

1.2 Состав оборудования

В рамках ВКР (Выпускной квалификационной работы) была составлена ПГС (Пневмо-гидравлическая схема) РСГ, на которой отражены основные единицы оборудования для организации системы криостатирования. Схема представлена в графической части работы (см. ПГС 31.05.00 Приложение А).

Компрессорный агрегат. Для сжатия гелия до давления 2,3 МПа применяется компрессорный агрегат, состоящий из двух винтовых маслозаполненных компрессоров первой ступени (Км100, Км200) и одного винтового компрессора второй ступени (Км300) сжатия. Компрессоры обвязаны современными приборами автоматики для защиты и регулирования их работы: реле давления (PS), датчиками давления (PT) и температуры (TT). В конструкции компрессоров предусмотрено золотниковое регулирование как объемной производительности, так и степени сжатия.

На сжатие гелий поступает из «мягкого» газгольдера (Г501) через фильтры с индикатором (Ф101, Ф201). Давление в газгольдере регулируется регулятором «за собой» (BP501).

Первичная очистка сжимаемого гелия от масла происходит в маслоотделителях (ОМ201, ОМ301), отбиваемое в них масло возвращается в контур подготовки масла, где охлаждается и вновь подается на впрыск в компрессоры.

Для регулирования уровня масла в системе предусмотрен масляный бак (БМ401), оборудованный датчиком (LT401) и реле (LS401) уровня. Наличие масляного насоса (Н401) позволяет как закачивать масло в контур охлаждающего масла, так и откачивать избыток в бак через масляный фильтр с индикатором (Ф401).

Контур подготовки масла содержит дифференцированные водяные маслоохладители для первой и второй ступени сжатия (МО201, МО301). Прокачивание масла по контуру осуществляется масляными насосами, установленными на каждый компрессор отдельно (Н101, Н201 и Н301). Защита насосов реализуется посредством реле протока (FS) и датчиками давления (PT). Визуальный контроль

за состоянием масла в контур производится через смотровые стекла (СС201, С31). Температура охлаждения масла в маслоохладителях регулируется вентилями трехходовыми с электроприводом и датчиками температуры (В207, В305).

Маслоотделители оснащены предохранительными клапанами (ВП201, ВП202 и ВП301, ВП302) аварийного сброса давления в газгольдер. Благодаря резервированию, возможно проведение поверочных и ремонтных работ клапанов без остановки компрессоров.

Очищенный от масла гелий после очередной ступени сжатия поступает на охлаждение в концевой охладитель (ОХ201, ОХ301), температура охлаждения в которых регулируется вентилями трехходовыми с датчиками температуры (В209, В309). В концевом охладителе II ступени гелий дополнительно проходит тонкую очистку от масла.

Сжатый, охлажденный и очищенный от масла гелий поступает в реципиенты (РС301, РС302), оборудованные аварийными клапанами сброса давления в газгольдер (ВП303, ВП304).

Для надежной и длительной эксплуатации требуется поддержание температуры на датчиках (ТТ201 и ТТ301) не более 355 К, а также периодическое обслуживание системы циркуляции масла. Наиболее уязвимым местом компрессора являются подшипниковые узлы, по истечению расчетного ресурса которых следует проводить их замену и комплексную диагностику всего агрегата.

Теплообменное оборудование. Для гелиевых криогенных систем обосновано нашли применение витые теплообменные аппараты с трубками оребренными проволокой. Достоинства витых аппаратов:

- высокий тепловой КПД (Коэффициент полезного действия), стабильная структура теплообменной поверхности и надежность за счет подбора геометрических параметров оребренных труб;

- прочные каналы труб круглого сечения, с возможностью их контроля до намотки;

- малая протяженность паяных и сварных соединений, высокая надежность швов за счет однородности температурного поля;

- самокомпенсация температурных напряжений на свободных концах труб, выходящих из намотки;
- высокая компактность за счет труб малого диаметра без нарушения геометрии структуры теплообменной поверхности;
- работоспособность аппаратов на небольших разностях температур с высоким тепловым КПД за счет устойчивой среднестатистической геометрической характеристики теплообменной поверхности.

В состав РСГ входят 4 витых двухпоточных аппарата: первая ступень охлаждения на номинальном режиме – ТОВА601 (300 ... 80 K); первая ступень охлаждения на пусковом режиме – ТОВА602; вторая ступень охлаждения – ТОВА701 (80 ... 30 K); третья ступень охлаждения – ТОВА702 (30 ... 7 K). Для охлаждения прямого потока от температуры ОС до температуры 6,7 K наиболее оптимально применение трех ступеней охлаждения, поскольку достигаются удачные габаритные параметры для компоновки криогенных блоков наряду с высокими теплообменными характеристиками.

Для охлаждения гелия в период пускового режима применяется азотная ванна с погружным змеевиком. Разработанная конструкция азотной ванны для РСГ представлена в Приложении Б. Конструкция сборника гелия СГ801 также представляет собой ванну с погружным змеевиком с диаметром трубы 12х1. Объем сборника гелия 1000 л.

Очистка гелия. Криогенная система замкнута, поэтому очистка потока требуется после монтажа или ремонта, а также для поглощения примесей вследствие негерметичности. Для очистки циркулирующего гелия низкотемпературной адсорбцией на активированном угле в схему включены адсорберы от примесей азота (воздуха) – А601 и от неона (водорода) – А701.

В предпусковом (азотном) режиме захолаживания адсорберы отсекаются запорными клапанами (КР604, КР605, КР606), и поток циркулирует в обход. На пусковом (гелиевом) режиме захолаживания и на номинальном режиме поток проходит очистку в адсорберах.

Парожидкостной турбодетандер. С целью повышения надежности

работы установки в криогенной системе установлено два детандера (ПЖТД1001, ПЖТД1002). При возникновении аварийной ситуации в течение 10-16 минут в работу включается резервная машина.

Запуск и останов машин автоматизирован, предусмотрены необходимые защитные блоки. Холодопроизводительность машины и частота вращения ротора регулируется изменением начального давления гелия клапанами (КР801, КР802).

1.3 Вариация исполнения, модули

Отличительной особенностью разрабатываемого РСГ является модульность. Благодаря этому оборудование рефрижератора может быть скомпоновано в транспортабельных блоках антресольного исполнения. Оборудование рефрижератора может эксплуатироваться в обогреваемом помещении с температурой от 280 К до 305 К.

На ПГС представлены наиболее значимые модули рефрижератора. Оборудование внутри каждого модуля размещено по принципу «гирлянды» в соответствии с возрастанием температурного уровня по высоте блока. Это позволяет снизить теплопритоки за счет конвективного теплообмена в кожухе блока.

Блоки очистки, охлаждения и ожижения помещены под индивидуальную многослойную вакуумную изоляцию, в которой в постоянном режиме функционирует азотный экран.

Парожидкостные турбодетандеры вынесены в обособленные блоки под индивидуальной изоляцией и азотным экраном. Легкий доступ к машинам позволяет проводить аварийный ремонт и замену вышедших из строя частей без необходимости в остановке и отоплении всей криогенной системы.

Минимальное оснащение рефрижератора по машинной и аппаратной части позволяет обеспечить высокую отказоустойчивость криогенной системы в течение длительного срока эксплуатации, который составляет 20 лет.

2 Описание работы рефрижератора

2.1 Захолаживание магнитов

Захолаживание магнитов осуществляется последовательно в два этапа: предпусковой – азотного захолаживания; пусковой – гелиевого захолаживания. Для описания режимов работы РСГ применяются обозначения с ПГС 31.05.00 (см. Приложение А).

Предпусковой режим. Сжатый и очищенный от примесей масла и влаги гелий в виде двух технологических потоков поступает в блок очистки.

— Первый поток через клапан КР601 поступает в ТОА602, где охлаждается парами азота, а затем проходит змеевик азотной ванны и охлаждается до температуры 80 К. Через клапан КР607 охлажденный поток поступает в блок охлаждения, где последовательно проходит ТОА702 и ТОА701, затем возвращается в блок очистки и проходит ТОА601. Нагретый до температуры ~285 К гелий возвращается на сжатие в блок компримирования. Данный поток регулируется клапаном КР607 по температуре с датчика ТТ602. При температуре $TT602 > 285\text{ К}$ клапан КР607 приоткрывается, при $TT602 < 280\text{ К}$ клапан КР607 прикрывается.

— Второй поток через клапан КР602 подается в линию прямого потока ТОА601, ТОА701 и ТОА702, где охлаждается до температуры 85 – 90 К. Затем поток поступает в блок ожижения и через клапан КР809 проходит змеевик в сборнике гелия СГ801, после этого отправляется через клапаны КР803 (КР804) на охлаждение потребителя – магнитов. Данный поток регулируется клапаном КР809 по допустимому давлению в ванне СГ801 в пределах $PT804 \leq 0,06\text{ МПа}$ (изб.). Для экономии жидкого азота в зависимости от температуры поток от потребителя направляется:

- 1) при $TT703 > 250\text{ К}$ – через клапан КР709 (по тракту В504, ВР502) в блок компримирования;
- 2) при $180\text{ К} < TT703 < 250\text{ К}$ – открыт клапан КР709, закрыты клапаны

КР706, КР707 и КР709 (по тракту В504, ВР502);

3) при $100\text{ K} < TT703 < 180\text{ K}$ – открыт клапан КР706, закрыты клапаны КР709, КР707 и КР709 (по тракту В504, ВР502);

4) при $TT703 \leq 95\text{ K}$ – предпусковой режим заканчивается, клапан КР607 (КР708) начинается пусковой режим.

Пусковой режим. На данном этапе в сборник СГ801 от ЦО подается жидкий гелий. Испаряясь жидкий гелий охлаждает прямой поток перед магнитами в теплообмене с ним в змеевике СГ801 и ТОА702. Обратный поток движется прежним путем.

При $TT703 \leq 14\text{ K}$ закрывается клапан КР706, открывается – КР707. Для ускорения процесса захолаживания при $TT703 \leq 60\text{ K}$ параллельно КР809 включается турбодетандер ПЖТД1001 (ПЖТД 1002). Расход прямого потока регулируется клапаном КР801 (КР802) по частоте вращения ротора детандера. А клапаном КР809 поддерживается давление в сборнике СГ801 по $PT804 \leq 0,04\text{ МПа}$. После появления уровня в СГ801 давление поддерживается клапанами КР809 и КР808 (КР807). Уровень в СГ801 регулируется клапаном КР806 по датчику уровня LT801.

После достижения $TT703$ температуры $4,5\text{ K}$ и накопления уровня в СГ801 пусковой режим заканчивается.

2.2 Рабочий режим

В номинальном рабочем режиме прямой поток при давлении $PT303 = (2,3 \pm 0,1)\text{ МПа}$ проходит последовательно ТОА601, ТОА701 и ТОА702, где охлаждается в теплообмене с обратным потоком до $TT803 = (6,7 \pm 0,1)\text{ K}$, расширяется в ПЖТД1001 (ПЖТД1002) до давления $PT805 = (0,09 \pm 0,01)\text{ МПа}$ (изб.).

Двухфазный поток гелия после ПЖТД1001 (ПЖТД1002) конденсируется и переохлаждается в змеевике до температуры $4,6\text{ K}$ и подается на охлаждение

магнитной системы. От потребителя в СГ801 поступает двухфазный поток с содержанием жидкой фазы $\sim 10\%$. В СГ801 происходит сепарация потока, и пар при $TT702 = 4,4\text{ K}$ обратным потоком проходит последовательно ТОА702, ТОА701 и ТОА601, а затем поступает в блок компримирования.

Для поддержания теплового баланса и должного охлаждения гелия прямого потока за счет испарения жидкости, в СГ801 через клапан КР806 от ЦО подается жидкий гелий. Подача избыточной части гелия контролируется по датчику уровня LT801.

Температура TT803 регулируется или давлением прямого потока РТ303 или степенью открытости КР809 при $TT803 < 6,7\text{ K}$.

2.3 Очистка от примесей азота и кислорода

Для очистки прямого потока гелия от примесей воздуха (азота) и неона (водорода) вследствие негерметичности и после монтажных работ применяются два адсорбера на разных температурных уровнях.

Работа адсорберов регулируется системой управления, которая организует и отслеживает правильность перехода адсорбера из одного состояния в другое. Адсорбер может находиться в следующих состояниях:

— **Работа.** Прямой поток проходит адсорбер и очищается. Переход в это состояние возможен из состояния «ожидания».

— **Выключен.** Адсорбер отсечен от прямого потока, давление в адсорбере сброшено. В этом состоянии адсорбер загрязнен и ожидает регенерации. Переход в это состояние возможен из состояния «работа». Степень загрязнения и необходимость в регенерации отслеживается по датчику давления (РТ601) и дублируется на щите управления на манометре (PI601).

— **Регенерация.** Производится регенерация адсорбера. Переход в это состояние возможен из состояния «выключен». Регенерация адсорберов производится механическим форвакуумным насосом. Подача греющего и жидкого азота осуществляется посредством соленоидных клапанов (ВС603, ВС604).

— **Ожидание.** Адсорбер заполнен чистым гелием до рабочего давления, но отсечен от прямого потока запорными клапанами. Для медленного заполнения и опорожнения со скоростью не более 0,5 МПа/мин предусмотрена арматура и обводная линия с запорным клапаном (КР605). Контроль готовности адсорбера к работе контролируется по датчику температуры (ТТ601). Переход в это состояние возможен из «регенерация».

2.4 Парожидкостной турбодетандер

Парожидкостной турбодетандер имеет центростремительные турбину с закрепленным на валу рабочим колесом радиально-осевого типа. Ротор вращается в магнитных подшипниках и оснащен магнитным тормозом. Статоры радиальных подшипников и магнитного тормоза имеют 4 пары полюсов, расположенных по концентрической сетке. Роторы подшипника и тормоза выполнены в виде втулок из магнитного материала, изолированы фторопластовыми втулками в радиальном и осевом направлении.

Для защиты ротора от разрушительных последствий касания с корпусом подшипников, на валу установлены фторопластовые втулки с номинальным диаметром большим, чем роторы подшипников и тормоза. А на крышках осевых подшипников установлены предохранительные кольца для предотвращения падения подпятника на металлические части крышки.

На консоли вала со стороны рабочего колеса имеется лабиринтное уплотнение с вращающимися гребнями, служащие для снижения утечки газа по осевому зазору вала.

Для уменьшения угла установки сопел применяется канальная схема соплового аппарата, которая позволяет значительно повысить изоэнтропный КПД машины.

Описание работы парожидкостного турбодетандера сопровождается обозначениями позиций, указанными на ПЖТД 31.00.00 СБ, представленного в Приложении А.

Гелиевый парожидкостной турбодетандер установлен непосредственно над сборником жидкого гелия сателлитного гелиевого рефрижератора и служит ступенью конечного расширения.

Рабочий процесс машины состоит из следующих шагов. Охлажденный в теплообменных аппаратах газообразный гелий поступает по подводящему патрубку, состоящему из сильфона поз.16, штуцера поз.18 и отвода углового поз.13 штуцеров. Проходит по кольцевой камере, образованной корпусом поз.9 и аппаратом сопловым поз.4, направляется в аппарат сопловой поз. 4, где предварительно расширяется, и поступает на рабочее колесо. В проточной части рабочего колеса гелий расширяется с переходом из газообразного в двухфазное состояние. Затем гелий проходит диффузор, в котором его скорость снижается и поток стабилизируется. Под действием сил тяжести двухфазный гелий сбрасывается в сборник жидкого гелия.

Конструктивно ПЖТД состоит из двух основных узлов, находящихся на «холодной» при температуре (4.5 ... 7)K и «горячей» при температуре (7 ... 30) K сторонах. «Горячий» узел выполнен по модульному принципу и может быть целиком заменен без необходимости в отопреве установки до температуры $\sim 300K$. Наиболее ответственные узлы конструкции детандера размещены в «горячем» узле: датчик частоты радиального положения ротора, магнитные радиальные и осевой подшипники, рабочее колесо. В «холодном» узле размещены немеханические элементы, которые не требуют замены во время работы СГР.

Для принятой конструкции схемы подшипникового узла необходимы две соединительные розетки подвода электрического тока и снятия показаний с датчика радиального положения, для реализации обратной связи и регулирования положения ротора в радиальном и осевом положении.

Подвод газа на расширение осуществляется посредством резьбового соединения, для снижения вибраций и частичного предотвращения самоотвинчивания патрубков применен компенсирующий сильфон. Стопорение резьбовых соединений в непосредственной близости к ПЖТД осуществляется точечной сваркой по контуру резьбового соединения.

2.5 Аппаратное оснащение

Для обеспечения вакуума в теплоизоляционных полостях в криогенную систему входит высоковакуумный агрегат с механическим форвакуумным насосом. В вакуумное оборудование входят азотные ловушки и контрольно-измерительные приборы. На ПГС РСГ блок вакуумного оборудования показан условно.

Оборудование пуска, отогрева, контроля потоков предназначено для плавного пуска, установки, отсечения от системы компримирования и хранения гелия, контроля за расходом и давлением прямого и обратного потоков установки, используется для отогрева установки. Система управления обеспечивает все необходимые действия по аварийному останову, а также защитным блокировкам.

Оборудование обеспечения азотом представляет собой арматуру и КИП (Контрольно-измерительные приборы), позволяющие управлять потоками жидкого и газообразного азота, используемыми в установке и получаемыми от внешних источников.