



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011-9  
ОЭФ

В.И. Киреев<sup>\*</sup>, А.В. Плескач

**Двухконтурная система регулирования  
термостатированием прецизионного вершинного  
детектора установки СВД-2**

---

\* ОИЯИ, Дубна

Протвино 2011

**Аннотация**

Киреев В.И., Плескач А.В. Двухконтурная система регулирования термостатированием прецизионного вершинного детектора установки СВД-2: Препринт ИФВЭ 2011-9. – Протвино, 2011. – 19 с., 7 рис., 1 табл., библиогр.: 6.

Для термостатирования прецизионного вершинного детектора установки СВД-2 разработана и создана двухконтурная система регулирования. Она позволила обеспечить необходимую точность поддержания температуры даже в случае возникновения экстремальных возмущений в системе. При этом точность поддержания температуры была существенно улучшена и составила  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ .

**Abstract**

Kireev V.I., Pleskach A.V. Double-loop regulation system for thermostating of the precision vertex detector at the SVD-2 set-up: Preprint IHEP 2011-9. – Protvino, 2011. – p. 19, figs. 7, table 1, refs.: 6.

Double-loop regulation system is developed to stabilize temperature of the precision vertex detector at the SVD-2 set-up. It is permitted to provide the necessary precision of maintenance of temperature even in case of extraordinary disturbing influence in the system. At the same time the precision of maintenance of temperature are increased importantly and composed  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ .

## Введение

Разработанное и изложенное в работе [1] автоматическое регулирование системы термостатирования прецизионного вершинного детектора (ПВД) выполнено по одноконтурной схеме, что в случае сильного возмущения регулируемого параметра (температуры внутри кожуха ПВД), например из-за резкого изменения температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ) при работе в неотапливаемое время года или из-за отключения одного или нескольких дисков *VA*-плат аварийно или во время настройки, приводит к изменению тепловой нагрузки на 30-40% и, как следствие, к возникновению длительного переходного процесса с большой амплитудой изменения температуры, который вызывает существенное снижение точности поддержания температуры в рабочем объеме детектора.

После столкновения с неудовлетворительной работой системы термостатирования в неотапливаемый период пришлось временно перейти на ручной режим управления, который совмещался с исследованием динамических характеристик системы термостатирования и её элементов, анализом особенностей их взаимодействия, а также поиском путей улучшения её рабочих характеристик.

В результате, чтобы исключить этот недостаток, была разработана и создана двухконтурная система регулирования термостатированием ПВД. Обоснованию создания двухконтурной системы регулирования и её описанию посвящается эта работа.

## 1. Система питания хладагентом

В процессе эксплуатации выяснилось, что нет необходимости охлаждать блоки пучкового телескопа из-за их малой тепловой нагрузки. Поэтому схема питания хладагентом существенно упростилась, что отражено на рис. 1.

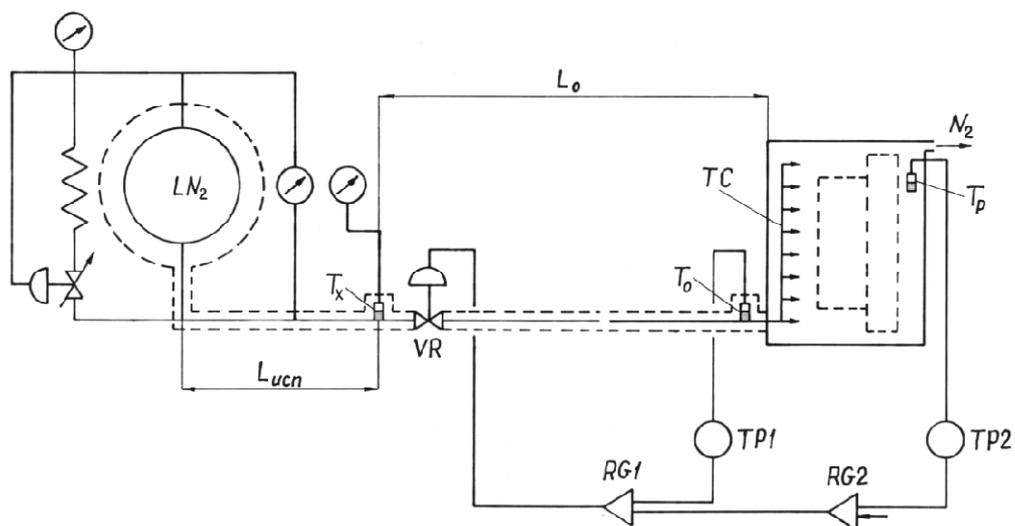


Рис. 1. Схема термостатирования ПВД:  $LN_2$  – танк с жидким азотом;  $T_x$  – температура азота на выходе из участка испарения;  $VR$  – сервомотор;  $RG1$  – пневморегулятор внутреннего контура;  $T_0$  – температура азота на входе в  $TC$ ;  $T_p$  – температура внутри кожуха ПВД по конденсационному термометру;  $RG2$  – пневморегулятор внешнего контура;  $TP1$  и  $TP2$  – трансмиттеры;  $TC$  – теплообменник смешения.

Система подачи хладагента (газообразного азота) состоит из азотного танка ёмкостью  $1 \text{ м}^3$ , линии питания, контрольно-регулирующей и запорной арматуры.

Давление в танке поддерживается автоматически с помощью регулятора прямого действия и контролируется соответствующим манометром.

Линия питания хладагентом состоит из двух участков: линии испарения жидкого азота ( $L_{uch}$ ) при некотором нагреве его паровой фазы и линии подогрева газообразного азота ( $L_0$ ).

Подогрев осуществляется за счёт теплопритока через изоляцию линии питания.

Конденсационный термометр перед сервомотором ( $VR$ ) контролирует температуру после испарительного участка линии. Он заполняется аргоном и может измерять

температуру от 87 до 145 К. Линия транспортировки хладагента выполнена из пластиковой трубки Ø12x2 мм и изолирована с помощью слоёв фильтра Петрянова, намотанных до наружного диаметра равного 40 мм.

На входе в кожух ПВД установлен конденсационный термометр, заполняемый углекислым газом. Диапазон его измерения от -78 до +20°C. Он контролирует температуру хладагента на входе в теплообменник смешения, который подробно описан в работе [2].

Внутри кожуха ПВД установлен конденсационный термометр, заполняемый фреоном-12. Диапазон его измерения от -5 до +20°C.

Термометры на входе в ПВД и в его рабочем объёме включены в соответствующие контуры регулирования.

Из предположения, что теплоприток по всей длине участка испарения постоянен и воспринимается жидким и газообразным азотом без потерь, нами получена следующая зависимость для определения температуры азота на выходе из участка испарения:

$$T_x = \frac{q(L_{исп} - \frac{r \cdot G}{C_p})}{C_p G} + T_K,$$

где  $r$  – теплота испарения жидкого азота,  $L_{исп}$  – длина испарительного участка,  $G$  – весовой расход хладагента,  $q$  – линейная плотность теплового потока,  $T_K$  – температура кипения жидкого азота,  $C_p$  – теплоёмкость газообразного азота.

При выводе этой формулы было использовано среднеарифметическое значение  $\Delta T$ , так как  $(T_{oc} - T_K) / (T_{oc} - T_X) < 2$ .

Линейная плотность теплового потока ( $q$ ), т.е. потока, отнесённого к единице длины трубы, была определена на основании экспериментальных данных по следующей формуле:

$$q = \frac{r \cdot G + C_p G (T_X - T_K)}{L_{исп}}.$$

Подставляя в эту формулу экспериментальные данные, полученные во время эксплуатации ПВД при  $T_{oc} = 18^\circ\text{C}$ :

$$G = 1.09 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с},$$

$$T_X = 110.8 \text{ К},$$

$$T_K = 78 \text{ К},$$

$$L_{исп} = 3.4 \text{ м},$$

$$r = 2 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг},$$

$$C_p = 1040 \text{ Дж/(кг·К)},$$

находим, что

$$q = 75 \text{ Вт/м}.$$

На рис. 2 представлена зависимость  $T_X = f(G)$  для рабочего диапазона расходов хладагента системы термостатирования.

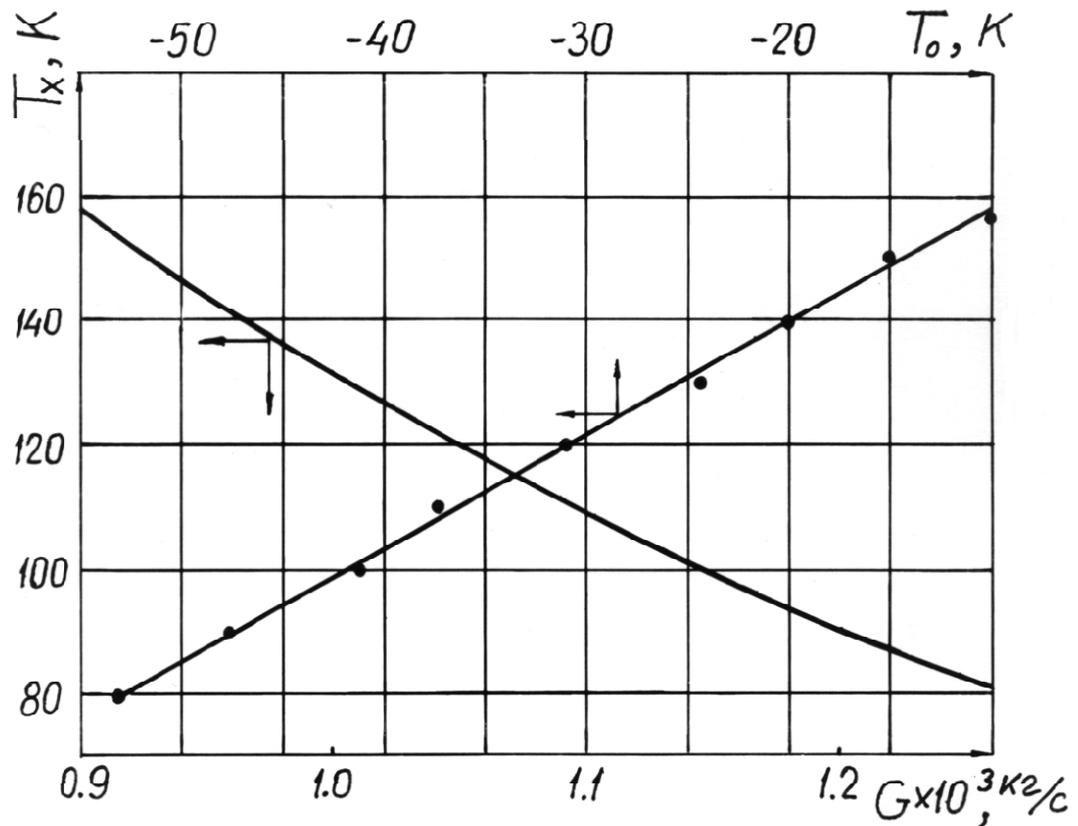


Рис. 2. Зависимость температуры ( $T_X$ ) азота на выходе из испарительного участка от расхода хладагента ( $G$ ) и от температуры ( $T_0$ ) на входе в ТС.

## 2. Статическая характеристика системы термостатирования

Статической характеристикой системы называется зависимость выходной величины от различных постоянных значений входной величины в установившихся режимах.

При температуре окружающей среды  $T_{oc} = 18^{\circ}C$  была снята зависимость расхода хладагента ( $G$ ) от температуры его входа в теплообменник смешения ( $T_o$ ), т.е.  $G=f(T_o)_{T_{oc}}$ . Эта зависимость приведена на рис. 3 и является частью статической характеристики системы термостатирования при  $T_{oc} = 18^{\circ}C$ .

На основании расчётного графика  $T_X=f(G)$ , изображённого на рис. 2, и экспериментального графика  $G=f(T_o)$ , приведенного на рис. 3, получена зависимость  $T_X=f(T_o)$ , которая нанесена на график рис. 2 и может быть в рабочем диапазоне представлена в виде формулы

$$T_X = 1.4T_o - 222, \quad (1)$$

где  $T_o$  – температура хладагента на входе в теплообменник смешения.

Тепловая нагрузка на ПВД в соответствии с работой [3] определяется по следующей зависимости:

$$Q_{ПВД} = 0.34(T_{oc} - \bar{T}_p)^{4/3} + 1.91(T_{oc} - \bar{T}_p)^{17/16} + Q_D^*, \quad (2)$$

где  $T_{oc}$  – температура окружающей среды,  $\bar{T}_p$  – средняя рабочая температура внутри кожуха детектора,  $Q_D$  – суммарное тепловыделение элементов детектора.

Тепло, снимаемое теплообменником смешения [1], находится по формуле

$$Q_T = C_p G (\bar{T}_p - T_o). \quad (3)$$

Из условия равенства  $Q_T = Q_{ПВД}$  по уравнениям 2 и 3 находится рабочая температура внутри кожуха детектора ( $\bar{T}_p$ ) при  $T_{oc} = 18^{\circ}C$  для каждого  $T_o$  рабочего диапазона, т.е.  $\bar{T}_p = f(T_o)_{T_{oc}=18^{\circ}C}$ . При этом значения  $G$  берутся с экспериментальной кривой  $G=f(T_o)_{T_{oc}=18^{\circ}C}$ .

---

\*  $Q_D = 26 \text{ Вт}$  – при работе с внутренней активной мишенью и всеми шестью ВА-платами.

Нахождение изменения  $G$  и  $T_o$  при изменении температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ) производится следующим образом.

Тепло, снимаемое теплообменником смешения на основании теории, изложенной в работе [4], выражается через условия теплообмена питающей линии с окружающей средой путём введения среднелогарифмической разницы температур между  $T_{oc}$  и температурой хладагента, которая, возрастая по ходу его движения, изменяется от  $T_X$  до  $T_o$ :

$$Q_T = \pi k_l L_o (\bar{T}_p - T_o) \left( \ln \frac{T_{oc} - T_X}{T_{oc} - T_o} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи [Вт/(м·К)], определяемый экспериментально,  $L_o$  – линия подогрева,  $T_X$  – температура на выходе из испарительной части линии, остальные обозначения приведены выше.

Подставляя в формулу (4) выражение для  $T_X$ , по формуле (1) получим окончательно для наших условий:

$$Q_T = \pi k_l L_o (\bar{T}_p - T_o) \left( \ln \frac{T_{oc} - 1.4T_o + 222}{T_{oc} - T_o} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Линейный коэффициент теплопередачи находится на основе экспериментальных данных, полученных для рабочей точки во время работы системы термостатирования по следующей формуле:

$$k_l = \frac{C_p G}{\pi L_o} \ln \frac{T_{oc} - T_X}{T_{oc} - T_o}. \quad (6)$$

Подставляя в эту формулу экспериментальные данные, полученные во время эксплуатации ПВД при  $T_{oc} = 18^\circ\text{C}$  и  $\bar{T}_p = 11^\circ\text{C}$ :

$$G = 1.09 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с},$$

$$T_X = 110.8 \text{ K},$$

$$T_o = 238 \text{ K } (-35^\circ\text{C}),$$

$$L_o = 6.4 \text{ м},$$

находим, что

$$k_l = 0.069 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Из условия равенства  $Q_T = Q_{ПВД}$  по формулам (2) и (5) для изменившейся температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ) при каждом фиксированном значении  $\bar{T}_p$ , взятом на полученной выше кривой  $\bar{T}_p = f(T_o)_{T_{oc}=18^\circ C}$ , определяется значение температуры входа хладагента в теплообменник ( $T_o$ ), соответствующее новым внешним условиям.

Таким образом, находится зависимость температуры ( $\bar{T}_p$ ) внутри кожуха детектора от температуры входа хладагента ( $T_o$ ) в теплообменник смешения при новой температуре окружающей среды, т.е.  $\bar{T}_p = f(T_o)_{T_{oc}}$ . Эти зависимости, полученные при  $T_{oc}=14^\circ C$  и  $T_{oc}=22^\circ C$ , представлены на рис. 3.

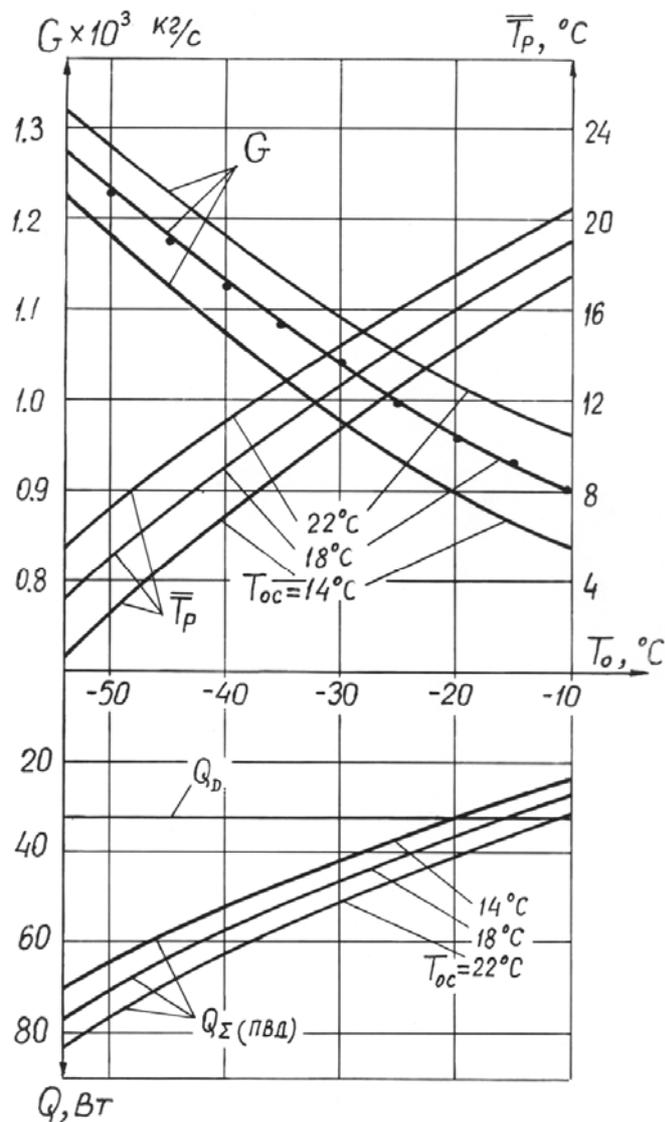


Рис. 3. Статическая характеристика системы термостатирования ПВД:  $T_o$  – температура на входе в ТС;  $\bar{T}_p$  – средняя температура внутри кожуха ПВД;  $G$  – расход хладагента;  $Q_\Sigma$  – суммарная тепловая нагрузка ПВД;  $Q_D$  – тепловыделение детектора.

По найденной  $T_o$  для новых внешних условий расход хладагента ( $G$ ) находится по следующей формуле:

$$G = \frac{\pi k_l L_o}{C_p} \left( \ln \frac{T_{oc} - 1.4T_o + 222}{T_{oc} - T_o} \right)^{-1}.$$

Таким образом, путём пересчёта экспериментальной кривой мы получили кривые  $G=f(T_o)_{T_{oc}=14^\circ\text{C}}$  и  $G=f(T_o)_{T_{oc}=22^\circ\text{C}}$ , которые найдены из условия поддержания неизменными равновесных температур ( $\overline{T_p}$ ), соответствующих кривой  $G=f(T_o)_{T_{oc}=18^\circ\text{C}}$ . При этом для каждой экспериментальной точки проводилось уточнение  $k_l$  по формуле (6). Полученные таким образом кривые представлены на рис. 3.

Для определения суммарной тепловой нагрузки ПВД в зависимости от ( $T_o$ ) используется выражение (2). При этом поддерживаемая внутри кожуха температура ( $\overline{T_p}$ ) соответствует равновесной для каждой из рассматриваемых температур окружающей среды ( $T_{oc}$ ).

Полученные таким образом зависимости в обобщённом виде представлены на рис. 3.

Характерной особенностью данной системы термостатирования является то обстоятельство, что для поддержания рабочей температуры внутри кожуха постоянной в случае, например, повышения температуры окружающей среды необходимо увеличивать расход хладагента ( $G$ ) при одновременном снижении температуры ( $T_o$ ) на входе в теплообменник смешения и наоборот.

В итоге значения необходимых изменений  $G$  и  $T_o$  в зависимости от изменения температуры окружающей среды легко определить из обобщённых графиков, представленных на рис. 3 и являющихся статической характеристикой системы термостатирования.

### 3. Система регулирования

Целью системы автоматического регулирования (САР) является поддержание стабильной температуры внутри кожуха детектора независимо от изменения температуры окружающей среды ( $T_{oc}$ ) и тепловой нагрузки внутри кожуха ( $Q_D$ ).

В соответствии с рис. 1 в канале регулирования объекта можно выделить и измерить промежуточный параметр  $T_o$  – температуру на входе в теплообменник смешения, т.е. фактически выделить промежуточный объект регулирования. В таком случае для одноконтурной схемы автоматического регулирования температуры ( $T_p$ ) будут характерны три точки приложения возмущений: 1) по регулируемому воздействию, возникающему, как правило, в результате изменения характеристики регулирующего органа; 2) по изменению нагрузки объекта I; 3) по изменению нагрузки объекта II. Объектом I в нашем случае является теплоизолированная линия питания, на выходе которой измеряется температура ( $T_o$ ) входа в теплообменник смешения. Объектом II является ПВД, в кожухе которого измеряется температура  $T_p$ .

При большой инерционности объектов I и II [5] одноконтурная система регулирования не обеспечивает требуемой точности регулирования при любых значениях параметров настройки регулятора. В таком случае эффективно применять двухконтурную систему автоматического регулирования, которая называется каскадной САР. Для такой системы характерно наличие двух контуров регулирования: внутреннего контура (объект I – регулятор  $RG1$ ) и внешнего (объект I – объект II – регулятор  $RG2$  – регулятор  $RG1$ ). Заданием регулятору  $RG1$  внутреннего контура служит выход регулятора  $RG2$  внешнего контура (см. рис. 1).

Каскадная САР обрабатывает возмущение по регулируемому воздействию так же, как и одноконтурная. Преимуществом каскадной САР является значительно лучшая обработка возмущений объектов I и II, причём это преимущество тем сильнее, чем более инерционен объект II по сравнению с объектом I.

В таблице приведены измеренные инерционные характеристики (скорость изменения температуры в рабочем диапазоне) теплоизолированной линии питания ( $\dot{T}_o$ ) и вершинного детектора ( $\dot{T}_p$ ).

Таблица.

Линия питания		Вершинный детектор	
Охлаждение	Нагрев	Охлаждение	Нагрев
$\dot{T}_o, \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$		$\dot{T}_p, \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$	
4.4	0.92	0.043	0.041

Из приведённых измерений, представленных в таблице, следует, что корпус ПВД (объект II) существенно инерционнее, чем теплоизолированная линия питания (объект I). Это обстоятельство предопределяет значительно лучшую отработку возмущений объектов I и II в каскадной системе и, следовательно, обеспечивает лучшую точность поддержания температуры в рабочем объёме ПВД.

Кроме того, большая инерционность объекта II по сравнению с объектом I позволяет заключить, что в качестве регулятора *RG2* можно использовать [5] ПИ-регулятор, обеспечивая устойчивость работы всей системы регулирования.

Каждый из контуров регулирования включает в себя конденсационный термометр, трансмиттер (пневмопреобразователь), станцию команд, пневморегулятор и сервомотор (исполнительный механизм), находящийся во внутреннем контуре.

Система регулирования, за исключением сервомотора (регулирующего вентиля), была выполнена на элементной базе фирмы *Foxboro*.

На рис. 4 приведена монтажно-функциональная схема двухконтурной системы регулирования. Приведённая схема является гибкой и в случае необходимости предусматривает возможность работы в режиме одного контура (т.е. осуществление автоматического регулирования заданной температуры  $T_o$  на входе в теплообменник смешения), а также работу в ручном режиме (т.е. прямое управление степенью открытия регулирующего вентиля – *VR*) путём соответствующего переключения на станциях команд *SC1* и *SC2*.

Трансмиттеры *TP1* и *TP2* служат для преобразования давления в стандартный пневмосигнал величиной  $0.2 \div 1 \text{ атм}$  и подачи его на вход регулятора в качестве переменной величины.

В качестве регулятора *RG1* используется пропорционально-интегрально-дифференциальный пневморегулятор со станцией команд *SC1*. В связи с тем, что нагревание питающей линии осуществляется через теплоёмкую изоляцию, тепловая инерция которой способствует возникновению задержки реакции на сигнал управления, в регулятор *RG1* внутреннего контура был введён дифференциальный закон. Настройка законов регулирования регулятора *RG1*, найденная методом подбора, следующая:

- коэффициент пропорциональности  $K_P = 25\%$
- постоянная времени интегрирования  $T_I = 10 \text{ мин}$
- постоянная времени дифференцирования  $T_D = 2 \text{ с}$

В качестве регулятора  $RG2$  по приведённым выше соображениям используется пропорционально-интегральный пневморегулятор со станцией команд  $SC2$  и задатчиком  $CP$ . Настройка его законов регулирования следующая:

- коэффициент пропорциональности  $K_P = 25\%$
- постоянная времени интегрирования  $T_I = 10 \text{ мин}$

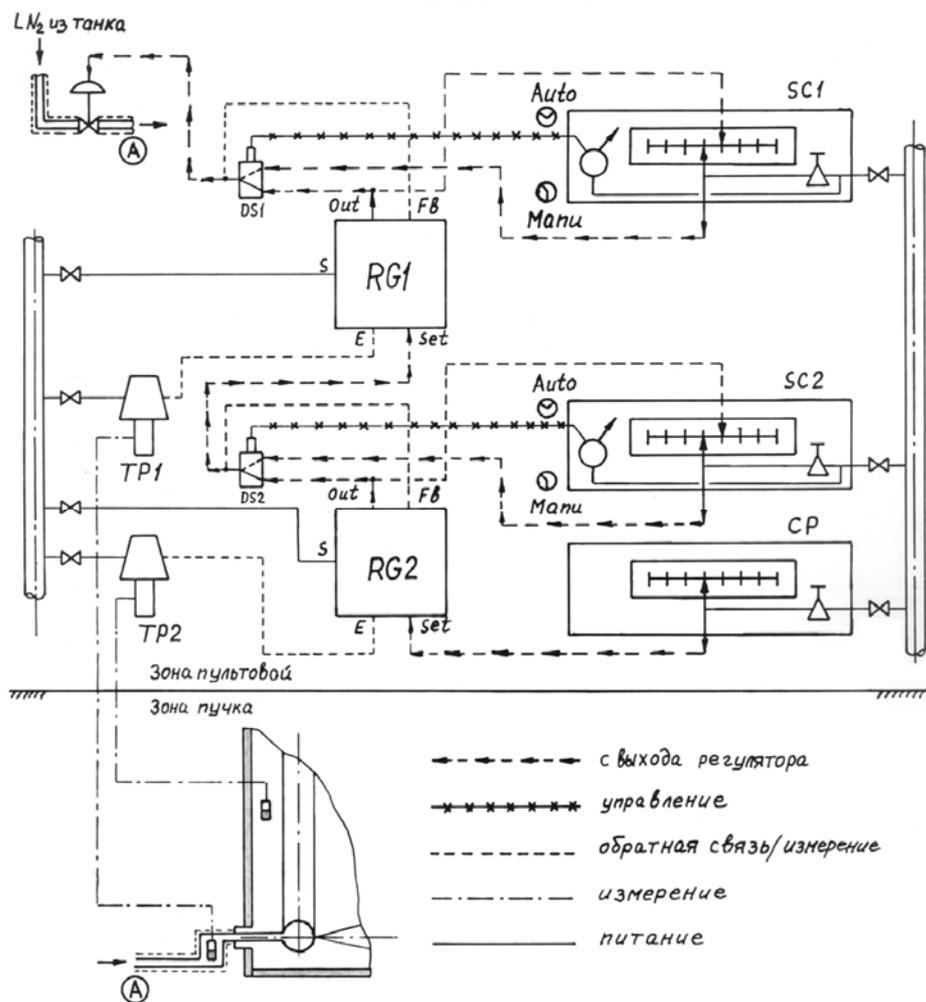


Рис. 4. Монтажно-функциональная схема двухконтурной системы регулирования:  $RG1$  – пневморегулятор внутреннего контура;  $RG2$  – пневморегулятор внешнего контура,  $SC1$  – станция команд внутреннего контура;  $SC2$  – станция команд внешнего контура,  $CP$  – задатчик внешнего контура;  $TP1$  и  $TP2$  – трансмиттеры;  $DS1$  и  $DS2$  – пневмореле.

При работе внешнего контура в автоматическом (*Auto*) режиме с помощью задатчика *CP* осуществляется задание величины температуры ( $T_p$ ) внутри кожуха ПВД. При переводе с помощью станции команд *SC2* внешнего контура в ручной режим (*Manu*) *RG2* отключается и *SC2* начинает работать в режиме задатчика температуры ( $T_o$ ) на входе в теплообменник смешения.

#### 4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В соответствии с экспериментальным графиком  $G=f(T_o)$  для  $T_{oc}=18^{\circ}C$ , приведённом на рис. 3, были рассчитаны и уточнены характеристики системы термостатирования в зависимости от температуры окружающей среды, которые были затем использованы при настройке диапазонов работы системы автоматического регулирования и выборе параметров её настройки.

Изменение рабочей температуры ( $T_p$ ) внутри кожуха ПВД в процессе регулирования осуществляется за счёт изменения температуры входа ( $T_o$ ) хладагента в теплообменник смешения. Это изменение ( $\Delta T_p$ ) обеспечивается за счёт соответствующего изменения проходного сечения регулирующего вентиля (*VR*), что приводит к изменению расхода хладагента ( $G$ ), которое сопровождается противоположным по знаку изменением температуры ( $T_o$ ) на входе в теплообменник смешения.

На каждом *VA*-диске блока *Viking* в его центральной части размещена плата с двумя микросхемами. За счёт тепловыделения температура каждой из микросхем существенно выше рабочей температуры среды внутри кожуха. Во время сеансов контролировалась температура одного из латунных дисков, который является периферийной частью *VA*-платы. Это позволяло косвенно судить о температуре микросхемы. В принципе стабильность температуры среды внутри кожуха, на его входе, должна предопределять и такую же стабильность температуры микросхемы. Однако в силу наличия теплообмена движущегося потока азота с источниками теплопритока – стенками кожуха и детектором, эффект от действия которого усиливается негерметичностью кожуха, неравномерностью размещения тепловыделяющих элементов по длине детектора, а также наличием частично удалённой лавсановой перегородки между блоками *Gassiplex* и *Viking*, – точность поддержания температуры в головной части

кожуха может отличаться от стабильности температуры микросхемы и, следовательно, от температуры диска. Таким образом, осуществляя контроль температуры *VA*-диска, на котором крепится *VA*-плата, можно судить о конечной эффективности термостатирования ПВД.

Как уже отмечалось ранее, конденсационный термометр установлен в передней части кожуха ПВД для измерения рабочей температуры среды ( $T_p$ ). Он встроен в систему автоматического регулирования. Т.е. система в принципе поддерживает температуру среды ( $T_p$ ) в передней части кожуха в зоне формирования потока и в достаточной близости от активной мишени (*AM*), в то время как температура в остальной части кожуха в силу его негерметичности и неравномерности расположения тепловыделяющих элементов будет отличаться. Однако увеличение точности поддержания температуры в передней части кожуха предопределяет также улучшение стабильности температуры, хотя и в меньшей степени, в удалённой от формирования потока зоне.

Измерение температуры детектора осуществляется с помощью термометров сопротивления, расположенных по его оси. Температурные датчики размещены в плоскостях перед активной мишенью (*AM*), на одном из дисков *Gassiplex* в горизонтальной плоскости, на стыке между блоками *Gassiplex* и *Viking*, на одном из *VA*-дисков, а также у задней крышки кожуха около последнего *VA*-диска блока *Viking*. На каждой из перечисленных плоскостей, за исключением диска *Gassiplex*, датчики расположены по вертикали в верхней и нижней точках в соответствии со схемой, приведённой на рис. 5. Средняя рабочая температура детектора определялась как среднее арифметическое измеренных температур:

$$\bar{T}_p = \left( \sum_{j=1}^k T_j \right) / k,$$

где  $k$  – число датчиков,  $j$  – порядковый номер датчика,  $T_j$  – температура, измеренная  $j$ -датчиком.

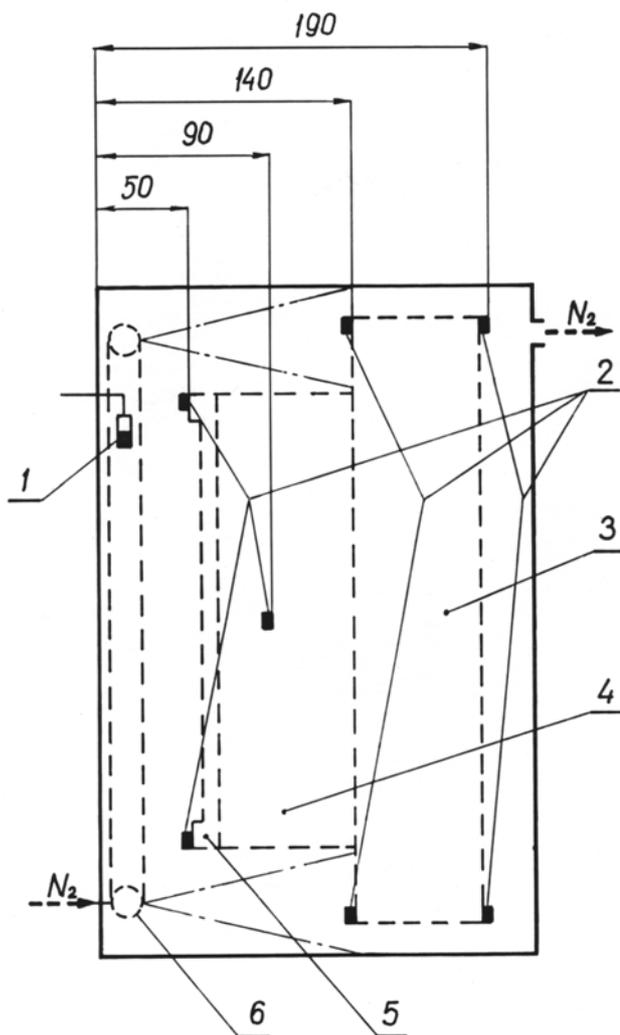


Рис. 5. Схема расположения датчиков температуры внутри кожуха ПВД: 1 – бульба конденсационного термометра; 2 – платиновые температурные датчики; 3 – блок плат *Viking*; 4 – блок плат *Gassiplex*; 5 – активная мишень (AM); 6 – теплообменник смешения.

Для определения точности поддержания температуры блока плат *Viking* по одному из его *VA*-дисков были использованы зависимости, применяемые для определения ошибки физических измерений, которые приведены в работе [6].

Точность поддержания температуры блока плат *Viking* определялась как среднеквадратичное отклонение [6] по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{T}_D - T_{Di})^2}{n-1}},$$

где  $\overline{T}_D = \left( \sum_1^n T_{Di} \right) / n$  – среднеарифметическое значение температуры диска платы *Viking*, определённое по ( $n$ ) измерениям,  $T_{Di}$  – текущее значение температуры диска платы *Viking*,  $n$  – число измерений,  $i$  – порядковый номер измерения,  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Тогда рабочая температура диска платы *Viking* записывается следующим образом:

$$T_D = \overline{T}_D^{\pm\sigma}.$$

На рис. 6 приведена кривая охлаждения детектора до рабочей температуры. Видно, что температура в плоскости активной мишени (*AM*) практически равна температуре, измеренной находящимся около передней крышки кожуха конденсационным термометром. Т.е. на расстоянии 50 мм (между крышкой кожуха и *AM*) практически отсутствует осевой градиент температуры по газу. Различие между температурой плоскости *AM* и температурой, определяемой как средняя по детектору ( $\overline{T}_p$ ), говорит о наличии осевого градиента температуры. Увеличение осевого градиента температуры объясняется, прежде всего, негерметичностью кожуха детектора, из-за чего охлаждающая способность потока хладагента по мере его продвижения к выхлопу на задней крышке кожуха падает и приводит к возникновению дополнительного градиента температуры. Кроме того, свой вклад в его возникновение вносит неравномерность тепловыделения по оси детектора, а также наличие лавсановой перегородки между блоками плат *Gassiplex* и *Viking*. Между тем, при отработке системы регулирования на макете кожуха, который отличался от оригинала абсолютной герметичностью, градиент температуры вдоль оси кожуха был не более  $0.1^\circ\text{C}$  при идентичной статической тепловой нагрузке, но в условиях отсутствия детектора.

Запуск системы термостатирования осуществляется с охлаждения и стабилизации детектора при рабочей температуре в отсутствие тепловыделения в нём. Охлаждение и стабилизация температуры детектора в таком режиме (статическом) осуществляется в течение 220 минут и точность поддержания средней рабочей температуры ( $\overline{T}_p$ ) составила  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

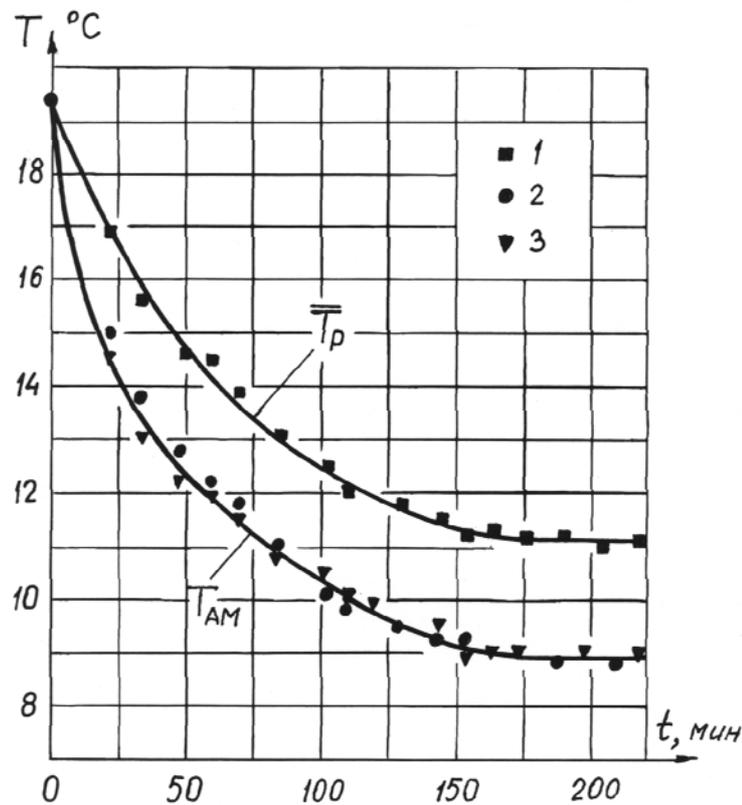


Рис. 6. Кривая охлаждения ПВД: 1 – средняя рабочая температура ПВД; 2 – температура по конденсационному термометру (вблизи входной крышки кожуха ПВД); 3 – средняя температура активной мишени ( $AM$ ).

После подачи напряжения на активную мишень ( $AM$ ) и  $VA$ -платы блока *Viking* система регулирования в течение 150 минут обеспечивает необходимое увеличение расхода хладагента при одновременном снижении его температуры ( $T_o$ ) на входе в теплообменник, не допуская изменения температуры ( $T_p$ ) среды регулируемой зоны (головной части кожуха) более чем на  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Процесс выхода системы термостатирования на динамический режим после включения рабочей нагрузки показан на графике, изображённом на рис. 7. При этом, как это видно из рис. 7, в силу возникновения температурного напора (между поверхностью  $VA$ -плат блока *Viking* и хладагентом кожуха), необходимого для отвода тепла, выделяющегося в них, температура блока *Viking* повысилась на  $1.9^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура активной мишени ( $AM$ ) практически не изменилась в силу меньшего тепловыделения и близости к теплообменнику смешения.

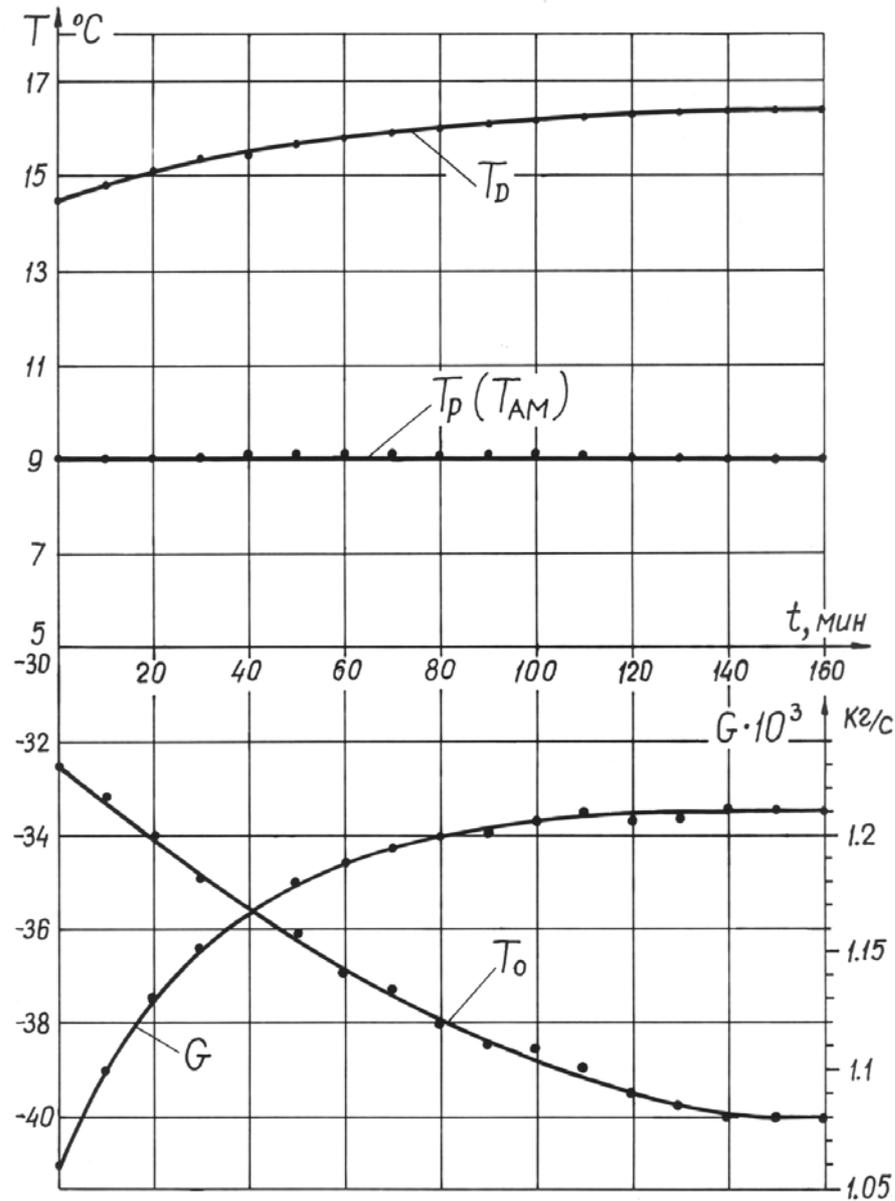


Рис. 7. Выход системы термостатирования на динамический режим (после включения детектора):  $T_p$  – температура среды в головной части кожуха (регулируемая температура);  $T_{AM}$  – температура активной мишени;  $T_0$  – температура входа хладагента в теплообменник смешения;  $G$  – расход хладагента;  $T_D$  – температура одного из латунных дисков блока плат *Viking*.

Из графика видно, что выход на новый режим (динамический) при  $T_{oc}=24^{\circ}\text{C}$  составляет 150 минут и сопровождается снижением температуры входа хладагента в теплообменник с  $-33^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  при одновременном увеличении расхода до  $1.21 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ .

В конечном счёте, система автоматического регулирования, будучи настроенной в статическом режиме на поддержание температуры внутри головной части кожуха, равной  $9^{\circ}\text{C}$ , без необходимости коррекции задания (включая и выход на динамический режим) проработала в автоматическом режиме, т.е. без вмешательства обслуживающего персонала, весь оставшийся сеанс в течение 34 суток. При этом точность поддержания температуры блока плат *Viking* за указанный период составила  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ . За время сеанса температура окружающей среды изменялась от  $16^{\circ}\text{C}$  до  $26^{\circ}\text{C}$ , т.е. её дрейф составил  $10^{\circ}\text{C}$ . В итоге, после обработки экспериментальных данных по приведённой выше методике, было получено, что температура блока плат *Viking* в течение сеанса поддерживалась стабильно равной  $T_D = 16.15^{\pm 0.25} \text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура (регулируемая) среды в передней части кожуха поддерживалась равной  $T_p = 9^{\pm 0.035} \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Выводы

1. Двухконтурная система регулирования позволила улучшить точность поддержания температуры при работе детектора в штатном режиме с  $1^{\circ}\text{C}$  до  $0,25^{\circ}\text{C}$ .
2. Во время возникновения нештатных ситуаций точность поддержания температуры в головной части кожуха составила  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ , что не приводит к выходу детектора из рабочего состояния.
3. Более высокая точность ( $\pm 0.035^{\circ}\text{C}$ ) поддержания температуры в регулируемой зоне (передней части кожуха) позволяет в случае необходимости также улучшить стабильность температуры и в удалённой зоне, где находится основная тепловыделяющая часть детектора, за счёт полного устранения перечисленных выше недостатков: 1) негерметичности кожуха, 2) лавсановой перегородки между блоками *Gassiplex* и *Viking*.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность д.ф.-м. наук А.П. Воробьёву за постановку задачи и постоянный интерес к работе.

## Список литературы

- [1] Гришкевич Я.В., Киреев В.И., Плескач А.В. – Препринт ИФВЭ 2005-1, Протвино, 2005.
- [2] Киреев В.И., Плескач А.В. – Препринт ИФВЭ 2007-25, Протвино, 2007.
- [3] Борзунов Ю.Т., Киреев В.И., Плескач А.В. и др. – Препринт ИФВЭ 2009-4, Протвино, 2009.
- [4] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975.
- [5] Ключев А.С. Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1973.
- [6] Зайдель А.Н. Ошибки измерения физических величин. – Л.: Наука, 1974.

*Рукопись поступила 27 мая 2011 г.*

В.И. Киреев, А.В. Плескач

Двухконтурная система регулирования термостатированием прецизионного вершинного детектора установки СВД-2.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 01.06.2011.                      Формат 60 × 84/16.    Офсетная печать.  
Печ.л. 1,3.    Уч.– изд.л. 2,02.                      Тираж 80.    Заказ 53.                      Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2011-9, ИФВЭ, 2011

---