

02, февраль 2016

УДК 621.565.8

Многоцелевая система обеспечения температурно-влажностного режима для создания условий испытаний перспективной авиационной техники

Кулик В. В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и
жизнеобеспечения»*

Научный руководитель: Паркин А.Н., ассистент-совместитель

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и
жизнеобеспечения»
crio@power.bmstu.ru*

Во время полета при определенных погодных условиях для авиационного двигателя существует опасность попадания в него шквального града, в результате чего может произойти повреждение лопаток двигателя, загиб кромки, отрывы. В рамках наземной отработки экстремальных режимов работы для перспективных авиационных двигателей в ЦИАМ им. Баранова проводятся их стендовые испытания на устойчивость в условиях имитации сложных погодных условий. Во время одного из испытаний имитируется попадание града на вход двигателя в условиях, максимально приближенных к реальным [2].

Для проведения испытаний необходима равномерная дозированная подача шквального града на вход двигателя, а также продолжительное хранение града во время выхода двигателя на необходимый режим работы, для чего была сконструирована система дозирования и хранения града, основным элементом которой является дозатор шквального града (ДШГ), схематично изображенный на рис.1. [2]

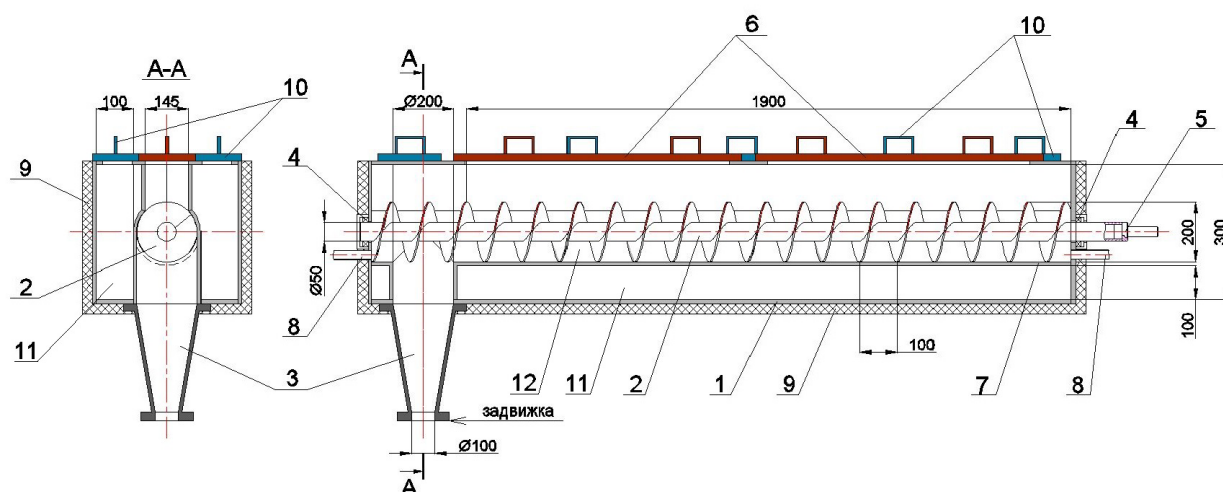


Рис. 1. Эскиз устройства дозирования шквального града: 1 – корпус системы дозирования; 2 – шнек; 3 – конический трубопровод; 4 – опоры вала шнека; 5 – выходной вал шнека; 6 – крышки (используются для загрузки града); 7 – стенка, образующая полость для установки шнека; 8 – патрубки для прокачки охлаждённого осушенного воздуха через полость, образуемую шнеком; 9 – слой теплоизоляции; 10 – крышки для загрузки охлаждающей жидкости; 11 – полость для хладоносителя; 12 – место загрузки града

Во время подготовки к проведению испытаний в загрузочную полость 12 со шнеком 2 (см. рис. 1) равномерно загружается предварительно приготовленный град (ледяные шары диаметром 16 мм), который должен храниться без таяния и смерзания в полости дозатора около 3 часов (данное время обусловлено скоростью подготовки стендового оборудования и длительностью выхода двигателя на режим) и в дальнейшем подаваться на вход двигателя. Продвижение града в ДШГ осуществляется с помощью шнека 2, который приводится во вращение электрическим приводом. Далее град проходит через воронку к транспортирующему трубопроводу 3 на вход разгонной камеры градовой пушки.

Для создания условий сохранения града необходимо обеспечить постоянный температурно-влажностный режим в загрузочной полости дозатора, вместе с этим, при подготовке ДШГ к загрузке града, требуется обеспечить его оперативное захолаживание. Для решения этих задач предлагается специальная автоматизированная многоцелевая система обеспечения температурно-влажностного режима (МСОТВР), которая должна обеспечивать понижение и поддержание температуры воздуха в полости шнека на уровне минус 15 °С и температуру точки росы не выше минус 18 °С.

Дополнительным требованием к выполнению МСОТВР является мобильность, чтобы иметь возможность перемещения установки к месту проведения испытаний двигателя. Испытания могут проходить как в помещении, так и на открытом воздухе, что задает достаточно жесткие условия эксплуатации МСОТВР: давление атмосферное, температура работы от +30 °С до минус 30 °С, влажность до 100% при температуре +25 °С. К другим требованиям относятся удобство системы в настройке и обслуживании, ремонтпригодность и эргономичность её конструкции.

Для решения имеющихся задач обеспечения условий испытаний предложен вариант работы МСОТВР в двух режимах:

1. Режим захлаживания;
2. Режим термостатирования.

В первом режиме МСОТВР выводит ДШГ на номинальный режим работы за максимально короткое время и обеспечивает температуру в полости дозатора не выше минус 15 °С. Выход на номинальный режим осуществляется прокачкой хладоносителя через специально предназначенную полость 11 в ДШГ, одновременно с этим полость 12 дозатора, в которой будет храниться град, продувается холодным воздухом. Загрузка града в дозатор происходит при достижении номинальной для хранения града температуры воздуха в пустой полости шнека, и после система переключается на второй режим работы - термостатирования.

Второй режим также характеризуется работой обоих контуров – воздушного и с жидким хладоносителем, однако основной акцент делается на обеспечение циркуляции через полость 12 с градом охлажденного и осушенного воздуха.

Конструкция ДШГ допускает, что в качестве альтернативы машинной выработке холода, источником холода для ДШГ также может выступать «сухой» лед, закладываемый в полость 11, предназначенную для хладоносителя. Однако, использование сухого льда представляется наименее практичным решением, сопряженным с невозможностью обеспечить точное регулирование температуры и контроль за влажностью воздуха в полости шнека, поэтому не рекомендуется к применению.

Расчет тепловых нагрузок выполняется отдельно для каждого из режимов в условиях, указанных в таблице 1. При расчёте режима захлаживания имеем нестационарную задачу теплообмена при относительно больших тепловых нагрузках (охлаждение в контуре воздуха, хладоносителя и всех элементов оборудования) в условиях свободной конвекции и малом напоре циркулирующего через полость 12 воздуха; целью проектных расчетов в этом режиме является определение холодопроизводительности, позволяющей вывести ДШГ на номинальный режим за время

в пределах 4 часов, и толщины теплоизоляции. При расчёте режима термостатирования имеем стационарную задачу при относительно маленьких тепловых нагрузках в условиях вынужденной конвекции (скорость обдува поверхности дозатора атмосферным воздухом до 20 м/с) и при большом напоре циркулирующего через полость 12 воздуха. Расчётные величины требуемых напора и расхода воздуха через дозатор определяются из условия обеспечения заданной скорости в живом сечении заполненной градом полости 12.

Таблица 1

Условия работы МСОТВР

Режим работы	Захлаживание	Термостатирование
Условие размещения ДШГ	Свободная конвекция	Вынужденная конвекция
Наличие хладоносителя	Есть	Есть
Наличие льда во время работы	Нет	Есть

Исходя из проведенных расчётов, выполненных по методикам из [1,4,5], были сформулированы следующие требования: необходимый расход воздуха через ДШГ должен составлять не менее 70 м³/час при напоре на входе в полость 12 равном 60 кПа (изб.), а нагрузка по холоду в наиболее нагруженном режиме работы должна составлять 8 кВт; для режима термостатирования эта нагрузка составляет величину порядка 1 кВт и обусловлена в большой степени условиями размещения ДШГ.

Регулирование производительности в обоих режимах работы МСОВРТ осуществляется автоматически по сигналу датчика температуры, установленного в ДШГ, заданная температура поддерживается при минимальных энергозатратах, что достигается применением эффективных средств глубокого регулирования холодильного контура.

В ходе разработки был проведён сравнительный анализ нескольких вариантов схем парокомпрессионных холодильных циклов для обеспечения требуемой температуры внутри дозатора града при соблюдении условий технического задания и выполнения критериев оптимальности.

В качестве вариантов холодильного цикла были рассмотрены следующие (рис. 2 и таблица 2):

1. Простой парокомпрессионный цикл;
2. Цикл с экономайзером;
3. Цикл с промежуточным впрыском жидкости;

4. Цикл с регенеративным теплообменником;
5. Цикл с регенеративным теплообменником и промежуточным впрыском жидкости.

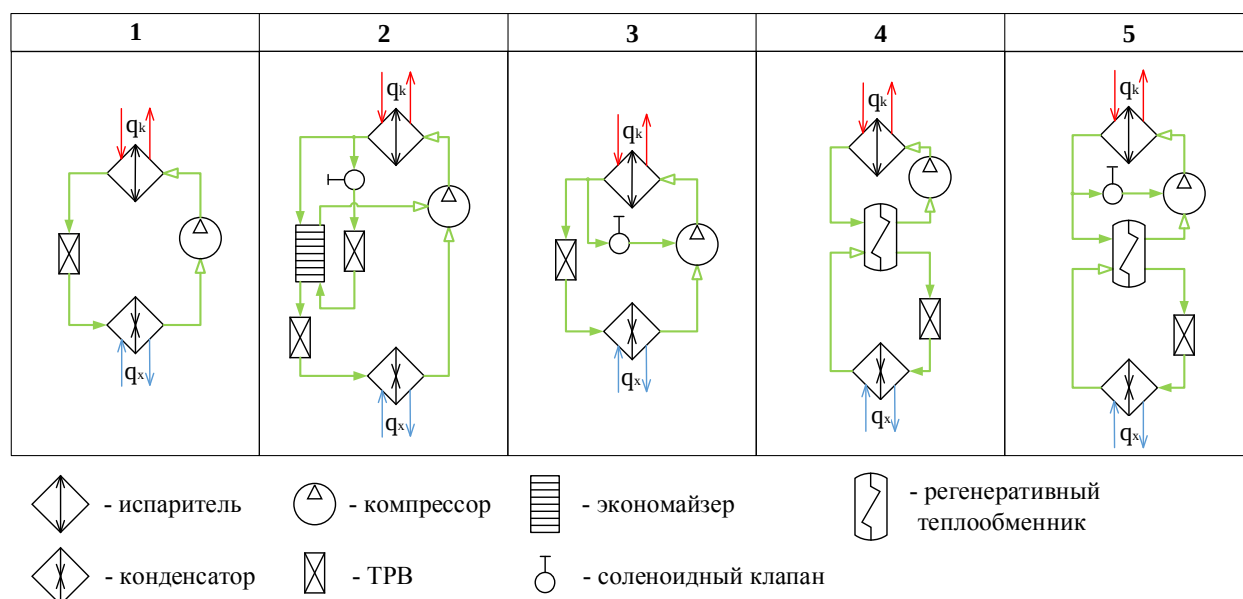


Рис. 2. Принципиальные схемы рассматриваемых циклов

В ходе проведенного анализа не был рассмотрен вариант цикла с экономайзером и регенеративным теплообменником, ввиду неизбежного усложнения фреонового контура и его схемы управления, что повлекло бы за собой снижение надёжности предлагаемого решения и увеличение его стоимости, при незначительном выигрыше в энергетических характеристиках.

Таблица 2

Варианты схемных решений

Вариант цикла	Наличие дополнительных элементов			Примечания
	Регенеративный теплообменник	Экономайзер	Промежуточный впрыск жидкости	
1	–	–	–	Базовый
2	–	+	–	
3	–	–	+	
4	+	–	–	
5	+	–	+	Выбранный

Критерием оптимальности выбора цикла являлся максимальный холодильный коэффициент (COP) системы на номинальном режиме работы, который определялся для каждого цикла в ходе предварительных расчетов. Ограничением в выборе цикла служила температура нагнетания, которая не должна была превышать в среднем $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ по рекомендациям производителей различных компрессоров. В случае небольших различий основных показателей цикла, выбор необходимо делать в сторону наименее затратного решения, как в плане энергетических, так и денежных затрат.

Исследование рассматриваемых циклов показало, что наибольшее значение COP достигается в холодильном цикле с регенеративным теплообменником как видно на рис.3.

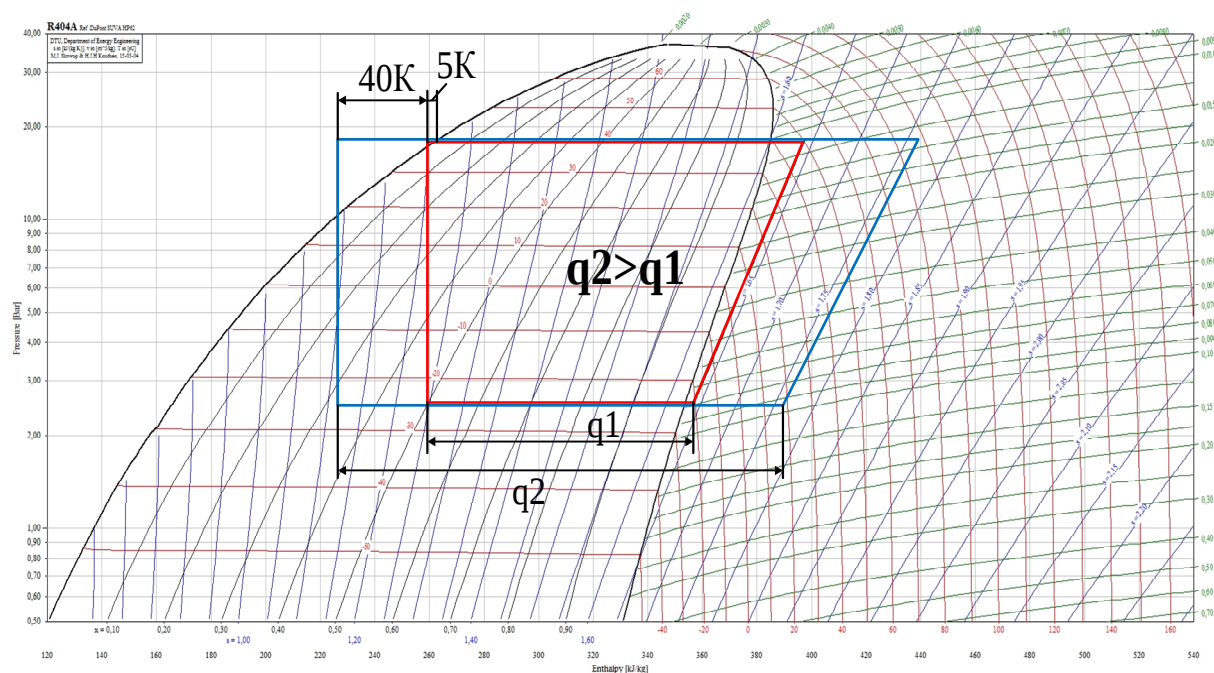


Рис. 3. Сравнение удельных холодопроизводительностей цикла с регенеративным теплообменником (синий) и обычного парокомпрессионного цикла (красный)

Отрицательным моментом в цикле с регенеративным теплообменником является возможность повышения температуры нагнетания до предельных $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому предпочтительно применять промежуточный впрыск жидкости в полость сжатия компрессора, что позволит ограничить температуру нагнетания. По результатам сравнительного анализа, было решено принять за основную - схему ПКХМ с регенеративным теплообменником и промежуточным впрыском жидкости (вариант 5), схема которой изображена на рис. 4.

Для обеспечения работы в двух режимах в принципиальной схеме установки предусмотрено два испарителя И1 и И2, которые могут работать совместно. А поскольку

температуры кипения фреона достаточно низкие, в воздушном контуре предусмотрена рекуперация холода, что позволит сделать затраты энергии на выработку холода в системе минимально возможными и приблизить к номинальным рабочие условия стандартных комплектующих.

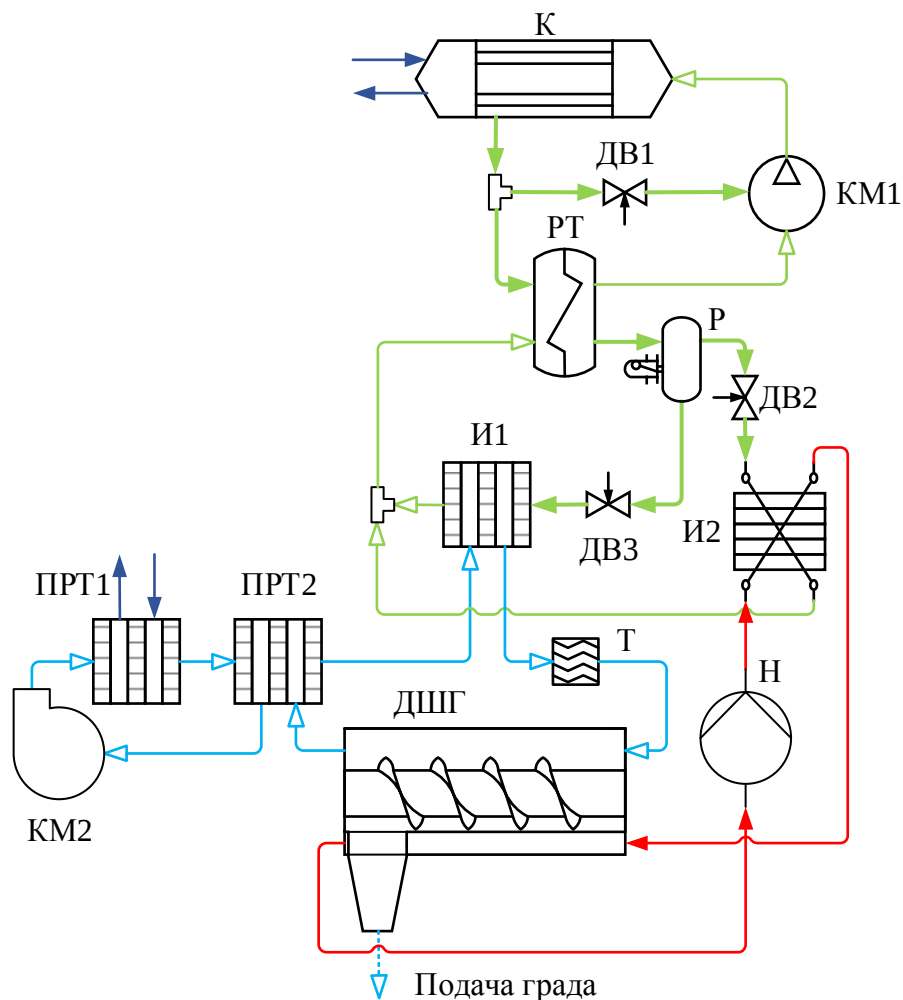


Рис. 4. Схема MCOTBP: KM1 – компрессор фреоновый; К – водяной конденсатор; РТ – регенеративный пластинчатый теплообменник; Р – жидкостной ресивер; И1 – воздушный пластинчато-ребристый испаритель; И2 – пластинчато-ребристый теплообменник с хладоносителем; ДВ1, ДВ2, ДВ3 – дроссельные вентили; KM2 – воздушный компрессор; Т – теплоэлектронагреватель; Н – водяной насос; ПРТ1– пластинчато-ребристый теплообменник предварительного охлаждения; ПРТ2 – воздушный регенеративный пластинчато-ребристый теплообменник; ДШГ – дозатор шквального града

В качестве хладоносителя были предложены 40% водный раствор этиленгликоля и «Экосол». Наиболее целесообразным является использование в данной системе «Экосола», т.к. он по совокупности характеристик превосходит раствор этиленгликоля,

обладая более высокой теплопроводностью и более низкой вязкостью в рассматриваемом диапазоне температур [3].

Выбор хладагента, используемого во фреоновом контуре МСОТВР, основан на подборе компрессора. Наиболее подходящим является спиральный компрессор фирмы Copeland, работающий на фреоне R404a и допускающий промежуточный впрыск жидкости в полость сжатия. Холодопроизводительность подобранного компрессора, с учетом его работы в цикле с регенеративным теплообменником, составляет 6 кВт при температуре конденсации +40 °С и температуре кипения минус 25 °С, что обеспечит выход на номинальный режим работы ДШГ в течение не более 1,5 часов. Для плавного и эффективного регулирования производительности в компрессоре предусмотрена функция периодического отжима спирали. Разъединение спиралей прерывает процесс сжатия, так что компрессор работает при нулевой нагрузке и по требованию может вернуться в режим полной нагрузки. Помимо этого, дополнительное регулирование производительности осуществляется за счет внешнего инвертора, через который к электрической сети подключен компрессор. Инвертор меняет частоту вращения встроенного двигателя компрессора, тем самым меняя его расход.

В качестве конденсатора был выбран кожухотрубный теплообменный аппарат с водяным охлаждением, мощностью 15 кВт (расчетная) производства фирмы Bitzer, как наиболее надежный и недорогой аппарат, к которому не предъявляются особые требования по исполнению. Регенеративный теплообменник пластинчатый, производства фирмы Alco, с медными пластинами, мощность 2 кВт.

К испарителям фреоновой контура и теплообменникам предварительного охлаждения воздуха из-за их количества и габаритов, при необходимости максимально сократить габариты и массу установки, выдвигались более жесткие требования и поэтому было принято решение выполнить их алюминиевыми пластинчато-ребристыми, т.к. теплообменники такого типа обладают наибольшей компактностью и показателями коэффициентов теплообмена. Все теплообменные аппараты были индивидуально спроектированы для работы в данной установке. За счёт продуманного компоновочного решения и выбора расположения коллекторов, габариты установки были уменьшены в среднем на 25% по сравнению с аналогами. Для теплообменников воздушного контура была предусмотрена возможность слива конденсата. Расчет аппаратов проводился на максимальную тепловую нагрузку схемы с запасом на выпадение конденсата и инея в течении времени не менее рабочей кампании установки (~3 часа).

В качестве воздушного нагнетателя был выбран компрессор фирмы GEV с номинальным расходом воздуха 100 м³/ч. В качестве альтернативы использования такого крупногабаритного и дорогого агрегата, была предусмотрена возможность подключения промышленной пневмосети к воздушному контуру через редукционный клапан, установленный параллельно с нагнетателем (рис. 5). При варианте подключения установки к пневмосети воздушный контур не замыкается, и после регенеративного теплообменника воздух выбрасывается в атмосферу.

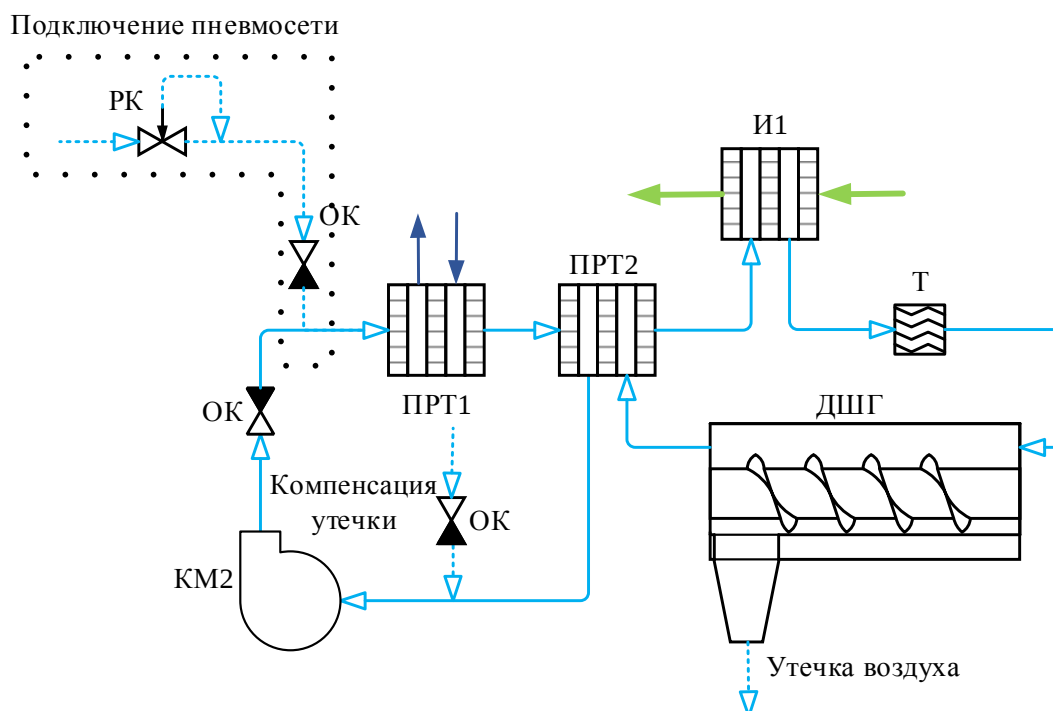


Рис. 5. Схема воздушного контура МСОТВР: И1 – воздушный пластинчато-ребристый испаритель; ОК – обратный клапан; РК – редукционный клапан; КМ2 – воздушный компрессор; Т – теплоэлектронагреватель; ПРТ1 – пластинчато-ребристый теплообменник предварительного охлаждения; ПРТ2 – воздушный регенеративный пластинчато-ребристый теплообменник; ДШГ – дозатор шквального града

В ходе проектирования МСОТВР было продумано наиболее компактное расположение всех компонентов друг относительно друга, как видно на рис. 6, 7, 8.

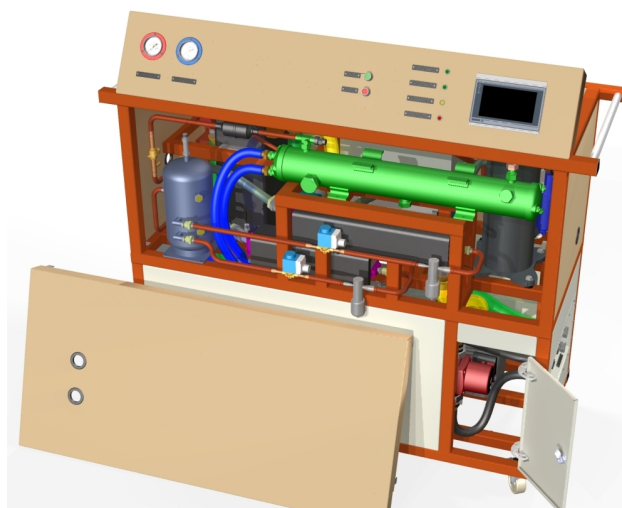


Рис. 6. MCOTBP, вид спереди. Передняя панель снята, лючок открыт

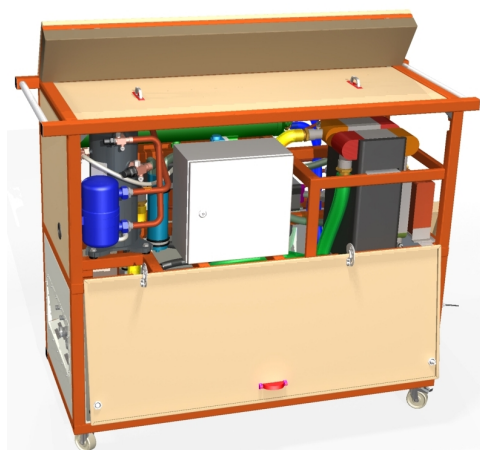


Рис. 7. MCOTBP, вид сзади. Верхняя панель открыта

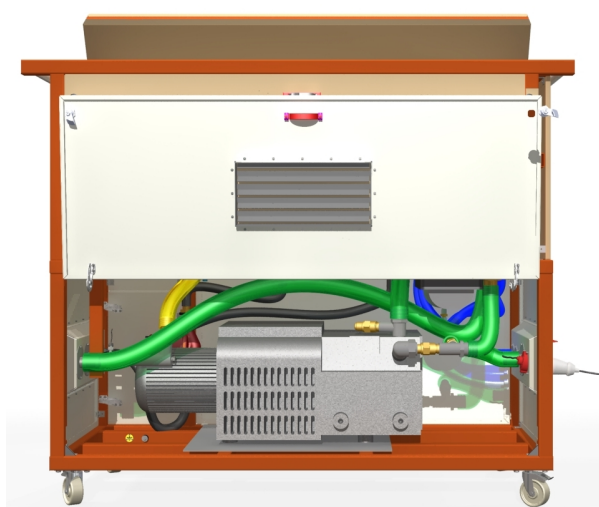


Рис. 8. MCOTBP, вид сзади. Нижняя панель открыта

Нагнетатель, как самый массивный агрегат установлен в нижней части системы, все теплообменники, ресивер, а также компрессор – в верхней части. Все компоненты установлены на раму специальной конструкции. Для снижения массы и габаритов, облегчения монтажа и обслуживания, большая часть соединений выполнена из гибких труб и рукавов, а теплообменники из алюминия. Габаритные размеры установки по длине и широте соразмерны с размерами письменного стола – 1550х670 мм, высота около 1550 мм, вес около 500 кг. Массогабаритные характеристики установки позволяют перемещать её между помещениями без специальных подъёмно-транспортных механизмов. Подробнее характеристики всей системы можно увидеть из таблицы 4.

Таблица 4

Характеристики МСОТВР

Наименование	Показатель	Ед. изм.	МСОТВР
Окружающая среда	Тип		Влажный воздух
	Скорость	м/с	до 20
Фреон	Тип		R404a
	Заправка фреона	кг	~40
Жидкий хладоноситель	Тип		Экосол-40
	Давление	атм	до 4
	Расход	м³/ч	до 1,3
Газообразный хладоноситель	Тип		Влажный воздух
	Давление (абс.)	кПа	до 170
	Расход	м³/ч	до 70
Охлаждающая вода	Тип		Техническая вода
	Давление	атм	до 4
	Изменение температуры	°С	от 30 до 27
	Расход	м³/ч	0,53
Электропитание	Трёхфазный переменный ток		
	Напряжение	В	380
	Частота	Гц	50
	Установленная мощность электрооборудования, не более	кВт	10
Компрессор	Тип		Спиральный
	Потребляемая мощность в номинальном режиме, не более	кВт	3,84
	Регулирование (инвертор + ШИМ отжимом спирали)		Плавное 10-100%
	Диапазон изменения частоты вращения ротора компрессора	Гц	25-50
Нагнетатель	Тип		Роторно-пластинчатый

	Потребляемая мощность в номинальном режиме, не более		кВт	4
	Номинальный расход		м³/ч	70
	Номинальный напор		кПа	170
Насос	Тип			С мокрым ротором
	Расход		м³/ч	до 3
	Гидростатический напор		м	до 6
Номинальный режим	Холодопроизводительность		кВт	6
	Холодильный коэффициент (COP)			1,7
	Температура воздуха на выходе из испарителя		°С	-20
	Температура хладоносителя на выходе из испарителя		°С	-20
	Гидравлическое сопротивление в аппаратах, не более		МПа	0,03
Особенности конструкции	Вывод соединительных элементов на периферию установки через БРС, проходное сечение	Вода (дренаж воды)	мм	12 (7)
		Хладоноситель	мм	19
		Воздух	мм	25
	Гибкие рукава и трубы, проходное сечение	Фреон	мм	21
		Жидкие среды	мм	15
		Воздух	мм	32, 38
Массово-габаритные характеристики	Масса		кг	~500
	Высота		мм	1550
	Ширина		мм	670
	Длина		мм	1550

Для удобства управления МСОТВР - ее включения, отключения, а также контроля работы, была спроектирована система автоматического управления (САУ) на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) и сконструирована приборная лицевая панель, на которую выведены световые индикаторы, сигнализирующие о состоянии работы установки, манометры давлений всасывания и нагнетания, а также сенсорный экран, программным обеспечением которого заложен вывод и контроль всех параметров системы.

Мобильность МСОТВР обеспечивается за счет установки на раме ручек и колес с тормозными элементами. Вывод всех разъемов для подключения к ДШГ расположен в торцах с обеих сторон в нижней части установки (рис. 9).

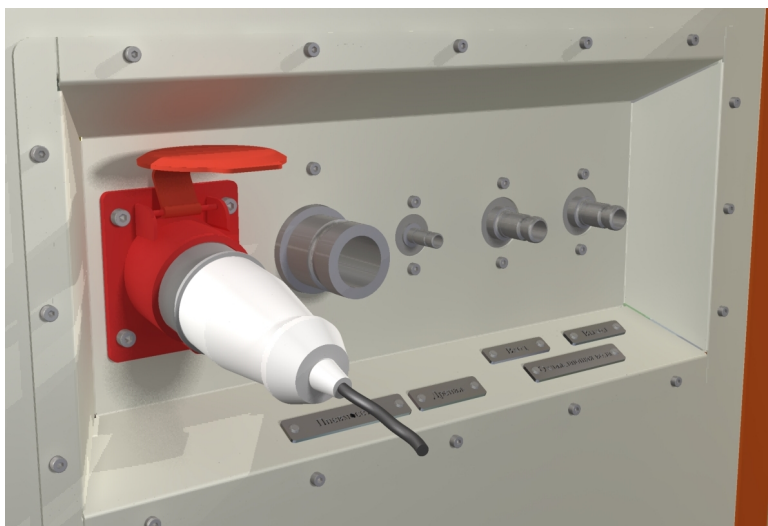


Рис. 9. MCOTBP, вид с торца. Панель с ниппелями для подключения технической воды и пневмосети

Для удобства подсоединения MCOTBP к ДШГ было предложено использование быстросъемных гибких шлангов с разъемами самозапирающегося типа. Доступ к самой установке осуществляется через откидные панели, фиксирующиеся с помощью простых поворотных замков. Возможность открытия панелей предоставляет доступ к компонентам всей системы, установленных как в верхней части, так и нижней части рамы, без дополнительных трудностей для обслуживания, в тех же целях возможен демонтаж верхней крышки. Лючок в передней части предназначен для обслуживания водяного насоса.

Вывод

Для решения поставленной задачи предложена схема и конструкция МСОТВР, предназначенной для двух режимов работы – захлаживания и термостатирования. Единоновременная работа на воздухе и жидком хладоносителе обеспечена двумя испарителями фреонового холодильного контура. Хладоноситель - «Экосол», хладагент – R404A. Цикл с регенеративным теплообменным аппаратом и промежуточным впрыском жидкости выбран как наиболее целесообразный в рассматриваемых условиях. Установка представляет собой автоматизированную передвижную систему для обеспечения циркуляции и поддержания температуры жидкого хладоносителя, а также, обеспечения циркуляции и поддержания температуры и влажности воздуха. Возможности системы управления установкой обеспечивают мониторинг и регулирование параметров всех контуров, а также защиту установки от аварийных режимов работы.

Список литературы

- [1]. Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1991. 496 с.
- [2]. Горячев А.В., Жулин В.Г., Баранов Ю.Ф. Методические особенности проведения испытаний авиационных двигателей в условиях дождя и разработка общих требований к конфигурации испытательного оборудования // Труды ЦИАМ. 2010. №1350: Развитие средств и методов испытаний авиационных двигателей. С. 105-108.
- [3]. Баранник В. П., Маринюк Б. Т. и др. Новый хладоноситель, особенности и перспективы применения // Холодильный бизнес. 2001. № 1. С. 20-21.
- [4]. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче / под ред. С. И. Мочан. М.: Госэнергоиздат, 1958. 414 с.
- [5]. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. М-Л: Госэнергоиздат, 1960. 208 с.