

УДК 621.59(075.8)

**И.К. Буткевич**Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, ул. Косыгина, 2, г. Москва, РФ, 117334  
e-mail: butkevich@kapitza.ras.ru

## АВТОМАТИЗАЦИЯ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ УСТАНОВОК И СИСТЕМ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

*Автоматизация современных криогенных гелиевых установок (КГУ) и систем (КГС) является необходимым условием повышения их эффективности и надёжности. Все коммерческие КГУ ведущих фирм снабжаются системами автоматического управления (САУ). Рассматриваются основные концептуальные положения и различные уровни автоматизации на основе отечественных САУ КГУ с поршневыми и турбодетандерами. САУ этого типа предоставляют широкие возможности оператору участвовать как в процессе пуска/наладки системы, так и в её перенастройке в процессе эксплуатации. Для дальнейшего совершенствования САУ КГУ и КГС обобщается создание адаптивных систем автоматизации и диагностических программ, предназначенных для предотвращения аварийных ситуаций и распознавания причин аварий с высокой степенью достоверности.*

**Ключевые слова:** Гелий. Криогеника. Ожижение гелия. Криогенная гелиевая установка. Автоматизация. Алгоритм. Система автоматического управления. Оптимизация. Надёжность.

**I.K. Butkevich**

## AUTOMATIZATION OF CRYOGENIC HELIUM PLANTS AND SYSTEMS: PROBLEMS AND SOLUTIONS

*Automatization of modern cryogenic helium plants (CHP) and systems (CHS) is a necessary condition for their efficiency and safety increase. All commercial CHP of leading companies are provided with the systems of automatic control (SAC). Basic, conceptual positions and different levels of automatization on the base of domestic SAC CHP with piston and turbo expanders. SAC of this type provide the operator with ample opportunity to participate both in the process of the system commissioning and in its reconfiguration during the work. The creation of automatization adaptive systems and diagnostic programs for handling emergency situations and the identification of accident causes at the highest level of confidence is grounded for further SAC CHP and CHS development.*

**Keywords:** Helium. Cryogenics. Helium liquefaction. Cryogenic helium plant. Automatization. Algorithm. System of automatic control. Optimization. Safety.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные криогенные гелиевые системы (КГС) и установки (КГУ) невозможно представить без автоматизации того или иного уровня. Это связано, с одной стороны, со сложностью протекающих в них теплогидравлических процессов и, с другой стороны, с дефицитом высококвалифицированного персонала. Оба этих фактора обуславливают практическую невозможность без автоматизации обеспечения оптимальной реализации процессов (с минимальными затратами энергии), исключения постоянной опасности влияния человеческого фактора на надёжность систем (установок) и их безопасную эксплуатацию.

В настоящей статье излагается видение уровней и проблем автоматизации КГС (КГУ) с точки зрения

технолога-криогеника, не затрагивающего теорию систем автоматического регулирования технологических процессов, которой посвящено достаточное количество специальной литературы. При этом приходилось учитывать, что криогенная система как объект регулирования обладает всеми свойствами, присущими термомеханическим системам.

В общем случае в состав КГУ входят: криогенный блок с детандерами, газгольдер, технологический компрессор, гелиевый ресивер, закачной компрессор, система маслоочистки (может иногда отсутствовать), сосуд Дьюара для жидкого азота (может отсутствовать), блоки осушки и криогенной очистки гелия.

КГУ как объект управления обладает рядом специфических особенностей. Основные из них: наличие значительного количества последовательно и парал-

лельно соединённых аппаратов различного назначения и типа; достаточно большая тепловая и гидравлическая инерционность системы; широкий диапазон изменения температур и давлений в аппаратах установки в процессе работы и, как следствие, изменение теплофизических свойств криоагента и материалов; изменение характеристик регулирующих органов (в частности регулирующей арматуры); достаточно сложная взаимосвязь основных регулируемых параметров установки (температур и давлений); сложность создания адекватной динамической модели, учитывающей показатели КГУ при работе в различных режимах (пуск, захлаживание, ожижение и криостатирование, остановка).

## 2. УРОВНИ АВТОМАТИЗАЦИИ КГУ

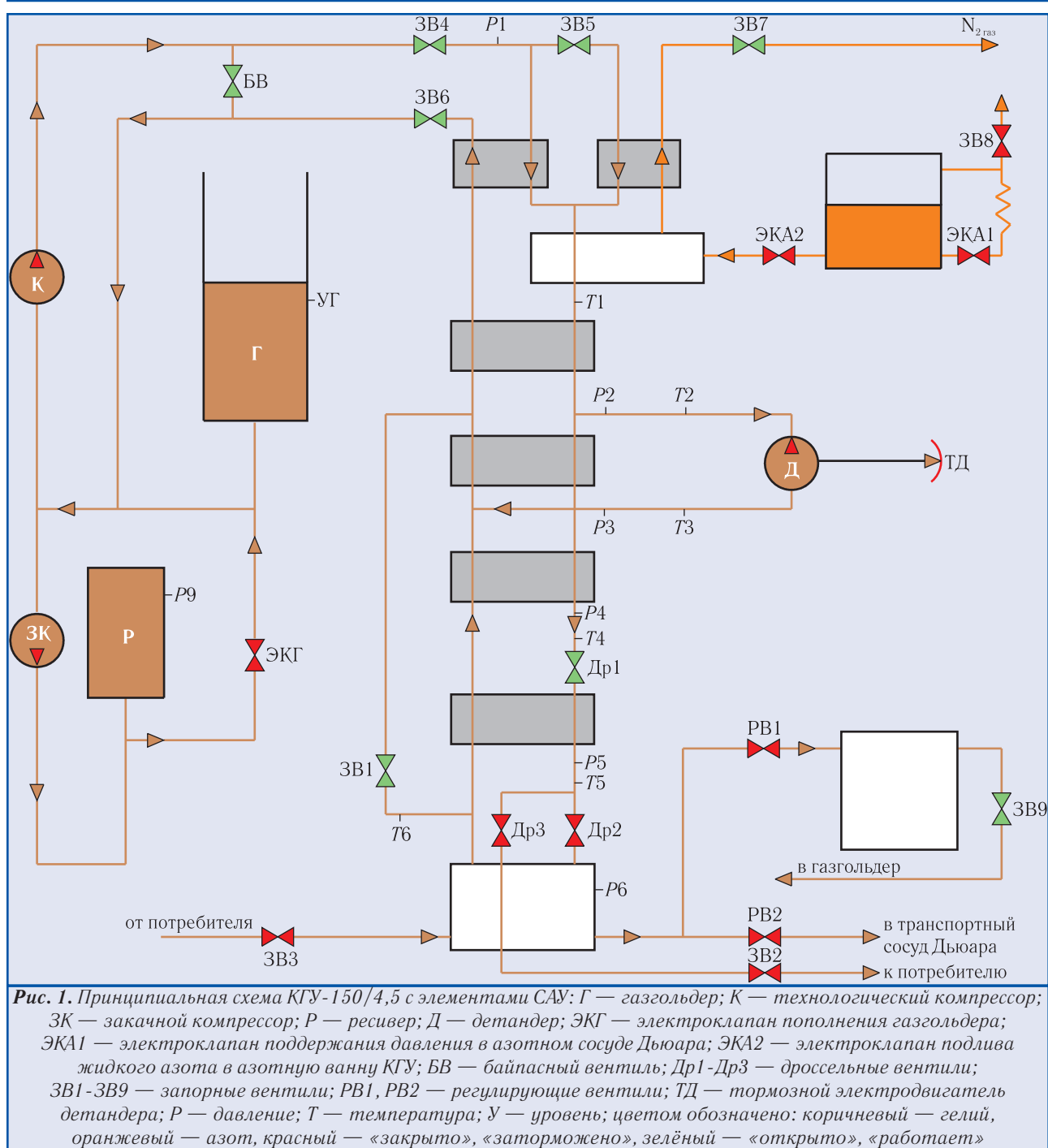
К самому низкому уровню автоматизации можно отнести различные дискретные устройства, обеспечивающие безопасную эксплуатацию КГС (КГУ). Прежде всего, это — предохранительные клапаны, срабатывающие при превышении заданного уровня давления в той или иной части системы, а также разрывные мембраны. К этому же уровню можно отнести и различные блокировки, отключающие те или иные механизмы (или запрещающие их пуск) при отклонении рабочих параметров от заданных. Эти локальные, дискретные контуры регулирования предназначены для контроля за работой того механизма, параметры которого регистрируются, как например, при уменьшении давления масла или расхода (давления) охлаждающей воды, при превышении температуры сжимаемого гелия выше нормы в какой-либо ступени компрессора, при перегрузке (по току) приводного электродвигателя и т.п., выдаётся команда для остановки компрессора.

К следующему уровню автоматизации следует отнести дискретные контуры управления для исполнения некоторых тривиальных функций, позволяющих эксплуатационному персоналу сосредоточиться на более интеллектуальных задачах управления процессами работы криогенных гелиевых установок и систем: поддержание заданного давления в азотном резервуаре, питающем азотную ванну КГУ (если присутствует ступень предварительного охлаждения жидким азотом), а также уровня жидкого азота в азотной ванне установки; пополнение газгольдера от источника гелия повышенного давления и закачка гелия из газгольдера в ресивер (при условии использования газгольдерной схемы компримирования); поддержание температуры водяной ванны испаряющегося гелия, заливаемого в сосуды Дьюара, и некоторые др. Для реализации этого уровня автоматизации обычно используются локальные контуры управления электромагнитными клапанами, различного рода нагревателями, электродвигателями компрессоров. Как правило, эти локальные контуры включаются при подготовке системы к работе эксплуатационным персоналом и присутствуют в большинстве коммерческих отечественных и зарубежных КГУ, например, КГУ-150/4,5, КГУ-400/4,5 (СССР); СТИ-1400 (США). В качестве датчиков в них

применялись различного типа электроконтактные манометры, термодпары, концевые выключатели.

Автоматическое поддержание заданных параметров рабочего ожижительного или рефрижераторного режима КГУ впервые было реализовано на базе промышленных ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальных) регуляторов. В простейшей КГУ к таким параметрам обычно относятся давление на входе в установку и температура детандерной СПО. Этот уровень регулирования позволяет автоматически поддерживать заранее заданные параметры рабочего режима, локализуя некие случайные или закономерные, например, слив жидкого гелия из сборника криогенного блока в сосуды Дьюара, возмущения. Впервые на отечественных КГС такая стабилизация параметров была осуществлена на установке КГУ-150/4,5 в составе стендовой КГС СПК-100 в лаборатории ВНИИКриогенмаша. Позже эти контуры были реализованы на мини-ЭВМ СМ-2. Наиболее полно уровень автоматической стабилизации параметров КГУ в режиме ожижения гелия удалось опробовать на стендовом ожижителе ОГ-400 на базе мини-ЭВМ СМ-4. Однако следует заметить, что КГУ как объект регулирования является достаточно устойчивой системой, т.е. при снятии возмущения, даже при отсутствии регулятора, её параметры возвращаются к исходному значению. Примером может являться ожижительный режим КГУ при периодическом опорожнении сборника гелия. При открытии сливного вентиля количество жидкости в сборнике начинает уменьшаться, паровой объём сборника увеличивается, что приводит к уменьшению величины обратного потока гелия. В результате температуры перед детандерной СПО и давления прямого потока гелия возрастают, температура перед дросселем также повышается, и устанавливаются некие новые значения параметров. После того, как слив жидкого гелия прекращается (сливной вентиль закрывается), происходит обратный процесс: объём парового пространства сборника уменьшается, величина обратного потока возрастает, температуры перед детандерной СПО и перед дросселем понижаются, давления прямого потока снижаются, и все параметры гелия возвращаются к значениям, имевшим место при накоплении жидкого гелия в сборнике. Это указывает на то, что качественное регулирование режима ожижения может только ускорить переходный процесс. Иными словами, существенного облегчения аппарату КГУ такой уровень автоматического регулирования не принесёт. Наиболее трудоёмким, требующим хорошей теоретической подготовки или значительных практических навыков, является режим пуска, захлаживания и вывода установки на устойчивый номинальный режим ожижения или криостатирования.

Эту задачу решает следующий уровень автоматического управления, реализующий алгоритмы пускового режима, режима ожижения и остановки (как плановой, так и аварийной). Фактически такой уровень автоматического управления стал возможен с появлением микропроцессорной техники и персональных компьютеров. На этом уровне управления

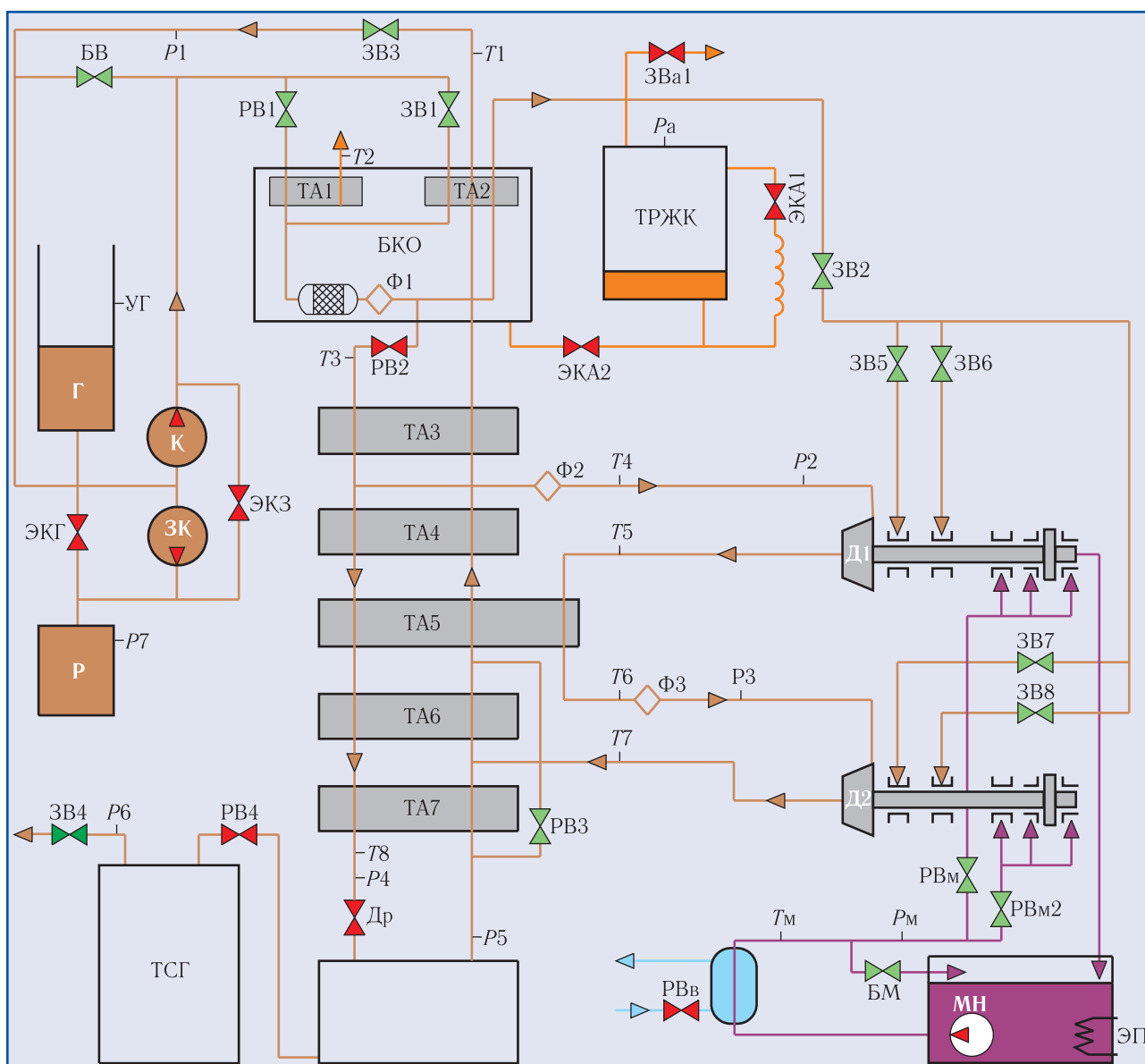


удётся реализовать заранее заданный алгоритм пуска, захлаживания и выхода установки на предположительно оптимальные параметры расчётного режима. Сегодня именно такой уровень систем автоматического управления (САУ) реализован в коммерческих КГУ таких ведущих криогенных фирм, как «Linde» и «Air Liquide». Такой же уровень САУ имеет и гелиевый ожижитель Института физических проблем им. П.Л. Капицы (ИФП РАН) Г-4. По своей технологической схеме он идентичен промышленной установке КГУ-150/4,5, упрощённая схема которой совместно с датчиками и органами системы автоматического управления представлена на рис. 1. Аналогичная схема для типовой турбодетандерной КГУ изображена на рис. 2. Её пневмогидравлическая схема принципиально ничем не отличается от схем ком-

мерческих турбодетандерных ожижителей гелия фирм «Linde» и «Air Liquide», за исключением дополнительных коммуникаций и регулирующих органов, связанных с использованием турбодетандеров на комбинированных (газomasляных) опорах, вместо газодинамических подшипников. На рисунках 1 и 2 показано основное оборудование и его состояние, измеряемые параметры криоагентов (давления, температуры, уровни жидких азота и гелия, частота вращения валов детандеров), состояние запорной и регуливающей арматуры. Эти схемы воспроизведены с экрана монитора динамического программного тренажёра, разработанного для КГУ с поршневыми и турбодетандерами.

В качестве контуров регулирования КГУ используются:

— дискретные для поддержания уровня газгольдер-



**Рис. 2.** Принципиальная схема турбодетандерного ожижителя гелия с элементами САУ: Г — газгольдер; К — технологический компрессор; ЗК — закачной компрессор; Р — ресивер; Д1, Д2 — детандеры; МН — масляный насос; БКО — блок криогенной очистки гелия; ТСГ — гелиевый сосуд Дьюара; ТРЖК — азотный сосуд Дьюара; ТА1-ТА7 — теплообменные аппараты; Ф1-Ф3 — фильтры; ЭП — электроподогреватель; ЭКГ — электроклапан пополнения газгольдера; ЭКЗ — электроклапан закачки; ЭКА1 — электроклапан поддержания давления в азотном сосуде Дьюара; ЭКА2 — электроклапан подлива жидкого азота в азотную ванну КГУ; БВ — байпасный вентиль; БМ — байпасный вентиль маслонасоса; Др — дроссельный вентиль; ЗВ1-ЗВ8 — запорные вентили; РВ1-РВ4 — регулирующие вентили; P — давление; T — температура; У — уровень; цветом обозначено: коричневый — гелий, оранжевый — азот, сиреневый — масло; голубой — вода; красный — «закрыто», «заторможено», зелёный — «открыто», «работает»

дера (открытием-закрытием СКГ (ЭКГ) и включением-выключением ЗК) или давления обратного потока гелия в безгазгольдерной схеме компримирования (вентильми «подпитки» и «закачки» гелия в оперативный ресивер); уровня жидкого азота в азотной ванне (открытием-закрытием ЭКА2); давления в азотном сосуде Дьюара (открытием-закрытием ЭКА1); уровня гелия в сборнике (открытием-закрытием сливного вентиля РВ1);

— аналоговые для поддержания давления на входе в КГУ (степенью открытия БВ); оптимальной температуры перед детандерной ступенью предварительного охлаждения (степенью открытия Др); уровня жидкого

гелия в сборнике (степенью открытия сливного вентиля при непрерывном режиме слива) и распределения прямого потока гелия между гелиевым и азотным теплообменниками (степенью открытия РВ1).

В турбодетандерных КГУ добавляются аналоговые контуры поддержания рабочей частоты вращения вала детандера регулированием величины тормозной мощности, а в КГУ с турбодетандерами с комбинированными опорами — дискретные или аналоговые контуры поддержания заданных параметров масла (давления и температуры).

Кроме этого, все САУ этого уровня обеспечивают режим автоматического пуска, захлаживания и выхо-

да на рабочий режим работы КГУ по заранее заданному алгоритму. САУ КГУ «Linde» и «Air Liquide», разработанные фирмой «Siemens», позволяют полностью автоматизировать управление, осуществлять пуск и остановку установки в любое время без специальных предварительных операций, отслеживать изменения параметров, хранить и распечатывать данные, производить аварийное оповещение и осуществлять мониторинг с помощью удалённого доступа. Основной недостаток этих САУ — достаточно жёсткое отношение к пользователю, существенно ограничивающее его возможности влиять на технологический процесс.

В ИФП РАН совместно с Санкт-Петербургской фирмой «Вертикаль» разработана и реализована САУ ожижителя гелия Г-4 с поршневыми детандерами, являющегося прототипом промышленной установки КГУ-150/4,5 [1]. Сейчас совместно с ОАО «НПО Гелиймаш» с учётом имеющегося опыта создаётся автоматизированный турбодетандерный ожижитель гелия ОГ-100.

Перечислим основные концептуальные положения, лежащие в основе этих САУ КГУ:

- они создаются на базе вербального алгоритма и не требуют строгого математического описания установки;

- количество и тип контуров регулирования определяется теплофизической сущностью протекания известных термодинамических процессов в машинах и аппаратах КГУ;

- контуры регулирования встраиваются в САУ с «пустым» законом регулирования, т.е. без числовых коэффициентов в отдельных составляющих ПИД-закона регулирования;

- оператору (аппаратчику, наладчику САУ) предоставляется возможность в процессе пусконаладки системы (а также и в процессе эксплуатации) постепенно вводить в строй отдельные контуры регулирования;

- пользователю САУ позволяет активно влиять на работу КГУ как до её автоматического пуска, так и в процессе работы, изменяя уставки (граничные значения параметров, используемые как в алгоритме, так и в дискретных контурах регулирования) и параметры контуров регулирования;

- подготовительный период к пуску КГУ должен проходить в режиме активного диалога между системой и оператором (аппаратчиком), что удешевляет систему, так как часть операций проводится в ручном режиме и не требует дистанционного управления;

- для отладки системы без пуска КГУ и тренировки обслуживающего персонала в составе САУ предусмотрен программный имитатор, который решён в той же программной среде, что и САУ реальной КГУ, и полностью отражает все изменения, вносимые в САУ в процессе её пусконаладки и эксплуатации; в автоматическом режиме работы имитатор позволяет до реального пуска установки проверить все алгоритмы, а в ручном режиме — может использоваться для обучения эксплуатационного персонала.

### 3. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ САУ КГУ

Для реализации алгоритма, используемого в САУ, и наполнения контуров регулирования конкретными значениями параметров необходимо их каким-то образом определить. Если рабочие значения таких параметров, как давление на входе в установку  $P1$  и температура перед дросселем  $T8$  (см. рис. 2) достаточно устойчивы по отношению к конструкции и эффективности машин и аппаратов КГУ и могут быть заданы из оптимизационного расчёта цикла, то задание остальных параметров требует достаточно трудоёмких расчётов или экспериментального определения в процессе пусконаладочных работ. Однако, однажды определённые, они могут изменяться в процессе эксплуатации. Это относится к таким характеристикам КГУ, как КПД детандеров, значения теплопритоков, интенсивность опорожнения сборника жидкого гелия, давления в гелиевом ресивере и т.п. Рассмотрим два примера.

Для сокращения времени пуска и ускорения захлаживания имеется контур поддержания пускового давления  $P5$  (см. рис. 2) в сборнике жидкого гелия путём воздействия на степень открытия дросселя. Числовое значение этого давления задаётся одинаковым во всем диапазоне температур и не зависящем от степени открытия «холодного» байпасного вентиля РВЗ. Однако по мере понижения температуры гидравлическое сопротивление аппаратов меняется. К тому же, это давление в сборнике зависит от степени открытия РВЗ, который согласно используемому алгоритму либо полностью открыт, либо закрыт. При этом его закрытие происходит после достижения некоторого заданного значения температуры  $T8$  перед дросселем. Ни правильность выбора числовых значений  $P5_{\text{пуск}}$  и  $T8_{\text{зад}}$  ни сам факт, что значение  $P5_{\text{пуск}}$  должно сохраняться неизменным во время всего пускового периода, а закрытие РВЗ должно происходить сразу и полностью, неочевидны. Скорее, наоборот, очевиден факт неоптимального ведения процесса захлаживания, время которого для КГУ, работающих по регламенту периодических и достаточно частых пусков, иногда является определяющим при выборе типа установки [2].

В качестве второго, более простого, примера можно привести обоснование значений уровня газгольдера УГ, при которых происходит закрытие клапана пополнения ЭКГ и включение закачного компрессора ЗК. Понятно, что  $УГ_{\text{вкл.ЗК}}$  должно быть больше  $УГ_{\text{откл.ЭКГ}}$  на некую величину  $\Delta УГ$ . Но значение этой величины является функцией давления в ресивере, из которого происходит процесс пополнения. Причём из-за инерционности системы, зависящей от объёма коммуникаций между ресивером и газгольдером, чем больше давление в ресивере  $P7$ , тем большей должна быть эта величина. Это означает, что в процессе эксплуатации величина  $\Delta УГ$  должна быть величиной переменной.

Оба эти примера показывают, что современные САУ КГУ не всегда могут обеспечить необходимое качество управления в переходных режимах и при не-

стационарных процессах, возникающих в период эксплуатации установки. Вместе с тем, используя накопленный в течение двадцати лет опыт автоматизации КГУ и последние достижения вычислительной техники, можно использовать новые подходы и способы решения задач автоматизации КГУ. В частности, возникает возможность разработки системы с непрерывным процессом адаптации, которая будет обеспечивать перенастройку параметров регуляторов и уставок при изменяющихся характеристиках объекта без контроля и вмешательства со стороны обслуживающего персонала [3]. Такая САУ позволит не только значительно уменьшить энергозатраты, повысить производительность установки и ускорить режим пуска, но и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и практически свести на нет влияние человеческого фактора на технологический процесс.

Как уже отмечалось, при программной реализации вербального алгоритма и контуров регулирования получают «пустые» законы регулирования. Следовательно, перед началом работы должна быть проведена идентификация (настройка) САУ. Идентификация — один из основополагающих этапов в создании САУ, от которого во многом зависит её дальнейшая работа. В адаптивных САУ этап идентификации установки должен проходить без участия человека. Разработка подобных систем на сегодняшний день является актуальной задачей криогенной техники, так как основной недостаток настройки современных САУ КГУ — необходимость участия в ней опытного наладчика, совмещающего в одном лице криогениста и высококвалифицированного специалиста по системам управления и программного обеспечения.

Пятый этап предполагает создание разветвлённой и достаточно полной системы автоматической диагностики КГУ, т.е. проявления автоматической реакции КГУ на предаварийные ситуации, а также определения первопричины аварийной остановки, если таковая произошла. Сложность реализации данного этапа заключается в том, что он сводится к решению задачи в условиях ограниченного объёма диагностической информации. В настоящее время возможности методов информационной поддержки принятия решений по предотвращению аварийных ситуаций на ранней стадии развития повреждения или для определения истинной причины аварийной остановки используются в криогенной технике не в полной мере. Обычно во многих случаях ограничиваются лишь фактом обнаружения того или иного дефекта.

Приведём пример. Произошла аварийная остановка технологического компрессора при понижении уровня газгольдера УГ <  $УГ_{авар}$ , которая будет зафиксирована современной системой диагностики. Однако истинных причин низкого уровня газгольдера может быть достаточно много. Перечислим некоторые из них: низкое давление  $P7$  гелия в ресивере, из которого происходит пополнение; не открылся клапан пополнения ЭКГ (из-за программного сбоя, отказа реле, нарушения питания, механического повреждения

самого клапана или отказа датчика уровня газгольдера УГ); появилась большая утечка гелия из системы (нарушение герметичности разъёмных соединений, разрушение паяных или сварных соединений); включился и не остановился закачной компрессор ЗК (из-за программного сбоя, отказа реле и отказа датчика уровня газгольдера УГ).

Из анализа этого далеко неполного перечня становится ясно, что не все причины могут быть определены с помощью анализа показаний непосредственных датчиков (например, УГ или  $P7$ ). В процессе принятия решений приходится осуществлять выбор в условиях неопределённости исходных данных, которая обусловлена наличием факторов, не поддающихся строгой количественной оценке. Следовательно, для решения указанных проблем необходимым является привлечение инструментов системного анализа с использованием различных методов прогнозирования.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что современный уровень САУ КГУ и КГС не в полной мере обеспечивает работу криогенных гелиевых систем в оптимальном режиме. Особенно это касается ожижителей гелия малой и средней производительности, работающих с достаточно частыми периодическими и кратковременными пусками. Требования минимизации пускового периода и максимальной скорости ожижения, очевидно, могут быть в полной мере выполнены только с применением адаптивной системы автоматического управления. Её создание потребует, в свою очередь, проведения анализа динамических и статических характеристик КГУ, создания алгоритмической базы для обработки отзвон системы после подачи возмущающих воздействий и методики получения настроечных коэффициентов для контуров регулирования САУ.

Для получения достоверной информации о состоянии КГУ (КГС) в процессе её эксплуатации необходимо создание диагностической программной модели с использованием как анализа прямых показаний датчиков параметров установки, так и причинно-следственных связей между параметрами и состоянием оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буткевич И.К., Рыдник Е.А., Шапов В.М. Новое о старом: об автоматизации криогенных гелиевых установок // Холодильный бизнес. — 2001. — № 2. — С. 34-35.
2. Буткевич И.К. Нетрадиционный взгляд на тип детандеров криогенных гелиевых установок малой и средней производительности // Технические газы. — 2010. — № 4. — С. 31-36.
3. Александрова И.В., Буткевич И.К. Современные проблемы автоматизации криогенных гелиевых установок // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение (спец. выпуск). — 2008. — С. 102-112.