

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Методические указания к лабораторной работе
«Изучение работы дроссельной системы охлаждения»

САМАРА 2017

УДК 533

ББК 31.31

Составители: Д.А. Угланов

Изучение работы дроссельной системы охлаждения: Методические указания к лабораторной работе / Самарский университет; Д.А. Угланов; Самара, 2017. – 63 с.

Пособие (Методические указания) предназначено для студентов, обучающихся по следующим направлениям подготовки бакалавра: 13.03.03 – Энергетическое машиностроение, 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств. 15.03.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 – Двигатели летательных аппаратов; по специальности 24.05.02 – Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок, по направлению подготовки магистров 24.04.05 - Двигатели летательных аппаратов, а также может быть полезно слушателям курсов, аспирантам и специалистам. Разработано на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского университета.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ДРОССЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	5
1.1 Схема дроссельной СО, энергетический и эксергетический балансы.....	5
1.2 Замкнутые дроссельные системы охлаждения	8
1.3 Баллонные дроссельные системы охлаждения	12
1.4 Дроссельные системы охлаждения умеренного уровня температуры охлаждения.....	15
1.5 Схемы и конструкции дроссельных микроохладителей	16
1.6 Особенности методики расчёта дроссельных циклов	24
1.7 Дроссельные системы для ожижения газов	27
1.8 Рабочий процесс баллонной дроссельной системы.....	32
Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРОССЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	36
2.1 Создание расчетной модели.....	36
2.2 Расчет и анализ полученных данных	45
Заключение.....	60
Список литературы.....	61

ВВЕДЕНИЕ

В современных летательных аппаратах авиационного и космического назначения все более широкое применение находят различные оптико–электронные и квантовые системы и устройства навигационного, боевого и научного назначения. Лазерные дальномеры, прицелы, системы наведения, лидары, гироскопы – вот далеко не полный перечень устройств, основным элементом которых является оптико–электронный прибор [1].

Одним из основных элементов оптико–электронных систем (ОЭС) являются инфракрасные приёмники (ИК–приёмники). Высокая эффективность работы ИК–приёмников обеспечивается охлаждением до температуры 77К [2] и ниже. Для этого существуют различные системы и агрегаты, классификация которых представлена в главе 1.

Обеспечение охлаждения до криогенных уровней температуры ИК – приёмников, элементов оптических систем и других устройств, устанавливаемых на летательных аппаратах, – важнейшее требование, предъявляемое многим авиационным и космическим проектам. Существует множество систем охлаждения, разной степени совершенства, которые могут удовлетворить тем или иным техническим требованиям. Основными параметрами, которыми отличаются аэрокосмические системы охлаждения от промышленных или систем наземного применения, являются:

- минимально возможная масса;
- минимально возможная потребляемая мощность,
- высокая надёжность, исключающая необходимость ремонта.

Степень совершенства бортовых систем охлаждения (СО) в значительной мере определяет возможности аэрокосмической техники.

Глава 1. ДРОССЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

1.1 Схема дроссельной СО, энергетический и эксергетический балансы

На рисунке 1.1 показаны схема и процессы в $T-s$ диаграмме, работающей по циклу Линде [17]. Она состоит из следующих основных элементов: I– компрессор, II–холодильник, III– теплообменник, IV– дроссельный клапан, V– испаритель.

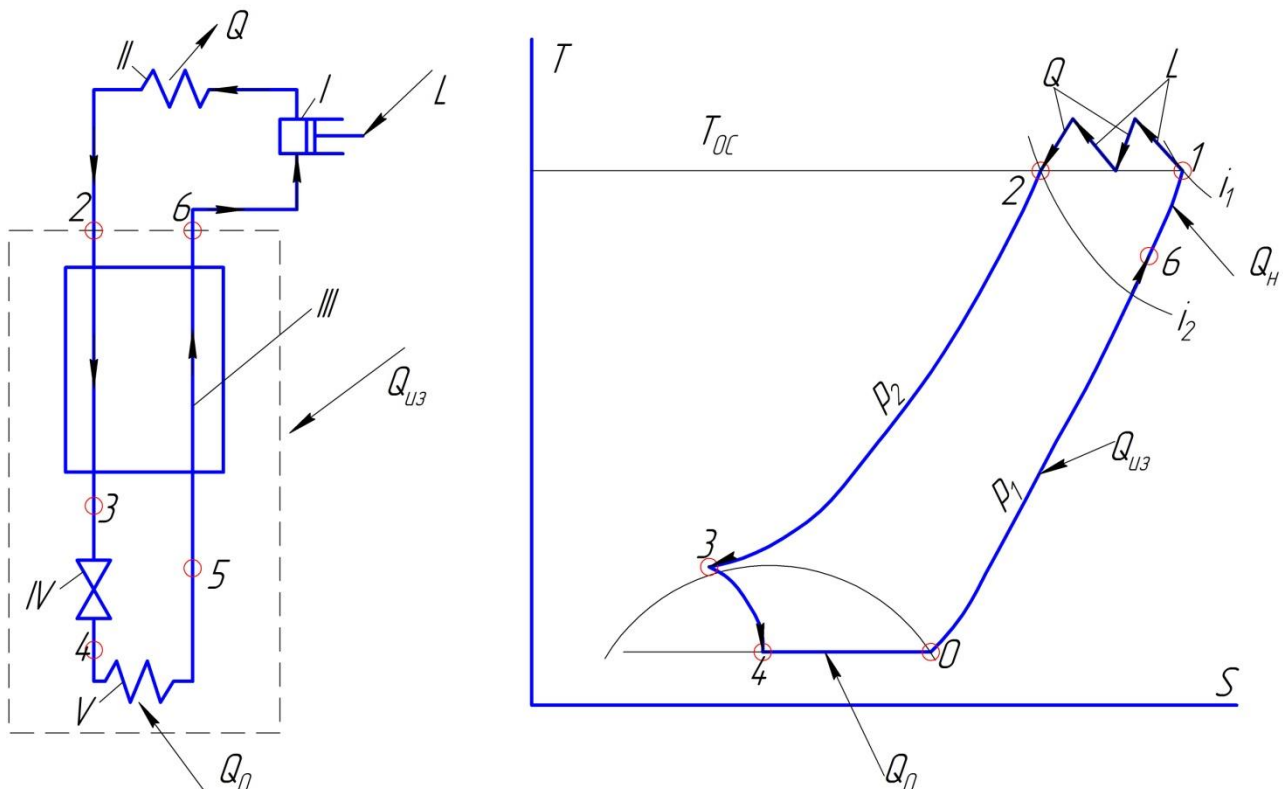


Рисунок 1.1 - Схема и процессы в $T-s$ диаграмме рефрижераторной установки, работающей по циклу Линде

Необходимым условием работы такой установки является наличие положительного дроссель-эффекта при температуре окружающей среды: $\Delta i_T > 0$. Эти циклы называются газо(паро)–жидкостными, так как агрегатное состояние рабочего тела меняется.

Для этого процесса характерно, что давление обратного потока может быть как больше, так и меньше давления окружающей среды, так как процесс по рабочему телу замкнут.

Рассмотрим процесс получения холода подробнее. Газ в состоянии 1 поступает в компрессор. Процесс сжатия в реальном случае идёт не по изотерме, представляет собой чередование нескольких процессов адиабатного сжатия и изобарного охлаждения в холодильнике.

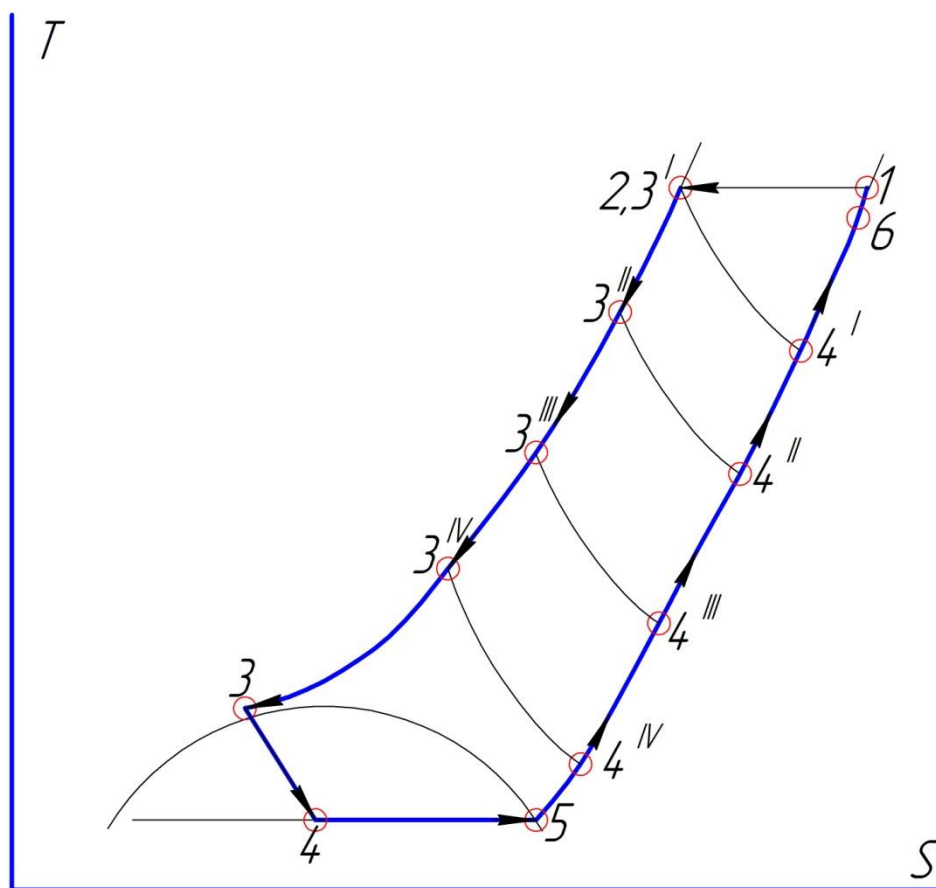


Рисунок 1.2 – $T - S$ диаграмма рефрижераторной установки

При первом прохождении газа через теплообменник обратный поток ещё не охлаждён и поэтому точка 2 и точка 3 совпадут; газ дросселируется до точки 4' и охлаждает прямой поток, который будет дросселироваться уже до более низкой температуры t_4'' . Так процесс идёт до тех пор, пока после дросселирования не попадает в двухфазную область (рисунок 1.2).

Энергетический баланс установки для G кг/час газа, циркулирующего в контуре (рисунок 1.6), представится в виде соотношения:

$$Gi_2 + Q_0 + Q_{u3} = Gi_6,$$

где i_2 и i_6 - соответственно энтальпия газа на входе и выходе из теплообменника;

Q_0 – холодопроизводительность установки;

$Q_{из}$ – теплоприток через изоляцию.

Энергия с потоком газа выводится из системы в большем количестве, чем поступает ($i_6 > i_2$), а разница в подводимой и отводимой энергии показывается за счёт подвода тепла Q_0 и $Q_{из}$.

$$Q_0 + Q_{из} = G (i_6 - i_2) = G (i_6 - i_1) - G (i_2 - i_1),$$

где $i_1 - i_2 = \Delta i_T$ - дроссель-эффект газа при $T = T_1$;

$i_1 - i_6 = \Delta i_{II}$ - потеря холода от недорекуперации газа в теплообменнике,

тогда

$$Q_0 + Q_{из} = G \Delta i_T - G \Delta i_{II}.$$

Суммарная холодопроизводительность системы $Q_0 + Q_{из}$ равна величине изотермического дроссель-эффекта минус потери холода от недорекуперации.

Баланс эксергии установки представляется в виде:

$$G e_2 = G e_6 + Q_e + \sum_{T=T_6}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e) + \sum D_i.$$

где e_2 и e_6 – соответственно эксергия на входе выходе из теплообменника;

Q_e – приведенная холодопроизводительность;

$\sum_{T=T_6}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{из} \cdot \tau_e)$ - суммарный приведённый теплоприток через изоляцию;

$\sum D_i$ - сумма внутренних потерь эксергии в элементах контура.

В отличие от энергии, эксергия с потоком газа вводится в систему в большем количестве, чем выводится ($e_2 > e_6$), а разность в подводимой и отводимой эксергии расходуется на получение полезной приведённой холодопроизводительности Q_e , на внутренние потери эксергии $\sum D_i$ и внешние $\sum D_e$, связанные с теплопритоками через изоляцию $Q_{из}$.

$$Q_e + \sum_{T=T_g}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{uz} \cdot \tau_e) + \sum D_i = G e_2 - G e_6 = G e_2 - G e_1 - G e_6 + G e_1,$$

где $e_2 - e_1 = \Delta e_p$ – повышение эксергии газа в компрессоре;

$e_6 - e_1 = \nabla e_n$ – потери эксергии от недорекупации в теплообменнике.

Тогда

$$Q_e + \sum_{T=T_g}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{uz} \cdot \tau_e) = G \Delta e_p - (G \nabla e_n + \sum D_i).$$

Суммарная приведенная холодопроизводительность системы $Q_e + \sum_{T=T_g}^{T=T_{oc}} (\delta Q_{uz} \cdot \tau_e)$

равна возрастанию эксергии в компрессоре с холодильником минус сумма потерь эксергии от недорекупации (внешние потери) и внутренних потерь.

1.2 Замкнутые дроссельные системы охлаждения

В отдельных случаях применяются дроссельные системы охлаждения с замкнутым циклом, на рисунке 1.3 показана система охлаждения холодопроизводительностью 0.75 Вт.

При переходе из точки 4 в 5 (рисунок 1.3) происходит процесс дросселирования.

Точка 5 находится в двухфазной зоне, и тепловыделение охлаждаемого объекта поглощается при испарении частично ожиженного хладагента, что соответствует переходу из точки 5 в 6. Обычно хладагент, например газообразный азот, сжимается приблизительно до 18МПа в многоступенчатом компрессоре. Тепло сжатия отводится с помощью теплообменника внешнего контура охлаждения.

После сжатия очищенный азот высокого давления поступает в миниатюрный противоточный теплообменник, где охлаждается обратным потоком низкого давления. При прохождении через дроссель, температура его падает, что приводит к частичному ожижению азота. Скрытая теплота испарения жидкого азота используется для локального охлаждения объекта. Газ низкого давления

охлаждает в теплообменнике 3 газ высокого давления и возвращается на вход компрессора 1.

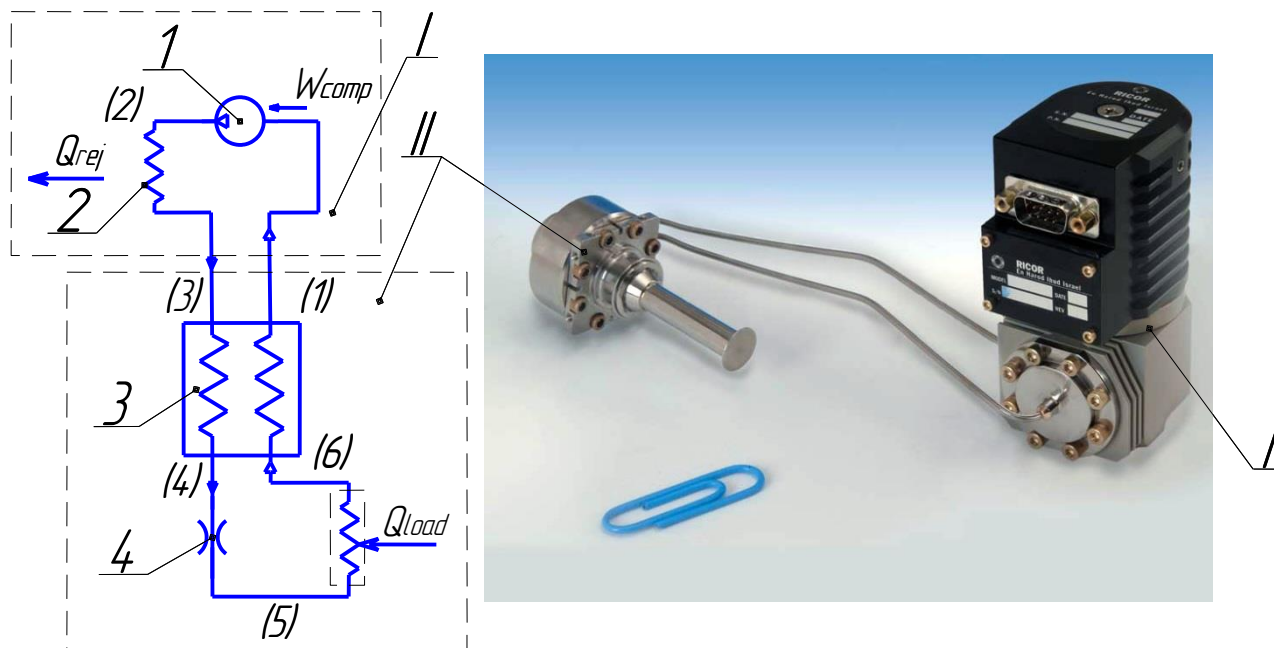


Рисунок 1.3 – Замкнутая дроссельная система охлаждения с компрессором
I – блок высокого давления; II – низкотемпературный блок
1 – компрессор; 2 – теплообменник; 3 – рекуператор; 4 – дроссель.

К линии низкого давления для нормальной работы системы подсоединяется небольшой резервуар с хладагентом для того, чтобы компенсировать количество хладагента, перешедшего в жидкую фазу.

Локальное охлаждение обычно осуществляется путём испарения сжиженного хладагента на конце медного хладовода, находящегося на внутренней оболочке криостата, внутри которого происходит процесс сжижения. Поскольку криостат герметичен, хладагент полностью находится в системе охлаждения. Таким образом, детектор в сосуде Дюара не подвергается действию колебания давления в системе.

Данные по основным параметрам замкнутых дроссельных систем представлены на рисунках 1.4 – 1.5.

Основное преимущество систем охлаждения с использованием замкнутого дроссельного цикла заключается в том., что компрессор может быть размещён

на некотором расстоянии от объекта охлаждения, это представляет большие возможности при компоновке.

Система может обеспечить ресурс безрегламентной работы в интервале от 200 до 500 ч., а с регламентными работами от 1000 до 2000 ч.

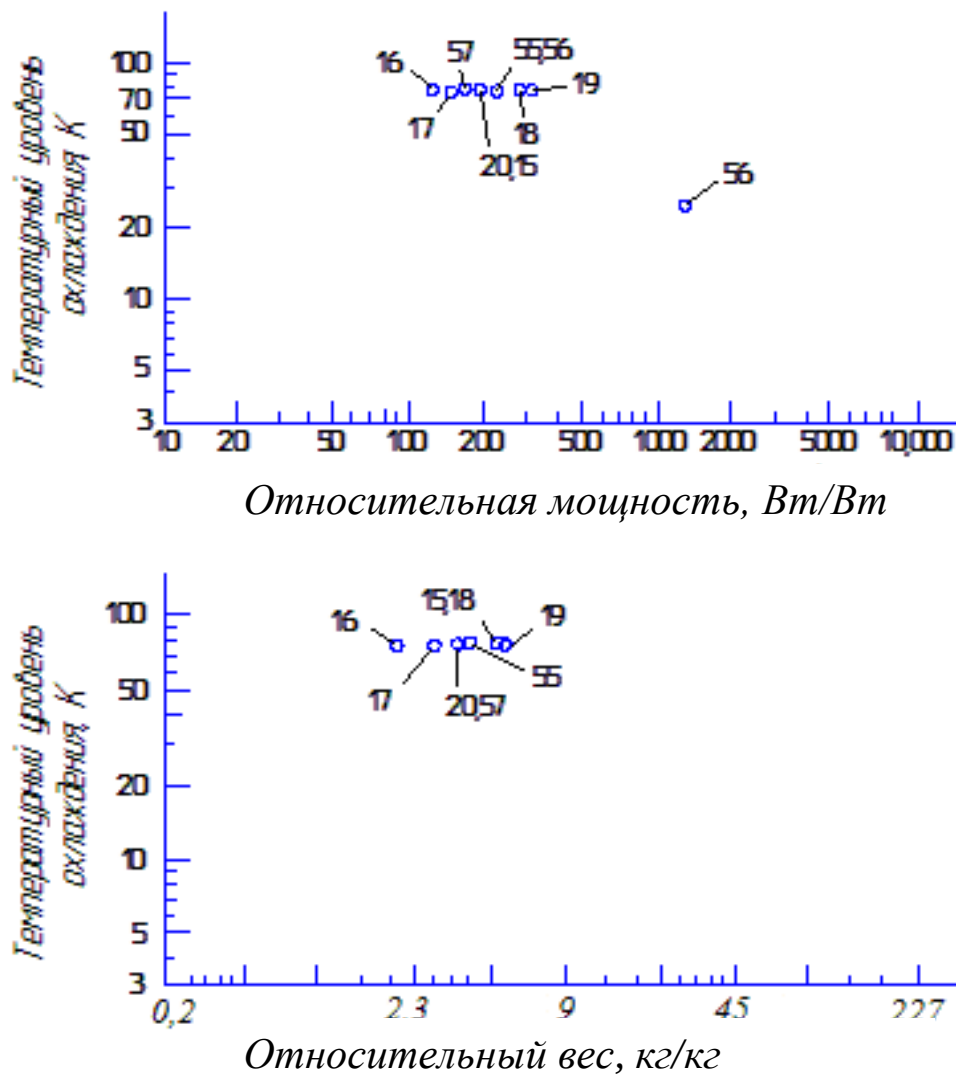


Рисунок 1.4 – Зависимость мощности и относительной массы от температурного уровня охлаждения для дроссельной системы с замкнутым циклом

Другим преимуществом замкнутой дроссельной системы является то, что температура окружающей среды не оказывает заметного влияния на температурный уровень охлаждения. Кроме того, система может быстро выходить на режим, а именно в течение 3 – 5 мин.

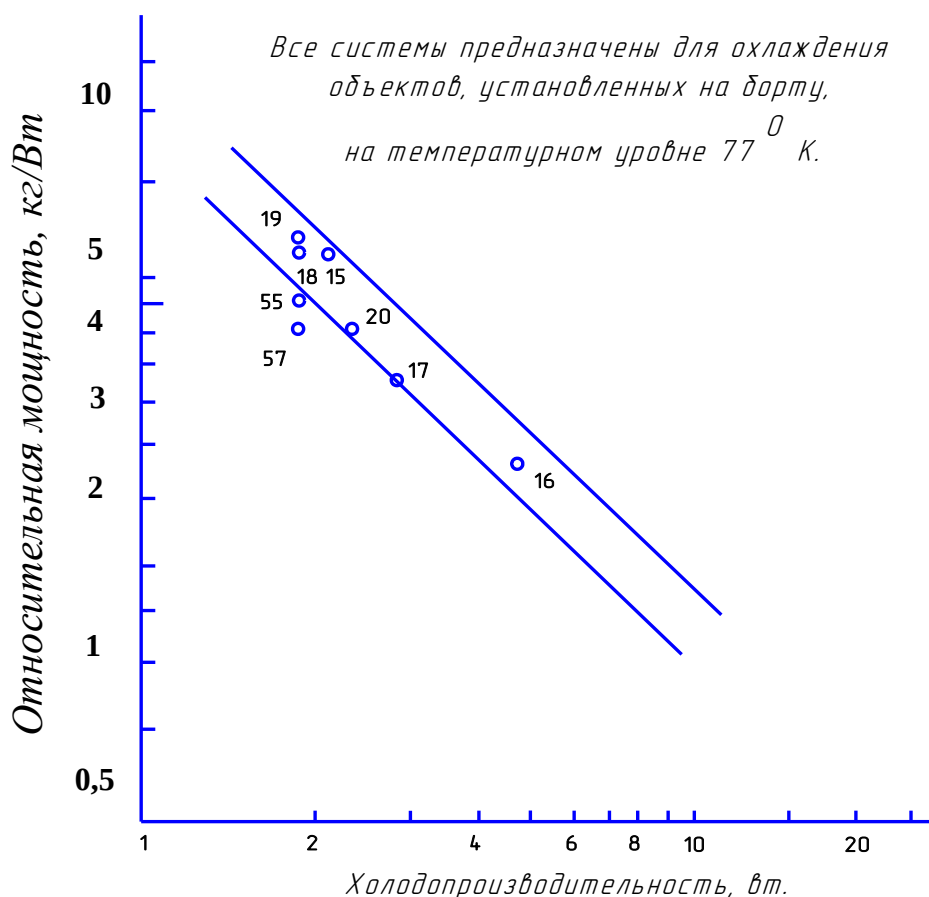


Рисунок 1.5 – Зависимость относительной массы от холодопроизводительности для систем охлаждения с замкнутым циклом

Основными недостатками системы, использующий замкнутый цикл, с точки зрения применения на борту космического аппарата является относительно высокая потребляемая мощность, поэтому эти системы не получили широкого применения для космических систем.

Другим недостатком системы является то, что она обеспечивает охлаждение объекта только при температуре ожижения хладагента, что ограничивает ее применение.

Дроссельные системы охлаждения изготавливаются следующими компаниями:

«RICOR» Cryogenic & Vacuum Systems, «Garret Corporation» («Air Research Manufacturing Company»), «Janis Research Company», «Thematic Engineering Company», «Hughes Aircraft Company». «AdvancedResearchSystems», ООО НТК "Криогенная техника" Омск и др.

1.3 Баллонные дроссельные системы охлаждения

Большинство созданных систем охлаждения представляют собой системы с разомкнутым циклом, использующие газ высокого давления. В соответствии с работой [8,9], можно заметить, что только три компании в настоящее время занимаются разработкой и производством дроссельных систем с замкнутым циклом: «AirProducts», «GarretAirResearch», «SantaBarbaraResearch».

- «GarretAirResearch» создаёт множество систем охлаждения в основном для использования на самолётах (числовое обозначение точек на рисунках 1.4–1.5 соответственно 15 – 20).
- «AirProducts» разработала ряд дроссельных систем (числовое обозначение точек на рисунках 1.4–1.5 соответственно 55), но считает, что системы охлаждения с использованием цикла Сольвея имеют больше перспектив для увеличения ресурса работы.
- «SantaBarbaraResearch» разработала свою уникальную дроссельную систему с замкнутым циклом (числовое обозначение соответственно 57) для использования в самолётах, но затем прекратила дальнейшие разработки.

Эти системы, используют хладагент как в критическом, так и в сверхкритическом состояниях, а так же в некоторых специальных случаях используют жидкий хладагент. Основными преимуществами этих систем являются простота надёжность сравнительная экономичность и незначительное энергопотребление. В большинстве случаев в системах охлаждения используются современные достижения техники.

К основным недостаткам таких криогенных систем относятся: ограниченное время работы и существенное возрастание массы и габаритов систем, предназначенных для продолжительных полётов.

Недостатки, связанные с хранением газа высокого давления, очень быстро приводят к тому, что масса системы становится препятствием для увеличения времени работы или размещения на борту (беспилотные аппараты).

Система с разомкнутым циклом рисунок 1.6 состоит из оребренной трубки в форме змеевика, сопла с насадкой и внешнего экрана. Оребренная трубка имеет малый внутренний диаметр для получения наибольшего отношения площади поверхности к объёму для эффективного теплообмена. Системы охлаждения с разомкнутым циклом обычно используют в качестве хладагента инертные газы, азот(N_2)и обеспечивают охлаждения в пределах 0.1 – 10 Вт на температурном уровне охлаждения в диапазоне 20 – 100К и расход хладагента порядка 45 – 1800 г/ч.

При строгом соблюдении всех мер предосторожности микрохолодильники, для цикла с простым дросселированием, функционируют достаточно надёжно. Время выхода их до рабочей температуры колеблется от 20 – 30 секунд до 10 минут и зависит от охлаждаемой массы (в том числе и самого теплообменника), расхода газа и его природы. В микрохолодильниках основное количество производимого холода расходуется на охлаждение объекта до рабочей температуры, а в стационарном состоянии на компенсацию теплопритоков, так как мощность, выделяемая охлаждаемым элементом, обычно ничтожно мала. В системах с микрохолодильниками, работающими от баллонов с ограниченным запасом сжатого газа, очень существенно – получение максимального количества холода на объём единицы газа. С этой точки зрения целесообразно применение аргона вместо азота или воздуха, что иллюстрируется данными таблицы 1.2.

Из данных таблицы 1.1 следует, что в интервале давлений 5 – 40 МПа можно получить на 20 – 60 % больше холода на объёмную единицу газа, применяя в цикле с простым дросселированием аргон вместо азота. В некоторых случаях это весьма существенно.

Применительно к системам охлаждения кратковременного действия, функционирующим от баллонов со сжатым газом, представляет практический интерес определение количества холода, которое можно получить при дросселировании газа, отбираемого из баллона. Задача осложняется тем, что

давление в баллоне уменьшается по мере отбора газа, а следовательно, изменяется и дроссель эффект.

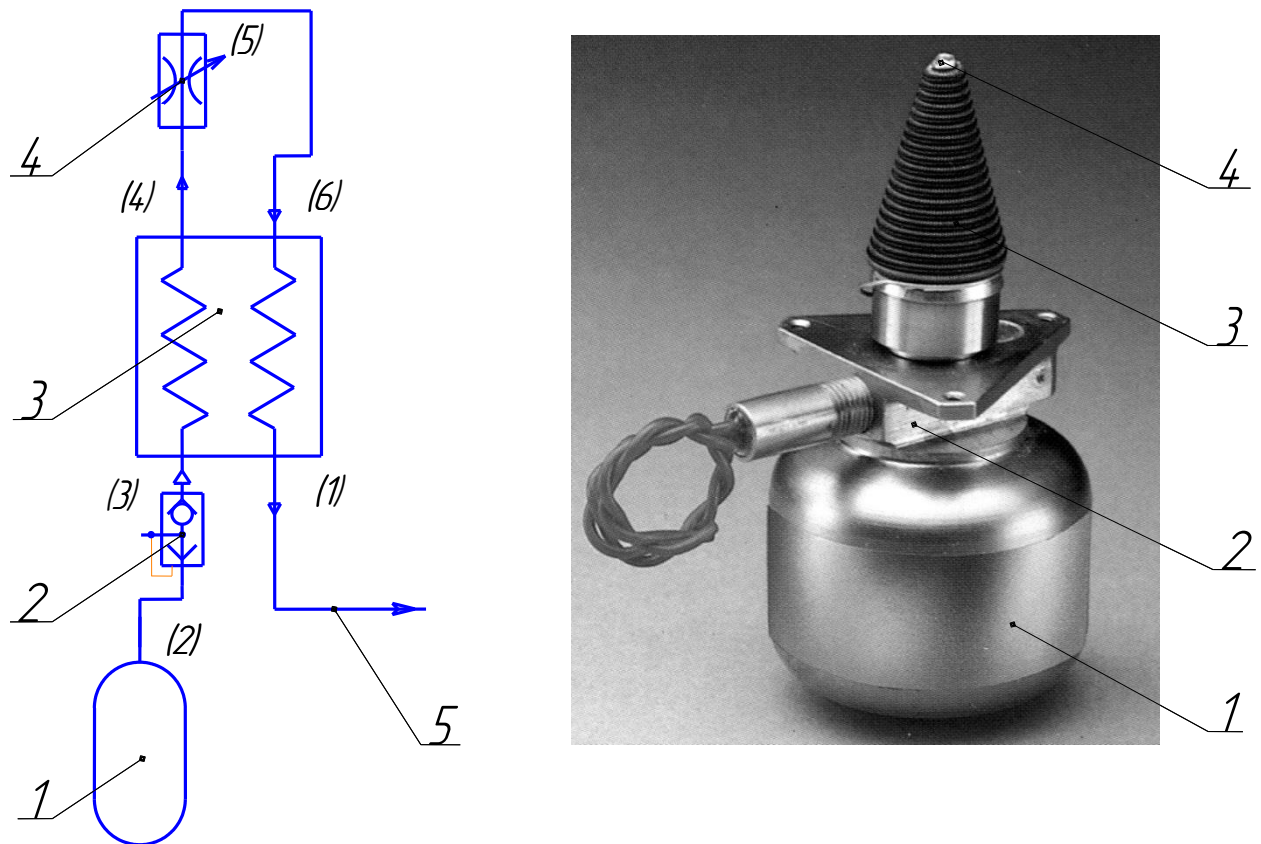


Рисунок 1.6 – Дроссельная система охлаждения с разомкнутым циклом
1 – резервуар (цилиндрический баллон); 2 – электрический пневмоклапан; 3 –
рекуперативный теплообменник; 4 – дроссель Джоуля – Томсона; 5 – линия сброса
рабочего тела

Таблица 1.1 – Изотермический эффект дросселирования(кДж/м³) для азота, воздуха и аргона при $T = 300\text{ K}$ и различных значениях давления p_2 .

Газ	p_2 , МПа							
	40	35	30	25	20	15	10	5
Азот	50,7	49,9	48,6	45,7	40,5	32,5	23,5	13,2
Воздух	56,1	55,7	54,5	50,3	44,8	36,8	25,9	12,1
Аргон	80,9	78,4	73,3	66,6	57,4	45,7	31,4	16,1
Гелий	6,7	6,6	6,3	6,1	5,9	5,9	5,6	5,1

Характерной особенностью микрокриогенных систем является чрезвычайно большой диапазон изменения их ресурсных показателей в зависимости от

назначения, применения и типа системы. Требуемая длительность непрерывной работы колеблется от десятков секунд до нескольких тысяч часов, а ресурс – от 1 минут до 25 000 часов и более.

1.4 Дроссельные системы охлаждения умеренного уровня температуры охлаждения

В качестве системы охлаждения умеренного уровня температуры охлаждения (200-250K) на рисунке 1.7 представлена схема с циркуляционным жидкостным контуром и дроссельной системой генерации холода.

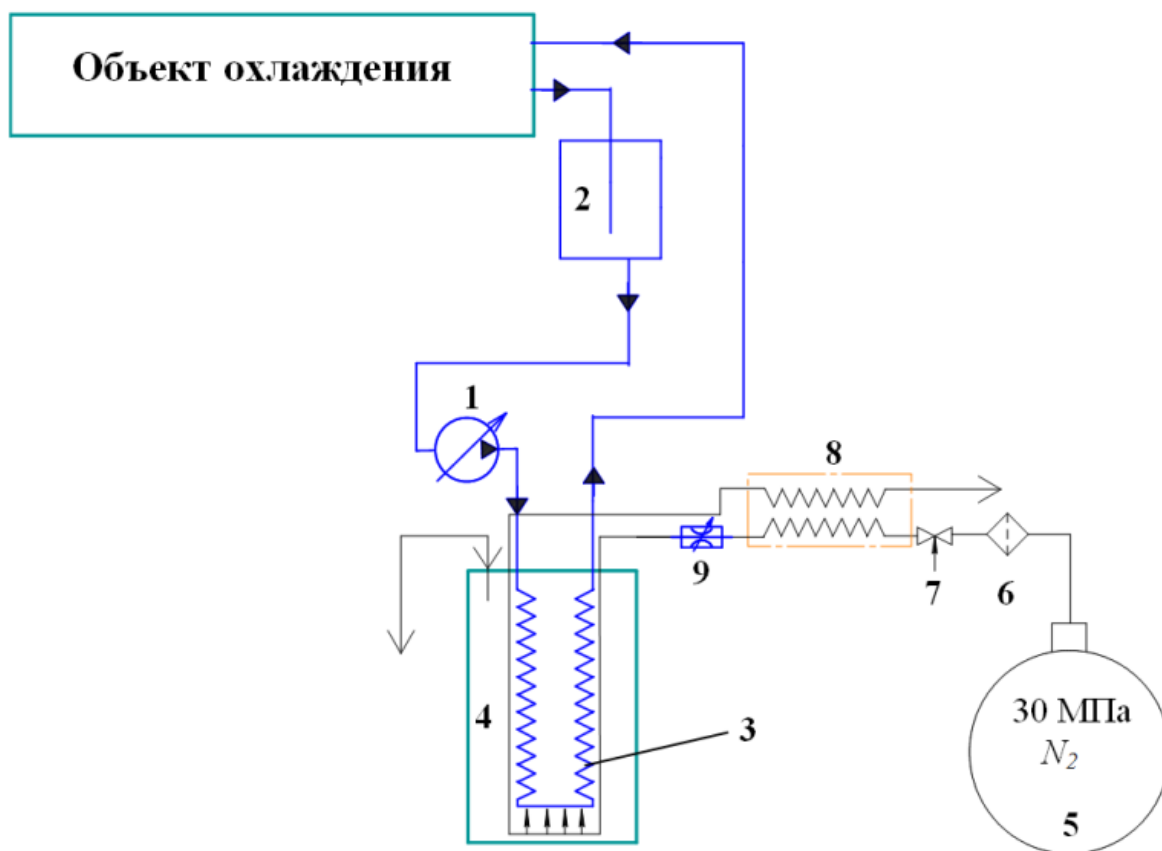


Рисунок 1.7 – Дроссельная система охлаждения с барботажем дросселированного азота через бак внешнего теплоносителя.

1 – насос; 2 – расширительный бачок; 3 – теплообменник; 4 – бак с внешним теплоносителем; 5 – баллон для хранения газа высокого давления; 6– фильтр–адсорбер; 7– вентиль регулировки расхода; 8 – теплообменник дроссельной системы; 9 – дроссель.

В состав внешнего контура системы такого типа входят следующие устройства (рисунки 1.7): дроссель, баллон для хранения газа высокого давления, фильтр–адсорбер. Расчёты показывают, что при использовании азота в качестве

хладагента для охлаждения в диапазоне температур 200 – 250К и получения холодопроизводительности около 350 Вт. необходимо обеспечить расход газа около 15кг/ч. При условии, что температура охлаждения (например ЛИДАР) будет активно поддерживаться около 120мин, необходимый запас азота при давлении 30 МПа составит величину около 30кг. Для хранения такого количества потребуется ёмкость. В соответствии с расчётом по методике [7] масса баллона при сферической форме, выполненного из титана с толщиной стенки $\delta_c=5$ мм, составит около 2 кг, а резервуар цилиндрической формы будет иметь массу около 3 кг. Полная масса внешнего контура складывается из массы сухого баллона, массы хладагента и дополнительных устройств. Расчёты дают соответственно величину полной массы баллона с рабочим телом 31–32кг.

Необходимо отметить, что системы такого типа хорошо отработаны и производятся серийно. С другой стороны реализация на практике такой системы позволит охлаждать не только лазер, но и ИК –приёмники, входящие в состав лазерного бортового комплекса (например, ЛИДАРа).

1.5 Схемы и конструкции дроссельных микроохладителей

По принципиальной схеме большую часть разработанных конструкций дроссельных, микроохладителей можно отнести к одной из следующих основных групп (рисунок 1.8):

- однокаскадные; в том числе с простым и двукратным дросселированием;
- многокаскадные с предварительным охлаждением газа.

Чаще всего применяют одно и многорядные поперечно – противоточные теплообменники (типа Хэмпсона) и противоточные типа труба в трубе (Линде). Формы теплообменников различны: цилиндрическая, коническая, плоская.

Теплообменники Хэмпсона изготавливаются из капиллярных трубок $\varnothing 0,2 - 1,0$ мм с чередованием оребренных и не оребренных рядов (нержавеющая сталь, никель и его сплавы). Оребрение выполняется из медной проволоки диаметром $\varnothing 0,05 - 0,2$ мм, спирально навитой на трубки с определённым шагом.

Устройство спирального теплообменника схематически показано на рисунке 1.9.

Тонкостенную трубку малого диаметра навивают в виде спирали на оправку диаметром 0,5 – 1 мм, затем полученную спираль располагают вокруг оправки нужного диаметра. Сжатый газ проходит внутри трубки и выходит через дроссельное отверстие на холодном конце теплообменника. Теплообменник плотно вставляется во внутреннюю полость колбы.

Особенностью таких теплообменников является малое сопротивление обратному газовому потоку.

При ничтожных размерах дроссельных отверстий, которые определяют расход 0.5 – 2 м³/ч газа, чрезвычайно высоки требования, предъявляемые к чистоте газа.

В качестве дроссельных устройств (рисунок 1.10) могут использоваться капиллярные трубки определённой длины ("капиллярный" дроссель), микроотверстия (дюзы), пористые металлокерамические таблетки, трубки теплообменника ("распределённый" дроссель), а также регулируемый дроссель.

Конструкция охлаждаемого устройства и физические характеристики его активного (чувствительного) элемента во многом определяют также схему сопряжения устройства с микрокриогенной установкой; узел их стыковки должен удовлетворять комплексу требований, обеспечивающих нормальную работу термостатируемого устройства при определённых параметрах установки;

Вибрации установки, если они существуют, не должны по возможности передаваться охлаждаемому объекту.

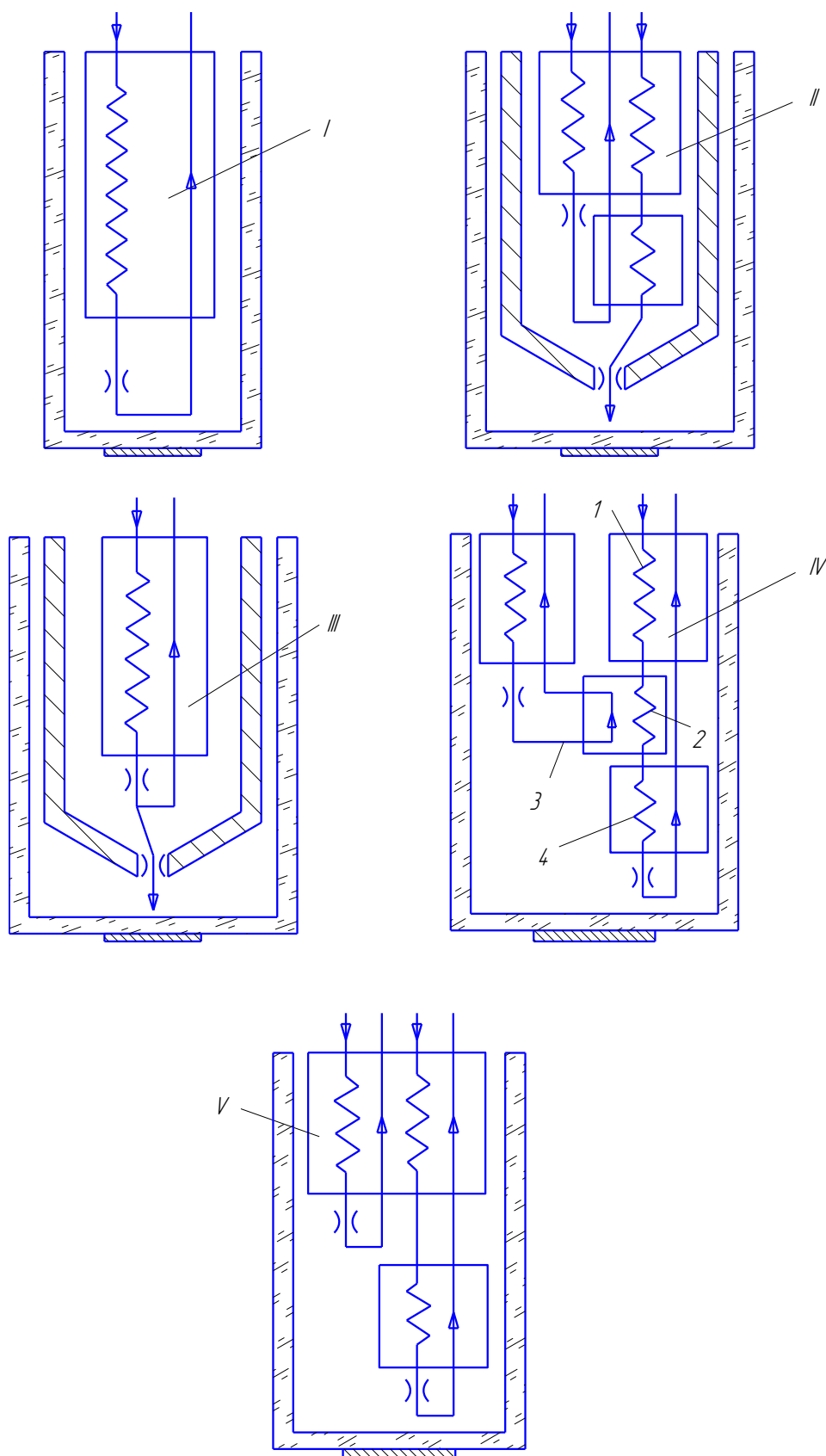


Рисунок 1.8 – Различные схемы теплообменников

I – с простым дросселированием; II – с двукратным параллельным дросселированием; III – с двукратным последовательным дросселированием; IV и V – соответственно с «локальным» и «распределённым» охлаждением хладагента второго каскада

Температурный перепад и потери холода в зоне стыка должны быть минимальными; пульсации температуры, возникающие в холодной головке микрокриогенной установки, во многих случаях могут вызвать ухудшение характеристик прибора и должны быть исключены применением специальных конструктивных мер;

Взаимное размещение установки и охлаждаемого прибора, а также конструкцию узла и сопряжения следует выбирать и условия экранировки прибора от влияния электромагнитных полей возникающих при работе установки.

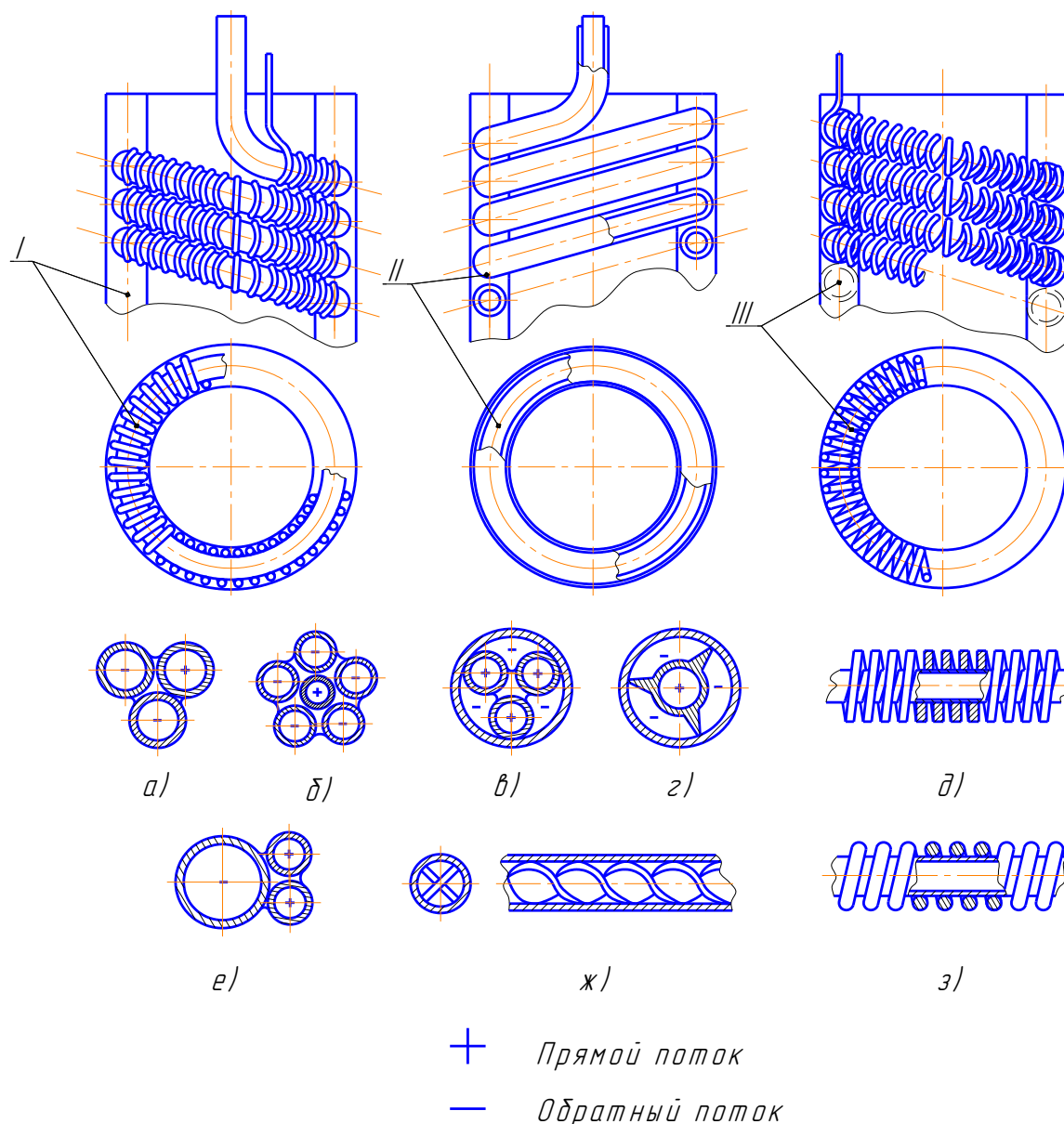


Рисунок 1.9 – Устройство микрокриогенных теплообменников
1 – теплообменник типа (Хэмпсона); 2 – теплообменник типа (Линде) а), б), в), г), д), е), з), ж) – варианты компоновки трубок теплообменника Линде

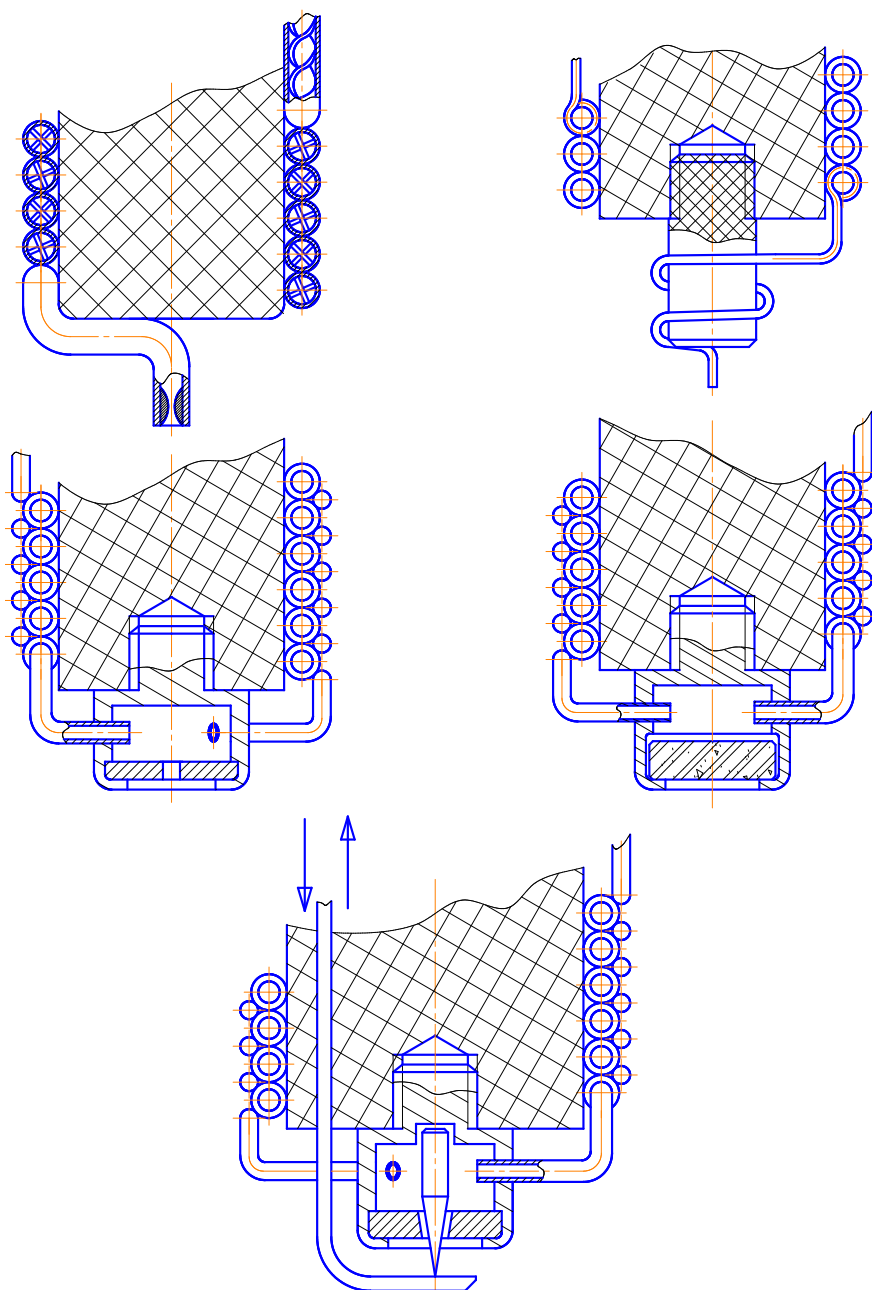


Рисунок 1.10 – Конструктивные схемы дроссельных устройств

- температурный перепад и потери холода в зоне стыка должны быть минимальными; пульсации температуры, возникающие в холодной головке микрокриогенной установки, во многих случаях могут вызвать ухудшение характеристик прибора и должны быть исключены применением специальных конструктивных мер;
- взаимное размещение установки и охлаждаемого прибора, а также конструкцию узла и сопряжения следует выбирать и условия экранировки

прибора о влияния электромагнитных полей возникающих при работе установки.

Конструкция микроохладителя с простым дросселированием, приведена на рисунке 1.11. Противоточный теплообменник построен по схеме труба в трубе и представляет собой свитую в спираль капиллярную трубку 2, размещённую во внешней трубке 3 с запаянным концом. Трубка 2 канала высокого давления играет одновременно роль распределённого дросселя. В низкотемпературной зоне к теплообменнику припаян наконечник 4, который через слой теплопроводящей пасты 5 (смесь замазки Рамзая с алюминиевой пудрой) контактирует с дном охлаждаемого прибора 6. Конструкция штуцера 1 позволяет использовать микроохладитель как в замкнутой, так и в разомкнутой системах охлаждения, 7 – входное оптическое стекло.

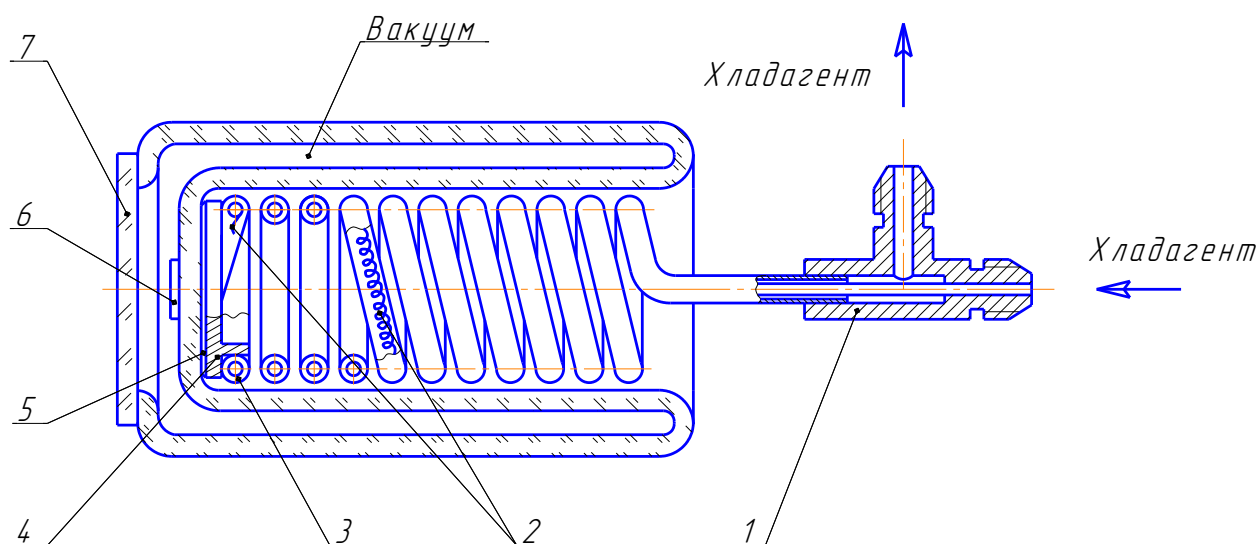


Рисунок 1.11 – Микроохладитель простого дросселирования с противоточным теплообменником

Эта схема не нашла широкого применения в основном из-за отсутствия непосредственного контакта хладагента с охлаждаемым объектом, т.е. из-за повышенной температуры криостатирования (повышенное давление в канале обратного потока). Наилучшими техническими данными обладает микроохладитель, представленный на рисунке 1.12.

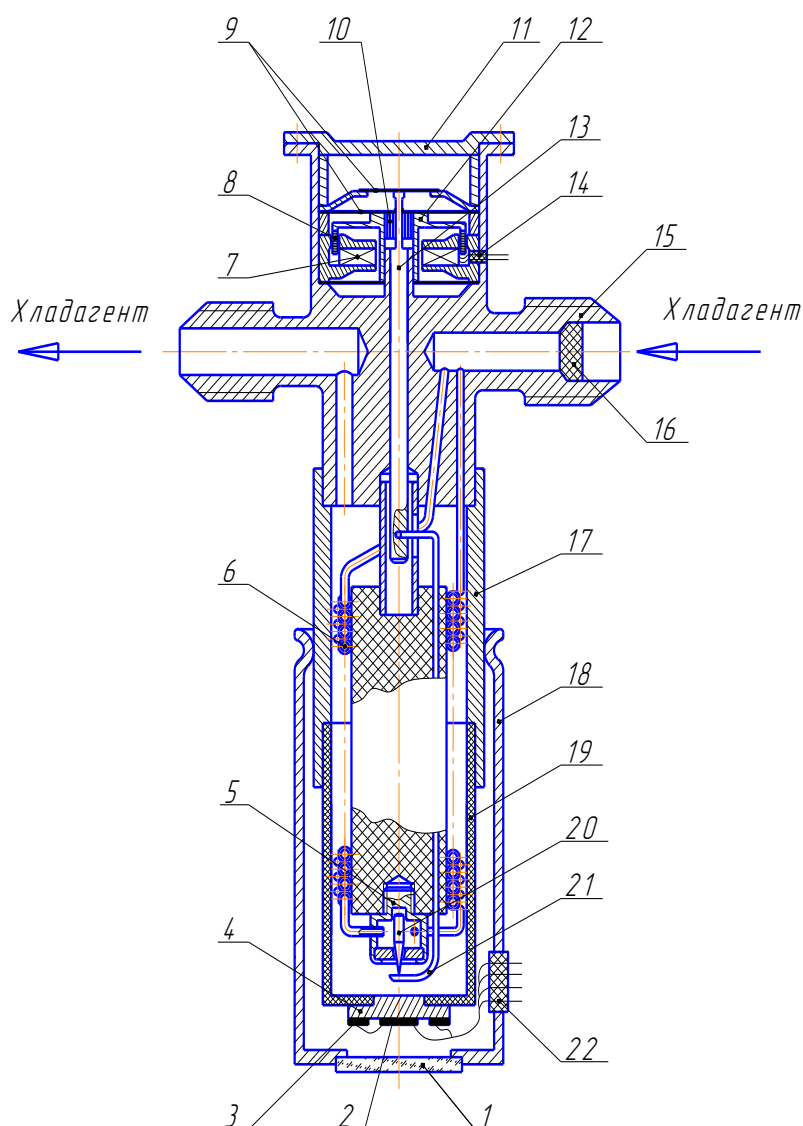


Рисунок 1.12– Конструктивная схема микроохладителя с регулируемой холодопроизводительностью для глубоко охлаждаемого ИК–приёмника

1 – входное оптическое окно; 2 – фоточувствительный элемент; 3 – кольцевая стеклотекстолитовая печатная плата с выводами от фоточувствительного элемента; 4 – медный хладопровод; 5 – дроссельная дюза; 6 – теплообменник Хэмпсона; 7 – магнит; 8 – катушка; 9 – мембранные пружины; 10 – бесконтактное уплотнение; 11 – крышка; 12 – подвижный элемент; 13 – подвижный шток; 14 – герметичный разъем; 15 – корпус; 16 – фильтр; 17 – обечайка из нержавеющей стали; 18 – обечайка (секция) теплообменника из кобальта; 19 – секция обечайки теплообменника из стеклотекстолита СТЭФ; 20 – игла; 21 – тяга; 22 – сверхгерметичный разъем типа РСГС

В данной конструкции обеспечивается:

– минимальное время выхода на температурный режим, так как минимизированы охлаждаемые массы, а секция 4 из стеклопластика с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 3 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$;

– равенство температуры хладагента и охлаждаемого объекта.

Такой микроохладитель с системой замкнутого цикла очень удобен для крылатых ракет, систем FLJR самолетов и других аэрокосмических объектов, реализующих самонаведение в спектральном диапазоне волн 3,5 мкм. При он также может быть снабжён в случае необходимости охлаждаемым фильтром изображения.

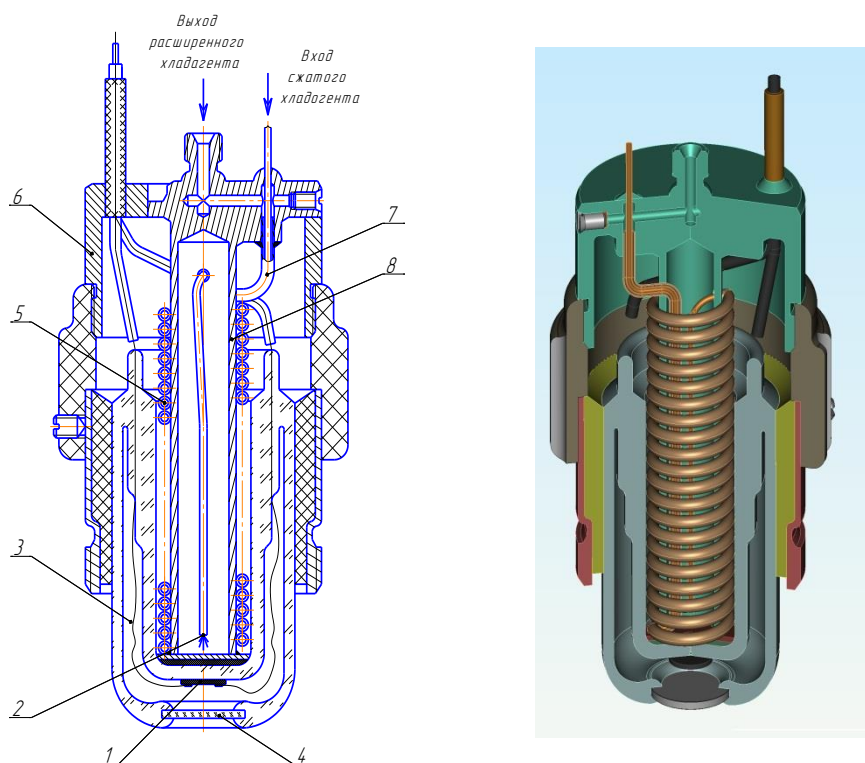


Рисунок 1.13– Схема охлаждаемого детектора ИК – излучения

1 – охлаждаемый ИК–детектор; 2 – парожидкостная смесь; 3 – вакуумная полость стеклянной колбы; 4 – прозрачное для ИК лучей окно; 5 – теплообменник типа труба в трубе (Линде); 6 – кожух микроохладителя; 7 – выходной штуцер; 8 – крышка криоохладителя

Входное окно может быть выполнено из Лейко сапфира или германия, если необходимо отсечь излучение до 1,60 мкм, или из кремния, если до 1,06 мкм.

Для зенитных ракет «Земля – воздух» с тепловыми головками самонаведения важнейшим параметром является время выхода на температурный режим (не более 3,4 с), так как они работают от баллонных расходных систем с ресурсом 90 – 100 с.

Охлаждаемый детектор ИК–излучения схематически показан на рисунке 1.13. Кристалл полупроводника 1 крепится тем или иным способом, обеспечивающим хороший тепловой контакт, к поверхности пластины, которая охлаждается с противоположной стороны парожидкостной смесью 2, образующейся при дросселировании газа, прошедшего через теплообменник.

Охлаждаемый кристалл обычно размещается в вакуумной полости стеклянной, металлической или комбинированной колбы 3, имеющей окно 4 (например, сапфировое), прозрачное для ИК–лучей с определёнными длинами волн. Если внешняя часть колбы стеклянная, то стенки ее серебрят для уменьшения притока лучистого тепла.

1.6 Особенности методики расчёта дроссельных циклов

Расчёт дроссельных циклов состоит из нескольких этапов. Первый состоит в выборе рабочего тела для заданного уровня криостатирования, на втором этапе производится подбор рабочего давления и построение процесса на диаграмме, на последнем этапе определяются энергетические показатели установки для заданной холодопроизводительности.

Перед тем, как приступить к расчёту, необходимо знать исходные данные, а именно:

- 1) холодопроизводительность Q_0^* , Вт;
- 2) уровень криостатирования T_0 , К;
- 3) температура окружающей среды T_{oc} , К.

Далее приступают к выбору рабочего тела, которое должно циркулировать в установке.

Выбор рабочего тела.

1. Желательно, чтобы температура кипения хладагента при $p = p_4$ отличалась от температуры охлаждаемого объекта не больше, чем на $0,3 - 1^\circ$:

$$T_{кин} = T_0 - \Delta T.$$

2. В качестве рабочего тела могут быть выбраны только вещества, дроссель-эффект которых положителен при температуре T_{oc} ; поэтому такие вещества как водород, неон и гелий для этой цели не подходят.

Рабочими веществами в рефрижераторе Линде могут служить воздух, кислород, азот, аргон, различные углеводороды и низко температурные фреоны.

3. Оценка величины дроссель-эффекта Δi_T .

Очевидно, что Δi_T при температуре окружающей среды, тем эффективнее будет цикл при той же температуре T_0 .

4. Учёт различных качеств хладагента.

Наряду с термодинамическими характеристиками при выборе хладагента немаловажную роль могут играть химическая активность, токсичность и т. д., а также его стоимость.

После выбора хладагента переходят к подбору рабочего давления.

Выбор рабочего давления.

1. Рабочее давление выбирают исходя из того, чтобы Δi_T был как можно больше, но ниже давления инверсии.

2. Необходимо учесть возможности компрессора (чтобы выбранный компрессор мог эффективно работать на заданном уровне).

После этого приступают к собственно расчёту с определением всех параметров и показателей установки.

Построение процесса на диаграмме (рисунок 1.14) и определение параметров во всех точках схемы.

1. Точка 1 соответствует температуре окружающей среды.

2. Точку 5 наносим, исходя из давления в испарителе.

3. Выбирается величина ΔT_H недорекуперации и наносится точка 6.

4. Составляется тепловой баланс для определения остальных параметров теплообменника: $i_2 - i_3 = i_6 - i_5$, отсюда находят i_3 , а затем T_3 .

5. Проведя изоэнтальпу, находим положение точки 4. Чем левее расположена точка 4, тем большая доля жидкости будет поступать в испаритель. Если это

целесообразно, то надо или уменьшить величину ΔT_{II} , или изменить давление p_2 так, чтобы увеличить долю жидкости.

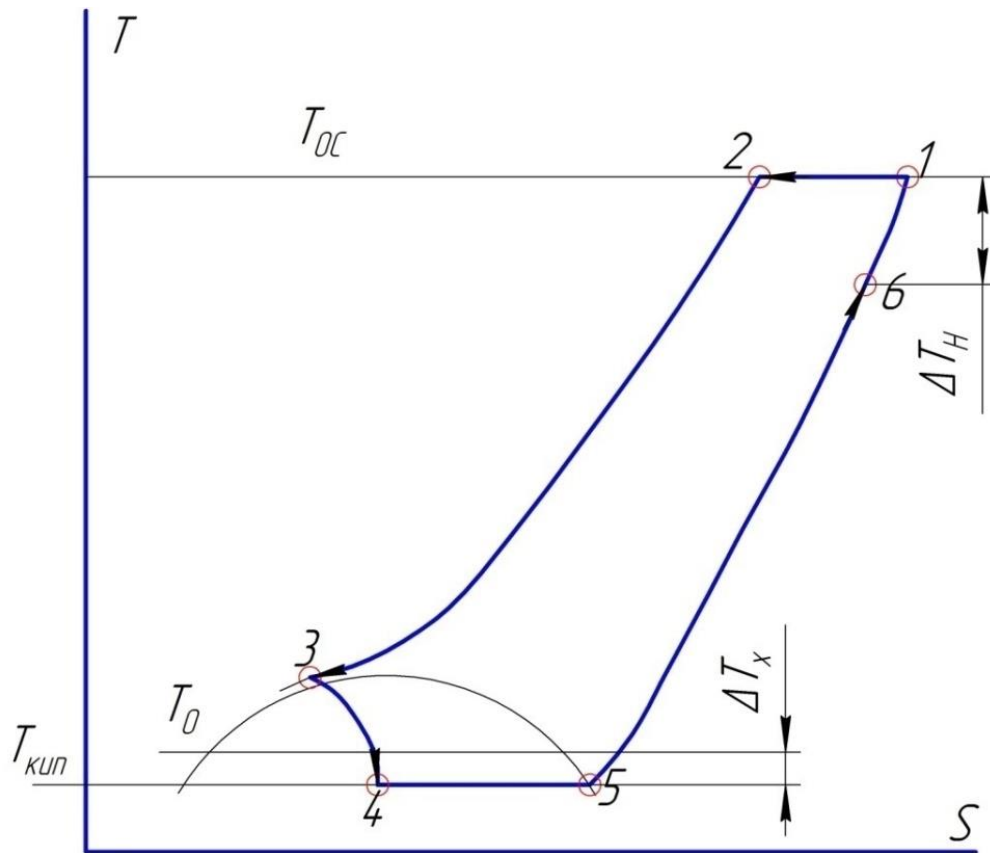


Рисунок 1.14 – Цикл с дросселированием рабочего тела

Определение расхода рабочего тела.

Расход хладагента 1 кг в час даёт холодопроизводительность q_0 , равную $i_6 - i_2$, или, что то же самое, $i_5 - i_4$. Необходимую холодопроизводительность Q_0 даст

$$\text{расход газа } G = \frac{Q_0}{q_0}.$$

Полный расчёт и определение энергетических показателей.

1. Определение затраты работы на привод компрессора

$$L = G (e_2 - e_1) \frac{1}{\eta_{из} \cdot \eta_{эм}}, \text{ кВт},$$

где $(e_2 - e_1)$ берётся или из $e-i$ диаграммы рабочего тела, или вычисляется по формуле

$$e_2 - e_1 = i_2 - i_1 - T_{oc} (s_2 - s_1).$$

Значения i и s берутся из $T-s$ диаграммы, или работа определяется по формуле

$$l = R T \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

2. Тепловая нагрузка теплообменника

$$Q_T = G (i_2 - i_3) \text{ кДж / ч а с.}$$

3. Эффективность работы установки:

$$\eta_e = \frac{Q_e}{L} \text{— эксергетический К.П.Д.};$$

$$l' = \frac{L}{Q_0} \text{— удельная затрата работы на производство единицы холода, Вм/Вм}$$

холодопроизводительности (этот показатель пригоден только для сравнения установок, работающих на одном температурном уровне).

Далее проводят конструктивный расчёт с определением габаритов установки.

Дроссельные установки, работающие на чистых веществах, имеют сравнительную небольшую эффективность $\eta_e = 6 - 8\%$ и применяются в областях техники, где ей можно пренебречь из-за простоты и надёжности этих установок.

Повысить эффективность этих СО можно путем применения в качестве рабочих тел эффективных смесей с высоким изотермическим дроссель-эффектом.

1.7 Дроссельные системы для ожижения газов

Кроме решения задач термостабилизации на борту ЛА, дроссельные системы охлаждения могут использоваться для ожижения газов и их возможного специального применения. Дроссельные холодильные циклы при ожижении

газов играют особую роль. Они дают возможность сравнительно просто получить низкие температуры, необходимые в процессе ожижения. При использовании создаваемой холодопроизводительности на предельно низком температурном уровне эффективность дроссельных циклов становится удовлетворительной. Существуют методы значительного повышения энергетической экономичности таких циклов путем их соединения с более совершенными, которые, однако, не позволяют получить низкие температуры, необходимые при ожижении газа. Следует отметить, что в промышленных установках глубокого охлаждения любого типа самая низкая в процессе температура получается с помощью дроссельного холодильного цикла. Рассмотрим вначале процесс ожижения газа с помощью простейшего цикла такого вида. Это позволит наиболее наглядно выявить особенности ожижения в случае идентичности ожижаемого газа и рабочего тела холодильного цикла. В связи с последним процессы холодильного цикла и ожижаемого газа изображаются на одной и той же диаграмме. На рис. 1.15 показаны принципиальная схема и процессы в энтропийной диаграмме ожижения газа при использовании дроссельного холодильного цикла для случая, когда ожижаемый газ и рабочее тело холодильного цикла сжимаются в одном и том же компрессоре, а затем отделяются один от другого. Предположим, что ожижаемый газ изотермически сжимается в процессе 1-2, а затем отводится тепло (процесс 2-0'). После дросселирования (процесс 0'-0) получается насыщенная жидкость состояния 0.

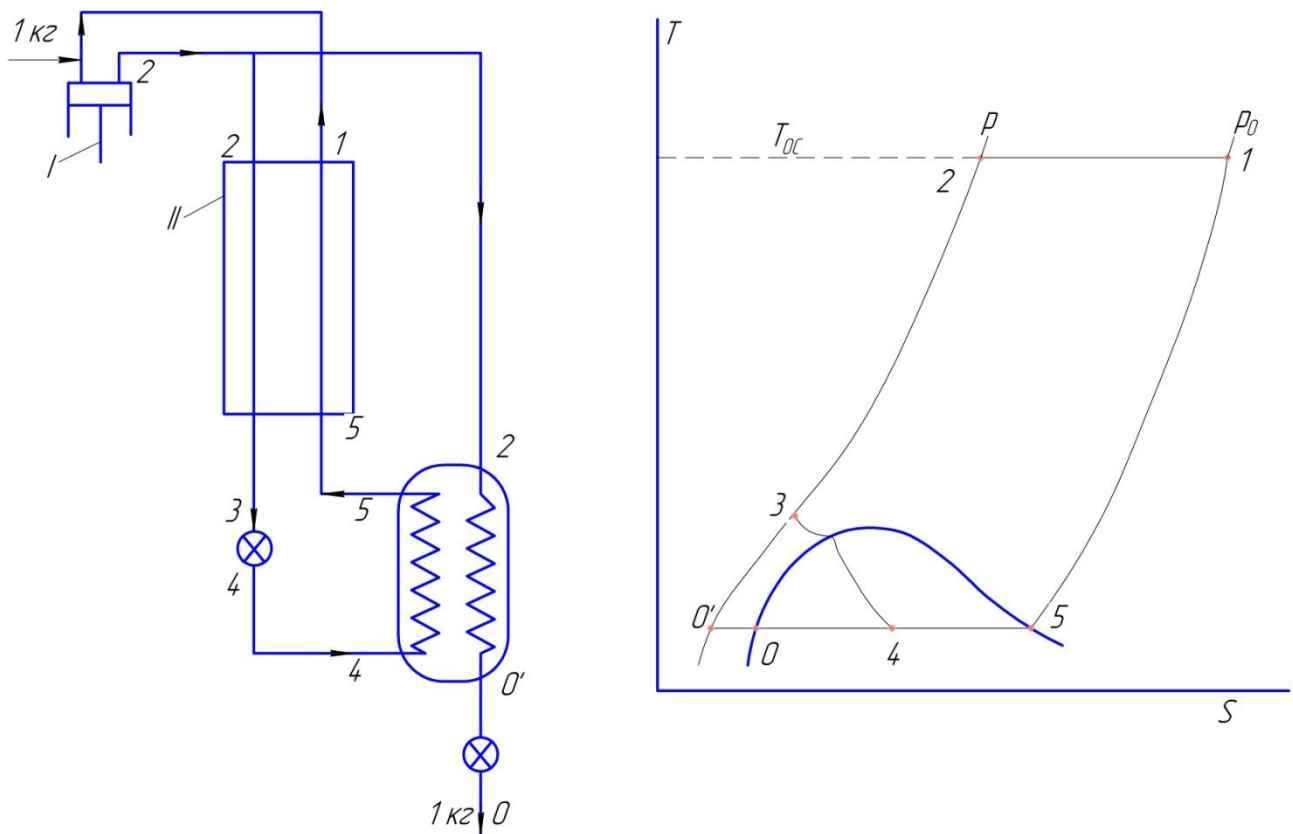


Рисунок 1.15 - Ожижение газа с помощью дроссельного цикла при изолировании рабочего тела холодильного цикла от ожижаемого газа

Холодильный цикл 1-2-3-4-5-1 создаёт холодопроизводительность $i_5 - i_4 = i_1 - i_2$, которая используется для отвода тепла от сжатого газа. При этом от сжатого газа отнимается тепло $i_2' - i_0 = i_2 - i_0$. Количество газа m' кг, циркулирующего в холодильном цикле, при ожижении 1 кг газа в случае отсутствия холодопотерь равно:

$$m' = \frac{i_2 - i_0}{i_1 - i_2}.$$

При учёте потерь холодопроизводительности вследствие недорекупации и теплопритоков извне $\sum q^n$ полезная холодопроизводительность цикла, отнесённая к 1 кг циркулирующего газа, равна:

$$q_0 = (i_1 - i_2) - \sum q^n.$$

Действительное количество циркулирующего в холодильном цикле газа будет равно:

$$m = \frac{i_2 - i_0}{(i_1 - i_2) - \sum q^n}.$$

Расход энергии складывается из расхода энергии на осуществление холодильного цикла $l_{с.жс}$ и на сжатие охлаждаемого газа Al_x , т. е.

$$l_{с.жс} = l_x + l_{с.жс}; \quad (1)$$

Причём

$$l_x = m \cdot \frac{T_{o.c} (S_1 - S_2) - (i_1 - i_2)}{860 \eta_{из}}, \frac{кВт \cdot ч}{ккал \cdot о.жс \cdot г}. \quad (2)$$

и

$$l_{с.жс} = \frac{T_{o.c} (S_1 - S_2) - (i_1 - i_2)}{860 \eta_{из}}, \frac{кВт \cdot ч}{ккал \cdot о.жс \cdot г}. \quad (3)$$

Из (1) учитывая (2) и (3),получаем:

$$l_{с.жс} = (m + 1) \frac{T_{o.c} (S_1 - S_2) - (i_1 - i_2)}{860 \eta_{из}}, \frac{кВт \cdot ч}{ккал \cdot о.жс \cdot г}.$$

Для воздуха и других газов, если сжатие происходит в области состояний, близких к идеальному, затрачиваемая работа может быть с достаточно» точностью определена из уравнения

$$l_{с.жс} = (m + 1) \frac{ART_{o.c} \cdot \lg \frac{p}{p_o}}{860 \eta_{из}}. \quad (4)$$

В действительном процессе охлаждения газа при идентичности охлаждаемого газа и рабочего тела холодильного цикла они в точке 2 (рисунок 2.7) не разделяются, а идут совместно в теплообменник.

На рисунке 1.16 показаны принципиальная схема и процессы в энтальпийной диаграмме при смешении рабочего тела и охлаждаемого газа. После дросселирования смеси получается влажный пар состояния 4. Можно было бы дросселировать до этого состояния только рабочее тело, а охлаждаемый газ за счёт выпаривания рабочего тела на участке 4-5 охладить в процессе 3-0'. После его

The left diagram is a schematic of a refrigeration cycle. It consists of a compressor (1-2), a condenser (2-3), an expansion valve (3-4), and an evaporator (4-5). The refrigerant flows clockwise. The condenser is a vertical coil, and the evaporator is a horizontal coil. The refrigerant is shown as a liquid-vapor mixture in the evaporator. The right diagram is a T-s (Temperature-Entropy) plot for the cycle. The vertical axis is Temperature (T) and the horizontal axis is Entropy (S). The cycle is represented by a closed loop with points 1, 2, 3, 4, and 5. The process 1-2 is isentropic compression (vertical line). The process 2-3 is isobaric condensation (horizontal line at T_{0c}). The process 3-4 is isentropic expansion (vertical line). The process 4-5 is isobaric evaporation (horizontal line at T_0). The area under the 4-5 line represents the heat absorbed Q_0 . The area under the 2-3 line represents the heat rejected Q_c . The area between the 2-3 and 4-5 lines represents the work input W . The saturation dome is shown with critical point O' and triple point O .

Следовательно, идентичность рабочего тела и ожижаемого газа позволяет при их смешении исключить процессы осушения влажного пара рабочего тела холодильного цикла и охлаждения сжатого ожижаемого газа. Дросселируя смесь рабочего тела и ожижаемого газа в процессе 3-4, мы заменяем эти процессы простым отделением жидкости от пара в полученном влажном паре.

Следовательно, смешение рабочего тела с охлаждаемым газом в данном случае, не меняет ничего термодинамически, а, практически упрощает схему, позволяя исключить из неё второй теплообменник (рисунок 1.15 и 1.16).

1.8 Рабочий процесс баллонной дроссельной системы

В настоящее время системы, основанные на использовании эффекта, открытого более 100 лет назад Джоулем и Томсоном, находят очень широкое применение. При дросселировании любого реального сжатого газа происходит изменение его температуры на ΔT градусов. Между изменением давления $\Delta P = P_1 - P_2$ и изменением температуры (рисунок 1.17) существует зависимость

$$\Delta T = \alpha_i \cdot \Delta P ,$$

где α_i – среднее значение эффекта дросселирования в интервале изменения давления ΔP .

Исходя из первого закона термодинамики, дифференциальный эффект дросселирования может быть выражен суммой

$$\alpha_i = \alpha_u + \alpha_{pv}$$

Эта зависимость показывает, что величина и знак дифференциального эффекта дросселирования определяются воздействием молекулярных сил α_u и изменением потенциальной энергии газа α_{pv} .

При расширении газа его внутренняя энергия падает, следовательно, α_u всегда является величиной положительной, что приводит к понижению температуры дросселируемого газа.

Вторая часть слагаемого в зависимости от изменения произведения PV может принимать положительное, отрицательное значение, а также быть равной нулю. Вполне понятно, что если α_{pv} будет величиной положительной, то эта часть слагаемого даст добавку к значению α_u . Если α_{pv} имеет отрицательный знак, то могут быть случаи, когда

$$\alpha_u + \alpha_{pv} > 0;$$

$$\alpha_u + \alpha_{pv} < 0;$$

$$\alpha_u + \alpha_{pv} = 0;$$

Иными словами, в первом случае будет происходить охлаждение, во втором нагревание, а в третьем – температура газа остаётся без изменений, так как $\alpha_i = 0$.

Такое состояние, когда в результате дросселирования, температура реальных газов остаётся постоянной, называют инверсионным. Для каждого газа можно построить инверсионную кривую; если начальные параметры газа T_0 и P_0 укладываются в области, ограниченной этой кривой, то при дросселировании наблюдается только охлаждение газа. Это обстоятельство учитывают при выборе газа, а также его начальных значений. Для воздуха, азота, кислорода, аргона и некоторых других газов α_{pv} имеет отрицательное значение в широком диапазоне температур и давлений. Однако по абсолютной величине эта часть слагаемого меньше, что позволяет применять эти газы в охлаждающих устройствах, основанных на принципе дросселирования.

При расчёте и проектировании таких устройств обычно пользуются не дифференциальным, а интегральным или средним значением дроссель – эффекта, получаемым от дросселирования единицы массы или объёма газа.

В таблице 1.2 представлены значения интегрального эффекта Джоуля – Томсона для воздуха при различных начальных температурах и давлениях. Конечное давление равно 0,1 МПа.

Таблица 1.2 – Интегральный эффект Джоуля – Томсона при различных начальных температурах и давлениях

Начальная температура в °К	5МПа	10МПа	15МПа	20МПа
320	9,1	17,5	23,0	29,5
300	10,6	20,6	28,3	35,2
280	12,7	29,1	31,2	42,6
260	20,0	41,5	51,5	51,5

240	18,0	35,8	50,8	57,4
220	22,4	44,9	62,8	74,4
200	27,4	56,2	76,4	97,1

Изотермический эффект дросселирования характеризует холодопроизводительность единицы массы воздуха при дросселировании и может быть выражен зависимостью

$$\Delta i_T = i_{T_1}^{P_2} - i_{T_1}^{P_1} = C_p \Delta T \text{ ккал / кг} ,$$

где $i_{T_1}^{P_2}$ и $i_{T_1}^{P_1}$ – энтальпии газа до и после дросселирования. Здесь индексы при буквенных выражениях показывают температуру и давление, при которых берутся величины. Обозначение точек соответствует рисунку 2.9.

Обычно эти величины находятся из диаграммы состояний, построенных по опытными данным. Чаще всего при этом пользуются диаграммами $T - S$ (температура – энтропия) или $T - I$ (температура – энтальпия).

Схема охлаждающего устройства, основанного на эффекте дросселирования, изображена на рисунке 1.17 (а); процессы, протекающие в нем – на рисунке 1.17 (б).

Начальное состояние характеризуется параметрами точки 1 то есть температурой T_1 и давлением P_1 . В результате дросселирования происходящего без изменения энтальпии, до давления P_2 температура газа понижается.

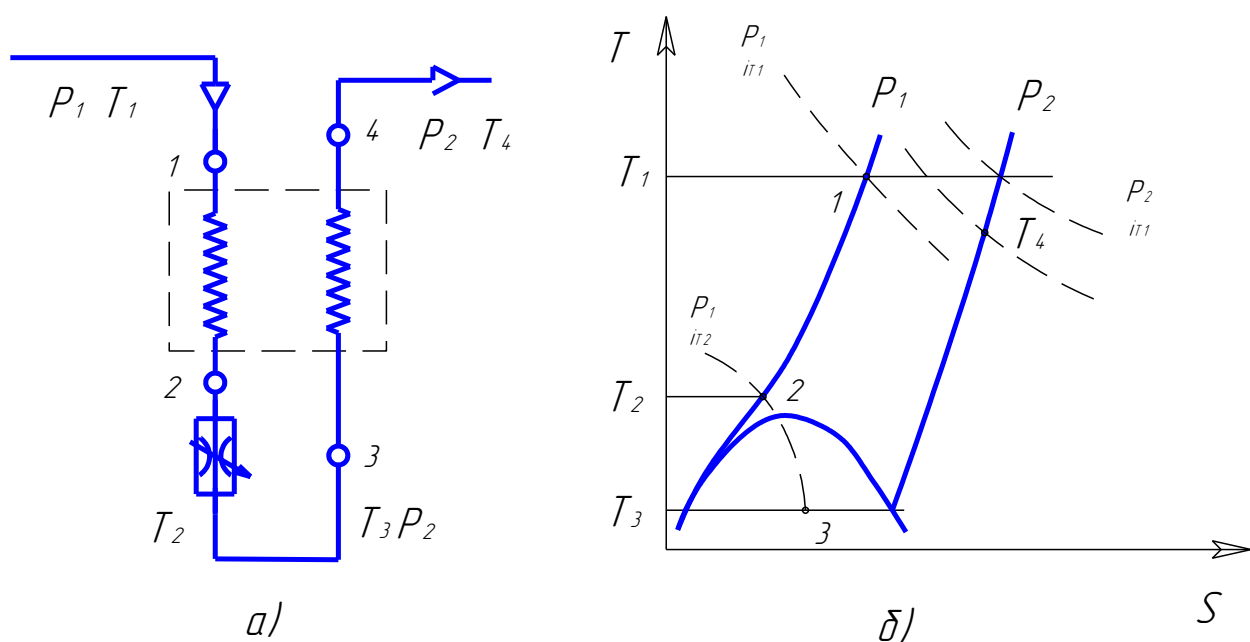


Рисунок 1.17 – Схема теплообменника типа «труба в трубе» в процессе дросселирования газов в $T-S$ диаграмме[21].

Во многих охлаждающих устройствах основанных на эффекте Джоуля – Томсона, газ после дросселирования возвращается в теплообменник, где он отнимает тепло от газа высокого давления, поступающего к дросселю. Вследствие этого дросселирование в теплообменнике происходит не при температуре, T_1 а при более низкой T_2 и может заканчиваться в области влажного пара. Температура в конце процесса дросселирования в этом случае будет равняться температуре кипения сжиженного газа при давлении P_2 .

Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРОССЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

2.1 Создание расчетной модели

2.1.1 Построение расчетной модели

Построение расчетной модели осуществляется в программе Gambit. На первом этапе построения модели будут построены точки контура канала. Затем на их базе будут получены границы расчетной области с помощью дуг окружности, отрезков и сплайнов, которые станут основой для создания поверхностей двумерной расчетной модели.

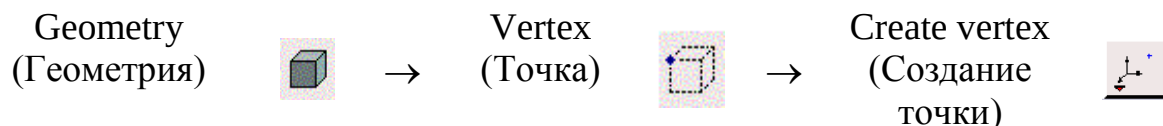
Таблица 2.1 - Координаты профиля исследуемого канала

х, мм	у, мм
0	-9
-9	-20,5
-9	11,5
-25	-20,5
-25	11,5
0	0
50	0
50	-9
59	-20,5
59	11,5
191	-20,5
191	11,5
Входная часть	
Координата Х центра скругления верхней кромки, мм	2
Координата Y центра скругления верхней кромки, мм	15
Радиус входной окружности r_1 , мм	16
Координата Х центра скругления нижней кромки, мм	2
Координата Y центра скругления нижней кромки, мм	-24
Радиус выходной окружности r_2 , мм	4,5
Выходная часть	
Координата Х центра скругления верхней кромки, мм	48
Координата Y центра скругления верхней кромки, мм	15
Радиус входной окружности r_1 , мм	16
Координата Х центра скругления нижней кромки, мм	48

Координата Y центра скругления нижней кромки, мм	-24
Радиус выходной окружности r_2 , мм	4,5

2.1.2 Построение базовых точек.

С помощью команды вызывается меню построения точек по координатам:



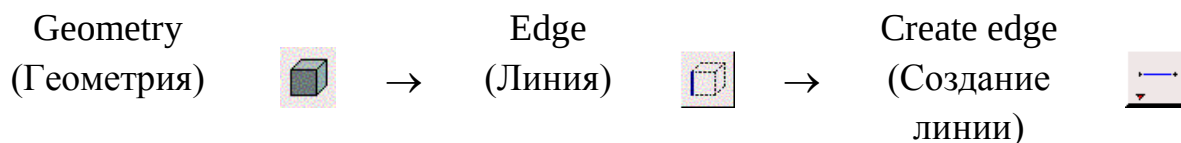
В появившемся меню в поле Global (в глобальной системе координат) следует поочередно ввести координаты всех точек в соответствии с таблицей 4.1. Например вводятся координаты первой точки (921;0), и затем они подтверждаются нажатием кнопки Apply. Аналогичным образом следует ввести все точки из таблицы координат профиля канала. В случае совершения ошибки действие можно отменить с помощью кнопки  («отмена»). Увидеть все построенные точки можно с помощью кнопки  («вписать в экран»). Результат построения изображен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 - Построенные базовые точки профиля

2.1.3 Построение контура профиля канала

Профиль канала образован двумя дугами окружностей (входная кромка) и отрезками. Начинать построения удобно с отрезков. Для этого нужно вызвать соответствующее меню командой:



Для построения контура канала необходимо с помощью мыши и нажатой клавиши Shift выбрать соответствующие точки в порядке следования. Для принятия действия нужно нажать кнопку Apply. Результат действия показан на рисунке 2.3.

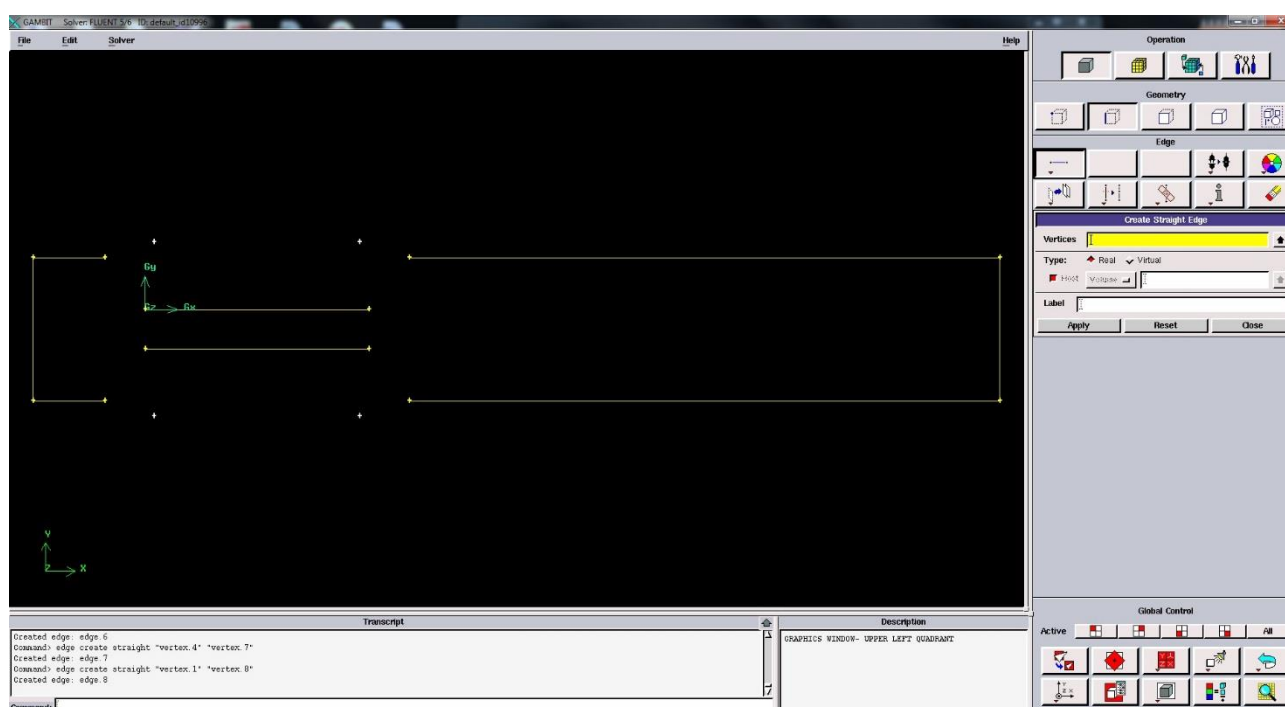
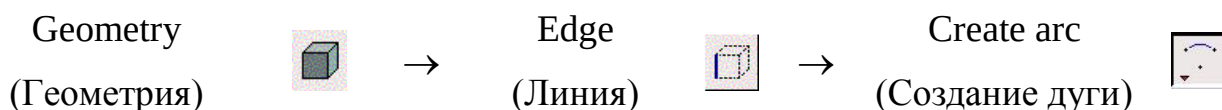


Рисунок 2.3 - Меню построения линий и результат построения канала

Следующим этапом строятся дуги, образующие кромки входного и выходного канала. Для этого нужно вызвать меню построения дуг (рисунок 2.4):

В этом меню нужно выполнить следующие действия:



- в графе Method нужно выбрать метод построения (по центру и двум точкам);

- в поле Center выбрать центр окружности входной кромки;
- в поле End-points выбрать соседние точки входной кромки;
- поле Arc оставить без изменений;
- запустить команду с помощью кнопки Apply.

Результат выполнения команды показан на рисунке 4.5.

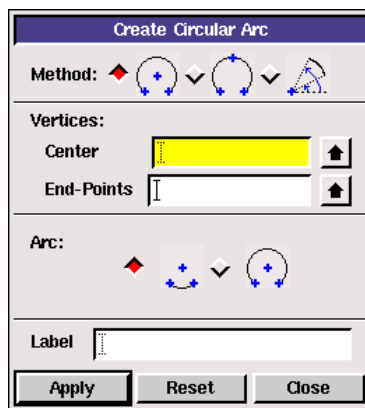


Рисунок 4.4 - Меню построения дуги

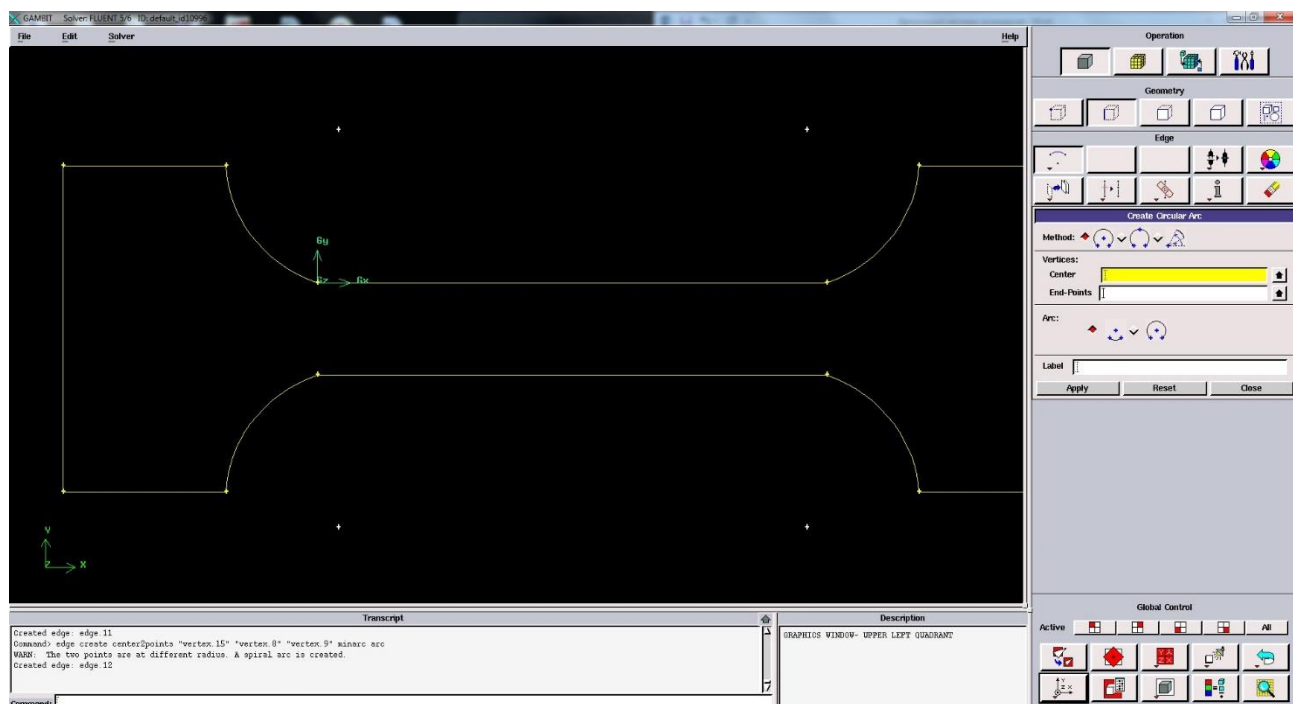
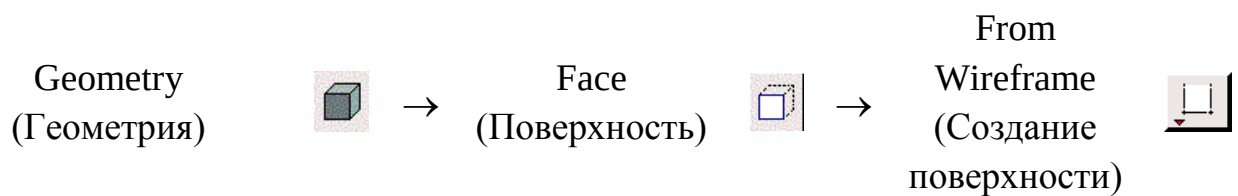


Рисунок 4.5 - Результат построения дуг

2.1.4 Построение поверхности

Основой для построения конечно-элементной сетки двумерной модели является поверхность. Она строится с помощью меню построения поверхности (рисунок 2.6):



В появившемся меню необходимо поставить курсор в окно Edges и с помощью мыши выбирать линии, образующие замкнутый контур расчетной области. Для построения поверхности следует нажать кнопку Apply. В результате линии контура модели поменяют цвет.



Рисунок 4.6 - Меню построения поверхности по линиям

2.1.5. Указание граничных поверхностей

Для выхода в меню задания граничных условий (рисунок 2.7) следует нажать следующие кнопки в главном меню:

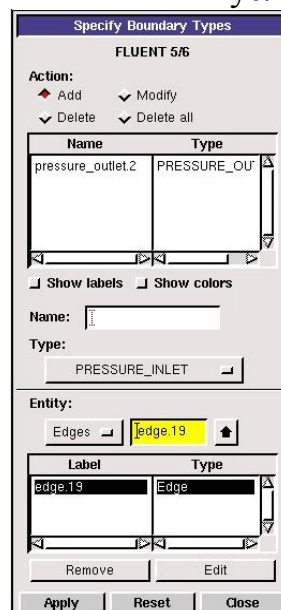
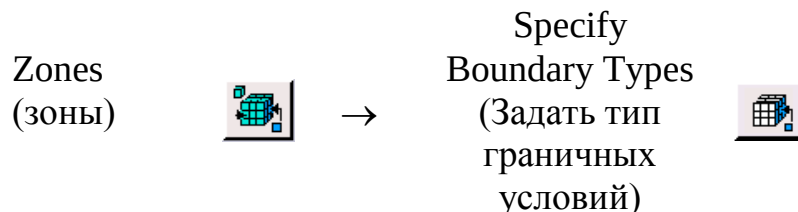


Рисунок 2.7 - Меню задания граничных условий

В данном меню необходимо установить граничное условие pressure inlet (давление на входе) и граничное условие pressure outlet (давление на выходе). Результат построения граничных условий показан на рисунке 2.8. На остальных ограничивающих модель поверхностях, которые не были отмечены как граничные, по умолчанию будет установлено граничное условие стенки (Wall).

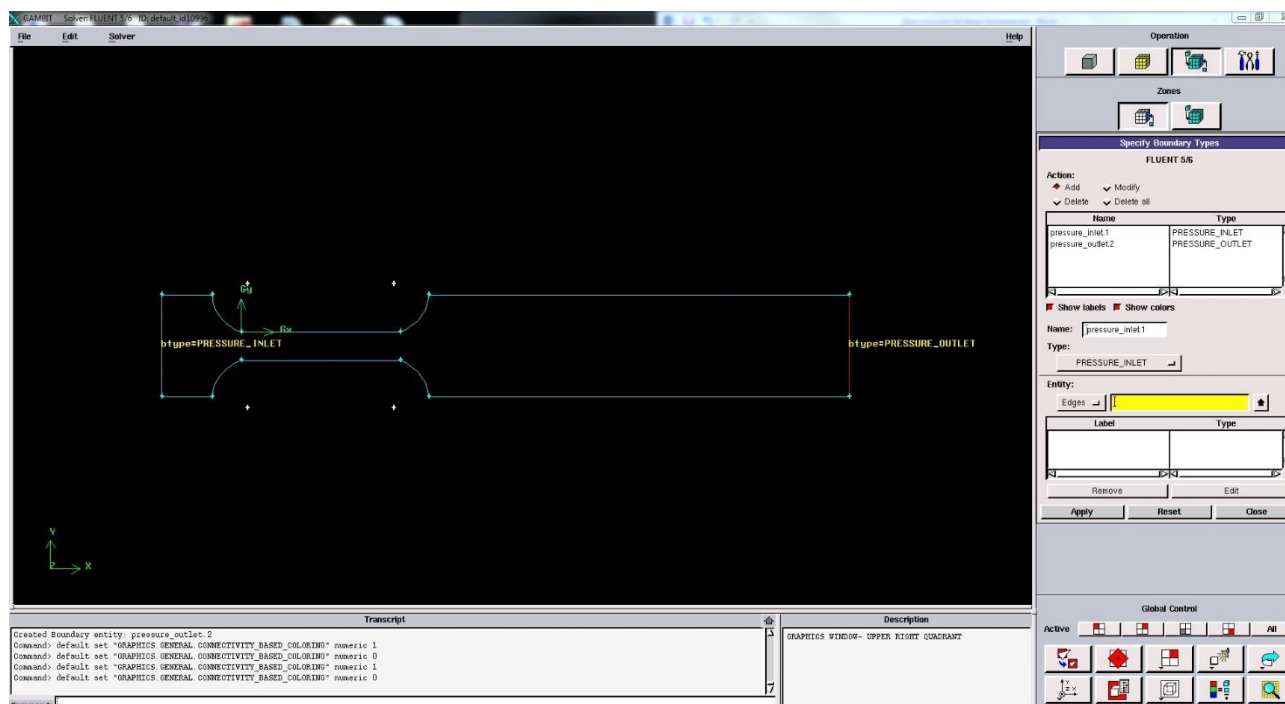
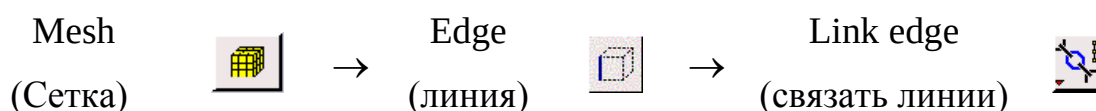


Рисунок 2.8 - Результат задания граничных условий

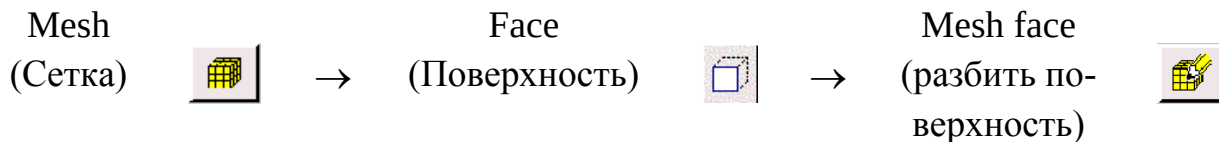
2.1.6 Построение конечно-элементной сетки

Для корректного задания периодического граничного условия необходимо, чтобы данные границы имели связанную конечно-элементную сетку. Установить связь можно с помощью команды:



В появившемся диалоговом окне с помощью мыши необходимо выбрать пару периодических элементов, например боковые линии входной области, и подтвердить выполнение команды нажатием кнопки Apply.

Для решения данной задачи с достаточной точностью можно использовать неструктурированное разбиение исследуемого канала. Разбиение поверхности осуществляется с помощью команды:



В результате появится меню, изображенное на рисунке 2.9.

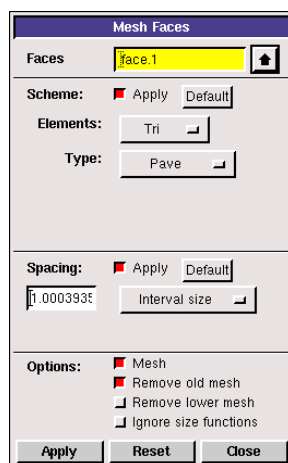


Рисунок 2.9 - Меню построения сетки

В нем следует провести следующие манипуляции:

- В поле Face надо выбрать поверхности, которые будут разбиваться.
- В поле Elements выбирается тип конечного элемента Quad (четырёхугольный), Tri (треугольный) или Quad/Tri (смешанный).
- В поле Type выбирается схема Pave, по которой производится разбиение.
- В поле Spacing (рисунок 2.9) вводится требуемый размер конечного элемента (например, 1мм).
- Для построения конечно-элементной сетки с выбранными параметрами нужно нажать кнопку Apply.

Результат выполнения команды показан на рисунке 2.10.

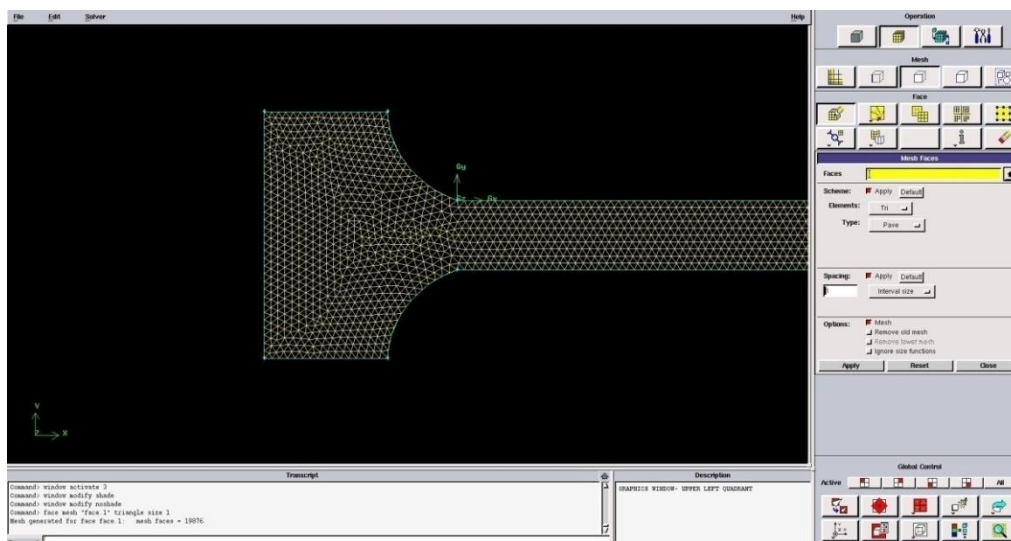


Рисунок 2.10 - Результат построения треугольной неструктурированной конечно-элементной сетки

Для получения более точных расчетов предлагается загустить конечно-элементную сетку только в местах с большими градиентами параметров. Данное действие выполняется с помощью меню Size Function (рисунок 2.11.), которая вызывается командой:

Tools (установки)  → Size function (Функция размера) 

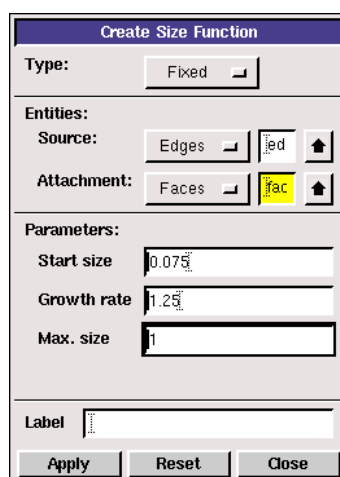


Рисунок 2.11 - Меню Size Function

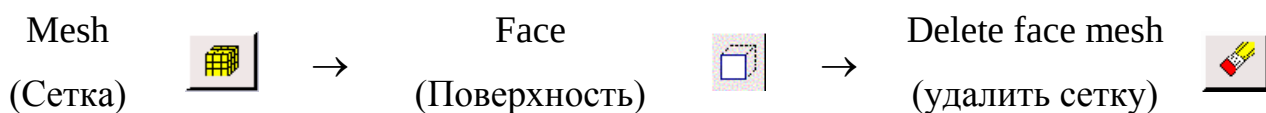
В появившемся окне в поле Source нужно описать, что источником сгущения будет линия Edges. Затем с помощью мыши следует выбрать линии,

рядом с которыми будет осуществляться сгущение. В рассматриваемом случае это стенки канала.

В поле Attachment следует выбрать элемент, к которому будет применена функция размера. В рассматриваемом случае это поверхность расчетной модели. Поэтому в списке нужно выбрать Face и с помощью мыши отметить поверхность расчетной области.

В поле Start size вводится размер конечного элемента вблизи поверхности сгущения, например, 0,075 мм. В поле Growth rate задается - во сколько раз ячейки $i+1$ -го ряда больше ячеек i -го ряда (например 1,25). В поле Max.size вводится максимальный размер конечно-элементных ячеек, после которых загущение прекращается (например, 1 мм). Для применения введенных настроек следует нажать кнопку Apply.

Увидеть действие команды Size Function можно, вновь построив сетку на поверхности модели так, как это делалось ранее. Перед этим необходимо удалить построенную раньше сетку с помощью команды:



С помощью мыши выбирается поверхность, с которой нужно удалить сетку. Кнопку Remove unused lower mesh следует оставить нажатой. Это удалит разбиение на конечные элементы граней (связь разбиения нарушена не будет). Для подтверждения команды удаления нужно нажать кнопку Apply. Результат разбиения расчетной области треугольной неструктурированной сеткой с учетом Size Function показан на рисунке 2.12.

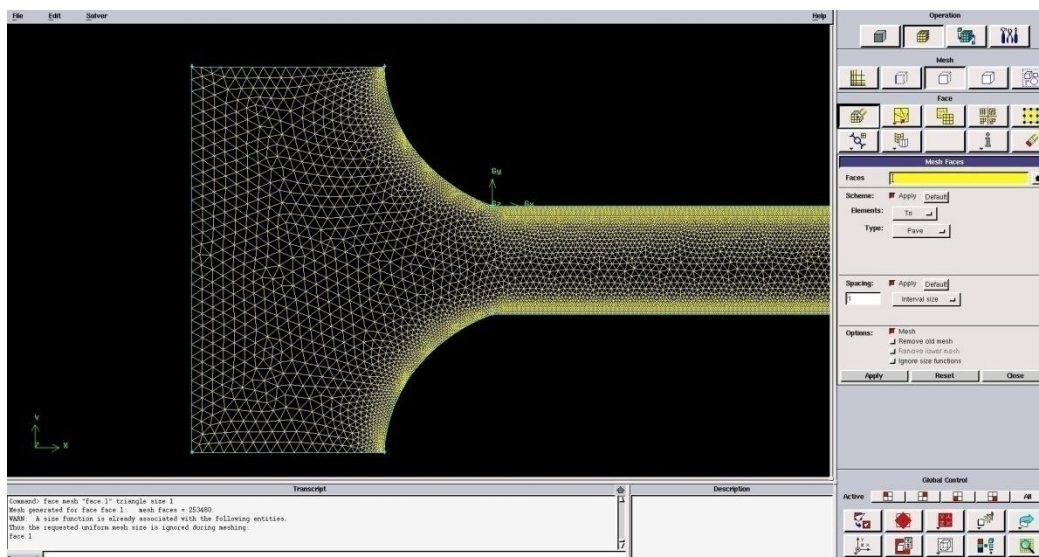


Рисунок 2.12 - Результат построения треугольной неструктурированной конечно-элементной сетки со сгущением вблизи стенок

2.1.7 Передача построенной расчетной модели во Fluent

Для экспорта созданной модели в верхнем меню нужно выбрать следующие пункты:

BM: File → Export → Mesh.

В появившемся окне нужно ввести имя файла обмена и с помощью кнопки Browse можно выбрать место, где файл необходимо сохранить. Поскольку расчетная модель двухмерная, то обязательно следует нажать кнопку Export 2D (X-Y) Mesh и затем нажать кнопку Accept.

2.1.8 Закрытие программы Gambit

Данное действие осуществляется командой:

BM: File → Exit.

2.2 Расчет и анализ полученных данных

Запускается программа Fluent и непосредственно в ней выполняются все остальные действия:

2.2.1 Чтение расчетной модели, созданной в программе Gambit

Для выполнения данной команды необходимо в главном меню выбрать:

ГМ: File → Read → Mesh.

В появившемся стандартном окне проводника ОС «Windows» нужно найти место, где был сохранен файл обмена, выбрать его и подтвердить выбор кнопкой ОК.

2.2.2 Проверка конечно-элементной сетки на наличие ошибок

Осуществляется с помощью команды:

ГМ: Mesh → Check.

Если будет найдена ошибка, то будет выдано соответствующее сообщение. В этом случае необходимо вернуться в программу Gambit, найти ошибку и исправить ее.

2.2.3 Масштабирование конечно-элементной сетки

Так как модель канала была выполнена в модуле Gambit, а размеры расчетных моделей в программе Fluent должны быть обязательно заданы в метрах, то необходимо построенную сетку уменьшить в 1000 раз. Для этого в программе вызывается из главного меню специальная команда (рисунок 2.13):

ГМ: Mesh → Scale.

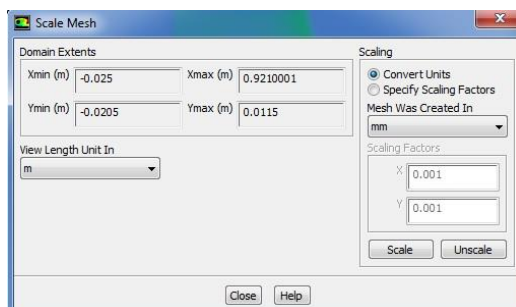


Рисунок 2.13 - Меню Scale Mesh

В меню Scale Mesh в поле Mesh was created in (сетка была создана в ..) нужно выбрать миллиметры mm (или другую единицу измерения, в которой была создана расчетная модель), а затем нажать кнопку Scale. Масштабирование будет выполнено. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки Close.

2.2.4 Просмотр конечно-элементной сетки

Для просмотра конечно-элементной сетки исследуемой модели можно с помощью команды:

ГМ: Display → Mesh.

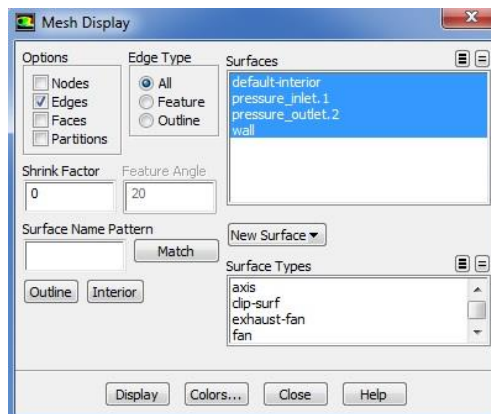


Рисунок 4.14 - Меню Mesh Display

В окне Surfaces (рисунок 2.14) требуется выбрать все граничные поверхности, которые пользователь хочет просмотреть. После выполнения данных манипуляций нужно нажать кнопку Display. В результате появится в графическом окне расчетная сетка (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 - Результат отображения расчетной сетки

2.2.5 Задание опций решателя

При решении данной задачи необходимо выбрать решатель, с помощью которого будет проводиться решение. Этот выбор осуществляется с помощью команды Solver:

ГМ: Define → General.

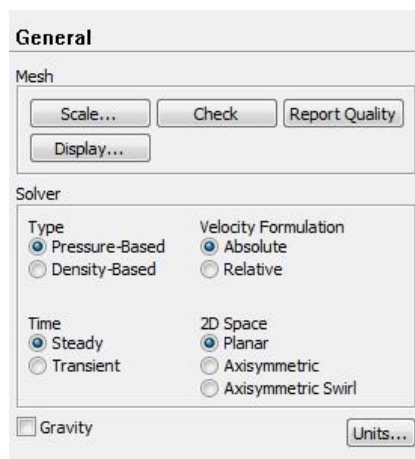


Рисунок 2.16 - Меню Solver

И в этом меню (рисунок 2.16) необходимо установить следующие настройки:

в поле Solver следует выбрать алгоритм решения для решения рассматриваемой задачи целесообразно выбрать Pressure Based;

в поле 2D Space выбирается Planar - плоская;

в поле Time устанавливается, что решение данной задачи будет стационарным Steady или переходящий Transient (в данной задаче - Steady).

2.2.6 Учет в расчете уравнения энергии

При решении данной задачи газодинамики необходимо обязательно учитывать изменение температуры потока и теплообмен. Поэтому следует подключить к решению уравнение энергии с помощью команды:

ГМ: Define → Models → Energy.

В окне этой программы необходимо поставить галочку в строке Energy Equation и нажать ОК.

2.2.7 Определение модели турбулентности

Для задания модели турбулентности необходимо выбрать команду:

ГМ: Define → Models → Viscous.

Для решения задачи в списке моделей турбулентности необходимо выбрать модель турбулентности k-ε (k-epsilon). В появившемся меню отмечается модель RNG и для учета тепла, выделяющегося от вязкого трения слоев газа, ставится галочка в графе Viscous Heating.

2.2.8 Задание свойств рабочего тела

Данная операция осуществляется в меню Materials (рисунок 2.17):

ГМ: Define → Materials.

Рабочим телом в данной задаче является азот, который необходимо добавить из базы Fluent (Fluent Database) и нажать клавишу Copy (рисунок 2.18). При решении задач с эффектом Джоуля - Томсона нельзя использовать модель идеального газа. Поэтому в меню Materials в списке Density нужно выбрать пункт real-gas-redlich-kwong.

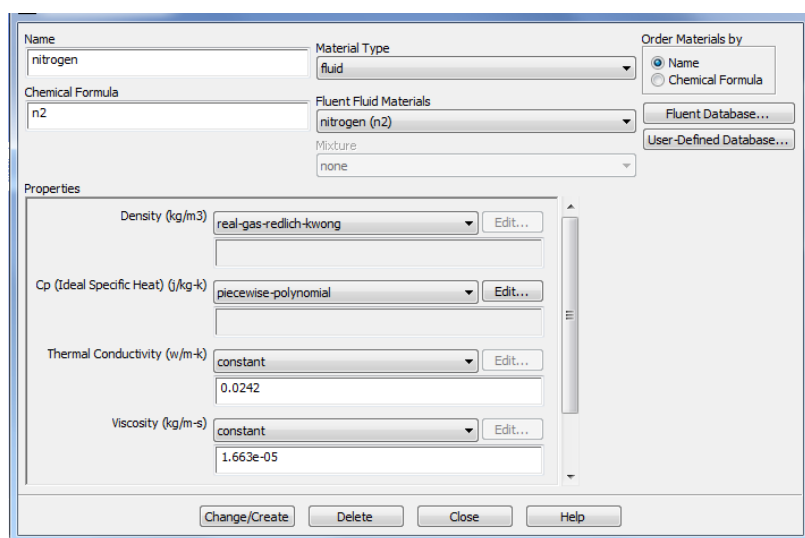


Рисунок 2.17 - Меню Materials

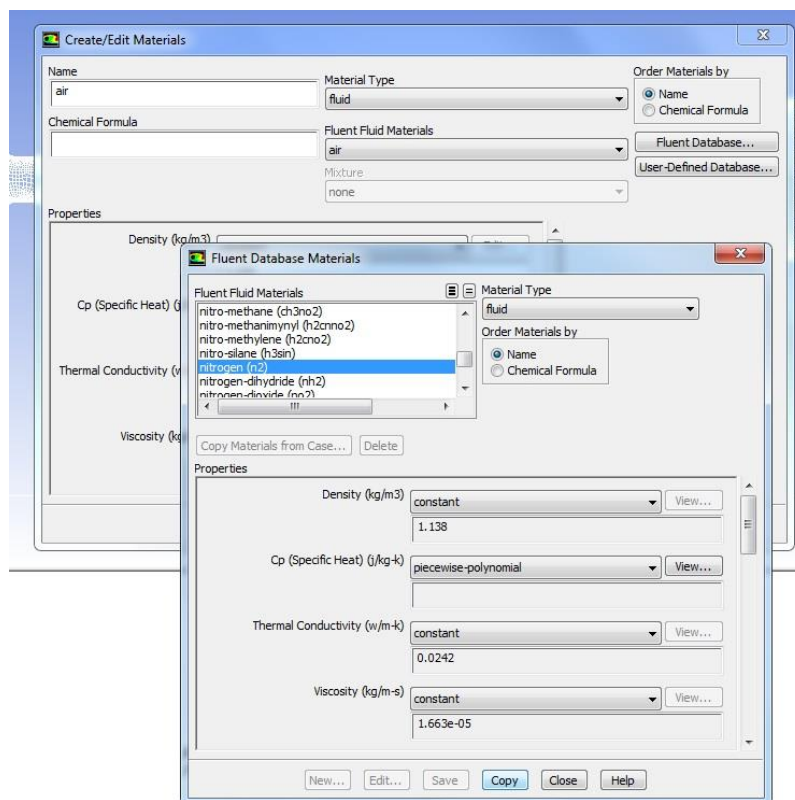


Рисунок 2.18 - Меню Fluent Database

Зависимость вязкости от температуры чаще всего задается в виде уравнения Сатерленда:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{273 + C}{T + C}.$$

Чтобы это описать в программе в меню Materials в списке Viscosity нужно выбрать пункт Sutherland. Все изменения свойств рабочего тела сохраняются нажатием кнопки Change/Create. После завершения операции меню необходимо закрыть с помощью кнопки Close.

2.2.9 Задание справочного давления

В качестве «справочного давления» следует принять 0, для того чтобы результаты расчета и исходные данные задавались в абсолютных значениях. Изменить значение «справочного давления» можно в меню, которое появится в результате выполнения команды:

ГМ: Define → Operating Condition.

Для упрощения обработки результатов в решаемой задаче целесообразно принять «справочное давление», равное нулю, и ввести его значение в поле Operating pressure.

2.2.10 Задание граничных условий

С помощью команды Boundary Condition вызывается меню задания граничных условий (рисунок 2.19):

ГМ: Define → Boundary Condition.

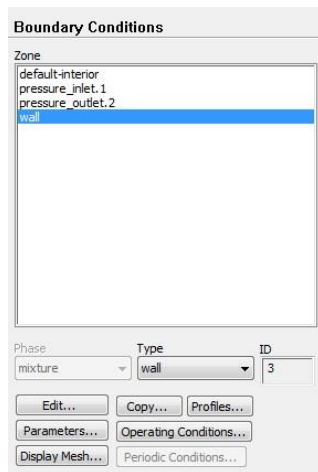


Рисунок 2.19 - Меню Boundary Condition

Затем в окне Zone выбрать нужное граничное условие, убедиться, что в окне Type тип граничного условия указан верно, и нажать Set. Как отмечалось выше, в рассматриваемой задаче будут заданы следующие условия:

- на выходной границе задается статическое давление, равное противодавлению, которое зарегистрировано в ходе эксперимента;
- на входной границе задается полное давление, равное атмосферному;
- на стенках канала задается условие теплового обмена.

Входное граничное условие «давление на входе» - (pressure-inlet) задается в следующей последовательности (рисунок 2.20):

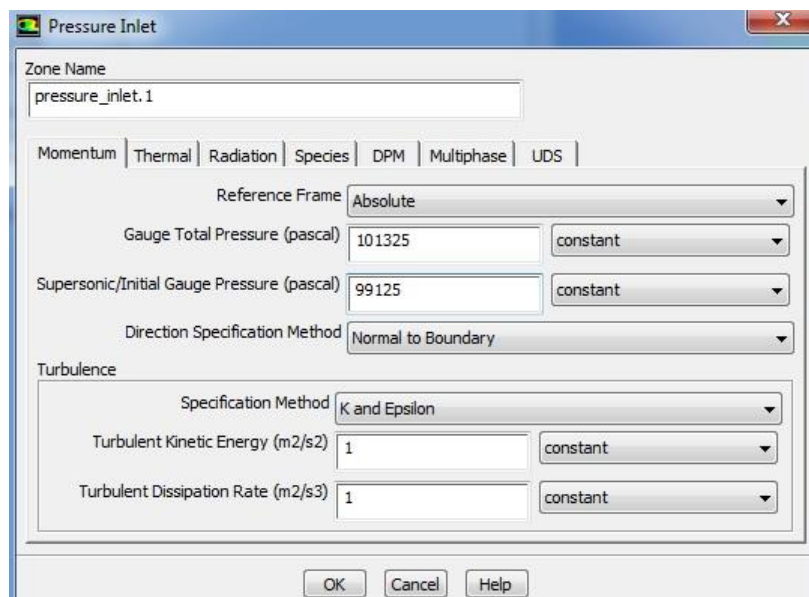


Рисунок 2.20 - Меню Pressure inlet

В поле Gauge Total Pressure вводится значение полного давления на входе в расчетную область. В рассматриваемой задаче оно равно значению в соответствии с таблицей 2.2.

Таблица 2.2 – Давление и температура на входе

Вариант	Р, МПа	T_1, K .
1	1,2	283
2	1,5	285
3	2	287
4	2,2	290
5	2,5	291
6	3	293
7	3,2	295
8	3,5	297
9	4	300
10	4,2	300
11	1,6	283
12	1,75	285
13	1,8	287
14	2,3	290
15	2,1	291
16	2,8	293
17	2,7	295
18	3,2	297

19	2	280
20	2,5	290

В поле Supersonic Gauge Pressure задается статическое давление потока для данного случая. Скорость потока на входе в канале равна нулю и поэтому в данном поле давление равно давлению на входе.

В поле Direction Specification Method определяется направление вектора скорости на входной границе, который в данном случае нормален к входной границе. Поэтому в поле Direction Specification Method выбирается пункт Normal to Boundary (перпендикулярно границе).

Для задания полной температуры потока на входе нужно в верхней части меню нажать на закладку Thermal, а в ставшем доступном поле Total Temperature ввести значение температуры в соответствии с таблицей 2.2.

Аналогичные настройки выполняются для задания граничного условия на выходной границе в меню Boundary Condition, где нужно выбрать имя данной границы и нажать кнопку Set. Это вызовет появление меню Pressure Outlet (рисунок 2.21), в котором необходимо произвести настройки аналогичные Pressure-inlet.

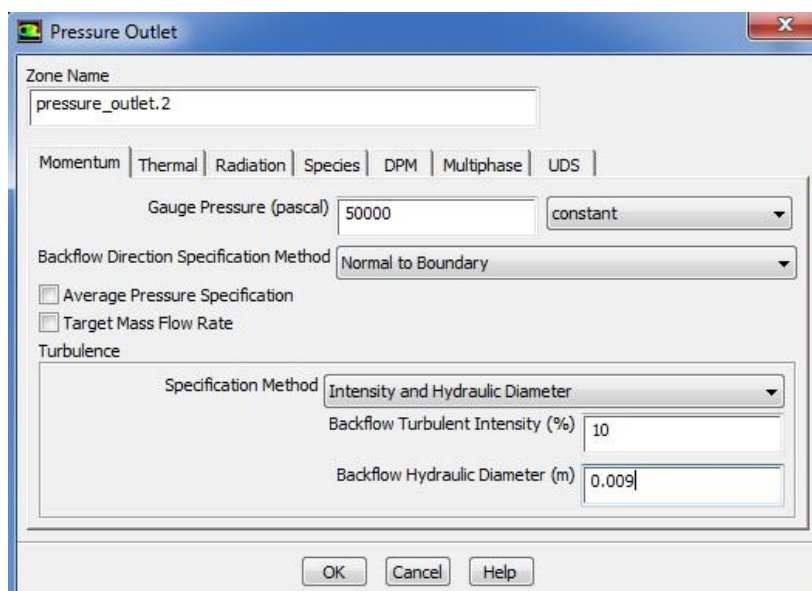


Рисунок 2.21 - Меню Pressure Outlet

2.2.11 Установка параметров счета

Меню установки параметров счета вызывается с помощью команды:

ГМ: Solve → Methods.

На экране монитора появится меню Solution Methods (рисунок 2.22).

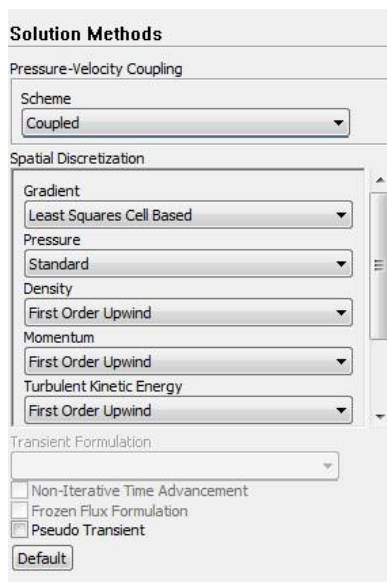


Рисунок 2.22. Меню Solution Methods

В этом меню необходимо выполнить следующие настройки:

В зоне Spatial Discretization следует в начале расчета установить первый порядок дискретизации, затем его повышать.

В зоне Pressure-Velocity Coupling для решения задачи течения в исследуемом канале целесообразно выбирать алгоритм Coupled, а для улучшения устойчивости и сходимости число Куранта (Courant number) уменьшить до 50.

2.2.12 Установка начальных значений параметров

Меню установки начальных условий (рисунок 2.23) вызывается командой:

ГМ: Solve → Initialization.

В поле Compute From данного меню необходимо выбрать входную границу. В результате рекомендуемые значения начальных параметров будут рассчитаны по входным граничным условиям. Для их принятия следует нажать Initialize.

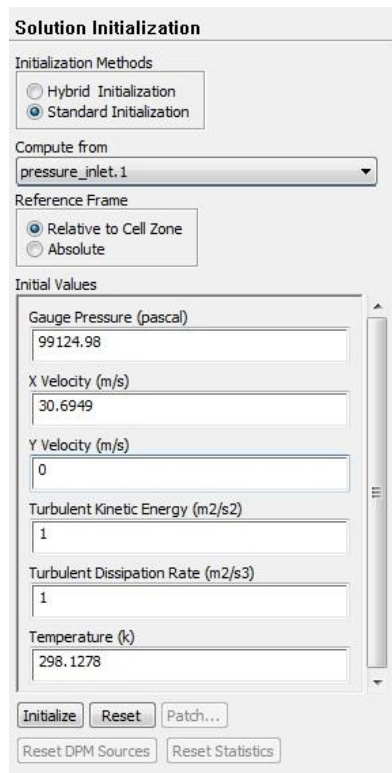


Рисунок 2.23 - Меню установки начальных значений параметров

2.2.13 Настройка отображения процесса решения

Для мониторинга невязок в процессе расчета, а также для задания критерия остановки решения, необходимо вызвать меню Residual Monitors (рисунок 2.24) с помощью команды:

ГМ: Solve → Monitors → Residual.

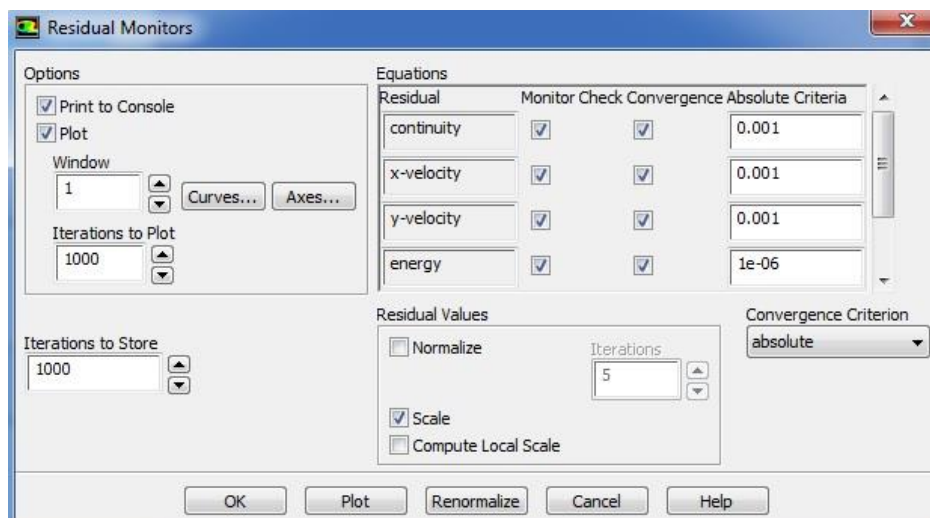


Рисунок 2.24 - Меню Residual Monitors

В поле Option необходимо поставить галочки напротив слов Plot и Print, что позволит наблюдать невязки на экране. В поле Convergence Criterion для получения достаточно точного решения каждого уравнения, необходимо установить величину невязок 10^{-3} (кроме 10^{-6} по уравнению энергии).

2.2.14 Сохранение расчетной модели

Осуществляется с помощью вызова команды:

ГМ: File → Write → Case.

Затем в появившемся окне проводника необходимо выбрать область, куда будет сохранена модель и ее имя.

2.2.15 Запуск решения

Осуществляется с помощью выбора команды:

ГМ: Solve → Run Calculation.

В поле Number of Iteration вводится число итераций (например, 1000), а затем нажимается кнопка Calculate. После запуска решения в графическом окне появится зависимость невязок от номера итерации для каждого уравнения (рисунок 2.26). Как только значения невязок по каждому из уравнений достигли заданных величин, то сразу же программа Fluent остановит решение и в окне сообщений выдаст сообщение solution is converged.

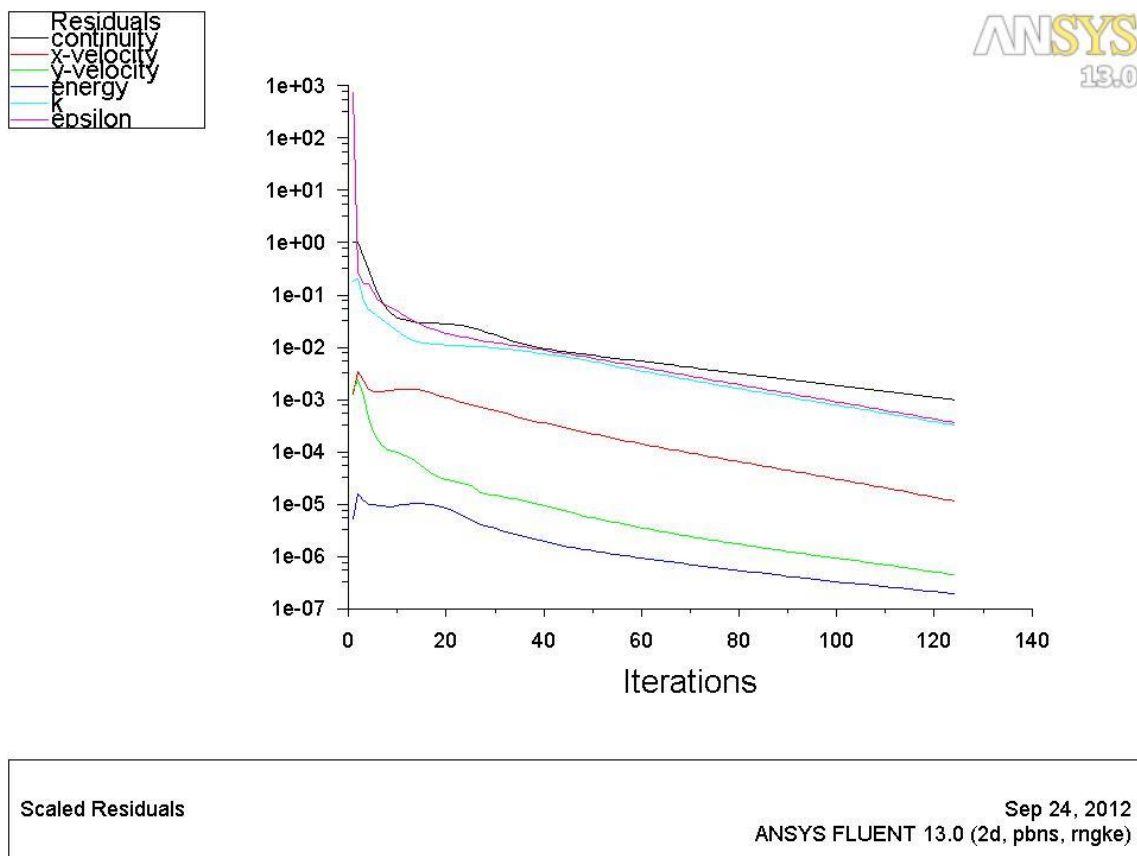


Рисунок 2.26 - Изменение невязок по итерациям

2.2.17 Визуализация полей распределения параметров в расчетной области

Для этого запускается команда:

ГМ: Display → Contours.

В результате ее выполнения появится меню Contours (рисунок 2.27). В окошке данного меню Filled необходимо поставить галочку, чтобы наблюдать поля распределений параметров, а затем выбрать в поле Contours of параметр, изменение которого требуется отобразить. Таким образом, выполняя необходимые настройки в данном меню, следует получить поля распределений полного и статического давлений, температур в канале (рисунок 2.28...2.30).

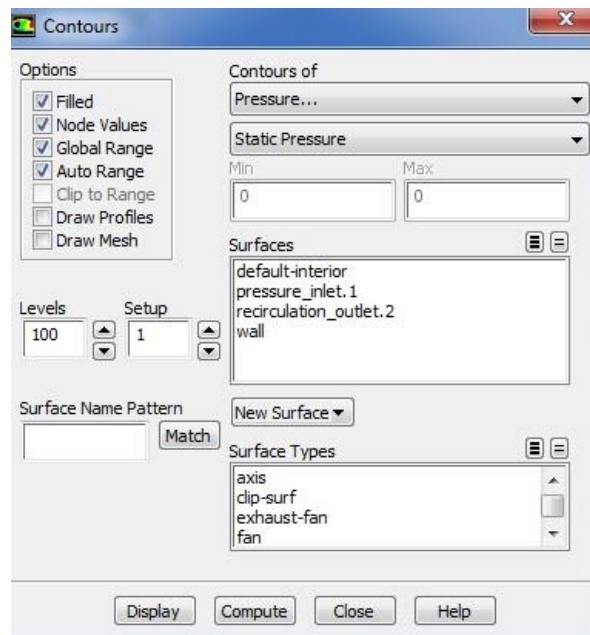


Рисунок 2.27 - Меню Contours

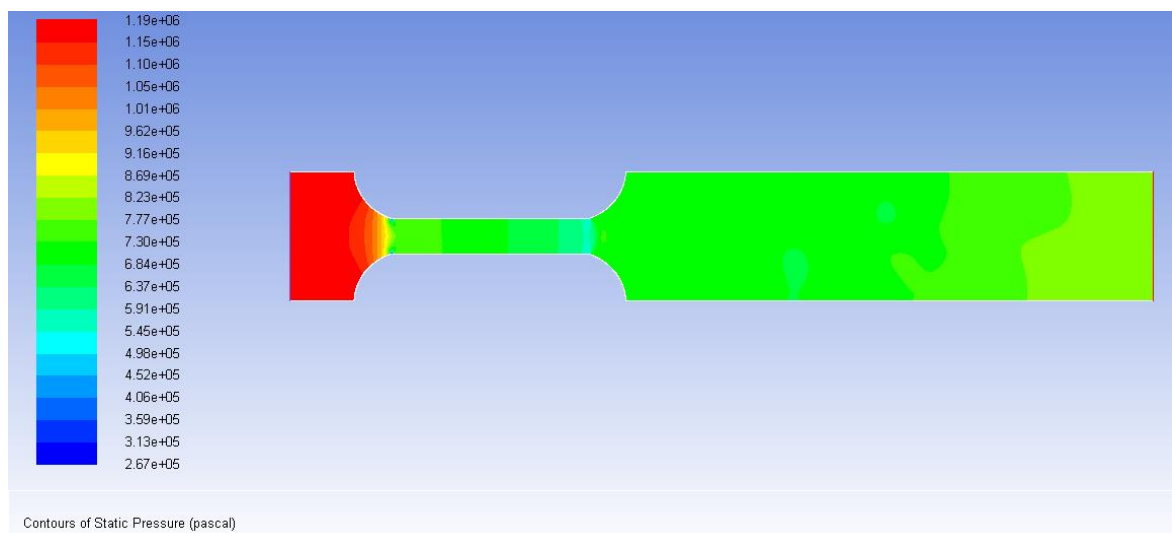


Рисунок 2.28 - Поле статических давлений в канале

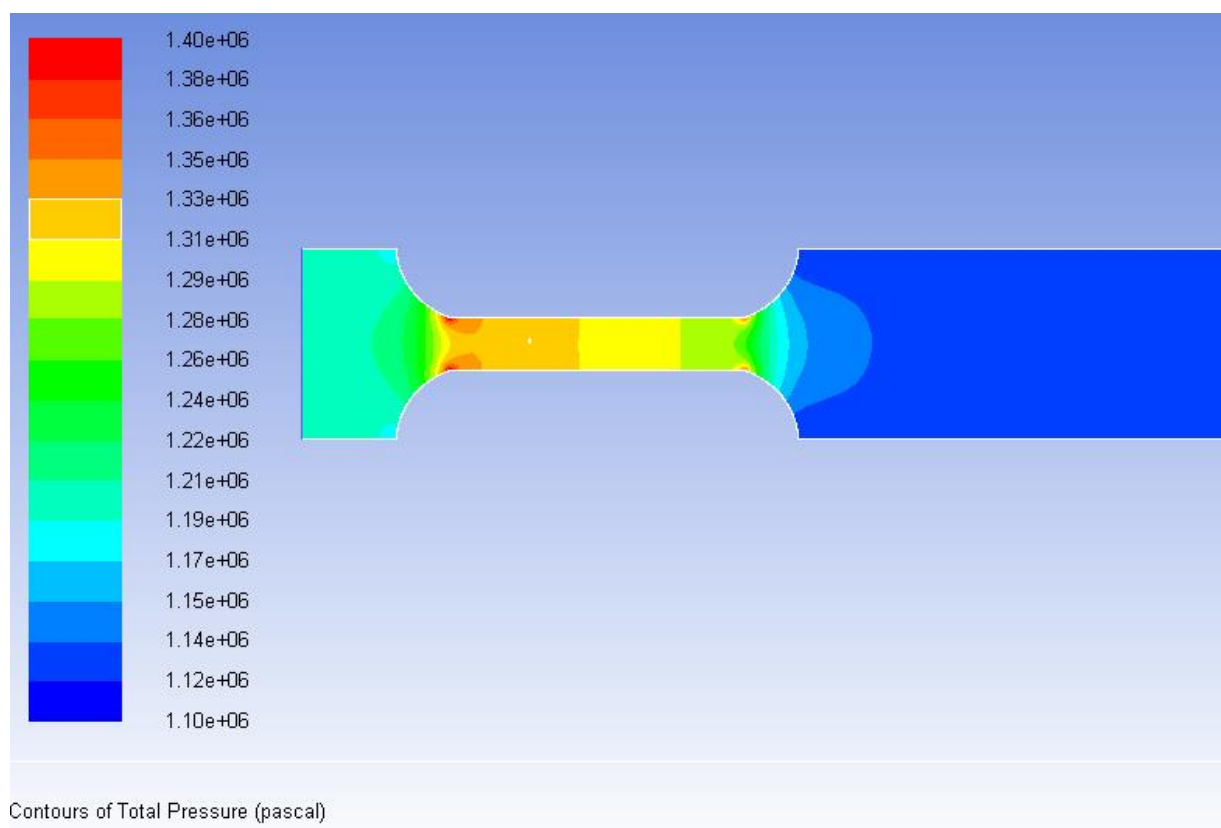


Рисунок 2.29 - Поле полных давлений в канале

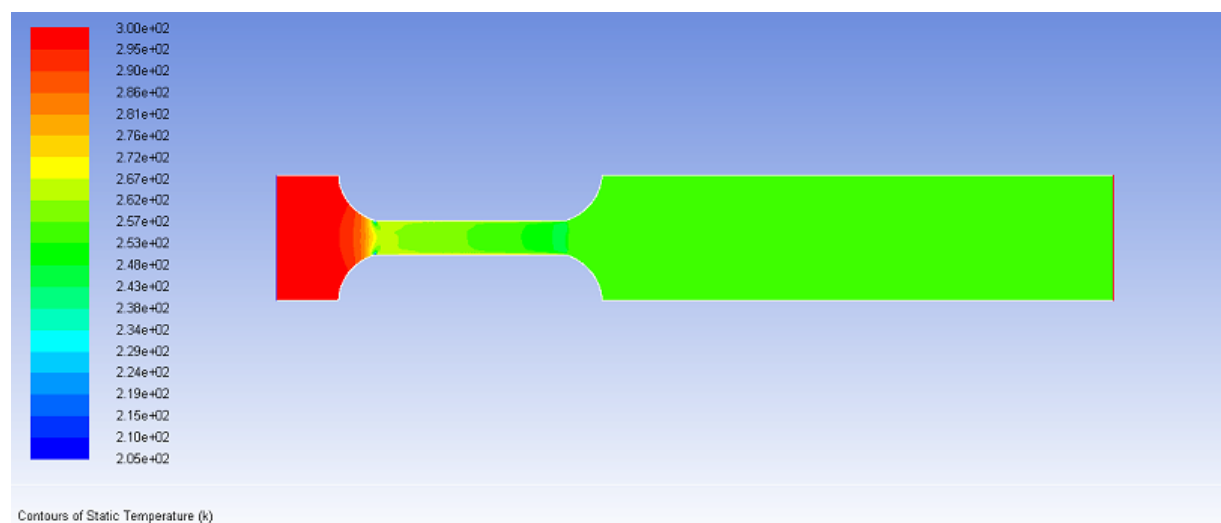


Рисунок 2.30 - Поле статических температур в канале

Заключение

В данном пособии рассмотрено современное состояние развития бортовых систем охлаждения аэрокосмического назначения, а также рассмотрены принципы выбора их типа для обеспечения необходимого температурного режима работы различных устройств и систем на борту ЛА.

Подробно рассмотрены теоретические основы работы дроссельной системы охлаждения замкнутого и баллонного типов, а также рассмотрены вопросы повышения их эффективности.

В качестве нового элемента баллонной дроссельной СО предложена емкость с криогенной заправкой, что позволяет получать криопродукт в однофазном состоянии и значительно улучшить эффективность ДСО.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчёта параметров рабочего тела в баллоне с криогенной заправкой (БКЗ) в составе дроссельной системы охлаждения позволяющая прогнозировать состояние рабочего тела и обеспечивать необходимыми данными испытания БКЗ в его производстве и эксплуатации. Теоретически и экспериментально доказана возможность, и перспективность применения БКЗ для систем охлаждения бортовых комплексов летательных аппаратов.

В пособии приведены примеры расчёта дроссельного холодильника и его теплообменного аппарата, которые позволяют самостоятельно рассчитать основные параметры аналогичных систем охлаждения.

Список литературы

1. Архаров, А.М. Криогенные системы: основы теории и расчёта [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.
2. Архаров, А.М. Низкотемпературные газовые машины (криогенераторы) [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1969. – 224с.
3. Фрадков, А.Б. Гелиевые и водородные криостаты без дополнительного охлаждения жидким азотом [Текст] / А.Б. Фрадков // Приборы и техника эксперимента», 1961, № 4.– С 25-35.
4. Красночуб, Е.К. Микрокриогенные системы охлаждения космических летательных аппаратов инфракрасного наблюдения на основе микрокриогенных систем [Текст] / Е.К. Красночуб // Полет. – Самара, 2004. – №11. – С. 41-48.
5. Бродянский, В.М. Методика расчёта схем криогенных установок [Текст] : учеб.пособие / В.М. Бродянский, А.Г. Ташина. – М.: Моск. энергетич. инст., 1972. – 86 с.
6. Новотельнов, В.Н. Криогенные машины [Текст] / В.Н. Новотельнов, А.Д. Суслов, В.Б. Полтараус. – Спб.: Политехника, 1991. – 335 с.
7. Mc Cormick, J.A. Progress on the development of miniature turbo machines for low-capacity reverse-Braytoncryocoolers / J.A. Mc Cormick, W.L. Swift, H. Sixsmith // Cryocoolers 9, Plenum Press, New York, 1997.– P.– 475-483.
8. Nellis, G. Reverse Braytoncryocooler for NICMOS / G. Nellis, F. Dolan, J. Mc Cormick, W. Swift, H. Sixsmith, J. Gibbon, S. Castles // Cryocoolers 10, Plenum Press, New York, 1999.–P.–431-438.
9. Gedeon, D. DC gas flows in Stirling and pulse tube refrigerators / D. Gedeon // Cryocoolers 9, Plenum Press, New York, 1997.–P.–385-392.
10. Biberman, L.M. A brief history of imaging devices for night vision / L.M. Biberman, and R.L. Sendall // in Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling, edited by L.M. Biberman, SPIE Press, Bellingham, 2000.–Chapter 1.–P. 11-26.
11. Cryogeniccoolers [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения о фирме «Astrum». – Режим доступа: <http://www.astrum-space.com/>, свободный.

12. Baars J. New aspects of the material and device technology of intrinsic infrared photo detectors / J. Baars // *Physics and Narrow Gap Semiconductors*, edited by E. Gornik, Springer, Berlin, 1982.–P.–280-282.
13. Elliott C.T. An integrating detector for serial scan thermal imaging / C.T. Elliott, D. Day, B.J. Wilson // *Infrared Physics*, 1982.–№2.–P.– 31–42.
14. Köhler J.W.L. Fundamentals of the gas refrigeration machine / J.W.L. Köhler, C.O. Jonkers // *Philips Tech*, 1954.–Rev. 16 №3.–P.– 69-78.
15. Little, W. A. Recent developments in Joule-Thomson cooling: gases, coolers, and compressors / W.A. Little // *Proc. 5th International Conference on Cryocoolers*. Monterey CA, 1988.–№2.– P.–3-11.
16. Кузьменко, Г.П. Разработка и исследование высокопроизводительных теплообменных каналов криогенных испарителей[Текст] / Г.П.Кузьменко, В.К.Орлов, В.Е. Позняк // *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1980.– №3.– С. 13–15.
17. Фастовский, В. Г.,Петровский Ю. В., Ровинекий А. Е. Криогенная техника[Текст]/ А.Г. Надольников, В.Г. Фастовский, Ю.В. Петровский. – М.: изд-во «Энергия», 1967.– 273 с.
18. Скотт, Р.Б. Техника низких температур[Текст] / Р.Б Скотт.–М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 435 с.
19. Radebaugh R. Recent developments in cryocoolers / R. Radebaugh // *Proc. 19th International Congress of Refrigeration*, The Hague, Netherlands, 1995.–№2.–P.– 973-989.
20. Radebaugh, R. A comparison of three types of pulse tube refrigerators: New methods for reaching 60 K / R. Radebaugh, J. Zimmerman, D.R. Smith, B. Louie // *Adv. in Cryogenic Engineering*, Plenum Press, New York, 1986.–Vol. 31.– P.– 779-789.
21. Бамбушек, Е.М. Тепловые и конструктивные расчёты холодильных машин [Текст] / Е.М. Бамбушек [и др.]; общ.ред. И.А. Сакун.– Л.: Машиностроение, 1987. – 422 с.
22. Чумак, И.Г. Холодильные установки [Текст] / И.Г. Чумак [и др.] – М.: Агропромиздат, 1991. – 416 с.
23. Пат. 2163690 Российская Федерация, МПК7F17C9/02, F17T10/06. Топливный баллон [Текст]/Довгялло А.И., Лукачев С.В. и др.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический

университет. - № 99114577/06; заявл. 02.07.1977; опубл. 27.02.2001, Бюл. №6.
– 6 с.

24. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст]: учеб. пособие / В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
25. Сармин, Д.В., Довгялло А.И. Предварительные исследования тепловых процессов в баллоне с криогенной заправкой бортовой дроссельной системы [Текст] / Д.В. Сармин, А.И. Довгялло, Д.А. Угланов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королева. – 2011 – №3 (Ч.4). – С. 78-85. Сармин, Д.В. Имитационные испытания баллона с криогенной заправкой для дроссельной системы охлаждения и ее сравнительные характеристики [Текст] / Д.В. Сармин., С.О. Некрасова Д.А. Угланов, А.И. Довгялло // статья в научно – техническом журнале «Прикладная физика».: – 2013. (В печати).
26. Красночуб, Е.К. Перспективы применения замкнутых дроссельных микрокриогенных систем на борту КА [Текст] / Е.К. Красночуб В.И. Могорычный., А.И. Довгялло // Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике; общ.ред. Козлов Д.И. – Самара: ЦСКБ-прогресс, 2001. – С. 78-183.
27. Сармин, Д.В. Дроссельная бортовая система охлаждения на базе баллона с криогенной заправкой [Текст] / Д.В. Сармин, А.И. Довгялло, Д.А. Угланов // статья в научно – техническом журнале «Прикладная физика». – 2010. – № 6. – С. 75-78.
28. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 716 с.
29. Грезин, А.К. Микрокриогенная техника [Текст] / А.К. Грезин, В.С. Зиновьев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
30. Архипов, В.Т. Оптимизация дроссельных микрокриогенных систем [Текст] / В.Т. Архипов, В.А. Шевченко // Тепло и массообмен в криогенной технике: сб. науч. тр. / Физ.-техн. ин-т низ. Температур. – Киев: Наук. Думка, 1990. – С. 74-80.