

## Оптимизация давления рабочего газа при промывке перед заполнением микрокриогенных систем охлаждения МФПУ

А.И. Еремчук, А.В. Самвелов, Д.А. Широков, Д.А. Сысоев, Н.Н. Оганесян

*Показано соответствие расчётного и экспериментального путей получения оптимальных режимов промывки внутренних полостей микрокриогенных систем (МКС) для подготовки к заполнению криоагентом с целью совершенствования процессов.*

PACS: 85.60.Gz

*Ключевые слова:* микрокриогенная система охлаждения, криоагент, МФПУ, газ, промывка.

### Введение

Для криостатирования фоточувствительных элементов матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) с целью получения требуемых фотоэлектрических характеристик широко применяются микрокриогенные системы (МКС), работающие по замкнутому термогазодинамическому циклу Стирлинга с постоянным количеством криоагента.

В состав МКС входят компрессор, электропривод, расширитель, регенератор и другие теплообменные аппараты. Расширение и сжатие рабочего тела в МКС сопровождаются сложными процессами тепло- и массообмена, а также нестационарными процессами теплообмена в теплообменных аппаратах.

Гелий, являющийся рабочим телом цикла МКС, согласно базовой технологии должен содержать строго ограниченную долю посторонних примесей, а именно, не более 0,0001 %. Такое требование к чистоте гелия необходимо для предотвращения возрастания гидравлического сопротивления потоку в регенераторе МКС по причине вымерзания примесей в криозоне, и, как следствие, снижения эффективности МКС.

Целью данной работы является оптимизация давления рабочего газа при промывке перед заполнением криоагентом микрокриогенных систем охлаждения МФПУ. В статье предлагается расчёт необходимого количества циклов промывки и, соответственно, оптимального давления промывки внутренней полости МКС перед запол-

нением, причем результаты расчета должны быть подтверждены экспериментальными данными.

### Объект исследования

Объектом исследования является микрокриогенная система Стирлинга с повышенным ресурсом работы.

Полностью собранная МКС в соответствии с технологическим маршрутом поступает на операции промывки газообразным гелием с последующим заполнением гелием до рабочего давления 30 атм. Изделие поступает на эти операции наполненное атмосферным воздухом технологического помещения. Сущность метода промывки заключается в многократном разбавлении гелием воздуха во внутреннем объёме МКС настолько, чтобы уменьшилась его остаточная концентрация и была сопоставима с концентрацией примесей в баллоне газообразного гелия чистотой 99,9999 %, принятого к использованию. Другими словами, остаточная концентрация воздуха должна быть на уровне объёмной доли  $n \leq 10^{-6}$ .

### Метод исследования

Метод расчёта основан на законе о парциальных давлениях смеси идеальных газов (закон Дальтона), поскольку речь идёт о двухкомпонентной смеси газов в замкнутой полости МКС, где первым компонентом является гелий, вторым – остаточный в МКС воздух. Операция промывки осуществляется следующим образом. МКС после сборки поступает на участок заполнения и подключается к установке заполнения. Установка позволяет задать требуемый профиль циклов промывки гелием полости МКС, устанавливающий продолжительность этих циклов, их число и давление. Промывка представляет собой многократные впуски/выпуски в объём МКС гелия повышенного давления.

В статье предлагается расчёт количества циклов промывки и давления промывки внутренней

Еремчук Анатолий Иванович, гл. технолог.

Самвелов Андрей Витальевич, аспирант.

Широков Денис Анатольевич, аспирант.

Сысоев Дмитрий Анатольевич, инженер.

Оганесян Николайос Норикович, инженер.

ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел.: 8 (916) 826-29-39. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2013 г.

© Еремчук А.И., Самвелов А.В., Широков Д.А., Сысоев Д.А., Оганесян Н.Н., 2013

полости МКС перед заполнением. Для подтверждения результатов расчёта авторами приводятся экспериментальные данные по определению технических характеристик МКС после проведения серии циклов промывки.

Согласно закону Дальтона давление смеси идеальных газов в замкнутом объёме равно сумме парциальных давлений этих газов, если эти газы химически не взаимодействуют.

Из интерпретированного уравнения Клайперона

$$p = n \cdot k \cdot T \quad (1)$$

следует:

$$p = k \cdot T \cdot \sum_{j=1}^v n_j, \quad (2)$$

где  $n_j$  – число молекул  $j$ -го сорта,  $v$  – количество газов смеси,  $k$  – постоянная Больцмана. Тогда

$$p = \sum_{j=1}^v p_j \quad (3)$$

где  $p$  – давление смеси газов,  $p_j$  – парциальное давление компонента.

Это тождество (закон Дальтона) применимо к идеальным газам, но может быть использовано и для расчётов парциальных давлений и концентраций реальных газов, если давления и температуры газов в смеси далеки от критических.

Критическая температура воздуха составляет 132 К, его критическое давление – 37,6 атм. Критическая температура гелия составляет 5,189 К, а критическое давление – 2,3 атм. Так как давление промывки гелием в данных исследованиях будет находиться в диапазоне 5–20 атм., парциальное давление воздуха не превысит одной атм., а эксперименты проводятся при температуре окружающей среды, то можно принять в данном случае гелий и воздух близкими к идеальным газам. Гелий же вообще по своим свойствам очень близок к идеальному газу. Гелий – инертный газ и с воз-

духом химически не взаимодействует. Поэтому, в данном случае для расчёта концентраций допустимо использовать закон Дальтона. Следовательно, имеем

$$p_{\text{см}} = p_{\text{в}} + p_{\text{He}},$$

$$n_{\text{см}} = n_{\text{в}} + n_{\text{He}},$$

а так как  $kT = \text{const}$ , значит, в нашем случае можно использовать следующее равенство:

$$p_{\text{в}}/p_{\text{He}} = n_{\text{в}}/n_{\text{He}},$$

где  $p_{\text{см}}$  – полное давление смеси,  $p_{\text{в}}$  – парциальное давление остаточного воздуха,  $p_{\text{He}}$  – парциальное давление промывочного гелия,  $n_{\text{см}}$  – концентрация смеси,  $n_{\text{в}}$  – концентрация примеси воздуха,  $n_{\text{He}}$  – концентрация гелия в объёме МКС.

Допустимая концентрация примесей, т.е. отношение  $n_{\text{в}}/n_{\text{He}}$  должно быть не более  $10^{-6}$ , как уже было сказано. Поэтому легко получаем следующее соотношение:

$$n_{\text{ост}} = (n_{\text{в}}/n_{\text{He}})^m \leq 10^{-6},$$

где  $n_{\text{ост}}$  – остаточная концентрация примесей в объёме МКС,  $m$  – число циклов промывки.

Остаточное парциальное давление воздуха в объёме МКС равно одной атмосфере, а так как  $p_{\text{в}}/p_{\text{He}} = n_{\text{в}}/n_{\text{He}}$ , то

$$1/p_{\text{He}} = n_{\text{в}}/n_{\text{He}} = 1/n_{\text{He}}.$$

Значит,  $n_{\text{ост}} = (1/n_{\text{He}})^m$  должно быть не более  $10^{-6}$ ,  $(1/n_{\text{He}}) \leq (1/10)^6$ . Например, при шести циклах промывки давление промывки должно составить 10 атм.

С учётом возможной ошибки, связанной с допущением об идеальных газах, последующая после шестой промывки заправка МКС до расчётного давления 30 атм. ещё более снизит концентрацию посторонних примесей в гелиевом объёме МКС.

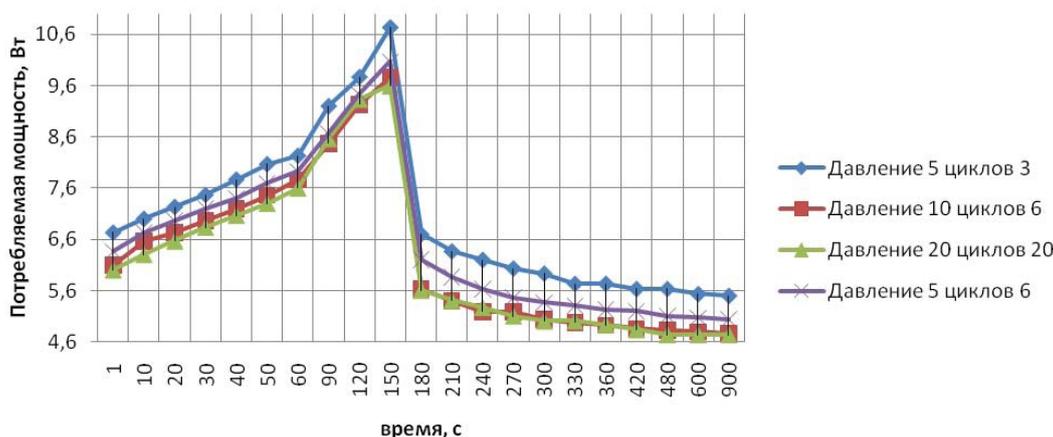


Рис. Зависимости потребляемой мощности от времени наработки МКС при различных количествах циклов промывки и давлений промывки

### Результаты испытаний и их интерпретация

Результатом испытаний служат зависимости потребляемой мощности системы в процессе проверки от времени после проведения различных количеств циклов промывки системы и заправки гелием до рабочего давления 30 атм. Данные испытаний показали, что при снижении числа циклов промывки и давления заправки потребляемая мощность системы возрастает.

На рисунке приводятся графики зависимостей потребляемой мощности от времени наработки МКС при различных количествах циклов промывки и давлений промывки. По графикам можно оценить возрастание потребляемой мощности системы в зависимости от количества циклов промывки и давлений промывки.

Анализ графиков показывает, что разница между потребляемой стационарной мощностью при промывке МКС базовым циклом (20 циклов, 20 атм.) и циклом, полученным расчётным путём (6 циклов, 10 атм.), несущественна. Однако при продолжении уменьшения давления и сокращения количества циклов промывки, потребляемая мощность МКС, как пусковая, так и стационарная, возрастает на 10–20 %. Возросшая потребляемая мощность МКС является индикатором некорректной работы системы, поскольку это может привести к сокращению срока службы системы

при дальнейшей её эксплуатации. Таким образом, можно сказать, что промывка МКС при давлении 10 атм. с шестью циклами впуска/выпуска является технологически оптимальной.

### Заключение

Проведенные расчеты показали, что оптимальное давление промывочного гелия составит 10 атм. при количестве циклов промывки не менее шести для достижения в конечном цикле концентрации примесей в объёме МКС, соизмеримой с концентрацией примесей в баллоне газообразного гелия 99,9999 %. Эксперименты полностью подтвердили расчёт.

Представленные результаты способствуют оптимизации существующей технологии в части снижения норм времени операций промывки и экономии гелия, являющегося редким и дорогостоящим веществом.

### Литература

1. Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника. - М.: Машиностроение, 1977
2. Колесников А.М., Самвелов А.В., Словеснов К.В. // Прикладная физика. 2010. С. 80
3. Фролов Е.С. и др. Вакуумная техника. Справочник. - М: Машиностроение, 1992.
4. Королёв Б.И. Основы вакуумной техники. - М.: Энергия. 1964.

## Enhancement of working operations for filling microcryogenic systems with cryoagent

*A.I. Eremchuk, A.V. Samvelov, D.A. Shirokov, D.A. Sysojev, and N.N. Oganesyanyan*

Orion Research-and-Production Association,  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

*There is a correspondence of the calculated and experimental ways for obtaining the optimum modes of flushing internal volumes of microcryogenic systems (MCS) at preparation for filling with cryoagent in order to enhance the basic technology.*

PACS: 85.60.Gz

*Keywords:* cooling microcryogenic system, cryoagent, FPA, gas, flushing.

Bibliography – 4 references

*Received February 2, 2013*