



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-69

ФТО

А.В.Плескач

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ
ХОЛОДНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
КРИОГЕННЫХ ДЕТЕКТОРОВ
К ПОВЕРХНОСТНОМУ КИПЕНИЮ**

Протвино 1998

Аннотация

Плескач А.В. Методика расчета устойчивости холодной электроники криогенных детекторов к поверхностному кипению: Препринт ИФВЭ 98-69. – Протвино, 1998. – 11 с., 3 рис., 6 табл., библиогр.: 9.

Работа посвящена рассмотрению методики расчета холодной электроники жидкоаргоновых калориметров на ее устойчивость к поверхностному кипению. Показано влияние материала поверхности теплообмена на ее устойчивость к закипанию (к появлению первых пузырьков пара) и продемонстрирована целесообразность покрытия металлических участков микросхемы усилителя с электронной платой материалом с малой теплоаккумулирующей способностью, например, фторопластом, с толщиной покрытия больше глубины проникновения температурных колебаний. Детальные расчеты вероятности вскипания на холодных микросхемах усилителей проведены для конкретных условий жидкоаргонового адронного торцевого калориметра детектора АТЛАС.

Abstract

Pleskach A.V. Method of Evaluation of the of Cold Electronics Stability Inside Cryogenic Detectors Towards on Chips Surfaces Boiling: IHEP Preprint 98-69. – Protvino, 1998. – p. 11, figs. 3, tables 6, refs.: 9.

The paper is devoted to the consideration of cold electronics stability housed inside a cryogenic detector to the chips surfaces boiling. The influence of a material of the chip surface, where heat exchange occurs, on the boiling stability (i.e. the appearance of the first bubbles of vapor) is determined and the advisability of coating of metal surfaces of amplifier chips and printed boards with by the material of a low heat accumulation capacity is proved. Such a coating, for example, with teflon, must have a depth exceeding the depth of penetration of heat variations. The detailed calculations of the probability of boiling on the cold amplifier chips are performed for the particular conditions of the liquid argon hadronic end-cap calorimeter of the ATLAS detector.

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 1998

Введение

В последнее время [1] в жидкоаргоновых детекторах с целью уменьшения потерь полезного сигнала появилась тенденция размещать усилители ионизационного сигнала детектора непосредственно в рабочей среде — жидком аргоне. Жидкий аргон, являясь диэлектриком и переносчиком электронных зарядов, образовавшихся в нем при прохождении заряженных частиц, на собирающие поверхности регистрирующих электродов, не должен содержать паровой фазы, которая в отличие от жидкой является проводником и, попадая в зазоры между электродами, может приводить к искажениям полезного сигнала. Микросхемы усилителей рассеивают некоторую тепловую энергию в жидком аргоне, являясь источником тепловыделения. Величина этого тепловыделения не должна вызывать кипения на поверхности микросхемы.

Настоящая работа посвящена определению условий, при которых генерация паровой фазы на поверхности микросхемы отсутствует, и выработке соответствующих рекомендаций, которые будут способствовать повышению устойчивости существующих микросхем усилителей к поверхностному кипению на них.

1. Определение условия отсутствия кипения на поверхности микросхемы усилителя

Обычно в криостатах отсутствие кипения на потенциальных источниках тепловыделения достигается созданием пережима (т.е. превышением давления над равновесным), что создает условия для поддержания жидкости в переохлажденном состоянии. Тепловой поток, рассеиваемый микросхемой, передается с ее поверхности к жидкости при наличии некоторого перепада температур (ΔT) между этой поверхностью, называемой в дальнейшем стенкой, и жидкостью. При отсутствии кипения этот теплообмен осуществляется в режиме естественной конвекции.

Очевидно, что необходимым условием отсутствия поверхностного кипения в переохлажденной жидкости является непревышение температурным напором на стенке (ΔT_c) величины переохлаждения жидкости (т.е. недоведение пограничного слоя

жидкости до состояния насыщения). Однако, как показывают исследования режима кипения [2], достижение пограничным слоем состояния насыщения не является достаточным для начала парообразования. Теплопередача в насыщенной жидкости на начальном этапе носит исключительно конвективный характер, который описывается критериальным уравнением для естественной конвекции [3]. Только после достижения некоторого превышения температурой стенки температуры насыщения, называемого задержкой кипения ($\Delta T_{зк}$), появляются первые пузырьки пара [4] и начинается режим пузырькового кипения.

С учетом этих обстоятельств для обеспечения условия отсутствия кипения максимальный перепад температур на поверхности микросхемы, установившийся в режиме естественной конвекции, должен быть меньше суммы температурных напоров, определяющих переохладение жидкости (ΔT_{nx}) и задержку ее кипения ($\Delta T_{зк}$):

$$\Delta T_c < (\Delta T_{nx} + \Delta T_{зк}). \quad (1)$$

Величина переохладения (ΔT_{nx}) жидкого аргона определяется пережимом (превышением давления над равновесным при рабочей температуре), создаваемым в криостате гидростатическим давлением, обеспечиваемым за счет подъема свободного уровня над криостатом и собственной высотой криостата.

Задержка кипения ($\Delta T_{зк}$) представляет собой разницу между температурой поверхности стенки и местной температурой насыщения жидкости. Величину задержки кипения ($\Delta T_{зк}$) представляется возможным определить из условия равенства тепловых потоков в режимах естественной конвекции и пузырькового кипения. Это условие фактически сводится к равенству коэффициентов теплоотдач, соответствующих этим режимам:

$$\alpha(\Delta T)_{конв} = \alpha(\Delta T)_{кун}.$$

1.1. Коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкому аргону в режиме естественной конвекции

Этот коэффициент теплоотдачи определяется из известного критериального уравнения [5]:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (2)$$

где $Nu = \alpha d / \lambda$ — критерий подобия Нуссельта; $Gr = g d^3 \beta \Delta T / (\mu / \rho)^2$ — критерий Грасгофа; $Pr = c_p \mu / \lambda$ — критерий Прандтля; d — характерный геометрический размер; g — ускорение свободного падения; λ — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости; β — коэффициент температурного расширения; μ — динамическая вязкость; ρ — плотность; c_p — теплоемкость; C и n — коэффициент и показатель степени, зависящие от режима движения

жидкости $C=0,54$ и $n=1/4$ — для ламинарного, $C=0,135$ и $n=1/3$ — для турбулентного движений (переход ламинарного режима в турбулентный происходит при $Gr \cdot Pr > 10^7$).

Проведенный анализ показывает, что для размеров, характерных для микросхем усилителей, смонтированных на плате, будет всегда иметь место турбулентный режим течения. После подстановки параметров жидкого аргона в приведенное выше критериальное уравнение из $\alpha = Nu \lambda/d$ коэффициент теплоотдачи находится в следующем виде:

$$\alpha_{конв} = A_{(T)} \Delta T^{1/3}, \quad (3)$$

где величина коэффициента $A_{(T)}$ определяется совокупностью теплофизических параметров жидкого аргона, задаваемых критериями подобия в критериальном уравнении (2), и зависит от рабочей температуры жидкости.

При рабочей температуре жидкого аргона, равной 89,3 К

$$A = 246 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^{4/3}).$$

В диапазоне рабочих температур аргона $87 \div 95$ К коэффициент $A_{(T)}$ весьма слабо зависит от температуры, и практически во всем этом диапазоне $\alpha_{конв} = 246 \Delta T^{1/3}$.

1.2. Коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкому аргону в режиме пузырькового кипения

Этот коэффициент теплоотдачи для криогенной жидкости определяется из следующего критериального уравнения, предложенного Толубинским [6] и использованного в работе [7]:

$$Nu = 75 C_\chi K^{0,7} Pr^{-0,2}, \quad (4)$$

где $Nu = (\alpha/\lambda) \sqrt{(\sigma/g)/(\rho - \rho_n)}$ — критерий подобия Нуссельта, модифицированный для процесса испарения; $K = q/(r \rho_n w'')$ — критерий подобия для процесса кипения; $Pr = c_p \mu/\lambda$ — критерий Прандтля; $C_\chi = (\chi/\chi_p)^m$ — коэффициент, учитывающий влияние теплофизических свойств материала теплообменной поверхности; $\chi = \sqrt{\lambda_c \rho_c c_c}$ — коэффициент теплоусвоения материала стенки; χ_p — коэффициент теплоусвоения бронзы¹; λ_c, ρ_c и c_c — теплопроводность, плотность и теплоемкость материала стенки; $w'' = 0,36 \cdot 10^{-3} (P_{кр}/P)^{1,4}$ (м/с) — средняя скорость роста паровых пузырей; ρ_n — плотность пара; σ — коэффициент поверхностного натяжения; q — плотность теплового потока; r — теплота испарения; m — показатель степени; $P_{кр}$ — давление в критической точке; P — давление при температуре насыщения, остальные обозначения приведены выше.

На основе экспериментальных данных в соответствии с работой [2] для металлических поверхностей $m=0,5$. Для неметаллических поверхностей в работе [2]

¹Как эталонный материал поверхности, используемый в критериальном уравнении В.И.Толубинского.

показатель степени m не определен. Представляется возможным по отношению измеренных в работе [2] коэффициентов теплоотдачи при кипении жидкого азота на поверхностях из нержавеющей стали (12X18H10T) и фторопласте-4 оценить показатель степени m для неметаллов равным $m \approx 0,2$.

В табл. 1 приведены теплофизические свойства материалов, используемых на поверхностях микросхем усилителей и плат, на которых они монтируются (при 90К) [8]:

Таблица 1.

Материал		λ Вт/(м·К)	c Дж/(кг·К)	ρ кг/м ³	$\sqrt{\lambda\rho c} \cdot 10^{-4}$ Вт·с ^{1/2} /(м ² ·К)
Ме- тал- лы	бронза ¹	29	207	8800	0,73
	медь	530	230	8930	3,3
	золото	139	104	19310	1,67
	припой ПОС-60	49	148	8900	0,8
Не- ме- тал- лы	фторопласт	0,26	340	2300	0,045
	стекло- текстолит	0,23	365	1600	0,037
	каптон (полиамид)	0,29	575	1150	0,043

Из табл. 1 видно, что малотеплопроводные материалы (неметаллы) по сравнению с металлами отличаются более чем на порядок меньшим коэффициентом теплоусвоения, который для неметаллов различается не более чем на 20%. Последнее обстоятельство позволяет с достаточной степенью достоверности распространить показатель степени $m=0,2$, определенный для соотношения коэффициентов теплоотдачи материалов нержавеющей сталь — фторопласт, также на большинство неметаллов — материалов с малой теплоаккумулирующей способностью.

После подстановки в критериальное уравнение Голубинского (4) теплофизических параметров жидкого аргона, берущихся при температуре насыщения, и материала поверхности нагрева получаем следующее выражение для определения коэффициента теплоотдачи при кипении:

$$\alpha_{кин} = B_{(T_{нас}, C_{\chi})} \Delta T^{7/3}, \quad (5)$$

где $B_{(T_{нас}, C_{\chi})} = B$ — коэффициент, определенный из критериального уравнения (4) и зависящий от температуры насыщения и теплоаккумулирующей способности материала поверхности нагрева.

В табл. 2 на примере криостата бокового торцевого калориметра установки АТЛАС [1] приведены значения коэффициента B жидкого аргона на трех уровнях этого криостата для ряда используемых в усилителе материалов при рабочей температуре 89,3 К.

Таблица 2.

Уровень криостата	$T_{раб}$ К	$T_{нас}$ К	$B, Вт/(м^2 \cdot К^{10/3})$			
			медь	золото	припой	неметаллы
Верх	89,3	91,7	1054	341	100	13
Середина		93,6	1303	419	123	16
Низ		95,3	1620	520	154	20

1.3. Задержка кипения в жидком аргоне

Величина задержки кипения, определенная из условия равенства найденных коэффициентов теплоотдачи при кипении (5) и естественной конвекции (3), выражается следующим образом:

$$\Delta T_{зк} = \left[A/B_{(T_{нас}, C_{\chi})} \right]^{0,5}. \quad (6)$$

В табл. 3 приведены результаты вычисления задержки кипения ($\Delta T_{зк}$) в жидком аргоне для различных материалов, используемых в микросхемах усилителя на трех уровнях криостата установки АТЛАС.

Таблица 3.

Уровень криостата	$T_{раб}$ К	$T_{нас}$ К	ΔT_{nx} К	$\Delta T_{зк}, К$			
				медь	золото	припой	неметаллы
Верх	89,3	91,7	2,4	0,48	0,85	1,57	4,35
Середина		93,6	4,3	0,41	0,77	1,4	3,91
Низ		95,3	6,0	0,39	0,69	1,26	3,5

Из приведенной таблицы видно, что задержка кипения ($\Delta T_{зк}$) уменьшается для каждого из материалов в направлении к низу криостата (с ростом гидростатического давления), но в меньшей степени, чем рост переохлаждения (ΔT_{nx}) (см. 1) с возрастанием пережима. Из этой таблицы также следует, что задержка кипения ($\Delta T_{зк}$) сильно зависит от материала поверхности нагрева и имеет наибольшее значение у неметаллов. С этой точки зрения, для увеличения стойкости поверхности усилителя к закипанию металлические поверхности его после окончания монтажа на плате следует покрывать слоем какого-нибудь пластика (материала с малой теплоаккумулирующей способностью). При этом толщина покрытия должна быть больше глубины проникновения температурных колебаний.

1.4. Условие отсутствия поверхностного кипения в переохлажденном жидком аргоне

Условие отсутствия поверхностного кипения в переохлажденной жидкости, как это было указано выше, должно выполняться в случае, если температурный напор на стенке, определенный в режиме естественной конвекции, будет меньше суммы температурных напоров от переохлаждения и задержки кипения:

$$\Delta T_c < (\Delta T_{nx} + \Delta T_{зк}).$$

Условие отсутствия кипения (максимально допустимый температурный напор на стенке) на трех уровнях криостата для различных используемых материалов поверхности нагрева приведено в табл. 4 (с точностью до описания коэффициентов теплоотдачи критериальными уравнениями).

Таблица 4.

Уровень криостата	$T_{раб}$ К	$T_{нас}$ К	$(\Delta T_{nx} + \Delta T_{зк}),$ К			
			медь	золото	припой	неметаллы
Верх	89,3	91,7	2,9	3,3	4,0	6,8
Середина		93,6	4,7	5,2	5,7	8,2
Низ		95,3	6,4	6,7	7,3	9,5

Из приведенной таблицы следует, что предельный температурный напор на стенке $(\Delta T_{nx} + \Delta T_{зк})$, соответствующий отсутствию поверхностного кипения, остается наименьшим в верхней части криостата и сильно зависит от материала поверхности нагрева.

2. Расчет температурного режима поверхности микросхемы усилителя

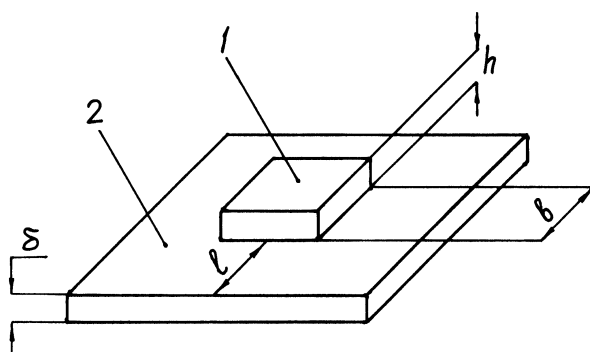


Рис. 1. Микросхема усилителя на плате: 1 — микросхема усилителя; 2 — часть электронной платы, приходящейся на 1 микросхему, размеры: $b=12,25$ мм; $h=2,6$ мм; $\delta=3$ мм; $l=60$ мм.

микросхемы усилителя, определяется как $l = F/\Pi$, где F — площадь части платы, отнесенная к одному усилителю; Π — внешний периметр микросхемы усилителя.

Тепло, отводимое поверхностью (S) микросхемы усилителя,

$$Q_1 = \alpha S \Delta T.$$

Тепло, отводимое периферийной частью стеклотекстолитовой платы, работающей как ребро, определяется по следующей формуле [9]:

$$Q_2 = \Delta T \sqrt{\alpha U \lambda_c f} th(ml),$$

где $m = \sqrt{\alpha U / (\lambda_c f)}$; f — поперечное сечение ребра; U — периметр поперечного сечения, остальные обозначения приведены выше.

Оценка показывает, что для стеклотекстолитовой платы уже при $l=5$ мм $th(ml) \cong 1$ и, таким образом, можно считать, что при рабочих размерах доли платы на один усилитель ($l \sim 60$ мм) $th(ml) = 1$, и тогда $Q_2 = \Delta T \sqrt{\alpha U \lambda_c f}$. Это означает, что перепад температур на поверхности платы изменяется от ΔT до 0. Из этого условия средний коэффициент теплоотдачи на поверхности ребра (периферийной части платы) может быть определен

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_0^{\Delta T} A \Delta T^{1/3} d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{3}{4} A \Delta T^{1/3}.$$

Рассеивающим эффектом кабелей, соединяющих контакты микросхемы усилителя и печатной схемы на плате, а также самой печатной схемы платы пренебрегаем, что, несомненно, идет в запас.

В соответствии с принятыми допущениями на рис.2 приведена эпюра распределения избыточной температуры (ΔT) на поверхности микросхемы усилителя, смонтированного на плате.

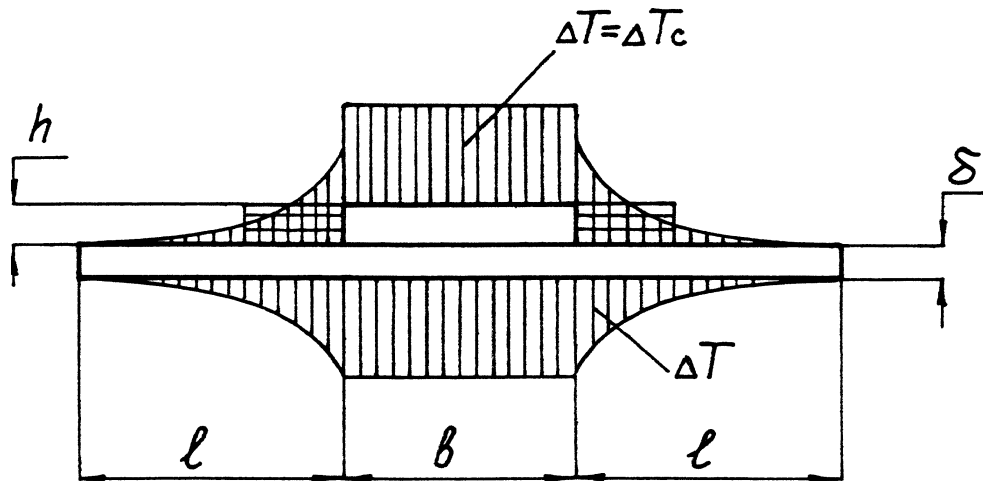


Рис. 2. Эпюра распределения избыточной температуры (ΔT) на поверхности микросхемы усилителя, смонтированной на плате.

Из условия $Q = Q_1 + Q_2$, где Q — величина тепловой энергии, рассеиваемой микросхемой усилителя, определяется максимальный температурный напор ($\Delta T = \Delta T_c$) на поверхности усилителя.

После подстановки размеров микросхемы усилителя и платы, приведенных на рис.1, в уравнение теплового баланса с учетом вышеприведенных зависимостей нахождение максимального перепада температур на поверхности микросхемы усилителя сводится к вычислению следующего выражения:

$$\Delta T_c = \left[\frac{Q}{2A(b^2 + 2hb) + 4,9kb\sqrt{A\lambda_c\delta}} \right]^{3/4},$$

где $k = 1/\Delta T^{1/6}$; b — ширина микросхемы усилителя; h — ее высота; δ — толщина стеклотекстолитовой платы. Для вычисления ΔT_c по приведенной формуле обычно достаточно одного приближения после задания $k = 1$ (второе приближение дает уточнение всего на $\sim 0,05\%$).

При ориентации микросхемы усилителя, отличной от вертикальной в соответствии с работой [5], необходимо учитывать, что для поверхностей, обращенных вверх, $\alpha = 1,3A\Delta T^{1/3}$, а для поверхностей, обращенных вниз, $\alpha = 0,7A\Delta T^{1/3}$. В соответствии с этим для любой ориентации микросхемы усилителя выражение для определения ΔT_c запишется следующим образом:

$$\Delta T_c = \left[\frac{Q}{2\bar{A}(b^2 + 2hb) + 4,9kb\sqrt{A\lambda_c\delta}} \right]^{3/4},$$

где $\bar{A} = eA$; $e = (1,3S_в + 0,7S_н)/(S_в + S_н)$; $S_в$ — величина поверхности, обращенной вверх, $S_н$ — величина поверхности, обращенной вниз. Для ребра $S_в = S_н$ и, следовательно, $\bar{A} = A$.

В табл. 5 представлены результаты расчета максимального перепада температур на поверхности микросхемы усилителя на плате (ΔT_c) в зависимости от ее ориентации в пространстве и величины тепловыделения в ней.

Таблица 5.

Ориентация микросхемы усилителя на плате	ΔT_c		
	Q=1Вт	Q=0,5Вт	Q=0,25Вт
Горизонтально вверх	4,50	2,65	1,56
Вертикально	4,78	2,81	1,65
Горизонтально вниз	5,11	3,0	1,77

3. Определение коэффициента запаса на отсутствие кипения на поверхности микросхемы усилителя и анализ полученных результатов

На рис.3 графически представлены результаты расчета ΔT_c и $\Delta T_{эж}$, которые нанесены на РТ-диаграмму для аргона в зависимости от высоты рассматриваемого в качестве примера криостата и с учетом влияния материала теплоотдающей поверхности.

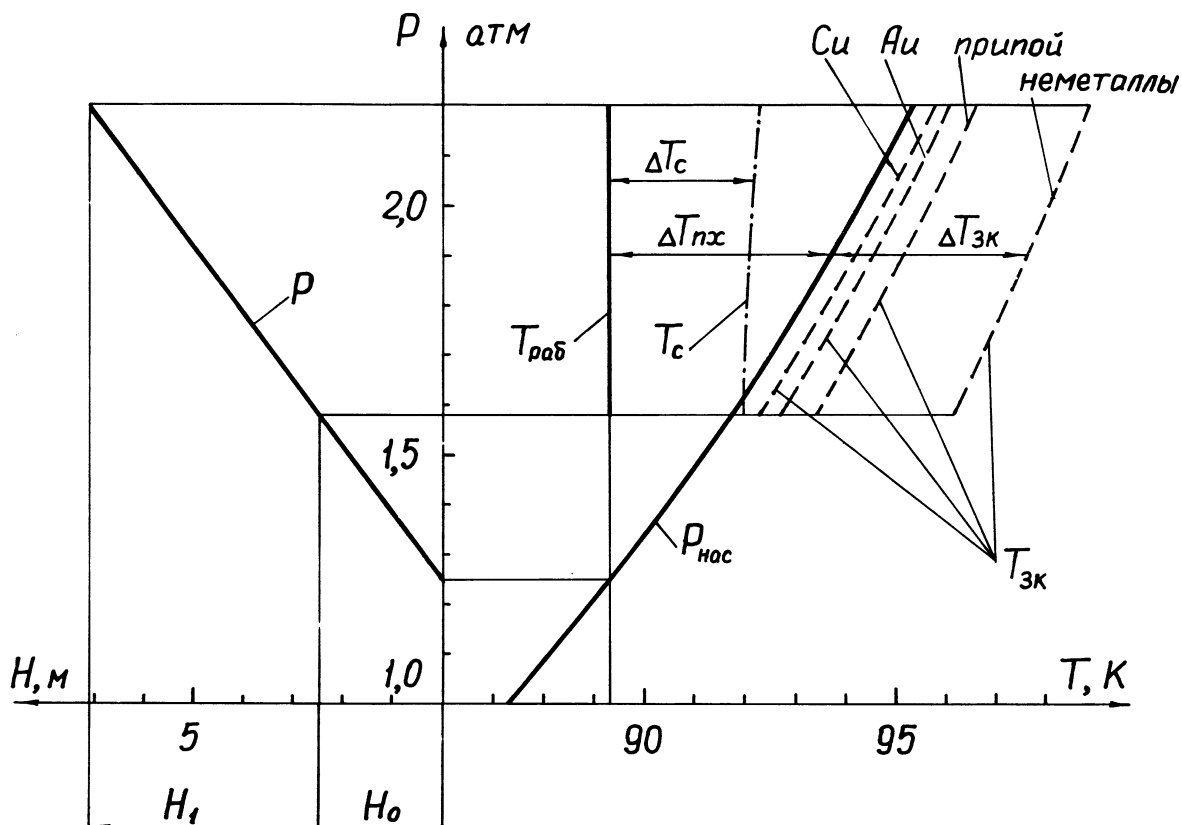


Рис. 3. Температура поверхности микросхемы усилителя (T_c) для $Q=0,5$ Вт и граница поверхностного закипания ($T_{зк}$) для различных материалов в РТ-диаграмме в зависимости от гидростатического давления столба жидкости в криостате: H_o — превышение уровня в расширительном объеме над верхней точкой криостата; H_1 — высота криостата; P — давление в криостате; $P_{нас}$ — давление насыщенных паров.

Очевидно, что температурный напор на стенке, определенный в режиме естественной конвекции, в соотношении с переохлаждением жидкости и задержкой кипения в ней является основным физическим параметром, определяющим степень приближения к границе начала кипения (начала образования пузырьков пара). Поэтому коэффициент запаса микросхемы усилителя к началу вскипания представляется возможным определять следующим образом:

$$\eta = \frac{\Delta T_{нх} + \Delta T_{зк}}{\Delta T_c}.$$

В табл. 6 представлены результаты расчета коэффициента запаса микросхемы усилителя к поверхностному кипению на трех уровнях криостата для различных материалов, используемых в микросхеме усилителя и его плате при рабочей температуре криостата 89,3 К и величинах тепловыделения усилителя 1; 0,5 и 0,25 Вт. При проведении этого расчета учитывалось, что вверху криостата усилители расположены горизонтально вверх, в среднем сечении криостата — вертикально, а внизу — горизонтально вниз.

Таблица 6.

Уровень криостата	$T_{раб}$ К	Q Вт	$\eta = (\Delta T_{nx} + \Delta T_{эж}) / \Delta T_c$			
			медь	золото	припой	неметаллы
Верх	89,3	1	0,6	0,7	0,9	1,5
		0,5	1,1	1,2	1,5	2,6
		0,25	1,9	2,1	2,5	4,3
Середина		1	1,0	1,1	1,2	1,7
		0,5	1,7	1,8	2,0	2,9
		0,25	2,9	3,1	3,5	5,0
Низ		1	1,2	1,3	1,4	1,9
		0,5	2,1	2,2	2,4	3,2
		0,25	3,6	3,9	4,1	5,4

Из приведенной таблицы видно, что коэффициент запаса по кипению у поверхностей из неметаллов существенно больше, чем у поверхностей из металлов. Из этого следует, что имеющиеся в сборке микросхемы усилителя на плате металлические поверхности (особенно медные и золотые) целесообразно покрывать слоем пластика (неметалла), обладающего хорошей адгезией к защищаемой поверхности. При этом толщина покрытия должна быть больше глубины проникновения температурных колебаний. Как показывают оценки, проведенные по методике, изложенной в [2], толщина пластикового покрытия должна быть $\delta \geq 10$ мкм.

Коэффициент запаса по стойкости к началу закипания (η) возрастает в направлении к низу криостата, что является благоприятным фактором, поскольку вероятность попадания пузырьков в межэлектродное пространство выше у усилителей, расположенных в нижней части криостата, и наименьшая — в верхней части. Поэтому, обеспечивая необходимый коэффициент запаса ($\eta \geq 2$) в верхней части криостата, можно быть уверенным, что в нижней части криостата коэффициент запаса будет обеспечен наверняка.

Эффективность использования пластикового покрытия, как это видно из табл. 6, уменьшается в направлении к низу криостата в связи с тем, что доля перепада температур (ΔT_{nx}), определяемого переохлаждением жидкости в суммарном до границы закипания, возрастает.

Из табл. 6 следует, что при рабочей температуре в криостате 89,3К [1] усилители с тепловыделением $Q=1$ Вт не проходят по стойкости к поверхностному кипению ни на одном из уровней криостата ($\eta < 2$).

Усилители с внутренним тепловыделением $Q=0,5$ Вт также не проходят по стойкости к поверхностному кипению ($\eta < 2$), однако покрытие металлических поверхностей тонким слоем пластика (например, путем напыления) позволяет увеличить коэффициент безопасности до 2,6 вверху и 3,2 внизу, что делает такие микросхемы “эксплуатационными” при рабочей температуре 89,3 К.

Усилители с внутренним тепловыделением $Q=0,25$ Вт являются эксплуатационными при рабочей температуре криостата 89,3 К ($\eta=1,9$ вверху и $\eta=3,6$ внизу), но

покрытие металлических поверхностей слоем пластика позволит этот коэффициент увеличить до 4,3 (в 2,3 раза) вверх, и 5,4 (в 1,5 раза) вниз, что существенно повысит надежность стабильной работы холодной электроники.

Выводы

1. На базе критериальных уравнений, описывающих режимы теплообмена при естественной конвекции и кипении, разработана методика расчета холодной электроники (например, для жидкоаргоновых калориметров) на устойчивость к поверхностному кипению.

2. Показана зависимость коэффициента стойкости к закипанию от материала поверхности теплообмена.

3. Показана целесообразность покрытия металлических участков поверхности микросхемы тонким слоем пластика, осуществляемого путем, например, распыления до толщины бóльшей глубины проникновения температурных колебаний ($\delta \geq 10$ мкм).

Список литературы

- [1] ATLAS Technical Design Report, Liquid Argon Calorimeter, CERN/LHCC 96-41, 1996.
- [2] Григорьев В.А. и др. Кипение криогенных жидкостей. — М.: Энергия, 1977.
- [3] Фастовский Е.Г. и др. Криогенная техника. — М.: Энергия, 1974.
- [4] Кошкин В.К. и др. Нестационарный теплообмен. — М.: Машиностроение, 1973.
- [5] Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергия, 1985.
- [6] Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. — Киев: Наукова думка, 1980.
- [7] Алексеев В.П. и др. Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок. — Л.: Энергоатомиздат, 1987.
- [8] Кожевников И.Г., Новицкий Л.А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. — М.: Машиностроение, 1982.
- [9] Исаченко В.П. и др. Теплопередача. — М.: Энергия, 1975.

Рукопись поступила 15 октября 1998 г.

А.В.Плескач.

Методика расчета устойчивости холодной электроники криогенных детекторов к поверхностному кипению.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 19.10.98. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1,37. Уч.-изд.л. 1,05. Тираж 120. Заказ 304. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

