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

Основная проблема, возникающая при применении азотной ступени предварительного охлаждения – теплообмен в двухфазной среде. Формулы для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении на горизонтальной трубе несут эмпирический характер, и минимальная погрешность расчета составляет 20%, отсюда возникают большие коэффициенты запаса по теплообменной поверхности.

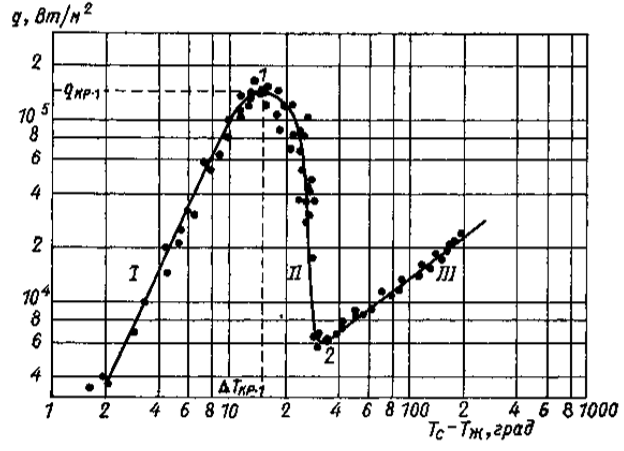
Рассмотрим процесс кипения жидкого азота при подводе к нему теплоты от нагревателя с температурным потенциалом – разность температур между стенкой нагревателя и жидкостью [1, стр. 154].

Рис. 3.1. Кривая зависимости теплового потока от температурного напора при кипении азота в большом объеме.

I – пузырьковое кипение, II – переходное кипения, III – пленочное кипение; 1 – точка первого кризиса кипения, 2 – точка второго кризиса кипения.

На рис. 3.1 при тепловом потоке менее наблюдается область однофазной свободной конвекции при малых значениях и . Плотность центров парообразования в этой области невелика вследствие малых перегревов жидкости, поэтому теплоотвод от стенки осуществляется в режиме свободной конвекции ([2, п. 18.1]).

Режим I – область развитого пузырькового кипения. Интенсивный теплообмен в этой области обусловлен пульсационным движением жидкости у стенки, вынужденным быстрорастущими пузырьками пара. Данный режим наиболее важный в практическом отношении интенсивный режим теплоотдачи, при котором [2, п. 18.1].

Режим II – область, в которой наблюдается парадоксальный, противоречащий обычному опыту факт: тепловой поток уменьшается с ростом температурного напора. Это области происходит из-за перемежающегося во времени и по поверхности пузырьковое и пленочное кипени, поскольку она расположена между двумя характерными точками кризиса теплообмена.

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

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

В том случае, если в радиальном направлении будет расположен только один слой змеевика или радиальный шаг навивки будет много больше характерного размера возможно обеспечить беспрерывную подачу жидкость к поверхности теплообмена в условиях гравитации. Руководствуясь данным решением и методикой расчета разработанной С. С. Будневичем [3. стр. 127] для азотных ванн предварительного охлаждения гелиевых ожижителей в рамках курсового проекта по «Машинам и аппаратам криогенных систем» был рассчитан, спроектирован и конструктивно проработан змеевиковый теплообменный аппарат, чертеж которого представлен в Приложении А.

Ниже представлен расчет азотной ванны для двух конфигураций: змеевиковой и витой.

## Расчет змеевиковой азотной ванны

Схема термодинамического цикл и таблица значений параметров точек сателлитного гелиевого рефрижератора представлен в Приложении Б.

Поток газообразного гелия с массовым расходом сжимается в винтовом компрессоре «Каскад-110/30» от давления до давления Сжатый гелий, охлажденный до температуры окружающей среды проходит предварительный теплообменный аппарат LNG-100, где охлаждается до состояния и затем проходит ванну с жидким азотом LNG-101, кипящем при давлении , охлаждаясь до состояния , захолаживает криостаты с магнитами до температуры . По мере понижения температуры обратного потока из магнитов включается прямой поток гелия, установка переходит на пусковой режим с подачей дополнительного расхода жидкого гелия из центрального ожижителя ОГ-1000.

Температура гелия на входе в азотную ванну: ;

Температура жидкого азота при давлении 0.125 МПа: ;

Недорекуперация на холодном конце: ;

Максимальный температурный напор: ;

Расход гелия: ;

Расход жидкого азота: , с учетом рекуперации холода паров.

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

*Температуры и разность температур*. Температура кипения жидкого азота . Разность температур на теплом конце предварительного теплообменника между потоком сжатого гелия и обратным потоком сжатого гелия, и обратным потоком низкого давления . Разность температур между кипящим азотом и гелием, выходящим из азотной ванны, . Температура азота на выходе из ванны предварительного охлаждения .

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

*Теплоемкая масса*. Теплоемкая масса сателлитного рефрижератора и магнитов Нуклотрона – 80 тонн. Расчетное время захолаживания – 80-100 часов (предпусковой и пусковой режимы).

*Расходы потоков*. Расход сжимаемого гелия , расход жидкого азота в ванне предварительного охлаждения (в режиме реконденсации). Расход жидкого азота, идущего на предварительное охлаждение, расходуется на компенсацию тепловой нагрузки, которая складывается из тепла, отнимаемого от сжатого гелия при предварительном охлаждении, холодопроизводительностью, вводимой в цикл в интервале изменения температуры от , а также теплопритоков извне к азотному экрану, азотной ванне и к части работающей на этом уровне сателлитному рефрижератору.

Теплоприток из окружающей среды к части рефрижератора, расположенной в зоне температур :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Расход жидкого азота на увеличение холодопроизводительности:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Пересчитанный расход жидкого азота:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

*Таблица 3.1. Сводные данные материальных и* тепловых

*потоков азотной ванны*

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

Охлаждение гелия высокого давления в азотной ванне осуществляется за счет кипения жидкого азота при . Для подобного аппарата характерно наличие высокого значения коэффициента теплоотдачи со стороны кипящего азота и более низкого 𝛼 от потока газа к стенке, который и является определяющим при расчете коэффициента теплопередачи.

Среднелогарифмическая разность температур:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

– разность температур между входящим в азотную ванну потоком гелия высокого давления и кипящим азотом на входе, – разность температур между потоком гелия высокого давления, выходящим из азотной ванным и азотом на выходе, .

Основные параметры гелия высокого давления:

*Средняя температура*

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

*Среднее значение теплоемкости*

*Среднее значение теплопроводности*

*Среднее значение вязкости*

*Удельный объем*

Параметры трубок*:*

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

где, ; ;

Заходность змеевика:

Скорость потока в трубках:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

Критерий Рейнольдса:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

*тогда, течение – турбулентное.*

Критерий Прандтля:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Критерий Нуссельта:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

Коэффициент теплоотдачи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (12) |

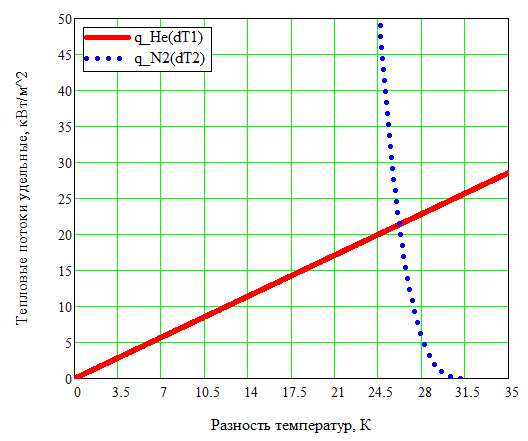
Величину удельной тепловой нагрузки определим графически. При этом исходим из того, что удельные тепловые потоки со стороны гелия и азота равны между собой. Для удобства относим удельный тепловой поток к единице внешней поверхности трубки [3, стр. 108]

Рис. 3.2. Графическое определение .

Из графического решения:

Коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему азоту:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (13) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (14) |

Коэффициент теплопередачи:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (15) |

Площадь теплообменной поверхности одной трубки:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (16) |

Длина одной трубки:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (17) |

С учетом запаса 50% [3, стр. 109]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (18) |

Число витков одной трубки:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (19) |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (20) |

Падение напора при прохождении змеевика:

Коэффициент Дарси [3, стр. 110]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (21) |

Падение давления:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (22) |

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

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

## Расчет витой азотной ванны

Для расчет витой азотной ванны используются исходные данные, описанные в пункте 2.1. Расчет условно разбит на 2 части, в первой представлены зависимости для построения кривой кипения азота по методике, изложенной в [4] и [5]. Во второй – расчет коэффициента теплоотдачи от гелия к стенке, и на основе двух частей проведен расчет коэффициента теплопередачи.

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

Параметры трубок витой азотной ванны:

* Наружный диаметр трубок:
* Толщина стенки трубки:;
* Число трубок в радиальном направлении: ;
* Число трубок в трубном пучке:

Полный расчет представлен в Приложении В, ниже рассмотрены основные соотношения, принятые для расчета.

Первый критический тепловой поток – переход развитого пузырькового кипения в переходную область, рассчитывается по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (23) |

где: – теплота парообразования, – плотность жидкости и пара соответственно, – поверхностное натяжения, – ускорение свободного падения.

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

Далее определяется приведенная скорость парообразования:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (24) |

Характерный линейный размер пузырькового кипения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (25) |

где: – теплоемкость жидкости, – температура насыщения жидкости при давлении .

Критерий Рейнольдса:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (26) |

где: – коэффициент теплопроводности жидкости, – удельный объем жидкости.

Критерий Нуссельта:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (27) |

где: – число Прандтля, определенное по параметрам жидкости.

Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (28) |

Первый критический температурный напор:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (29) |

Второй критический тепловой поток:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (30) |

Второй критический температурный напор:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (31) |

где: – удельный объем пара, – коэффициент теплопроводности пара.

Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (32) |

Коэффициент теплоотдачи при закритическом режиме:

где: – энтальпия пара, - теплоемкость пара, – динамическая вязкость пара.

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

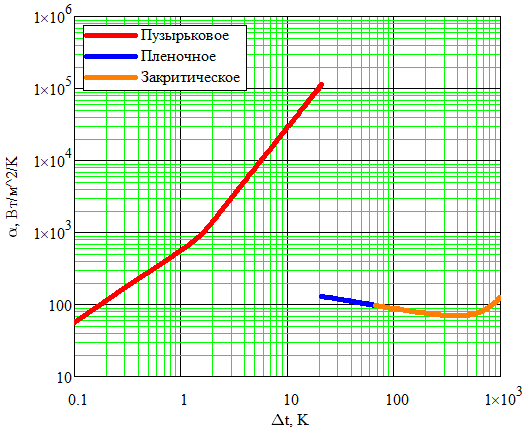


Рис. 3.3. Кривая кипения азота при давлении 0.1 МПа

Для потока гелия расчет аналогичен представленному в пункте 2.1.

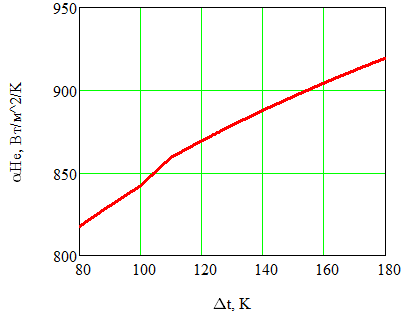


Рис. 3.4. Коэффициент теплоотдачи для гелия

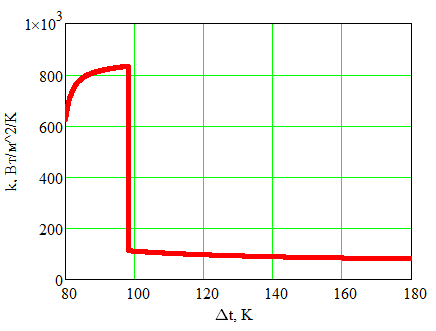


Рис. 3.5. Коэффициент теплопередачи

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

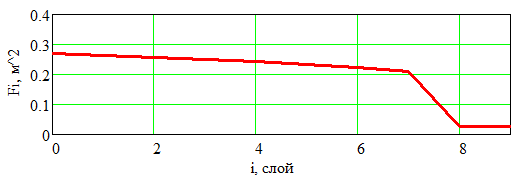


Рис. 3.6. Распределение поверхности теплообмена по слоям. Слева направо – уменьшение температурного напора.

Переход от слоев к температурному напору:

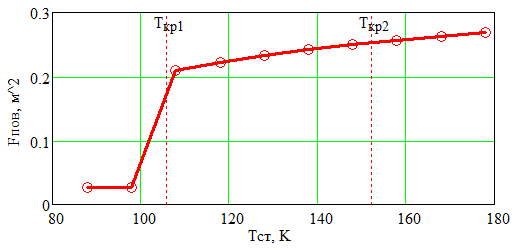


Рис. 3.7. Распределение поверхности теплообмена по температурному уровню поверхности стенки

Требуемая расчетная площадь поверхности:

Расчетная длина трубки: ;

Длина трубки с учетом запаса 20% (отклонения формул от экспериментальных данных): ;

Конструктивные параметры витого теплообменника:

* Диаметр сердечника: ;
* Средний диаметр намотки: ;
* Продольный шаг намотки: ;
* Число витков одной трубки в слое:

Ниже представлена таблица намотки аппарата, рассчитанного по изложенной методике.

*Таблица 3.2. Таблица намотки аппарата*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № |  |  |  |
| 1 | 326 | 1029.8 | 514.9 |
| 2 | 344 | 1086.1 | 543.1 |
| 3 | 362 | 1142.4 | 571.2 |
| 4 | 380 | 1198.7 | 599.3 |
| 5 | 398 | 1255.0 | 627.5 |
| 6 | 416 | 1311.4 | 655.7 |

В таблице: – диаметр i-того слоя; – длина витка трубки в слое; – длина одной трубки в слое.

Число продольных слоев навивки: ;

Высота навивки: ;

Высота аппарата с учетом подвода и отвода трубного пучка от трубной доски до намотки: ;

Ширина аппарата с учетом свободного погружения навивки в область, заполненную жидким азотом: .

Гидравлические потери в трубном пространстве:

## Анализ рассчитанных аппаратов

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

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

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

Поскольку в ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» отработана технология и налажено производство витых аппаратов, то для разрабатываемых криогенных систем целесообразно проектирование и производство теплообменного оборудования именно такой конфигурации.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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