводственные расходы.

Определение затрат на материалы определяется по формуле (3.2) [26]:

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{K_i} \times C_i \times (1 + s_1), \quad (3.2)$$

где M_i – конечная масса i -го материала, кг;

K_i – коэффициент использования i -го материала;

C_i – оптовая цена i -го материала, руб.;

$s_1 = 0,02$ – коэффициент, учитывающий расходы по транспортировке, хранению, подготовке материалов к использованию в производстве и неизбежные потери при хранении.

Оптовые цены материалов C_i , руб/кг:

сталь 12X18H10T ГОСТ 5632-72 – 150руб/кг;

алюминий АМг6М ГОСТ4734-74 – 188руб/кг;

Тогда затраты на материалы составят по (3.2):

$$C_1 = \frac{11}{0,85} \times 150 \times (1 + 0,02) + \frac{108}{0,92} \times 188 \times (1 + 0,02) = 24490 \text{ руб.}$$

Определение затрат на технологическое топливо согласно формуле (3.3):

$$C_2 = G_{N_2} \cdot C_{N_2} + G_{NaX} \cdot C_{NaX}, \quad (3.3)$$

где $G_{N_2} = 32$ кг – масса азота, требуемого на работу насоса и захолаживание сосуда;

$G_{NaX} = 14$ кг – масса сорбента;

$C_{NaX} = 147$ руб./кг – средняя оптовая цена сорбента.

$C_{N_2} = 31$ руб./кг – средняя оптовая цена жидкого азота.

$$C_2 = 14 \cdot 147 + 31 \cdot 32 = 3050 \text{ руб.}$$

Определение заработной платы производственных рабочих с отчислением на социальное страхование определяется по формуле (3.4) [26]:

$$C_3 = C_ч \cdot t \cdot K_д \cdot (1 + K_с), \quad (3.4)$$

где $C_ч = 70$ руб/нормо-час – средняя часовая заработная плата основных рабочих;

$t=420$ – количество часов, затраченных на изготовление насоса;

$K_д = 1,15$ – коэффициент, учитывающий размер дополнительной заработной платы;

$K_с = 0,26$ – отчисления на социальное страхование.

$$C_3 = 70 \cdot 420 \cdot 1,15 \cdot (1 + 0,26) = 42\,600 \text{ руб.}$$

Определение цеховых и общезаводских расходов определяется по формуле (3.5) [26]:

$$C_4 = K_{ц,р} \cdot C_3, \quad (3.5)$$

где $K_{ц,р} = 2,5$ – коэффициент, учитывающий величину цеховых расходов.

$$C_4 = 2,5 \cdot 42\,600 = 106\,500 \text{ руб.}$$

$$C_5 = K_{о,р} \cdot C_3,$$

где $K_{о,р} = 0,9$ – коэффициент, учитывающий величину общезаводских расходов, [1, стр.20]

$$C_5 = 0,9 \cdot 42\,600 = 38\,340 \text{ руб.}$$

Определение внепроизводственных расходов рассчитывается по формуле (3.6) [26]:

$$C_6 = K_{в,п} \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5), \quad (3.6)$$

где $K_{в,п} = 0,05$ – коэффициент, учитывающий величину внепроизводственных расходов.

Отсюда по (3.6):

$$C_6 = 0,05 \cdot (24490 + 3050 + 42600 + 106\,500 + 38\,340) = 10\,749 \text{ руб.}$$

Тогда полная себестоимость проектируемого компрессора составит по (3.1):

$$C_x = 24490 + 3050 + 42600 + 106\,500 + 38\,340 + 10\,749 = 225\,729 \text{ руб.}$$

4 Рыночная цена продажи

Рыночная цена продажи определяется по формулам (4.1) и (4.2):

$$C_{\text{прод}} = 1,2 \cdot C_{\text{пр-ва}}, \quad (4.1)$$

$$C_{\text{пр-ва}} = 1,5 \cdot C_x = 1,5 \cdot 225\,729 = 338\,594 \text{ руб.}, \quad (4.2)$$

Отсюда:

$$C_{\text{прод}} = 1,2 \cdot 338\,594 = 406\,312 \text{ руб.}$$

5 Сопоставление криoadсорбционного и турбомолекулярного насосов

Скорость откачки криoadсорбционного насоса $S=5 \text{ м}^3/\text{с}$.

При использовании турбомолекулярного насоса ВМН-500, для обеспечения такой же быстроты действия, потребуется приобрести 10 аппаратов, со скоростью откачки $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для обеспечения работы насосов требуется форвакуумный насос ВН-2МП, стоимостью 20 000 руб. Причем, при использовании десяти насосов ВМН-500, потребуется также десять форвакуумных насосов ВН-2МП.

Таким образом, суммарная рыночная цена турбомолекулярных насосов составит по формуле (5.1):

$$C_{\text{сумм}} = C_1 \cdot n, \quad (5.1)$$

где $n=10$ – количество насосов;

$C_1=67\,200$ руб – себестоимость одного насоса.

Отсюда по (5.1):

$$C_{\text{сумм}} = 10 \cdot 67\,200 = 672\,000 \text{ руб.}$$

Стоимость производства десяти турбомолекулярных насосов ВМН-500 составит по формуле (5.2):

$$C_{\text{пр-ва}} = C_{\text{прод}} / 1,2 = 672\,000 / 1,2 = 560\,000 \text{ руб.} \quad (5.2)$$

6 Единовременные затраты в сфере использования

Единовременные затраты в сфере использования представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Затраты, руб.		Вариант	
		Проект	База
Рыночная цена насоса	100%	406312	672 000
Транспортно-заготовительные расходы	10%	40 631	67 200
Монтажные расходы	25%	101 578	168 000
На зап. части	2%	8 126	13 440
На форвакуумный насос		20000	200000
<u>Итого:</u>		556 647	1 120 640

7 Определение результативности проекта

Для наглядной демонстрации результативности проекта, определим величину затрат на электроэнергию. Предположим, время работы проекта и базы составляет 24 часа. Тогда, время и затраты будут распределяться следующим образом по формуле (7.1).

$$C_{эн} = T \cdot N \cdot Ц_{ээ}, \quad (7.1)$$

где N – мощность, потребляемая насосом, кВт;

$Ц_{ээ}$ – цена электроэнергии, 2,5 руб./кВт·ч;

T – количество рабочих часов.

Для криoadсорбционного насоса затраты будут распределяться согласно формуле (7.2):

$$C_{эн1} = T \cdot N \cdot Ц_{ээ} = T_{рег} \cdot N_э \cdot Ц_{ээ} + T_{ф1} \cdot N_ф \cdot Ц_{ээ}, \quad (7.2)$$

где $T_{\text{рег}}=5$ ч– количество часов в сутки, затраченных на регенерацию;

$N_9=1,15$ кВт–мощность электроподогревателя;

$T_{\text{ф1}}=7$ ч– количество часов в сутки, затраченных на работу форвакуумного насоса;

$N_{\text{ф}}=1,7$ кВт– мощность форвакуумного насоса.

Тогда по (7.2):

$$C_{\text{эн1}} = 5 \cdot 1,15 \cdot 2,5 + 7 \cdot 1,7 \cdot 2,5 = 14,4 + 29,8 = 44,2 \text{ руб}$$

Турбомолекулярный насос насоса затраты будут распределяться согласно формуле (7.3):

$$C_{\text{эн2}} = n \cdot T \cdot N \cdot C_{\text{эз}} = n \cdot (T_{\text{т}} \cdot N_{\text{т}} \cdot C_{\text{эз}} + T_{\text{ф2}} \cdot N_{\text{ф}} \cdot C_{\text{эз}}), \quad (7.3)$$

где $n=10$ – количество необходимых насосов;

$T_{\text{т}}=22$ ч–количество часов в сутки, затраченных на работу турбомолекулярного насоса;

$N_{\text{т}}=0,28$ кВт–мощность турбомолекулярного насоса;

$T_{\text{ф2}}=2$ ч– количество часов в сутки, затраченных на работу форвакуумного насоса.

Тогда по (7.3):

$$C_{\text{эн2}} = 10 \cdot (22 \cdot 0,28 \cdot 2,5 + 2 \cdot 1,7 \cdot 2,5) = 239 \text{ руб.}$$

Полученные результаты представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

	Криоадсорбционный насос			Турбомолекулярный насос			
	Кол-во часов, п	Мощность, кВт	Стоимость электроэнергии, руб	Кол-во часов	Мощность, затраченная одним насосом, кВт	Стоимость электроэнергии, затраченной одним насосом, руб	Стоимость электроэнергии, затраченной 10 насосами, руб
Работа форвакуумного насоса	7	1,7	29,8	2	1,7	8,5	85
Проведение регенерации,	5	1,15	14.4	—————			
Работа основного насоса,	—————			22	0,28	15,4	154
Итого ,руб	44.2			239			

В таблице 7.2 представлены данные позволяющие быстро оценить полную стоимость приобретения проектируемого оборудования и базы с учетом стоимости эксплуатации на протяжении требуемого периода, а также сравнить различных поставщиков оборудования.

Таблица 7.2

Параметр	Проект	База
Скорость откачки, мЗ/с	5	5
Масса, кг	108	440
Стоимость производства, руб.	338594	560000
Рыночная цена насоса, руб.	406312	672000
Стоимость электроэнергии, потребляемой в сутки, руб.	44,2	239
Единовременные затраты в сфере использования, руб.	556647	1 120 640

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставлены технико-экономические характеристики криoadсорбционного и турбомолекулярного насосов, определена результативность проекта при заданных исходных данных. По полученным результатам расчетов, можно сделать следующие основные выводы: криoadсорбционные вакуумные насосы имеют высокую быстроту действия, что дает им преимущество при использовании в системах с большим натеканием и газовыделением (больших газовых нагрузках). Криoadсорбционные насосы имеют большой коэффициент компрессии, большое выпускное давление, что дает возможность применения с ними форвакуумных насосов меньшей производительности; Криoadсорбционные насосы имеют сравнительно невысокую стоимость, простоту устройства, надежность и удобство в эксплуатации; ТМН потребляют меньше электроэнергии и охлаждающей воды, в то же время имеют большую собственную стоимость и стоимость ремонта, поэтому в каждом конкретном случае совокупность этих факторов будет определять экономическую целесообразность выбора. Экономический подход к выбору решений оправдывает себя для объектов, на которых важно добиться высоких показателей энергоэффективности или позволяющих обойти ограничения выделенных энергетических мощностей.

Список литературы

1. Демихов К.Е., Панфилов Ю.В., Никулин Н.К. и др.; под общ. ред. Демихова К.Е., Панфилова Ю.В.. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. Вакуумная техника: справочник
2. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1975.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов/ Л.Н. Розанов.–3-е издание, переработ. и доп.–М.:Высшая школа, 2007.
4. Основы вакуумной техники: Учебник для техникумов/ А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Б.И. Королев, В.И. Кузнецов.–2-е изд., перераб. и доп.– М.:Энергоиздат, 1981.
5. Волчкевич А.И. Высоковакуумные адсорбционные насосы, М.: «Машиностроение», 1973.
6. Хэфер Р. Криовакуумная техника: Пер. с нем.– М.:Энергоатомиздат,1983.
7. Вакуумная техника: справочник/ Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др.; под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992.
8. 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.
9. Иванов В.И. Криовакуумные системы: Учеб. пособие. 2-е изд., испр.– СПб.: СПбГУНиПТ, 2008.
10. Акулов Л.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Теплофизические свойства и фазовое равновесие криопродуктов: Справ.– СПб.:СПбГУНиПТ,2009.
11. С.С. КУтателадзе, В.М. Боришанский. Справочник по теплопередач.– М.:Государственное энергетическое издательство,1959.
12. ГОСТ Р 52615-2006. Компрессоры и вакуумные насосы. Требования безопасности. Часть 2. Вакуумные насосы.-М.:Изд.стандартов, 2006.

13. ГОСТ 12.0.002-80 (1999) ССБТ. Термины и определения
14. Курс лекций «Вакуумная техника», Солдатов К.В., 2013 г.
15. Принцип действия и методика расчета турбомолекулярного вакуумного насоса, Солдатов К.В., 2011.
16. Механические вакуумные насосы / Е.С.Фролов, И.В.Автономова, В.И.Васильев и др. - М.: Машиностроение, 1989.