



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2005-1  
ОЭФ

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

**СИСТЕМА ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ  
ПРЕЦИЗИОННОГО ВЕРШИННОГО ДЕТЕКТОРА  
УСТАНОВКИ СВД**

---

<sup>\*</sup> НИИЯФ МГУ, Москва

<sup>\*\*</sup> ОИЯИ, Дубна

Протвино 2005

**Аннотация**

Гришкевич Я.В., Киреев В.И., Плескач А.В. Система термостатирования прецизионного вершинного детектора установки СВД; Препринт ИФВЭ 2005-1. Протвино, 2005. – 6 с., 2 рис., 1 табл., библиогр.: 4.

Создана проточная система термостатирования микрострипового вершинного детектора, использующая в качестве хладагента испаряющийся газообразный азот. Разработанная система позволяет изменять температуру внутри детектора в диапазоне  $+5 \div +15^{\circ}\text{C}$  и поддерживать её на заданном уровне с точностью до  $1^{\circ}\text{C}$ . При этом содержание влаги внутри детектора не превышает  $1 \cdot 10^{-6}$  ppm.

**Abstract**

Grishkevich Ya.V., Kireev V.I., Pleskach A.V. Thermostating System of Precision Vertex Detector SVD: IHEP Preprint 2005-1, Protvino, 2005. – p. 6, figs. 2, tables 1, refs.: 4.

Thermostating flow system of microstrip silicon vertex detector has been built. It uses vapouring nitrogen as refrigerant. The system allows to change the temperature inside the detector in the interval of  $+5 \div +15^{\circ}\text{C}$  and to maintain its with precision of about  $1^{\circ}\text{C}$ . The quantity of water inside the detector under these conditions don't exceed  $1 \cdot 10^{-6}$  ppm.

## **Введение**

В настоящей работе описывается система термостатирования прецизионного вершинного детектора (ПВД) на основе микростриповых кремниевых детекторов, созданного для 2-й очереди СВД [1].

Для уменьшения темновых токов в микростриповых кремниевых детекторах требуется создание внутри кожуха детектора сухой среды с постоянной температурой и поддержание этой температуры по возможности более низкой.

Созданная система термостатирования ПВД успешно отработала в 2 сеансах СВД по набору статистики.

### **1. Принцип функционирования системы**

Прецизионный вершинный детектор состоит из 3 блоков: одного комбинированного (КБ) и двух одинарных (ОБ), каждый из которых размещён в собственном кожухе. Эти три блока являются объектом термостатирования.

На **рис. 1** представлена схема системы термостатирования ПВД, которая включает в себя систему питания хладагентом, систему автоматического регулирования и систему теплосъёма с каждого из кожухов ПВД.

Система термостатирования основана на использовании испаренного газообразного азота в качестве теплоносителя (хладагента) и реализации теплообмена путём смешения – непосредственного контакта теплоносителя и среды, что выражается в организации постоянного протока азота через кожух детектора и формировании специально рассчитанной и спроектированной зоны смешения перед активной частью детектора.

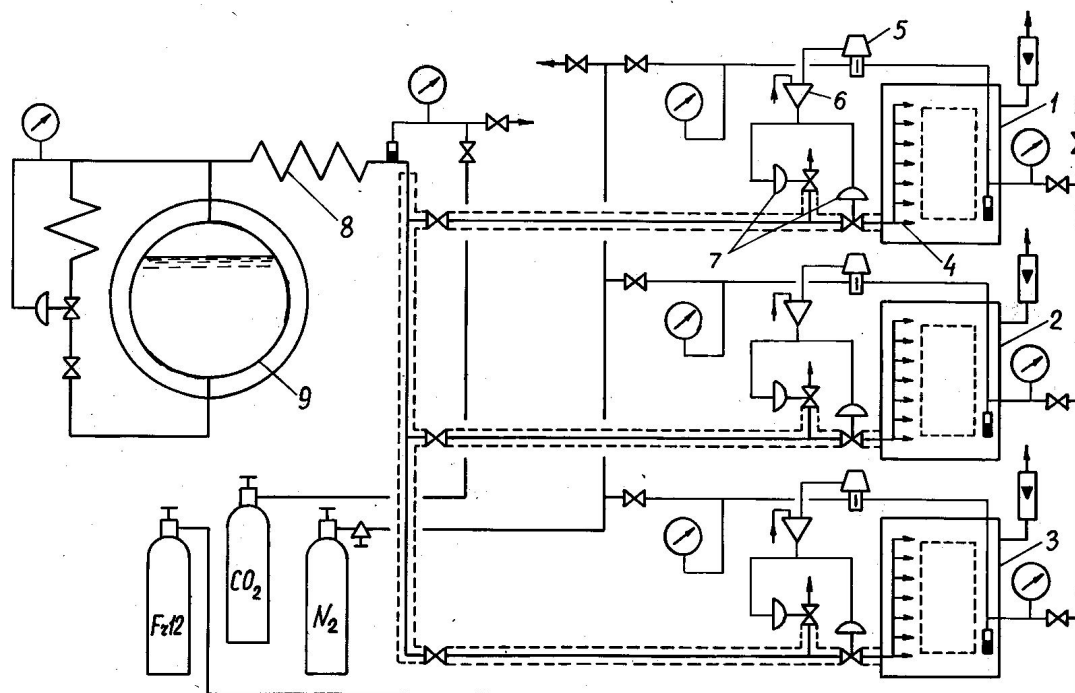
### **2. Система питания хладагентом**

Система подачи хладагента (газообразного испаренного азота) состоит из азотного танка ёмкостью 1 м<sup>3</sup>, теплообменника-подогревателя, контрольно-регулирующей и запорной арматуры.

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

Конденсационный термометр контролирует температуру после теплообменника-подогревателя. Он заполняется углекислотой и позволяет измерять температуру от +20<sup>0</sup>С до –100<sup>0</sup>С. Линии транспортировки подогретого газообразного азота от танка к каждому из 3 кожухов выполнены из пластиковых трубок размером 12×2 мм и изолированы с помощью слоёв фильтра Петрянова, намотанных до наружного диаметра, равного 40 мм.

Расход газообразного азота контролируется расходомерами, установленными на выходе каждого из кожухов.



**Рис. 1.** Схема системы термостатирования прецизионного вершинного детектора: 1 – комбинированный блок ПВД; 2, 3 – одинарные блоки ПВД; 4 – теплообменник смешения; 5 – трансмиттер дифференциальный; 6 – пневморегулятор; 7 – исполнительный механизм; 8 – теплообменник-подогреватель; 9 – азотный танк.

### 3. Система автоматического регулирования

Система автоматического регулирования ПВД состоит из 3 независимых контуров регулирования. Каждый из контуров состоит из пневморегулятора со станцией команд, дифференциального трансмиттера с фиксированным опорным давлением, исполнительного механизма, расположенного вблизи кожуха, конденсационного термометра, чувствительный элемент (бульба) которого расположен внутри кожуха, а также системы контроля и заполнения конденсационного термометра. Заполнение осуществляется фреоном-12 и обеспечивает измерение температуры в интервале  $+16 \div 0^{\circ}\text{C}$ . Фреон-12 был выбран из условия обеспечения лучшей чувствительности в рабочем диапазоне.

Дифференциальный трансмиттер предназначен для преобразования сигнала рассогласования между заданной температурой в кожухе и измеряемой в стандартный пневматический сигнал  $0,2 \div 1$  ати и подачи его на вход регулятора в качестве переменной величины.

Такая схема измерения давления в бульбе термометра с помощью дифференциального трансмиттера с фиксированным опорным давлением [2] позволяет повысить точность измерения давления в бульбе и, следовательно, температуры внутри кожуха. В итоге, дифференциальный трансмиттер с опорным давлением позволяет усилить сигнал рассогласования в 8 раз.

В качестве регулятора используется пропорционально-интегральный регулятор с местным задатчиком ПРЗ.32, который входит в систему приборов «Старт» завода Тизприбор. Он предназначен для получения непрерывного регулирующего воздействия в виде давления сжатого воздуха, подаваемого на исполнительный механизм для поддержания регулируемой температуры на заданном уровне.

Исполнительный механизм состоит из двух дистанционно управляемых сжатым воздухом вентилях, включенных параллельно. Один вентиль является нормально открытым, другой – нормально закрытым. Первый вентиль подключён к кожуху, второй связан с атмосферой и служит для поддержания длинной питающей линии ( $l \sim 6,4$  м) в охлаждённом состоянии в случае значительного уменьшения расхода холодного азота через кожух (например, при резком изменении температуры в помещении).

#### 4. Система теплосъёма

Поскольку температура внутри кожуха должна поддерживаться пониженной, то внутренняя поверхность кожуха покрыта слоем пористой резины толщиной 5 мм и на входе линии газообразного азота в кожух сделана тепловая развязка.

Важным элементом системы теплосъёма из кожуха, обеспечивающим равномерное распределение температуры по объёму детектора, является теплообменник смесительного типа. Он представляет собой полое кольцо со средним диаметром 300 мм и внутренним диаметром полости 8 мм. Кольцо закреплено через изолирующие проставки на входной крышке кожуха. На боковой стороне кольца, обращённой в сторону детектора, сделана перфорация в виде отверстий  $\varnothing 0,5$  мм с шагом 12 мм.

Подвод газообразного азота осуществляется в нижней части кольцевого распределителя.

Отвод тепла осуществляется путём смешения вытекающего из отверстий кольца газообразного азота, имеющего более низкую температуру, чем температура в рабочем объёме детектора (внутри кожуха). Эта разница температур и расход азота определяют количество тепла, отводимого системой:

$$Q = C_p G \Delta T_0,$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка, определяемая внутренним тепловыделением детектора и внешним теплопритоком;  $\Delta T_0$  – разница между температурой азота, входящего в распределитель, и температурой внутри детектора;  $C_p$  – теплоёмкость азота;  $G$  – расход газообразного азота.

Большое значение для создания однородности температуры внутри детектора имеют обеспечение практически постоянного расхода из всех отверстий перфорации кольца, минимизация протяжённости зоны смешения холодного азота и создание условий для преимущественного съёма тепла путём смешения (т.е. исключение поверхностного теплообмена) при допустимом перепаде давления между полостями кольца и детектора.

Степень неравномерности распределения расхода по длине кольца определяется из следующего выражения, полученного из условия, что потери на трение при движении по полости кольца значительно меньше, чем разница давлений внутри распределителя и вне его:

$$\beta = \frac{1}{6} \lambda \frac{L}{D} \left( \frac{n}{2} \right)^2 \left( \frac{d_0}{D} \right)^4,$$

где  $\beta = \frac{\Delta G}{G}$  – степень неравномерности расхода по кольцу;  $d_0$  – диаметр отверстия перфорации кольца;  $D$  – диаметр полости кольца;  $L$  – длина полукольца;  $\lambda$  – коэффициент трения, определённый по условиям входа в кольцо;  $n$  – число отверстий перфорации кольца. При разработке считалось, что  $\beta \leq 0,01$  является допустимым. Проектное количество отверстий  $\varnothing 0,5$  мм, равное 80 (шаг  $\sim 12$  мм), вызывает неравномерность расхода  $\beta = 0,8\% < 1\%$ , что допустимо.

Расчёт зоны смешения осуществлялся на основе теории движения затопленных струй [3], откуда эффективная длина зоны смешения ( $x_m$ ) была получена в виде следующего выражения:

$$x_m = 1,8d_0 \frac{\Delta T_0}{[\Delta \bar{T}_m]} \left( 1 - \frac{\Delta T_0}{T_p} \right)^{-0,5},$$

где  $T_p$  – температура в рабочем объёме детектора;  $[\Delta\bar{T}_m]$  – допустимая разница между температурами рабочего объёма кожуха и средней в сечении струи (на расстоянии  $x_m$  от распределителя), которая принималась равной 1,5 К, остальные обозначения введены выше.

При  $\Delta T_0 = 20\text{К}$  длина зоны смешения для  $d_0 = 0,5$  мм составляет 11,5 мм, что существенно меньше расстояния до плоскости первой микростриповой пластины (75 мм). Очевидно, что для уменьшения длины зоны смешения необходимо уменьшать размер отверстий перфорации.

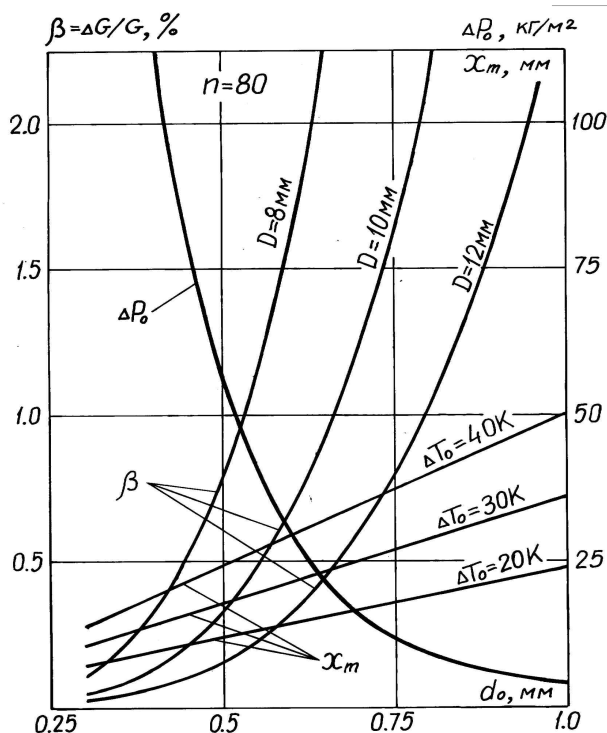
Перепад давления между полостью кольца и рабочим объёмом определяется по зависимости, полученной из допущения малости сжимаемости азота, что оправдано при малых перепадах давления, которые в нашем случае имеют место:

$$\Delta P_0 = \frac{1,24}{g\rho} \left( \frac{G}{nd_0^2} \right)^2,$$

где  $\rho$  – плотность газообразного азота;  $g$  – ускорение свободного падения; остальные обозначения введены выше.

Перфорированное кольцо, выполненное из нержавеющей трубки  $10 \times 1$  мм, в части, свободной от перфорации, должно быть изолировано, чтобы исключить передачу тепла через него конвективным способом, что может вызвать температурный перекокс и приведёт к увеличению неоднородности температуры в рабочем объёме. Изоляция кольца выполняется из самоклеющейся (на подложке из скотча) пористой резины толщиной 2 мм.

Полученные и приведённые выше зависимости позволяют спроектировать теплообменник смешения, удовлетворяющий требованиям со стороны объекта, для которого он должен использоваться.



**Рис. 2.** Зависимость основных параметров теплообменника смешения:  $\beta = \Delta G/G$ ,  $x_m$  и  $\Delta P_0$  от размера отверстия перфорации ( $d_0$ ), диаметра полости кольца ( $D$ ) и температурного напора на кольце ( $\Delta T_0$ ) при общем количестве отверстий  $n = 80$  и расчётном расходе  $G = 4,8 \cdot 10^{-4}$  кг/с.

На **рис. 2** представлены результаты расчёта основных параметров теплообменника смешения: неравномерности расхода ( $\beta$ ), перепада давления ( $\Delta P_0$ ) на кольце, длины зоны смешения ( $x_m$ ) в зависимости от диаметра отверстия перфорации ( $d_0$ ), внутреннего диаметра ( $D$ ) полости кольца и температурного напора ( $\Delta T_0$ ) на кольцевой трубке при постоянном количестве отвер-

стей, равном  $n = 80$ , и расчётном расходе азота, равном  $G = 4,8 \cdot 10^{-4}$  кг/с. Из приведённых зависимостей следует, что условие однородности истечения из отверстий перфорации  $\beta = \frac{\Delta G}{G} < 1\%$

для выбранного размера отверстия  $d_0 = 0,5$  мм реализуется при диаметре полости кольца  $D = 8$  мм. При этом перепад давления на отверстиях кольца  $\Delta P_0 = 56$  кг/м<sup>2</sup>, в то время как разница давлений на полудлине кольца составляет всего  $0,6$  кг/м<sup>2</sup>. В случае, если необходимо увеличить диаметр отверстия перфорации, например до  $d_0 = 0,8$  мм, нужно также увеличить проходной диаметр кольца до  $D = 12$  мм, но при этом следует иметь в виду, что увеличится протяжённость зоны смешения.

## 5. Обсуждение результатов работы системы термостатирования ПВД

Во время работы системы в двух сеансах по набору статистики был зафиксирован расход жидкого азота  $G_{\Sigma} = 180$  л/сутки ( $1,68 \cdot 10^{-3}$  кг/с). Температура на выходе из подогревателя и на входе в подводящие линии составила  $T_x = -80^{\circ}\text{C}$  (193 К).

В каждом из корпусов ПВД температура поддерживалась на уровне  $+10^{\circ}\text{C}$  (283 К) при средней температуре окружающей среды  $+20^{\circ}\text{C}$  (293 К). Охлаждение детектора от температуры окружающей среды до  $+10^{\circ}\text{C}$  обычно составляло 50 мин.

В силу недостаточной герметичности кожухов блоков ПВД расходомеры не работали и поэтому при обработке полученных данных по работе системы термостатирования принималось соотношение нагрузок  $Q^{КБ}/Q^{ОБ} = 4,8$ , полученное расчётным путём.

Тепловая нагрузка каждого из кожухов складывается из теплопритоков через изолированные стенки и по разъёмам, играющим роль радиатора, а также внутреннего тепловыделения активной мишени. Существенную роль на теплоприток оказывают многоштырьковые разъёмы типа ОНп-КС-6-96, количество которых в КБ – 76, в то время как в ОБ – на порядок меньше.

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась на основании уравнения для определения количества тепла, отводимого от каждого из кожухов, полученного из точного решения уравнения теплообмена [4]:

$$Q = C_p G [(T_{OC} - T_x) e^{-kF/(C_p G)} - (T_{OC} - T_p)],$$

где  $G$  – расход газообразного азота через теплообменник смешения одного из кожухов;  $T_{OC}$  – температура окружающей среды;  $T_x$  – температура входа в подводящие линии;  $T_p$  – рабочая температура внутри кожуха;  $k$  – коэффициент теплопередачи через изоляцию подводящих линий, отнесённый к её внутренней поверхности;  $F$  – внутренняя поверхность изоляции (изолируемая поверхность).

Решение этого уравнения ввиду его трансцендентного характера находилось графоаналитическим способом: определив из построенного графика  $Q = f(G)$  для расчётного соотношения  $Q^{КБ}/Q^{ОБ} = 4,8$  функцию  $Q = f\left(\sum_1^3 G_i\right)$ , из которой по условию  $\sum G_i = G_{\Sigma}$  находится иско-

мое  $Q$ , затем в обратном порядке находились интересующие нас параметры работы системы. В итоге такой обработки данных тепловая нагрузка КБ ПВД составила 26,8 Вт при расходе азота  $7,9 \cdot 10^{-4}$  кг/с и температуре входа в теплообменник смешения  $-23^{\circ}\text{C}$ , в то время как тепловая нагрузка ОБ ПВД составила 5,6 Вт при расходе азота  $4,5 \cdot 10^{-4}$  кг/с и температуре его входа в теплообменник смешения  $-2^{\circ}\text{C}$ .

Сравнение полученных результатов с результатами приближённого расчёта, проведённого на основании допущения линейности характера распределения температуры по длине подводящей линии, показало, что средняя ошибка по совокупности параметров  $Q$ ,  $G$  и  $\Delta T_0$  для КБ и ОБ не превышает 5,2%. Результаты обработки экспериментальных данных по точной и приближённой методикам приведены в табл. 1.

**Таблица 1.**

<b>Вид расчёта</b>	<b>КБ</b>			<b>ОБ</b>		
	Q, Вт	G, кг/с	$\Delta T_0, ^\circ\text{C}$	Q, Вт	G, кг/с	$\Delta T_0, ^\circ\text{C}$
Точный	26,8	$7,9 \cdot 10^{-4}$	32,8	5,58	$4,5 \cdot 10^{-4}$	12,1
Приближённый	24,7	$7 \cdot 10^{-4}$	33,9	5,14	$4,9 \cdot 10^{-4}$	10,1
Ошибка	-7,8%	-11,4%	+3,4%	-7,9%	+8,9%	-16,5%

Полученный результат позволяет использовать приближённый метод, как имеющий аналитическое решение относительно Q и G, для анализа работы системы в случае её модернизации. Согласно приближённому решению, суммарный расход азота определяется в следующем виде:

$$G_{\Sigma} = \frac{Q^{KB} (1 + 2/r) + 3ql}{C_p (T_p - T_x)},$$

где  $Q^{KB}$  – тепловая нагрузка комбинированного блока;  $r = Q^{KB}/Q^{OB}$  – соотношение между тепловыми нагрузками КБ и ОБ;  $q$  – погонный теплоприток к подводющей линии;  $l$  – длина подводющей линии; остальные обозначения приведены выше.

Из приведённой формулы следует, что общий расход азота зависит от качества изоляции и от температуры азота на входе. Подводящие линии выполнены из пластиковых трубок с внутренним диаметром 8 мм и длиной 6,4 м. Изоляция их сделана из плотно намотанных слоёв фильтра Петрянова и зафиксирована снаружи с помощью изоленты. Изолированная таким образом подводющая линия имеет наружный диаметр 40 мм. Теплоприток (погонный) для каждой из линий составляет  $q = 6,4$  Вт/м.

Анализ показывает, что сами подводющие линии являются достаточно эффективными подогревателями. Поэтому целесообразно исключить из схемы подогреватель и подавать холодный азот из танка непосредственно в подводющие линии. Это позволит снизить расход жидкого азота до 125 л/сутки. При этом температура на входе в КБ составит  $-41^\circ\text{C}$ , и расход азота станет равным  $4,6 \cdot 10^{-4}$  кг/с. Такое снижение температуры входа азота в КБ ПВД является допустимым, так как увеличившаяся до 33 мм зона смешения по-прежнему остаётся меньше расстояния до 1-й микростриповой пластины – 75 мм. Кроме того, необходимо осуществлять контроль температуры азота, входящего в каждый из блоков ПВД, путём установки соответствующих датчиков, что позволит более эффективно оптимизировать работу системы.

### **Выводы**

1. Созданная система термостатирования ПВД позволяет обеспечить практически сухую среду в объёме детектора и поддерживать температуру в нём с точностью  $1^\circ\text{C}$ .
2. Разработана методика расчёта, которая позволяет создать теплообменник смешения, обеспечивающий требуемую точность поддержания температуры.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность профессору Ермолову П.Ф. за постановку задачи и постоянное внимание к работе.

### **Список литературы**

1. Басиладзе С.Г., Воробьёв А.П., Ермолов П.Ф. и др. – Препринт НИИЯФ МГУ 99-28/586, М., 1999.
2. Толмачёв В.Т., Хренов Ю.В. – Препринт ОИЯИ 13-9166, Дубна, 1975.
3. Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю. и др. Теория турбулентных струй. – М.: Наука, 1984.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975.

*Рукопись поступила 11 февраля 2005 г.*



Я.В. Гришкевич, В.И. Киреев, А.В. Плескач.  
Система термостатирования прецизионного вершинного детектора установки СВД.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор .Н.В. Ежела.

---

Подписано к печати	18.02.2005.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 0, 75.	Уч.– изд.л. 0,6.	Тираж 130.	Заказ 12.
ЛР №020498	от 17.04.97.	Индекс 3649.	

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

**ПРЕПРИНТ 2005-1 ИФВЭ, 2005**

---