

ррри в Э институт физики высоких энергий

ИФВЭ 96-103  $\Phi TO$ 

Л.И. Никитина, А.В. Плескач

# РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КРИОСТАТА ТОРЦЕВОГО ЖИДКОАРГОНОВОГО КАЛОРИМЕТРА УСТАНОВКИ АТЛАС С УЧЕТОМ ИНЕРЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Протвино 1996

#### Аннотация

Никитина Л.И., Плескач А.В. Расчет на прочность криостата торцевого жидкоаргонового калориметра установки АТЛАС с учетом инерционной нагрузки: Препринт ИФВЭ 96–103. – Протвино, 1996. – 15 с., 8 рис., библиогр.: 6.

Разработана методика расчета криостата жидкоаргонового калориметра на прочность с учетом инерционных нагрузок, возникающих при монтаже установки. Определена допустимая скорость его опускания в подземный экспериментальный зал.

#### Abstract

Nikitina L.I., Pleskach A.V. Strength Calculation of the Liquid Argon End-Cap Calorimeter Cryostat for the ATLAS Detector Allowing for Inertial Force Load: IHEP Preprint 96–103. – Protvino, 1996. – p. 15, figs. 8, refs.: 6.

The method of the strengh calculations of the liquid argon calorimeter cryostat is worked out, which takes into account the load of the inertial force, arrising during the set-up assembly. The permissible velosity of the cryostat dessending into the experimental underground hall is estimated.

> © Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий, 1996

### Введение

Конструкция современных криостатов больших размеров (около 5÷10 метров диаметром) для жидкоаргоновой калориметрии [1,2] должна удовлетворять ряду противоречивых требований, весьма осложняющих их проектирование:

- 1. Стенки криостата должны быть достаточно радиационно-прозрачными, и в то же время выдерживать полное внутреннее давление аргона.
- 2. Тот факт, что нагрузка от веса калориметрической сборки, размещаемой в жидком аргоне, достаточно велика и соизмерима с нагрузкой, обусловленной внутренним давлением аргона, но в отличие от нее локально приложена, предъявляет повышенные требования к жесткости конструкции криостата и повышает сложность расчета.
- 3. Большие габариты установки и значительная ее стоимость предопределяют повышенные требования к надежности расчета криостата на прочность. Поэтому помимо расчета криостата на прочность от действия статической нагрузки становится также актуальным и его расчет на действие инерционных нагрузок, возникающих во время транспортировки и особенно монтажа криостата на штатном месте с помощью подъемного крана.

Необходимая точность расчета достигается использованием специального пакета программ, базирующихся на методе конечных элементов [3].

В настоящей работе приводятся методика расчета криостата на прочность с учетом инерционных нагрузок, возникающих при его монтаже, и разработанный на основе этих расчетов способ определения допустимой скорости его опускания во время монтажа. Знание допустимой скорости опускания позволяет сформулировать требования к грузоподъемному оборудованию, которое будет использоваться при монтаже криостата.

### 1. Принцип расчета

Расчет криостата на действие внутреннего давления и весовой нагрузки калориметрической сборки, размещаемой в нем, а также на действие веса самих элементов криостата проводился после описания граничных условий и схемы нагружения оболочек и днищ криостата с помощью готового пакета программ, основанных на применении метода конечных элементов. При этом в рамках используемой программы не представляло труда при действии одного и того же внутреннего давления провести расчет с весовой нагрузкой, увеличенной в произвольное число раз. Увеличение весовой нагрузки, которое реально вызывается действием инерционных сил, может быть выражено через ускорение свободного падения, т.е. через перегрузку. Результаты расчета для неизменного внутреннего давления и при различных перегрузках позволили перейти к определению допустимой скорости опускания, которая вызывает соответствующие инерционные усилия при установке криостата на опоры.

Определение допустимой скорости опускания криостата на опоры производилось из условия сохранения энергии в предположении, что кинетическая энергия движущегося криостата полностью превращается в потенциальную энергию деформации наружных опор криостата. При этом использовались следующие допущения:

— места, на которые устанавливается криостат своими опорами, считаются абсолютно жесткими;

— колебательным процессом внутренних частей криостата в момент его установки на опоры можно пренебречь.

## 2. Определение эквивалентных напряжений и деформаций в стенках криостата в зависимости от величины гравитационного ускорения

Конкретные расчеты проведены для криостата жидкоаргонового торцевого калориметра установки АТЛАС [4]. Этот криостат состоит из двух цилиндрических оболочек с плоскими днищами, связанными по центру трубами [5]. Между передними днищами расположены проставки, а обечайки жестко зафиксированы одна относительно другой. В этом случае днища деформируются под действием наружного и внутреннего давлений, действующих навстречу друг другу совместно, что позволяет уменьшить их суммарную толщину. Калориметрическая сборка, размещаемая внутри криостата, холодная оболочка так же, как и теплая оболочка, опираются на опоры, размещаемые внутри и снаружи соответствующих оболочек и располагаемые вдоль их образующих, находящихся в области средней горизонтальной плоскости. Все эти детали криостата представлены в виде оболочечных элементов (4-сторонний элемент с 4 узловыми точками), имеющих собственную толщину. Так как конструкция и нагрузки симметричны, то рассматривалась только одна половина криостата. На расчетной схеме рис.1 продемонстрировано секционирование криостата на элементы.



Рис. 1. Расчетная схема криостата: С1 — наружная оболочка; С2 — внутренняя (холодная) оболочка; D1 — переднее наружное днище; D2 — переднее внутреннее днище; D3 — заднее наружное днище; D4 — заднее внутреннее днище; T1 — труба, связывающая наружные днища; T2 — труба, связывающая внутренние днища.

На рис.2 показаны локальные усилия, действующие на стенки криостата, и соответствующие опорные точки. В соответствии с расчетной схемой принимаем, что:

— криостат опирается в 18 точках по наружной оболочке (вдоль образующей, расположенной ниже горизонтальной плоскости симметрии);

— обе оболочки имеют одинаковые перемещения в вертикальном направлении в 18 точках, расположенных вдоль горизонтальных образующих оболочек;

— вес модулей калориметрических сборок (электромагнитной и адронной), помещаемых в криостат, составляет 200 т и действует в 20 точках вдоль горизонтальной образующей внутренней оболочки;

— вес встроенного в криостат "переднего" калориметра [6] составляет 10 т и действует вдоль горизонтальной образующей труб Т2 (см. рис.1);

— при расчете учитываются нагрузки от самого криостата.



Рис. 2. Схема распределения весовых (локальных) нагрузок, действующих на стенки криостата: 1 – реакция внешних опор; 2 – усилия, передаваемые калориметром.

Днища D1 и D2 (см. рис.1) имеют одинаковые перемещения в направлении оси криостата в точках, где расположены проставки между ними. Днища D3 и D4 имеют одинаковые перемещения в направлении оси криостата в точках расположения кольцевой проставки между ними. Трубы T1 и T2 связывают соответственно теплые и холодные днища криостата.

Все стенки криостата, кроме дница D4, изготовлены из алюминиевого сплава, плотность которого принималась равной 2800 кг/м<sup>3</sup>, а модуль упругости — 7100 кг/мм<sup>2</sup>. Материал для днища D4 — нержавеющая сталь, плотность которой принималась равной 7800 кг/м<sup>3</sup>, а модуль упругости — 20000 кг/мм<sup>2</sup>.

Основная толщина оболочек C1 и C2 — 30 мм, толщина днищ D1 и D2 соответственно составляет 30 и 50 мм, расстояние между ними 30 мм; толщина днищ D3 и D4 составляет соответственно 60 и 90 мм, расстояние между ними 40 мм; толщины системы трубок T1 3 мм и системы трубок T2 от 5 до 20 мм.

Предполагается, что при монтаже установки АТЛАС жидкоаргоновые торцевые калориметры будут собраны на поверхности и опущены в подземный экспериментальный зал через вертикальную шахту.

В соответствии с описанной расчетной схемой были определены эквивалентные напряжения в стенках криостата и их деформации, происходящие при его опускании, для нескольких значений гравитационного ускорения (1g, 2g и 3g) и для следующих условий нагружения наружным и внутренним давлением:

$\mathbf{a})$	(давление наружное)	$P_{\mu ap.}$	=	1 атм	)	
	(давление в изоляцион-	Ризол.	=	0 атм		
	ном пространстве)				<b>для</b> 18	g, 2g и 3g
	(давление внутри	Рвн.	=	2  atm		
	холодной оболочки)				J	
<b>б</b> )		$P_{\mu a p.}$	= 1	атм	Ĵ	
		Ризол.	= 0	атм	<b>}</b> для 1§	5
		Рвн.	= 2	2,5 атм	J	

Характеристика условий нагружения: а) криостат охлажден газообразным гелием до температуры  $\sim 90K$  и находится под избыточным давлением гелия (чтобы исключить риск загрязнения объема путем подсоса атмосферы); б) криостат охлажден до рабочей температуры и находится под максимально возможным рабочим давлением в условиях эксплуатации.

На рис. 3, 4 и 5 приведены результаты расчета криостата для следующих условий: а) при увеличении массы криостата и его содержимого в 1, 2 и 3 раза; б) для рабочих условий эксплуатации результаты расчета приведены в табл.1 (далее по тексту).













### 3. Определение жесткости внешней опоры криостата

Для определения жесткости внешней опоры криостата был проведен расчет деформации последней под действием фиксированной весовой нагрузки. Расчет проводился по стандартной программе, основанной на использовании метода конечных элементов.

Для повышения точности расчета деформации опоры зона оболочки, сопрягаемой с опорой, была предельно уменьшена и ее граница была жестко заделана. Такая расчетная схема, используемая для определения деформации опоры, приведена на рис.6. Эта схема позволяет обеспечить более мелкое секционирование опоры и ее зоны сопряжения с оболочкой.



Рис. 6. Расчетная схема для определения деформации внешней опоры криостата.

На рис.7 приведен результат расчета деформации опоры криостата вдоль одной его горизонтальной образующей. Из приведенного графика видно, что деформация опоры практически постоянна по всей длине образующей за исключением краев, где сказывается влияние краевого эффекта. Деформация опоры, усредненная по длине, определяется следующим образом:

$$\Delta_1 = \frac{\int \Delta(l) dl}{l},$$

где l — длина опоры;  $\Delta$  — деформация опоры. Знание деформации опоры позволяет определить ее жесткость, которая составляет (для одной стороны):

$$K = 8, 3 \cdot 10^5$$
к $\Gamma$ /мм.



Рис. 7. Деформация внешней опоры криостата под действием весовой нагрузки 100 т.

#### 4. Определение допустимой скорости опускания криостата

Полагая, что вся кинетическая энергия опускающейся массы криостата превращается в потенциальную энергию деформации его опор в момент его установки на последние, можно записать следующее равенство:

$$\frac{mv^2}{2} = K \frac{X_1^2}{2},\tag{1}$$

где m — полная масса опускающегося криостата в сборе; v — скорость опускания криостата;  $K = \frac{G_1}{\Delta_1}$  — жесткость опор криостата;  $G_1$  — полный вес криостата в сборе;  $\Delta_1$  — деформация опор криостата под действием его веса;  $X_1$  — деформация опор криостата инерционным усилием.

Полное ускорение, действующее на весь криостат в момент его установки на опоры, можно записать как g+a, где g — ускорение свободного падения; a — инерционное ускорение. В этом случае относительный коэффициент перегрузки (n) — степень увеличения веса в момент торможения — можно представить следующим образом:

$$n = \frac{g+a}{g} = 1 + \frac{a}{g} = \frac{g_n}{g}$$

где  $g_n$  – увеличенное в (n) раз гравитационное ускорение, которое воздействует также как сумма (g + a).

Из равенства (1) можно получить следующее выражение:

$$v = X_1 \sqrt{\frac{K}{m}},\tag{2}$$

где

$$K = \frac{G_1}{\Delta_1} = \frac{mg}{\Delta_1}$$

откуда

$$\Delta_1 = \frac{mg}{K}.$$
(3)

Полное усилие, действующее на криостат (в вертикальном направлении) в момент его установки на опоры

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_{u \pi e p u}.$$

Это усилие по действию эквивалентно возрастанию веса криостата, т.е. увеличению ускорения свободного падения. В этом случае усилие, действующее на криостат  $(G_{\Sigma})$ , будет эквивалентно увеличению его веса, что в свою очередь можно представить как увеличение гравитационного ускорения:

$$g_n = rac{G_\Sigma}{G_1} \cdot g = n \cdot g,$$
 или  $rac{G_\Sigma}{G_1} = n_j$ 

где n — относительный коэффициент перегрузки.

Полная деформация опор криостата (практически в вертикальном направлении) от весовой и инерционной нагрузок

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_1 + X_1.$$

Поскольку расчет криостата проводится в области упругости, т.е. при условии соблюдения закона Гука, то деформация пропорциональна и зависит линейно от прилагаемого усилия. В этом случае можно записать, что

$$\frac{G_{\Sigma}}{G_1} = \frac{\Delta_{\Sigma}}{\Delta_1} = \frac{\Delta_1 + X_1}{\Delta_1} = n_2$$

откуда  $n\Delta_1 = \Delta_1 + X_1$  и

$$X_1 = (n-1)\Delta_1. \tag{4}$$

Подставляя выражение для  $\Delta_1$  из (3) в формулу (4) и полученное таким образом выражение для  $X_1$  в формулу (2), получаем следующее выражение для определения скорости опускания криостата:

$$v = (n-1)g\sqrt{\frac{m}{K}},\tag{5}$$

где v — скорость опускания криостата; n — коэффициент перегрузки, на который проводится расчет криостата; g — ускорение свободного падения; m — полная масса криостата; K — жесткость опор (внешних) криостата.

Если в качестве определяемого параметра принимать коэффициент перегрузки (при известной скорости опускания), то выражение (5) преобразуется к следующему виду:

$$n = 1 + \frac{v}{g\sqrt{\frac{m}{K}}}.$$
(6)

Полученное выражение (5) позволяет найти связь между результатами расчета криостата на прочность для нескольких значений гравитационного ускорения (при неизменных внешнем и внутреннем давлениях) и скоростью опускания криостата.

Эти результаты, обобщенные при использовании полученного выражения (5), представлены на рис.8 графически в виде зависимости максимального эквивалентного напряжения в стенках криостата и скорости опускания от коэффициента перегрузки. Используя эти графики, можно определить допустимую скорость опускания криостата из условия непревышения допустимого напряжения (для используемой марки материала) в опасном сечении криостата, что показано на рис.8.



## 5. Результаты расчета и их анализ

Рис. 8.

сти опускания.

В табл. 1 приведены результаты расчета криостата на прочность при рабочих условиях ( $P_{en.} = 2, 5$  атм) для двух значений толщин передних днищ.<sup>1</sup>

Толщина	$\sigma^{max}_{_{\mathcal{H}}\kappa_{B}}$	$U_z^{max}$	Марка Al-сплава					
днищ			АМг-5	01570				
тепл./хол.	$\kappa\Gamma/mm^2$	$\mathbf{M}\mathbf{M}$	$[\sigma]$	$[\sigma]$				
мм/мм			$\kappa\Gamma/mm^2$	$ m Kr/MM^2$				
30/30	$17,\!05$	24						
30/50	$10,\!6$	$_{9,5}$	8,7	15,4				
$U_z^{max}$ — прогиб связанных днищ D1 и D2.								
$\sigma^{max}_{_{\mathcal{H}\mathcal{B}}}$ — эквивалентное напряжение в опасном сечении.								
$[\sigma]$ — допускаемое напряжение для используемого материала.								

#### Таблица 1

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Для примера в расчетах используются известные отечественные марки Al-сплава. При проектировании криостата в LAL (Orsay) использовалась марка 5086, близкая к АМг-5.

Максимальные напряжения возникают на поверхности внутренней трубы T2 на расстоянии ~ 30 мм от места ее соединения с днищем D2. Увеличение толщины днища D2 до 50 мм приводит к существенному уменьшению прогиба до допустимого значения (< 10 мм), к снижению напряжений во всех остальных сечениях криостата до значений, которые становятся допустимыми для используемого алюминиевого сплава AMr-5, а также к снижению значения эквивалентного напряжения в опасном сечении (переход с трубы T2 на днище D2) до величины (10,6 кг/мм<sup>2</sup>), которая позволяет использовать для изготовления трубы T2 алюминиевый сплав повышенной прочности марки 01570. Этот сплав обладает хорошей свариваемостью со сплавом AMr-5, но дороже последнего в ~ 10 раз. Однако поскольку труба T2 по сравнению со всем криостатом обладает незначительной массой, то изготовление ее (или ее наиболее нагруженной части) из сплава 01570 практически не скажется на суммарной стоимости криостата.

В соответствии с предполагаемой схемой монтажа установки АТЛАС аргоновые криостаты в сборе (т.е. со смонтированными в них калориметрическими сборками) охлаждаются газообразным гелием до температуры 90К и в этом состоянии опускаются в шахту. Давление гелия во время опускания предполагается поддерживать 2 атм. Для этих условий, как это следует из рис.8, допустимая скорость опускания составляет 30 мм/с и может быть обеспечена краном стандартного исполнения. Эта скорость при установке криостата на опоры приведет к возникновению инерционной нагрузки на его элементы, эквивалентной по воздействию 1,9-кратной перегрузке, которую, как это следует из расчета, конструкция криостата выдерживает.

Однако на эту перегрузку следует проверить конструкцию калориметрической сборки, размещаемой внутри криостата, что может понизить допустимую скорость опускания.

#### Заключение

1. Разработана методика, позволяющая в рамках стандартной программы проводить прочностной расчет криостата с учетом инерционных нагрузок, возникающих во время его монтажа.

2. Показано, что приведенная в [5] конструкция криостата торцевого адронного калориметра позволяет использовать кран со скоростью опускания до 30 мм/с.

3. Проведен поверочный прочностной расчет на рабочее условие ( $P_{\rm внутр.} = 2,5$  атм) работы криостата.

В заключение авторы выражают благодарность профессору А.М.Моисееву за постановку задачи, постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

### Список литературы

- [1] H1-Collaboration. Technical Proposal of H1 Detector (1980).
- [2] D0-Collaboration. D0 Desigh Report (1978).
- [3] Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
- [4] ATLAS. Technical Proposal. CERN/LHCC/94-93 (1994).
- [5] Hodges T. et al. ATLAS Int. Note CAL-NO-60 (1994).
- [6] Rutherfoord J. et al. ATLAS Int. Note CAL-NO-55 (1994).

Рукопись поступила 3 декабря 1996 г.

Л.И.Никитина, А.В.Плескач.

Расчет на прочность криостата торцевого жидкоаргонового калориметра установки АТЛАС с учетом инерционной нагрузки.

 Оригинал-макет подготовлен с помощью системы IAT<sub>E</sub>X.

 Редактор Н.В.Ежела.
 Технический редактор Н.В.Орлова.

 Подписано к печати
 4.12.96.
 Формат 60 × 84/8.
 Офсетная печать.

 Печ.л. 1,87.
 Уч.-изд.л. 1,44.
 Тираж 180.
 Заказ 890.
 Индекс 3649.

Печ.л. 1,87. Уч.-изд.л. 1,44. Тираж 180. Заказ 890. Индек ЛР №020498 17.04.97.

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

Индекс 3649

 $\Pi$  Р Е П Р И Н Т 96–103, И  $\Phi$  В Э, 1996