



ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ХОС ВКС НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Ю.С. Марков, А.В. Гребенников, Е.Г. Лепестихина,

М.И. Меркулов, В.В. Бурмистров (ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Для обеспечения надежности авиационных двигателей (АД) и прогнозируемости их поведения в условиях полета важное значение имеет качество испытаний АД и их узлов на стадии проектирования и доработки. Холодильно-осушительная станция высотно-компрессорной станции (ХОС ВКС), необходимая при проведении испытаний для обеспечения имитации условий эксплуатации АД, была создана в 50-х годах XX столетия, в 80-х годах прошла реконструкцию, позволившую расширить ее возможности в соответствии с растущими требованиями к испытаниям АД, и к настоящему времени назрела необходимость очередной реконструкции. Это вызвано повышением требований к испытаниям АД и рядом проблем эксплуатационного характера. В статье рассматриваются пути и методы решения существующих проблем в обеспечении требований по производству искусственного холода для проведения климатических испытаний и предложена стратегия дальнейшего развития ХОС ВКС на ближайшую и долгосрочную перспективу.

Ключевые слова: холодильно-осушительная станция, холодильная установка, климатические испытания, хладагент, хладоноситель, эксплуатационные характеристики, алгоритмы и программы управления, технологический процесс, стратегия развития.

Холодильно-осушительная станция (ХОС) высотной установки (ВУ) НИЦ ЦИАМ — филиала ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» предназначена для получения искусственного холода при проведении климатических испытаний авиационных двигателей на стендах ВУ. Она представляет собой комплекс, состоящий из шести отдельных идентичных холодильных установок, расположенных попарно на трех секциях ХОС высотно-компрессорной станции (ВКС). Холодильные установки работают по компрессионному холодильному циклу с двухступенчатым сжатием и расширением рабочего тела, в качестве которого используется хладагент R22 (фреон 22). Процесс охлаждения воздуха выполняется по двухступенчатой схеме с использованием промежуточных хладоносителей. Задача первой высокотемпературной ступени — максимальное удаление влаги и снижение температуры воздуха на 0...4 °С. Используемый для этого хладоноситель — водный раствор этиленгликоля. Задача второй низкотемпературной ступени — вымораживание оставшейся влаги и снижение температуры воздуха до -35 °С. Используемый хладоноситель — водный раствор хлористого кальция. Максимальные расчетные возможности ХОС — охлаждение воздуха до температуры -35 °С и снижение влажности до 0,06 г/кг при расходе воздуха 270 кг/с.

Современная ХОС введена в эксплуатацию в 80...90-х гг. XX столетия взамен старой, возможности которой перестали удовлетворять требованиям высотной установки. В результате масштабной реконструкции существенно увеличилось число теплообменного и компрессорного оборудования,

работающего на фреоне 22 (на старой установке использовался фреон 12), и была введена принципиально новая система управления ТП, разработанная чешскими специалистами в соответствии с уровнем развития информационных технологий того времени.

Холодильная установка ХОС имеет в своем составе центробежный двухступенчатый компрессор с собственным маслохозяйством и теплообменное оборудование [1]. В системе используются кожухотрубные, многоходовые теплообменные аппараты (испарители, конденсатор, переохладитель), число ходов в которых варьируется в диапазоне 2...14 ед. В трубном пространстве аппаратов циркулируют хладоносители, в межтрубном — хладагент. Промежуточный сосуд не имеет собственной системы охлаждения, для этой цели используется впрыск жидкого фреона после дросселирования в перегретые пары на нагнетании первой ступени турбокомпрессора. Ресивер установки — линейный. Кожухотрубные, многоходовые воздухоохладители не входят в состав холодильной установки, а относятся к газозооному контуру ВКС. Здесь в межтрубном пространстве циркулируют хладоносители, в трубное пространство подается воздух. Число ходов в низкотемпературном воздухоохладителе — 10 ед., в высокотемпературном — 12 ед.

Для управления ТП и защитой установки от работы на опасных режимах (перегрузка компрессора, помпаж) предусмотрены 10 взаимосвязанных систем регулирования, использующих регулирующие органы с пневмо- и электроприводами, работающие в ручном и автоматическом режимах. Для контроля за работой установки используется система измере-

ний и контроля технологических параметров, включающая датчики давления, температуры, вибрации, осевого сдвига, уровня, перепада давления, расхода, а также системы предупредительной сигнализации и аварийного отключения турбокомпрессора при выходе наиболее ответственных параметров за допустимые пределы.

Система управления холодильными установками ХОС организована с учетом особенностей, обусловленных их назначением, периодичностью работы, схемой охлаждения и наличием двух хладоносителей. В отличие от подавляющего большинства холодильных машин установки ХОС должны производить холод только при востребованности его для испытаний. В остальное время они находятся в состоянии покоя с заполненными контурами хладоносителей. Жидкий хладагент хранится в ресиверах установок, в рабочих контурах хладагента поддерживается небольшое давление паров для постоянного контроля плотности (~170 кПа абс.).

Технологический процесс подготовки воздуха можно условно разделить на два этапа. На первом этапе, называемом захолаживанием контура, требуется обеспечить охлаждение хладоносителей до заданных температур. На втором этапе выполняется непосредственно охлаждение и осушка воздуха. Основная задача первого этапа — максимально быстро и безопасно вывести холодильную установку на расчетный режим работы и получить требуемые параметры хладоносителей. Главная задача второго этапа — обеспечить стабильные параметры воздуха на выходе из воздухоохладителей во время проведения на стенде испытаний. Иными словами, холодильная установка должна работать в таком режиме, чтобы при проведении испытаний значения температуры хладоносителей не выходили за допустимые заданные пределы. При пуске холодильной установки она проходит полный рабочий цикл: «горячий пуск» — загрузка компрессора — выход на рабочие параметры по охлаждению — работа на рабочих параметрах со стендом — останов — слив жидкого фреона в ресивер. На этапе пуска и загрузки компрессора необходимо обеспечить циркуляцию фреона и хладоносителей по рабочим контурам, оптимальную подачу жидкого фреона в теплообменные аппараты и полностью открыть компрессор. В процессе выхода на рабочие параметры холодильная установка находится в режиме захолаживания хладоносителей, причем высокотемпературный хладоноситель должен быть охлажден до температуры не ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (оптимально $-5\text{...}-7\text{ }^{\circ}\text{C}$), низкотемпературный — до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. После выхода на рабочие параметры и подачи воздуха в воздухоохладители холодильная установка должна обеспечить стабильные параметры воздуха на выходе из низкотемпературных воздухоохладителей во время проведения на стенде испытаний. По окончании испытаний, остановки компрессора и выполнения необходимых работ по эвакуации фреона из рабочего

контура в ресивер холодильная установка переводится в состояние покоя.

АСУТП подготовки воздуха предусматривает два основных режима: ручной и автоматический. В ручном режиме управление выполняется оператором установки, в автоматическом — программами управления, разработанными на основании алгоритмов, соответствующих состояниям установки на различных этапах работы. Согласно состояниям, ТП охлаждения формализован в виде четырех алгоритмов: «Подготовка к пуску»; «Пуск — нагрузка» («работа»); «Останов»; «Аварийный останов».

На стадии подготовки к пуску обслуживающий персонал должен обеспечить готовность технологических контуров к пуску турбокомпрессора. Готовность контуров определяется заданным положением запорной арматуры, регулирующих органов и состоянием технологических параметров блокировки пуска. Разрешение на пуск турбокомпрессора может быть получено только при выполнении всех предусмотренных в программе алгоритма условий. После получения разрешения на запуск и пуска турбокомпрессора начинается основная стадия работы холодильной установки — захолаживание хладоносителей до выхода их на расчетные параметры, работа со стендом, обеспечение стабильных параметров воздуха на выходе из воздухоохладителей в процессе проведения испытаний. После завершения работы холодильную установку необходимо остановить в безопасном режиме, для чего требуется разгрузить компрессор и установить в определенное положение запорную и регулируемую арматуру. Если в процессе работы возникает аварийная ситуация, управление передается программе аварийного останова.

Кроме основных режимов управления возможен смешанный режим, когда часть систем регулирования работает в автоматическом режиме, часть — в ручном. Этот режим необходим при работе во внестатных ситуациях, наиболее частые из которых следующие:

- требования программы испытаний по параметрам воздуха не соответствуют расчетным;
- необходимость работы с нулевой холодопроизводительностью — установка вышла на расчетные параметры хладоносителей, но съем холода не обеспечен;
- проблемы с работой теплообменного оборудования — снижение рабочих характеристик;
- программные сбои в управлении системами регулирования;
- недостаточное количество хладагента.

Основная задача ХОС — обеспечение надежной, безаварийной и эффективной работы холодильных установок. Успешное выполнение этой задачи зависит от ряда различных факторов. Это состояние оборудования и технологических контуров холодильной установки, качество и количество холодильного агента, качество хладоносителей, параметры воздуха на входе в воздухоохладители, требования к выходным параметрам воздуха, квалификация обслужива-

ющего персонала, качество и надежность систем измерения, регулирования и управления, программных средств, а также информативная наполненность, оперативность и удобство восприятия средств отображения хода ТП на пульте оператора.

В течение длительного периода эксплуатации возможности ХОС ВКС соответствовали предъявляемым к ней требованиям. К настоящему времени ситуация существенно изменилась, а именно: изменились требования к холодильным установкам в целом в области ужесточения экологических норм [2], появились проблемы, вызванные длительным временем эксплуатации оборудования, расширились требования по охлаждению воздуха, появились новые компьютерные и информационные технологии. Все это привело к возникновению ряда следующих актуальных проблем.

1. В соответствии с международными экологическими требованиями к хладагентам с 2020 г. вводится запрет на использование фреона 22. Необходимо разработать мероприятия по дальнейшему развитию холодильной станции на другом хладагенте.

2. Снижение эксплуатационных характеристик теплообменного оборудования вследствие физического износа.

К настоящему времени все холодильные установки находятся в рабочем состоянии, но эффективность работы ХОС несколько снизилась, что выражается в увеличении времени выхода холодильных установок на рабочие параметры в процессе захолаживания и повышении температуры хладоносителя в процессе охлаждения воздуха с номинальным расходом. Это произошло, главным образом, в результате ухудшения технических характеристик теплообменного оборудования вследствие физического износа. Разумеется, кроме физического износа, на эффективность работы холодильной установки негативное воздействие может оказывать целый ряд прочих факторов, но их влиянием можно пренебречь, поскольку все они вполне контролируемы и при своевременном и грамотном проведении ремонтно-профилактических и регламентных работ устранимы. Что же касается физического износа оборудования, то проведением подобных работ можно добиться некоторого снижения его темпа, но полностью устранить невозможно. Таким образом, постепенное снижение эффективности работы холодильных установок — неизбежный эффективный процесс, который надо принять как факт. В то же время задачи, стоящие перед ХОС, остаются прежними, поэтому необходимо искать пути их выполнения на существующем оборудовании с учетом снижения его технических характеристик. В первую очередь для этого надо знать реальные возможности ХОС на сегодняшний день с тем, чтобы правильно планировать работу отдельных установок, комбинируя возможные режимы их работы для обеспечения выходных рабочих параметров за минимально возможное время на этапе захолаживания хладоноси-

телей и поддержания стабильности этих параметров на этапе охлаждения и осушки воздуха.

3. Расширение требований к холодильной станции по количеству осушенного охлаждаемого воздуха.

Диапазон требований по параметрам воздуха постоянно расширяется. В настоящее время холодильные установки не могут обеспечить подготовку воздуха с расходом более 300 кг/с, также есть проблемы работы с малыми (до 10 кг/с) расходами воздуха. Необходимо вести работы в направлении создания новой холодильной установки либо модернизации существующих.

4. Необходимость модернизации контуров хладоносителей в направлении перехода на более экологически безопасные и обладающие меньшей коррозионной активностью хладоносители.

5. Необходимость модернизации морально и физически устаревшей системы управления и контроля.

Разработанная в конце XX века система была достаточно надежная и современная по требованиям и техническим возможностям того времени. Более того, за годы эксплуатации серьезных проблем в работе холодильных установок по причине неисправностей системы управления не наблюдалось, поскольку были предусмотрены дублирование наиболее важных параметров и возможность быстрого перехода с автоматического режима управления на ручной, что позволяло устранить возникшую неисправность в процессе работы. Но в настоящее время, вследствие стремительного прогресса в области электронных и компьютерных технологий, а также ПО, дальнейшее использование существующей АСУТП чревато серьезными последствиями. Число отказов аппаратных средств и отдельных электронных блоков неизбежно возрастает в результате длительности их эксплуатации, имевшийся ЗИП практически исчерпан, с серийного производства подобные изделия давно сняты. Все это снижает надежность системы и надежность работы холодильных установок в целом. Кроме необходимости замены элементной базы требовалась существенная доработка программно-алгоритмического обеспечения АСУТП. Программы системы управления не были окончательно отлажены, поскольку разработкой и отладкой АСУТП занимались чешские специалисты, а в конце 80-х гг. отношения с ЧССР были прерваны. Продолжить эту работу не было возможности в силу того, что программы управления ТП в целом и программы управления отдельными системами регулирования были жестко прошиты в постоянной памяти. Доступной для изменений оставалась только оперативная память пользователей программ. В результате управление ТП осуществлялось следующим образом: в автоматическом режиме работали программы подготовки к пуску и аварийного останова, программа «пуск-нагрузка» работала только в смешанном режиме, останов выполнялся программой аварийного останова после разгрузки турбокомпрессора вручную. Ряд недостат-

ков существующей АСУТП был выявлен в процессе эксплуатации:

- отсутствие полной информации о состоянии хладагента и хладоносителей по всему контуру, как следствие, невозможность объективной оценки работы отдельных теплообменных аппаратов и регулирующих органов и расчета температурных потерь на аппаратах и трубопроводах. Это значительно осложняло работу оператора, поскольку, управляя в ручном режиме системами регулирования, он не имел достаточного объема информации, подтверждающей правильность его действий;

- отсутствие непрерывной записи технологических параметров во время работы установки, как следствие, ограниченные возможности проведения последующей обработки данных и анализа технического состояния отдельных аппаратов и рабочих контуров;

- недостаточно удобный пульт оператора и низкая информативность мнемосхем: средства управления и представления информации, рассредоточенные на довольно большом расстоянии, не давали возможности оператору управлять частью систем в ручном режиме и одновременно следить за работой других систем. В критических же ситуациях один оператор просто не справлялся с работой, ему требовался помощник. Информацию о состоянии технологических параметров можно было получить только из информационных протоколов размерностью 16 единиц, которые поочередно вызывались на монитор, общий для двух холодильных установок;

- отсутствие программы слива жидкого фреона в ресивер после работы.

При разработке новой системы управления была поставлена задача заменить элементную и программную базу в соответствии с современными требованиями и возможностями и устранить недостатки прежней системы. Программно-алгоритмическое обеспечение новой АСУТП должно быть ориентировано, наряду с повышением качества и надежности управления, на максимально возможное снижение активного участия оператора в процессе управления и открыто для дальнейшего развития и совершенствования. При этом не ставилось цели отказа от всего, что было сделано ранее, напротив, необходимо было сохранить все достоинства старой системы. Требовалось сохранить прежние алгоритмы управления, системы защит и блокировок, возможность автономной работы систем регулирования, расширить систему измерений, введя в нее новые измеряемые и расчетные параметры, разработать более компактный пульт управления, обеспечить оператора достаточным объемом информации о ходе ТП на современных средствах отображения в удобной для восприятия форме (мнемосхемы рабочих контуров, графики, цифровые значения), обеспечить непрерывную запись всех технологических параметров и состояний запорно-регулирующей арматуры, увеличить размерность информационных протоколов.

В свете этих проблем перед специалистами НИЦ ЦИАМ была поставлена задача разработки стратегии дальнейшего развития и эксплуатации ХОС ВКС на ближайшую и долгосрочную перспективу. В период с 2010–2014 гг. был проведен ряд работ, направленных на поиск методов решения существующих проблем и разработку стратегии развития ХОС на ближайшую и долгосрочную перспективу:

- проведены аналитические исследования в области создания и применения экологически безопасных хладагентов, альтернативных фреону 22, изучен опыт ретрофита оборудования на альтернативные хладагенты, выполнена расчетная оценка возможности перевода ХОС ВКС на новый хладагент;

- проведены исследования в области промышленного производства хладоносителей, изучен опыт их применения;

- выполнены расчетно-экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик теплообменного оборудования ХОС ВКС, на основании результатов которых разработаны методики по организации мероприятий, направленных на обеспечение надежной работы холодильных установок с учетом физического состояния оборудования;

- введена в эксплуатацию новая АСУТП, в которой устранены все недостатки прежней системы. Внесены изменения в алгоритм и разработано новое ПО на этапе работы «пуск-нагрузка» с использованием в управлении системами регулирования наряду с классическими методами элементов нечеткой логики [3], что позволило расширить область работы системы в автоматическом режиме без вмешательства оператора. Поскольку холодильные установки несколько различаются по монтажному исполнению, расположению датчиков и эксплуатационным характеристикам оборудования, базовое ПО требуется корректировать и отлаживать для каждой конкретной установки с учетом ее особенностей. В настоящее время это выполнено для части установок ХОС, которые теперь работают в автоматическом режиме до выхода на рабочие параметры, то есть полностью автоматизирован режим захлаживания, на других установках отладка программ продолжается. В режимах работы с нулевой холодопроизводительностью и под нагрузкой по-прежнему используется ручное управление процессом с использованием автоматической работы отдельных систем регулирования в автономном режиме. Это наиболее сложные режимы работы, не имеющие заранее заданных параметров, для их автоматизации потребуются внедрение в ПО алгоритмов и технологий искусственного интеллекта более высокого уровня, что позволит программам управления гибко подстраиваться под требования пользователя.

- разработано техническое задание для проектирования новой холодильной установки под требуемые параметры по охлаждению воздуха.

По итогам проведенных работ была сформулирована следующая концепция развития ХОС:

— на долгосрочную перспективу: полная реконструкция ХОС с поэтапной заменой холодильных установок новыми, работающими на экологически безопасных хладагентах и хладоносителях и обладающими более широкими возможностями по сравнению с существующими холодильными установками;

— на ближайшую перспективу:

— продолжение работ по экспериментальным исследованиям эксплуатационных характеристик теплообменного, компрессорного и регулирующего оборудования всех холодильных установок;

— проведение сравнительного анализа технического состояния холодильных установок на основании полученных расчетно-экспериментальных данных;

— усовершенствование программно-алгоритмического обеспечения для каждой холодильной установки с учетом эксплуатационных характеристик входящего в ее состав оборудования в целях оптимизации управления технологическим процессом конкретной холодильной установки;

— разработка ПО для автоматизации режимов работы с нулевой холодопроизводительностью и под нагрузкой [4];

— проектно-конструкторская проработка новой холодильной установки;

— проведение мероприятий по обеспечению надежной и эффективной эксплуатации существующих холодильных установок (экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик теплообменного оборудования, оптимизация алгоритмов работы на основании результатов экспериментальных исследований, дальнейшая модернизация АСУТП).

Список литературы

1. Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П., Медникова Н.М., Крамской Э.И. Теплообменные аппараты холодильных установок. Под ред. Даниловой Г.Н., Л., Машиностроение, 1986. 303 с.
2. Железный В.П., Жидков В.В. Эколого-энергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике. Донецк: Донбасс. 1996. 144 с.
3. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического регулирования. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
4. Джонс М. Тим Программирование искусственного интеллекта в приложениях. Москва, ДМК Пресс, 2013. 311 с.

Марков Юрий Степанович — канд. техн. наук, начальник отделения,
Гребенников Александр Васильевич — зам. начальника отделения,
Лепестихина Екатерина Геннадьевна — начальник сектора,

Меркулов Михаил Игоревич — инженер, *Бурмистров Валерий Валерьевич* — инженер НИЦ ЦИАМ — филиал ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова».
Контактный телефон 8-(929)-648-72-97.
E-mail: merkulov.mihail.ciam@ro.ru

РАЗРАБОТКА СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ АСУТП КОМПЛЕКСА СТЕНДОВ Ц-16 В ОБЕСПЕЧЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

А.Р. Саев, А.А. Елтаренко, С.Е. Тарашев (ЦИАМ им. П.И. Баранова)

Описана АСУТП комплекса стендов Ц-16. Показана принципиальная возможность создания регулятора с цифровым управлением, с замкнутым контуром обратной связи через компьютер на базе аппаратуры ООО «Л КАРД» (при определенных ограничениях). За счет разделения и гальванической развязки цепей управления отсечными и регулирующими клапанами и исполнительной силовой части схемы управления как между собой, так и от стендового генератора значительно повысилась надежность управления и помехоустойчивость АСУТП.

Ключевые слова: АСУТП, синхронный сбор данных, гальваническая развязка, каналы цифрового управления.

В ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» на стенде Ц16 В/К проведена модернизация программно-аппаратного обеспечения АСУТП, а на стенде Ц16 создана АСУТП, обеспечивающая проведение испытаний модельной камеры дожигания стендовой энергетической установки с твердым наполнителем по схеме с присоединенным трубопроводом и организацией предварительного огневого подогрева на стенде. В процессе запуска установки длительно в несколько секунд необходимо вывести огневой подогреватель на режим, осуществить воспламенение и рабочий процесс в камере сгорания экспериментального объекта по заданной циклограмме. Ранее существовавшая на стенде Ц16 В/К АСУТП была выполнена на базе устройств связи с объектом (УСО)

1992 г. выпуска. Эти УСО физически и морально устарели, не соответствовали возрастающим требованиям по точности, быстродействию, синхронизации сигналов управления и сбора экспериментальных данных и в связи с отсутствием устаревшей элементной базы стало неремонтопригодной.

На стенде Ц16 была поставлена задача создания стендовой АСУТП, которая позволит обеспечить работу установки по заданной циклограмме, содержащей циклы автоматического включения/выключения отсечных клапанов, регулирование расходов топливных компонентов по пяти контурам и осуществление контроля и регистрацию параметров.

АСУТП выполнена на базе аппаратуры производства ООО «Л-КАРД» (Москва) и включает управля-