



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 96-27

ФТО

А.В. Плескач

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА
СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ДАВЛЕНИЯ
КВАЗИЗАМКНУТОГО КРИОГЕННОГО ОБЪЕМА
С ПЕРЕМЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ**

Протвино 1996

Аннотация

Плескач А.В. Методика расчета системы стабилизации давления квазизамкнутого криогенного объема с переменной тепловой нагрузкой: Препринт ИФВЭ 96-27. – Протвино, 1996. – 8 с., 2 рис., 1 табл., библиогр.: 4.

Описана методика, позволяющая рассчитывать влияние размера капилляра, связывающего рабочий объем с переменной тепловой нагрузкой, и объем со стабилизированным давлением, на стабильность давления в первом объеме. В качестве примера рассмотрена стабильность давления в рабочем объеме быстроциклирующей пузырьковой камеры. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными.

Abstract

Pleskach A.V. Calculational Method of the System for Pressure Stabilization in a Quazi-Closed Cryogenic Volume with a Variable Heat Load: IHEP Preprint 96-27. – Protvino, 1996. – p. 8, figs. 2, tables 1, refs.: 4.

The method permitting to calculate the impact of the capillary diameter which connects the volume with variable heat load and the volume, having a stabilized pressure, on the pressure stability in the first volume has been developed. The stabilization of the pressure in the working volume of the rapid cycling hydrogen bubble chamber is considered as an example. The calculational results are compared with the experimental ones.

1. Введение

Необходимость расчета (на стадии проектирования) изменения статического (верхнего) давления во время работы быстроциклирующей пузырьковой камеры в серии обусловлена тем, что повышение верхнего давления в серии приводит к соответствующему повышению нижнего давления, которое, в свою очередь, приводит к понижению плотности пузырьков, образующих след (трек) на месте прохождения через рабочий объем камеры заряженной частицы. Таким образом, стабильность верхнего давления во время работы камеры в серии однозначно связана с точностными характеристиками камеры. Например, из данных, приведенных в работе [1], следует, что при частоте работы 40 Гц и количестве расширений в серии 30 (достигаемая плотность пузырьков составляет 15 см^{-3}) повышение верхнего давления составляет $\sim 0,6$ атм. Для чистой камеры [2,3] это означает, что практически на эту же величину возрастает и нижнее давление. В этом случае изменение плотности пузырьков при рабочей плотности 150 см^{-3} [3] может составить $60 \div 70 \text{ см}^{-3}$, что для прецизионной быстроциклирующей пузырьковой камеры [3] совершенно недопустимо. Поэтому поведение статического давления при работе камеры в серии необходимо уметь рассчитывать и задавать на стадии ее проектирования, для чего была разработана соответствующая методика расчета этого процесса. Эта методика была использована для расчета системы стабилизации давления для жидководородной быстроциклирующей пузырьковой камеры [3].

2. Основные этапы расчета изменения верхнего давления во время работы камеры в серии

Конструкция системы термостатирования и стабилизации давления в камере описана в работе [3].

Камера в целом представляет собой замкнутый объем, верхняя часть рабочего объема которой через тонкий капилляр сообщается со стабилизационным объемом.

Верхнее давление поддерживается и отслеживается именно в этом объеме, а благодаря связи с камерой через капилляр и в рабочем объеме камеры.

Быстроциклирующая камера работает сериями с частотой (f) до 50 Гц и длительностью серии (T_p) до 1 с. Серии срабатываний камеры (на пучке) следуют с частотой работы ускорителя $f_{уск} = 1/T_{уск}$.

Очевидно, что во время осуществления рабочего цикла камеры из стабилизационного объема через капилляр в рабочий объем натекает какое-то количество жидкости. Во время работы камеры в серии время между расширениями может быть достаточно малым, и вся натекающая за время рабочего цикла жидкость не успевает вытечь. В результате верхнее давление от цикла к циклу начинает возрастать за счет неполного возврата жидкости, натекающей из стабилизационного объема. Кроме того, рост верхнего давления от цикла к циклу происходит также за счет неполного отвода динамического тепловыделения системой термостатирования, которая в силу своей инерционности снимает средний во времени тепловой поток.

При разработке настоящей методики были приняты следующие допущения:

- система термостатирования инерционна и успевает воздействовать на температуру в камере во время ее работы в серии со скоростью отвода среднего теплового потока;
- влиянием колебательного процесса, возникающего в камере в конце расширения, на миграцию жидкости можно пренебречь, так как эти колебания совершаются относительно среднего уровня и быстро затухают;
- истечение жидкости через капилляр в силу ее переохлаждения носит жидкостный характер;
- количество жидкости, натекающее во время осуществления рабочего цикла камеры, мало и практически не влияет на кривую изменения давления в рабочем объеме.

2.1. Количество жидкости, натекающее через капилляр

Закон изменения давления (в рабочем объеме камеры) при расчете количества жидкости, натекающей через капилляр, принимается гармоническим. Определение натекающей через капилляр жидкости осуществляется путем численного интегрирования процесса истечения в объем с изменяющимся по гармоническому закону давлением. В результате получаем следующее выражение для определения объемного количества жидкости, натекающего во время рабочего цикла камеры:

$$\Delta G_0 = 0,64 \sqrt{\frac{2g(P_в - P_н)}{\rho(1,5 + \lambda \frac{L}{d})}} \cdot T_u \cdot S_0,$$

где $P_в$ – верхнее давление в камере; $P_н$ – нижнее давление в камере; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; T_u – длительность рабочего цикла камеры; S_0 – свободное сечение капилляра; L – длина капилляра; d – внутренний диаметр капилляра; $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$ – коэффициент трения [4]; Re – число Рейнольдса.

2.2. Повышение давления из-за необратимого тепловыделения

Подъем давления за счет нагревания жидкости вследствие необратимого тепловыделения в замкнутом объеме определяется путем сведения этого изохорического процесса к эквивалентному адиабатическому процессу сжатия объема, который происходит за счет натекания некоторого (расчетного) количества жидкости. Эквивалентный адиабатический процесс (следовательно, и расчетное количество натекающей жидкости) определяется из условия равенства конечных воздействий – одинакового в том и другом случае повышения давления. Такой прием позволяет свести расчет таких разнородных процессов, как нагревание и натекание, приводящих каждый к повышению давления, к одному процессу натекания, т.е. расчету миграции жидкости, что существенно упрощает процедуру расчета изменения верхнего давления.

В результате использования этого приема было получено следующее выражение для определения условно натекающего в рабочий объем количества жидкости, эквивалентного (по повышению давления) нагреванию из-за необратимости:

$$\Delta G_m = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \cdot \frac{U \cdot V \cdot \left(1 - \frac{T_p}{T_{\text{уск}}} \right)}{B \cdot \rho \cdot C_v},$$

где $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v$ – находится из TS -диаграммы [4] для вещества, которое представляет жидкость; T – температура; P – давление; U – удельное динамическое тепловыделение; C_v – теплоемкость жидкости при постоянном объеме; B – адиабатический модуль упругости жидкости; V – объем камеры. Остальные обозначения понятны из предыдущего текста.

2.3. Повышение давления в конце рабочего цикла

Натекшее количество жидкости приводит к увеличению объема жидкости в камере и, как следствие этого, к повышению давления в конце рабочего цикла, которое определяется как адиабатическое сжатие натекающей жидкости:

$$\Delta P_k = B \cdot \frac{\Delta G_k}{V},$$

где ΔG_k – объемное количество натекающей жидкости в одном из циклов серии, при $k = 1$ $\Delta G_k = \Delta G_0 + \Delta G_m$. Остальные обозначения понятны из предыдущего текста.

2.4. Количество жидкости, возвращающееся между циклами серии в стабилизационный объем

Возникший в конце цикла перепад давления ΔP_k будет способствовать вытеканию жидкости из камеры. В итоге за время паузы (t_n) между циклами натекающая жидкость (ΔG_k) (часть или вся) вытечет.

Скорость истечения

$$V = \sqrt{\frac{2g}{\rho(1,5 + \lambda \frac{L}{d})}} \cdot \sqrt{\Delta P_k} = A \cdot \sqrt{\Delta P_k}.$$

Очевидно, что при полном истечении натекшего количества жидкости $\Delta P_k \rightarrow 0$, и тогда средняя скорость за время полного истечения определяется следующим выражением:

$$\bar{V} = \frac{A \cdot \int_0^{\Delta P_k} \Delta P^{1/2} d(\Delta P)}{\Delta P_k} = \frac{2}{3} A \cdot \Delta P_k^{1/2}.$$

В общем виде средняя скорость при истечении

$$\bar{V} = r \cdot A \cdot \Delta P_k^{1/2},$$

где r – коэффициент степени истечения.

Представляя коэффициент степени истечения (r) как функцию $r = f(\frac{\Delta G(\Delta P_k)}{\Delta G_k})$, где $\Delta G(\Delta P_k)$ – количество жидкости, вытекающей во время паузы при условии сохранения начального перепада давления постоянным ($\Delta P_k = const$), и линеаризируя эту функцию, получим в результате следующее выражение для определения количества жидкости, вытекающей в паузу между циклами:

$$\Delta G_i = \left(1 - 0,22 \frac{A \cdot \Delta P_k^{1/2} \cdot S_0 \cdot t_n}{\Delta G_k} \right) \cdot A \cdot \Delta P_k^{1/2} \cdot S_0 \cdot t_n,$$

где $t_n = 1/f - T_u$, остальные обозначения описаны ранее.

Приведенное выражение справедливо при

$$\frac{\Delta G(\Delta P_k)}{\Delta G_k} \leq 1,5.$$

2.5. Повышение давления в конце серии

При определении повышения давления в конце рабочего цикла камеры под количеством натекшей в камеру жидкости подразумевается сумма реально натекшего количества жидкости (ΔG_0) и натекшего условно количества жидкости (ΔG_m), эквивалентного по воздействию на повышение давления подводу динамического тепловыделения.

В итоге повышение давления к концу серии (ΔP_s) при конечном числе срабатываний (N_s) камеры в серии определяется путем последовательного расчета процесса миграции рабочей жидкости от цикла к циклу:

$$\Delta P_s = B \cdot \frac{(\Delta G_0 + \Delta G_m) \cdot N_s - \sum_{i=1}^{N_s-1} \Delta G_i}{V}.$$

Последовательность расчета повышения давления из-за процесса миграции рабочей жидкости через капилляр от цикла к циклу следующая:

$$\Delta G_k = (\Delta G_0 + \Delta G_m) \cdot k - \sum_{i=1}^{k-1} \Delta G_i,$$

$$\Delta P_k = B \frac{\Delta G_k}{V},$$

$$\Delta G_i = \left(1 - 0,22 \frac{A \cdot \Delta P_k^{1/2} \cdot S_0 \cdot t_n}{\Delta G_k} \right) A \cdot \Delta P_k^{1/2} \cdot S_0 \cdot t_n,$$

$$\Delta G_{k+1} = (\Delta G_0 + \Delta G_m)(k+1) - \sum_{i=1}^k \Delta G_i,$$

$$\Delta P_{k+1} = B \frac{\Delta G_{k+1}}{V}$$

и т.д. до $k = N_s$ (начиная с $k = 1$).

2.6. Время выравнивания давления (при $U = 0$)

Верхнее давление, возросшее к концу серии, должно восстановиться к началу следующей серии. Для этого жидкость, реально натекшая в рабочий объем к концу серии (ΔG_s), должна вытечь за время $t_{выр} \ll T_{уск} - \frac{N_s}{f}$. Время полного истечения этой жидкости, которое будем называть временем выравнивания давления, в соответствии с ранее изложенным находится из выражения

$$t_{выр} = 1,5 \cdot \frac{\Delta G_s^{U=0}}{S_0 \cdot V_{max}},$$

где

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta P_s^{U=0}}{\rho(1,5 + \lambda \frac{L}{d})}}.$$

Очевидно, что условию выравнивания давления выбираемый размер капилляра должен удовлетворять как одному из основных.

3. Расчетные результаты и их сравнение с экспериментальными

На рис.1 приведены результаты расчета для быстроциклирующей пузырьковой камеры [3] зависимости повышения давления (ΔP_s) в конце серии и времени выравнивания ($t_{выр}$) давления от числа срабатываний (N_s) камеры в серии для нескольких значений внутреннего диаметра капилляра (d) без учета необратимого

тепловыделения в камере (при частоте работы камеры 30 Гц и длительности цикла 5 мс).

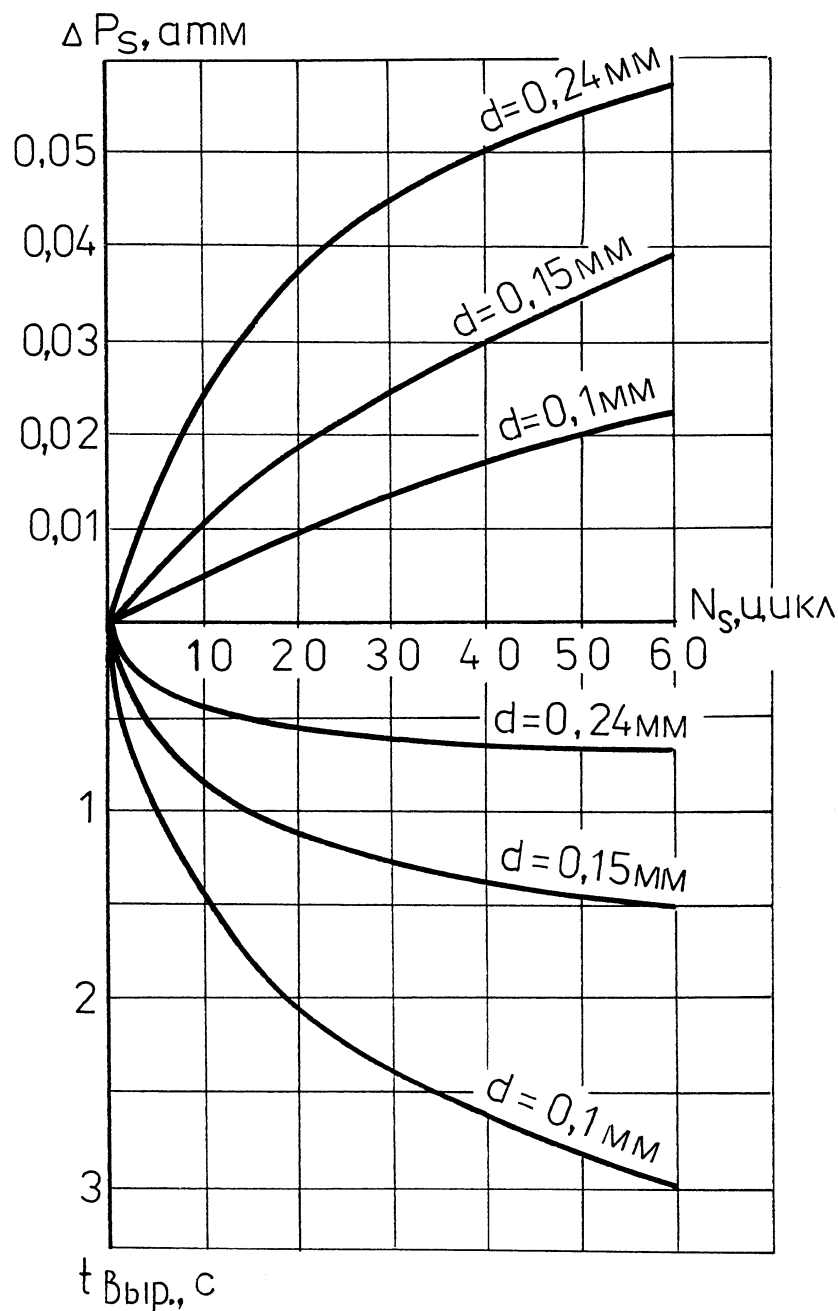


Рис. 1. Зависимость повышения давления (ΔP_s) в конце серии и времени выравнивания ($t_{\text{выр}}$) давления от диаметра капилляра (d) и числа расширений в серии (N_s).

С одной стороны, капилляр, обеспечивая хорошую связь стабилизационного объема с рабочим объемом камеры, не должен приводить к значительному повышению давления в камере к концу серии срабатываний на выведенном пучке.

С другой стороны, капилляр должен обладать таким проходным сечением, чтобы за время между сериями расширений давление в рабочем объеме камеры успевало восстановиться. При этом расчетное время выравнивания давления должно быть достаточно малым, чтобы обеспечить достаточно свободную миграцию жидкости, так как система термостатирования, являясь альтернативной процессу снижения давления за счет вытекания жидкости, должна иметь некоторый запас времени для реализации совместно с капилляром переходного процесса с завершением его к концу паузы между сериями срабатываний камеры (к началу следующей серии срабатываний камеры). Таким образом, время выравнивания давления должно быть

$$t_{\text{выр}} \ll \left(T_{\text{уск}} - \frac{N_s}{f} \right),$$

что для $T_{\text{уск}} = 8,8$ с, $N_s = 45$ и $f = 30$ Гц составит $t_{\text{выр}} \ll 7,3$ с.

В результате следует отдать предпочтение капилляру $\varnothing 0,24$ мм (длина 6,1 мм), как обеспечивающему хорошую миграцию жидкости и незначительное повышение

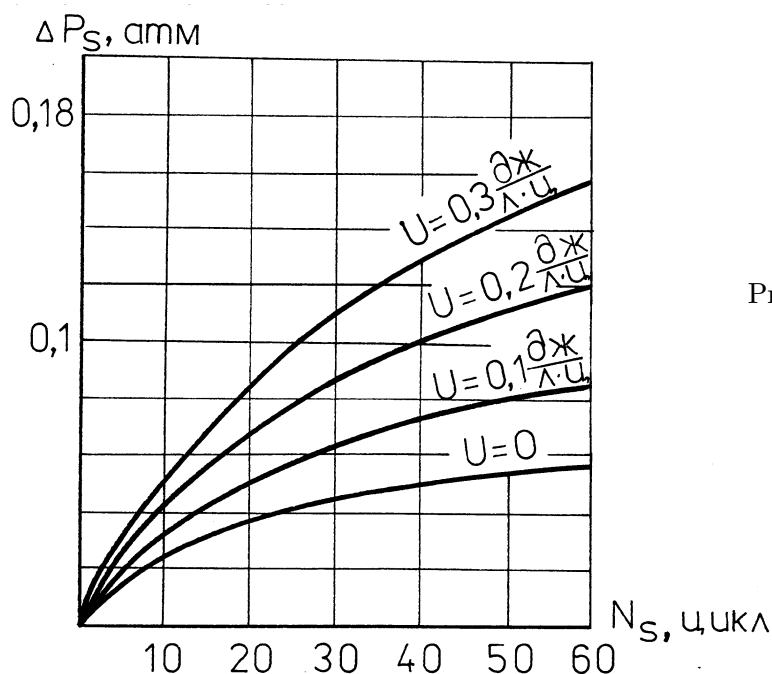


Рис. 2. Зависимость повышения давления (ΔP_s) в конце серии от числа расширений в серии (N_s) и величины динамического тепловыделения (U) для $d = 0,24$ мм.

На рис.2 приведены результаты расчета повышения давления в конце серии для выбранного размера капилляра ($\varnothing 0,24$ мм) в зависимости от числа срабатываний камеры для нескольких значений удельного необратимого тепловыделения (U) в камере. Для рабочей длительности вывода пучка 1 с при частоте работы камеры 30 Гц ($N_s = 30$) [3] повышение давления для $U = 0,1 \div 0,2$ Дж/(л · цикл) составит $0,07 \div 0,09$ атм, что означает повышение нижнего давления на такую же величину и, как следствие, уменьшение плотности треков на $5 \div 6\%$, что вполне допустимо (соизмеримо с флуктуацией одновозрастных треков).

В таблице приводятся основные параметры, характеризующие различные режимы работы быстроциклирующей камеры и соответствующие им расчетные и измеренные значения повышения давления в конце серии работы на пучке.

Таблица 1.

Сеанс	Капилляр d/L [мм/мм]	T [мс]	f [Гц]	N_s [цикл]	U [$\frac{Дж}{л \cdot цикл}$]	ΔP_s [атм]	
						измер.	расчет
4,0	0,48/545	7	30	30	2,85	$1,23 \pm 0,05$	1,2
12/8	0,24/6,1	5	30	30	0,11	$0,07 \pm 0,05$	0,065
14/10			40	45	0,25	$0,17 \pm 0,05$	0,16

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов, полученных в большом диапазоне рабочих режимов и с разными размерами капилляров, позволяет говорить о корректности предложенной методики расчета изменения давления вследствие миграции жидкости через капилляр во время работы камеры.

Заключение

1. Разработана методика расчета нестабильности верхнего давления во время работы быстроциклирующей камеры в серии, обусловленной перетечкой рабочей жидкости и необратимыми процессами в рабочем объеме камеры.

2. Показано, что использование методики позволяет обеспечивать необходимую точность поддержания верхнего давления в камере при ее работе в серии, заданную на стадии проектирования.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность профессору А.М.Моисееву за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Badier et al. Chambre a bulles a cadence rapide, Ecole Polytechnique. – College de France, Paris, 1970.
- [2] Benichou J.L. et al. // Nucl.Instr. and Meth., 1981, 190, p.487.
- [3] Ardashev E.N. et al. // Nucl. Instr. and Meth., 1995, 356, p.210.
- [4] Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М.П.Малкова. – М., Энергия, 1985.

Рукопись поступила 20 марта 1996 г.

А.В.Плескач

Методика расчета системы стабилизации давления квазизамкнутого криогенного объема с переменной тепловой нагрузкой.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор М.Л.Фоломешкина.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 21.03.96. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1. Уч.-изд.л. 0.76. Тираж 170. Заказ 682. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

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

