



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000-10
ОЭФ

А.В. Плескач

**ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ИЗМЕНЕНИЕ
СОСТАВА ГАЗОВОЙ СМЕСИ
ДЛЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2000

Аннотация

Плескач А.В. Изучение факторов, вызывающих изменение состава газовой смеси для пропорциональных камер.: Препринт ИФВЭ 2000-10. – Протвино, 2000. – 14 с., 6 рис., 7 табл., библиогр.: 7.

На основании аппроксимации характера течения газа через натекатель адиабатическим процессом его истечения из отверстия с учетом сжимаемости получены соотношения, описывающие влияние изменений давления исходных газовых компонентов и температуры окружающей среды на состав газовой смеси. Эти соотношения позволяют осуществить оптимальный подбор давлений питания и найти их допустимое изменение при обеспечении требуемой стабильности смеси, а также выбрать соответствующие регуляторы давления.

Abstract

Pleskach A.V. Study of the Factors Influencing the Composition of the Mixture of Gases for Proportional Chambers. : IHEP Preprint 2000-10. – Protvino, 2000. – p. 14, figs. 6, tables 7, refs.: 7.

By approximating the behaviour of the gas stream propagating through an inlet with the adiabatic flow out of a hole with account for the gas compressibility, the equations have been obtained, which describe the impact of the pressure changes of initial gas components and the surrounding air temperature on the composition of a gas mixture. These relations allow one to chose an optimal set of pressures of supplying gases and to determine the admissible range of these pressures changes, which ensures the needed stability of the mixture composition, as well as selection of the suitable pressure regulators.

Введение

Известно [1], что коэффициент усиления пропкамер и их эффективность достаточно сильно зависят от состава используемой газовой смеси. Поэтому оптимальный состав смеси необходимо поддерживать с точностью до 1% [1]. Газовая смесь для пропкамер получается с помощью газового пульта. Принципиальная схема газового пульта, используемого на установке СВД (Спектрометр с вершинным детектором) [2], приведена на рис.1, и она положена в основу нашего дальнейшего исследования. Давление каждого из компонентов смеси в линии перед натекателем поддерживается с помощью редуктора. С помощью натекателя регулируется расход каждого из компонентов, которые, смешиваясь в смесителе, образуют газовую смесь требуемого состава. Состав смеси задается соотношением объемных расходов, устанавливаемых с помощью ротаметров. Очевидно, что изменение давлений в линиях питания, а также температуры окружающей среды при неизменном положении иглы натекателя будет вызывать изменение расхода газа через ротаметр, а следовательно, и состава смеси. Изучению влияния нестабильности давления и температуры на состав смеси, а также выработке определенных требований к стабильности поддержания давления, обеспечивающей требуемую стабильность смеси, посвящена эта работа.

В процессе этого анализа были приняты следующие допущения:

1. Компоненты газовой смеси считаются идеальными газами, и формируемая из них смесь подчиняется закону Дальтона.
2. Режим течения через натекатель (вентиль с тонкой регулировкой) принимается адиабатическим.
3. Потери на трение в трассах по сравнению с потерями на натекателе считаются пренебрежимо малыми.
4. Считается, что газ в трубопроводах газовой системы (за исключением весьма малопротяженного участка натекателя) находится в равновесии с температурой окружающей среды.

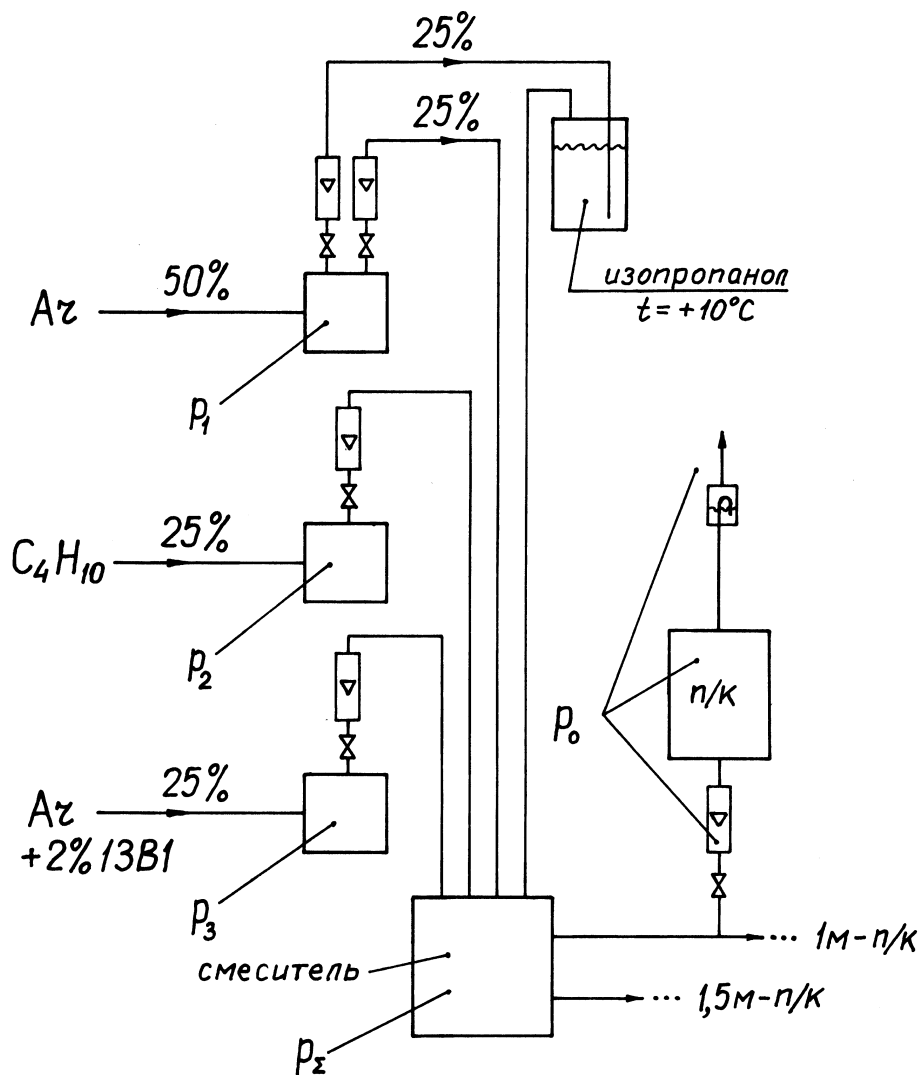


Рис. 1. Упрощенная схема подготовки газовой смеси и ее использования для пропкамер установки СВД.

1. Влияние давления питания на изменение расхода через ротаметр

Для упрощения и наглядности анализа вентиль с тонкой регулировкой (натекатель) заменяется на эквивалентное отверстие с регулируемым сечением, на котором, как и на натекателе, срабатывает практически весь перепад давления между 2-й ступенью редуцирования и смесителем (в соответствии с принятым допущением – и ротаметром также) – см. рис.2.

Этот прием позволяет учесть сжимаемость газа при истечении, используя известную формулу Сен-Венана [3] для изоэнтропного течения через отверстие:

$$V_i = \varphi S p_i v_{\Sigma} \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_i} \left(\frac{p_{\Sigma}}{p_i}\right)^{2/k} \left[1 - \left(\frac{p_{\Sigma}}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}, \quad (1)$$

где v_{Σ} – удельный объем расширившегося газа после отверстия; S – сечение отверстия; k – показатель адиабаты; R – газовая постоянная; p_i – давление перед натекателем; p_{Σ} – давление после натекателя (практически в ротаметре и смесителе); T_i – температура газа на входе (перед натекателем), равная температуре окружающей среды; V_i – объемный расход одного из компонентов, измеряемый при удельном объеме v_{Σ} на выходе; φ – коэффициент расхода, учитывающий сопротивление натекателя. Этот коэффициент определяется экспериментально или выбирается по аналогии с подобной конструкцией вентиля. Однако незнание его не создает проблемы при проведении этого анализа, т.к. нас будет интересовать относительное изменение расхода: $(V + \Delta V)/V$.

Приведенная формула (1) действительна для докритического режима истечения, т.е. для

$$\frac{p_{\Sigma}}{p_i} > \psi_{кр}, \text{ где } \psi_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

При $\frac{p_{\Sigma}}{p_i} < \psi_{кр}$ (критический режим истечения) расход не зависит от давления на выходе по причине достижения на выходе из отверстия местной скорости звука. В этом случае после подстановки $\psi_{кр}$ вместо p_{Σ}/p_i в формулу (1) расход будет определяться из следующего соотношения:

$$V_i = \varphi S p_i v_{\Sigma} \sqrt{\frac{2k}{(k+1)RT_i} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k+1}}}. \quad (2)$$

При изменении давления питания на Δp (в результате нестабильности работы редуктора) измененный расход $(V + \Delta V)$ определяется из выражения (1) путем подстановки в него $(p_i + \Delta p)$ вместо p_i , после чего изменение расхода определяется как $\frac{\Delta V}{V} = \frac{V + \Delta V}{V} - 1$. После проведения ряда преобразований, во время которых руководствуемся, что $\left(1 + \frac{\Delta p}{p}\right)^a = 1 + a \frac{\Delta p}{p}$, т.к. $\frac{\Delta p}{p} \ll 1$, получим следующее выражение, связывающее изменения давления питания и расхода:

$$\frac{\Delta V}{V} = n_p \frac{\Delta p}{p_i}, \quad (3)$$

где

$$n_p = \frac{k-1}{2k} \left\{ 1 + \left[1 - \left(\frac{p_{\Sigma}}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]^{-1} \right\} \quad (4)$$

– для докритического режима истечения; $n_p = 1$ – для критического режима истечения. Этот результат следует из формулы (4) после подстановки в нее $\frac{p_{\Sigma}}{p_i} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$.

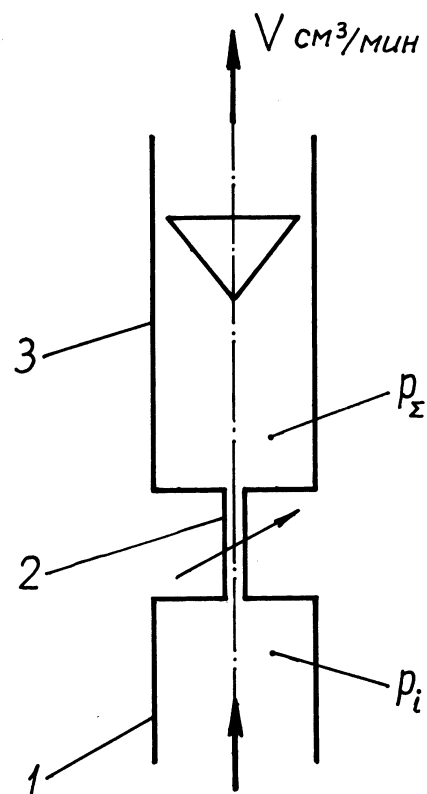


Рис. 2. Графическое изображение расчетной схемы истечения газового компонента смеси через натекатель: 1 – поплавок ротаметра, 2 – отверстие с регулируемым сечением, 3 – линия питания.

2. Влияние температуры окружающей среды на изменение расхода через ротаметр

Изменение температуры окружающей среды ($T_i = T$) помимо прямого влияния на расход, следующего из формулы Сен-Венана (1), оказывает косвенное влияние, заключающееся в изменении давления в смесителе как в квазизамкнутом объеме, отсеченном с обеих сторон: на входе в ротаметры и на выходе в пропкаммеры с помощью натекателей с неизменным положением регулирующих игл (см. рис.1). Изменение давления p_Σ в смесителе (как и после натекателя) определяется как для изохорического процесса ($v=\text{const}$) нагрева квазизамкнутого объема:

$$\frac{p_\Sigma + \Delta p}{p_\Sigma} = \frac{T + \Delta T}{T},$$

откуда $p_\Sigma + \Delta p = p_\Sigma \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)$ – давление в системе смесителя после повышения температуры окружающей среды на ΔT .

Таким образом, при изменении температуры окружающей среды на ΔT измененный расход компонента ($V + \Delta V$) определяется из формулы (1) путем подстановки в нее $(T + \Delta T)$ вместо T_i и $p_\Sigma \left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)$ вместо p_Σ , после чего изменение расхода определяется как $\frac{\Delta V}{V} = \frac{V + \Delta V}{V} - 1$. После проведения ряда преобразований, во время которых руководствуемся, что $\left(1 + \frac{\Delta T}{T}\right)^a = 1 + a \frac{\Delta T}{T}$, т.к. $\frac{\Delta T}{T} \ll 1$, получим следующее выражение, связывающее изменение температуры окружающей среды и расхода:

$$\frac{\Delta V}{V} = -n_T \frac{\Delta T}{2T}, \quad (5)$$

где

$$n_T = \frac{k-2}{k} + \frac{k-1}{k} \left(\frac{p_\Sigma}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}} / \left[1 - \left(\frac{p_\Sigma}{p_i}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \quad (6)$$

– для докритического режима истечения; $n_T = 1$ – для критического режима истечения. Этот результат следует из формулы (6) после подстановки в нее $\frac{p_\Sigma}{p_i} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$.

3. Влияние изменения давления в линиях питания на состав газовой смеси

Газовая смесь, используемая для пропкаммер установки СВД, имеет следующий состав: 74,5% Ar + 25% C₄H₁₀ + 0,5% 13B1 + пары изопропанола (пропанола-2) при температуре +10⁰C [4]. Упрощенная схема с распределением потоков компонентов приведена на рис.1.

Поскольку основными компонентами газовой смеси являются аргон и изобутан, то для упрощения и наглядности анализа на первом этапе рассматривается влияние Δp и ΔT на изменение состава смеси этих компонентов в отсутствие остальных. Изменение в смеси малых долей компонентов бромистого фреона (13B1) и паров изопропанола (C₃H₈O) будет рассмотрено в рамках этого анализа с учетом их малости.

В соответствии с изложенными допущениями на рис.3 приводится расчетная схема составления газовой смеси для проведения анализа влияния Δp и ΔT .

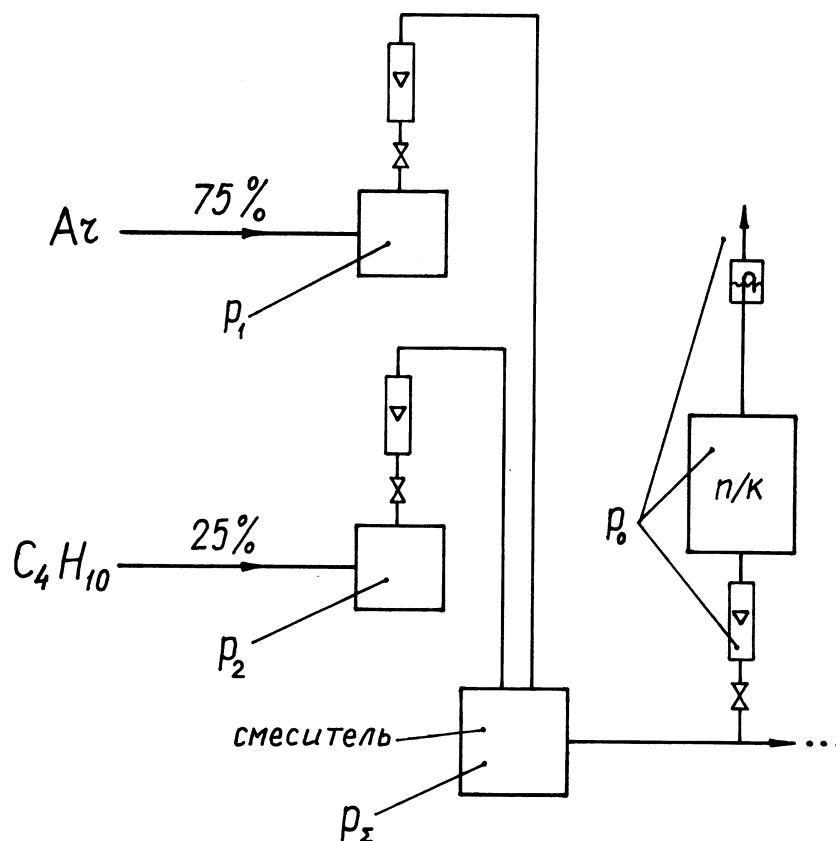


Рис. 3. Графическое изображение расчетной схемы составления газовой смеси для проведения анализа влияния на ее состав Δp и ΔT .

Полагая, что в линиях газовых компонентов используется однотипная регулирующая аппаратура, принимаем, что максимально возможное изменение давления Δp для всех линий одинаково, но может иметь разный знак, и этим руководствуемся во время всего дальнейшего анализа. При этом влияние каждого из исследуемых параметров рассматривается при сохранении неизменными остальных.

Если известны расходы аргона V_1 см³/мин и изобутана V_2 см³/мин, то объемная доля каждого компонента определится следующим образом:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Обозначим: α_1 – объемная доля аргона, α_2 – объемная доля изобутана.

Для определения влияния Δp выбираем одно из наиболее неблагоприятных соотношений изменения давлений в разных линиях питания, когда в результате один расход V_1 возрастает, а другой V_2 уменьшается (см. рис.4). В этом случае после повышения давления питания аргоном измененная доля аргона в смеси запишется следующим образом:

$$\alpha'_1 = \frac{V_1 + n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} V_1}{V_1 + V_2 + n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} V_1 - n_{p2} \frac{\Delta p}{p_2} V_2} = \frac{1 + n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1}}{\frac{1}{\alpha_1} + n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} - n_{p2} \frac{\Delta p}{p_2} \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \quad (7)$$

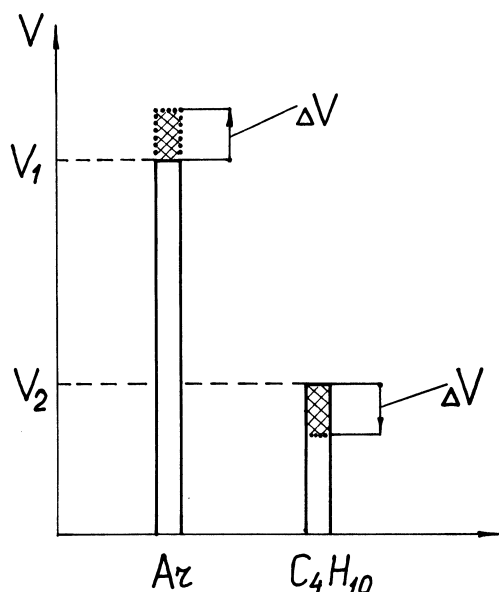


Рис. 4. Диаграмма наиболее неблагоприятного соотношения изменения расходов, вызванных соответствующим изменением давлений, для расчетной схемы, изображенной на рис.3.

Изменение доли аргона в смеси:

$$\Delta\alpha_1 = \alpha'_1 - \alpha_1.$$

Относительное изменение доли аргона в смеси:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_1 = \frac{\alpha'_1}{\alpha_1} - 1. \quad (8)$$

После подстановки выражения (7) в (8) и проведения ряда преобразований и упрощений, руководствуясь при этом, что $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ и принимая во внимание, что $\frac{\Delta p}{p} \ll 1$, получим следующее выражение для определения относительного изменения доли аргона в смеси:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_1 = \left(n_{p_1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2}\right) \alpha_2. \quad (9)$$

Далее, записав измененную долю изобутана в смеси в результате снижения давления на Δp (см. рис.4):

$$\alpha'_2 = \frac{V_2 - n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2} V_2}{V_1 + V_2 + n_{p_1} \frac{\Delta p}{p_1} V_1 - n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2} V_2} = \frac{1 - n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2}}{\frac{1}{\alpha_2} + n_{p_1} \frac{\Delta p}{p_1} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2}}.$$

Аналогично описанному выше получаем следующее выражение для определения относительного изменения доли изобутана в смеси:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_2 = - \left(n_{p_1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2}\right) \alpha_1. \quad (10)$$

После определения изменения состава газовой смеси вследствие изменения давления допустимое изменение давления находится из условия обеспечения допустимого изменения состава смеси:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_2 = \left(n_{p_1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p_2} \frac{\Delta p}{p_2}\right) \alpha_1 = \left[\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right],$$

откуда

$$[\Delta p] = \frac{[\Delta\alpha/\alpha]}{\alpha_1 \left(\frac{n_{p_1}}{p_1} + \frac{n_{p_2}}{p_2}\right)}, \quad (11)$$

где $[\Delta\alpha/\alpha]$ – допустимое изменение состава смеси, α_1 – наибольшая доля компонента смеси.

Ниже, в табл.1, приводятся свойства основных компонентов смеси (аргона и изобутана), используемые при приведении настоящего анализа.

Свойства компонентов смеси аргона и изобутана взяты по [5,6], а свойства смеси были рассчитаны по методике, изложенной в [7].

Таблица 1.

	$\rho_{лат}^{0^{\circ}C}, \text{кг/м}^3$	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	κ	$p_{нас}^{20^{\circ}C}, \text{кг/см}^2$
Аргон (Ar)	1,78	521	1,67	–
Изобутан (C_4H_{10})	2,51	1645	1,15	3,1
Смесь 75%Ar + 25% C_4H_{10}	1,96	863	1,31	–

Из таблицы следует, что малое давление насыщенных паров ($p_{нас}$) изобутана создает риск подачи его в состоянии насыщения на газовый пульт, что может приводить в процессе его расширения к образованию жидкой фазы, которая при прохождении через ротаметр будет искажать его показания. Для исключения риска этого явления изобутан перед натекателем следует подогревать. Однако целесообразнее и проще осуществлять редуцирование паровой фазы изобутана до промежуточного давления с тем, чтобы пары изобутана, нагреваясь в трубке (обладающей хорошей теплопроводностью) подачи на газовый пульт до температуры окружающей среды, приходили туда в состоянии сухого пара при параметрах, исключающих образование жидкой фазы во время его последующего расширения.

Величины давлений, приводимые далее в статье, даются везде в абсолютных единицах, температура в градусах Кельвина (К).

В приводимой ниже табл.2 представлены результаты вычисления вспомогательных коэффициентов n_p и n_T (по полученным формулам 4, 6) в зависимости от отношения давлений в смесителе и перед натекателем для основных компонентов.

Таблица 2.

p_{Σ}/p_i	Аргон		Изобутан		p_{Σ} кг/см ²	p_i кг/см ²
	n_p	n_T	n_p	n_T		
0,484*	1	1	1	1	1,2	2,48
0,574**	1,18	1,35	1	1		2,10
0,6	1,28	1,57	1,08	1,15		2,0
0,7	1,70	2,41	1,50	2,00		1,7
0,8	2,54	4,10	2,34	3,68		1,5
0,9	4,85	9,10	4,84	8,69		1,3

* Критическое отношение для аргона.

** Критическое отношение для изобутана.

На основании использования результата вычисления коэффициентов в табл.2 ниже приводится табл.3, в которой представлено допустимое изменение давления питания в зависимости от величины давлений в каждой из линий питания при неизменном допустимом изменении состава смеси в 1%.

Таблица 3.

$p_{Ar} (p_1)$	$p_{C_4H_{10}} (p_2)$	$[\Delta p]$	Аргон	Изобутан
кг/см ²	кг/см ²	кг/см ²	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$
			%	%
5	2,2	0,020	0,33	-1,0
2,5	2,2	0,016		
2,0	2,0	0,011		
1,7	1,7	0,007		
1,5	1,5	0,004		
1,3	1,3	0,002		

Эта же зависимость $[\Delta p] = f(p_{Ar}, p_{C_4H_{10}})$ представлена также в графическом виде на рис.5.

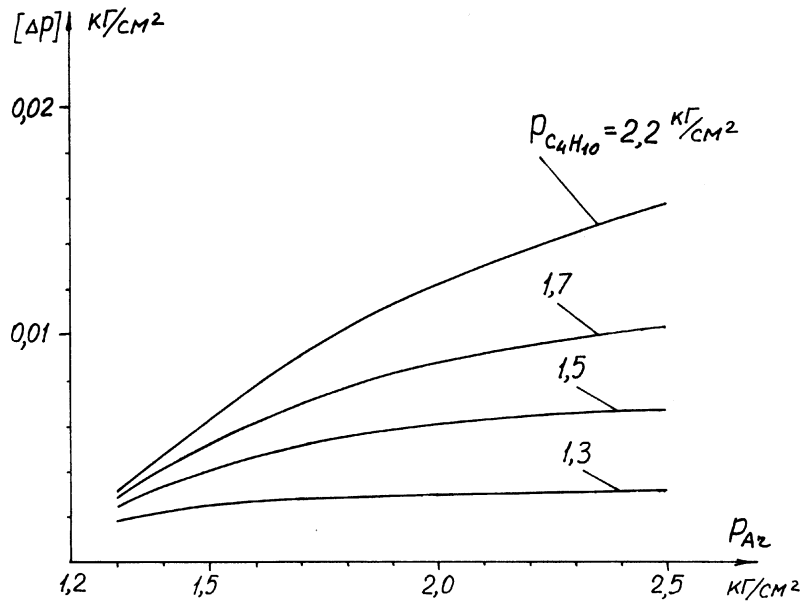


Рис. 5. Зависимость допустимого изменения давления питания $[\Delta p]$ от величины давлений каждого из компонентов смеси (75% Ar + 25% C₄H₁₀) – аргона и изобутана – при обеспечении относительного изменения состава смеси в 1%.

Из табл.3 и рис.5 следует, что поддержание повышенного давления (перед натекателем) каждого из компонентов газовой смеси приводит к снижению требований к точности поддержания давления в линии питания при сохранении неизменным допустимого изменения состава смеси в 1%.

4. Влияние изменения температуры окружающей среды (температуры в помещении) на состав газовой смеси

Доля аргона (α'_1) после повышения температуры на ΔT (относительно температуры, при которой газовая смесь формировалась) с учетом полученной зависимости (6) запишется следующим образом:

$$\alpha'_1 = \frac{V_1 - n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} V_1}{V_1 + V_2 - n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} V_1 - n_{T_2} \frac{\Delta T}{2T} V_2} = \frac{1 - n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T}}{\frac{1}{\alpha_1} - n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} - n_{T_2} \frac{\Delta T}{2T} \frac{\alpha_2}{\alpha_1}}. \quad (12)$$

Изменение доли аргона в смеси:

$$\Delta\alpha_1 = \alpha'_1 - \alpha_1.$$

Относительное изменение доли аргона в смеси:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_1 = \frac{\alpha'_1}{\alpha_1} - 1. \quad (13)$$

После подстановки выражения (12) в (13) и проведения ряда преобразований и упрощений, руководствуясь при этом, что $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ и принимая во внимание, что $\frac{\Delta T}{2T} \ll 1$, получим следующее выражение для определения относительного изменения доли аргона в смеси вследствие изменения температуры:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_1 = -(n_{T_1} - n_{T_2}) \frac{\Delta T}{2T} \alpha_2. \quad (14)$$

Записав далее измененную долю изобутана в смеси в результате повышения температуры на ΔT :

$$\alpha'_2 = \frac{V_2 - n_{T_2} \frac{\Delta T}{2T} V_2}{V_1 + V_2 - n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} V_1 - n_{T_2} \frac{\Delta T}{2T} V_2} = \frac{1 - n_{T_2} \frac{\Delta T}{2T}}{\frac{1}{\alpha_2} - n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - n_{T_2} \frac{\Delta T}{2T}}$$

аналогично описанному выше, получаем выражение для определения относительного изменения доли изобутана в смеси:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_2 = (n_{T_1} - n_{T_2}) \frac{\Delta T}{2T} \alpha_1. \quad (15)$$

Из полученных выражений для изменения долей газовых компонентов, обусловленного изменением температуры помещения, следует, что при $n_{T_1} = n_{T_2}$ изменение температуры в помещении вообще не приводит к изменению состава смеси ($\Delta\alpha/\alpha = 0$). Это условие легко обеспечить при закритическом режиме истечения через натекатель, когда $n_{T_1} = n_{T_2} = 1$ независимо от p_Σ/p_i . Давления в линиях питания при этом могут быть различными при соблюдении условия $p_\Sigma/p_i < \psi_{кр}$. Кроме того, при докритическом режиме истечения из условия $n_{T_1} = n_{T_2}$ можно всегда найти p_Σ/p_i , при котором также будет отсутствовать влияние температуры.

В табл.4 приведены результаты вычисления изменения состава смеси в зависимости от изменения температуры в помещении при различном сочетании давлений (перед накателем) в линиях питания аргоном и изобутаном.

Таблица 4.

ΔT $^{\circ}C$	p_{Ar} кГ/см ²	$p_{C_4H_{10}}$ кГ/см ²	Аргон	Изобутан	p_Σ кГ/см ²
			$\Delta\alpha/\alpha$ %	$\Delta\alpha/\alpha$ %	
5	5	2,2	0	0	1,2
	2	2	-0,1	0,3	
	1,7	1,7	-0,077	0,23	
10	5	2,2	0	0	1,2
	2	2	-0,2	0,6	
	1,7	1,7	-0,15	0,46	

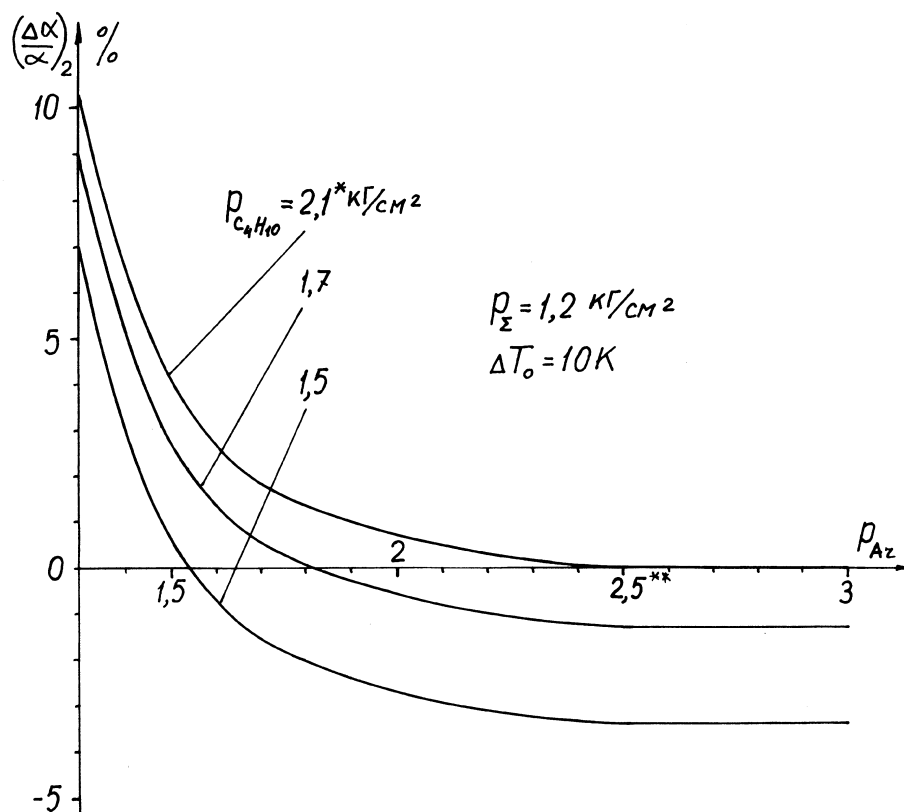


Рис. 6. Зависимость изменения состава $(\Delta\alpha/\alpha)_2$ смеси (75%Ar + 25% C_4H_{10}) от величины давлений ее компонентов при изменении температуры окружающей среды на $\Delta T = 10$ К. * – критическое давление изобутана, ** – критическое давление аргона при $p_{\Sigma} = 1,2$ кг/см² в обоих случаях.

На рис.6 представлена также в графическом виде при $\Delta T = 10$ К эта же зависимость $(\Delta\alpha/\alpha)_2 = f(p_{Ar}, p_{C_4H_{10}})$, которая дает наглядное представление, что в случае значительного различия величин давлений компонентов, когда хотя бы один из них находится в докритическом режиме истечения, имеет место сильная зависимость изменения состава смеси $(\Delta\alpha/\alpha)$ от величины соотношения давлений ее основных компонентов: аргона и изобутана, и может достигать 10%, что существенно выше допустимого изменения $\Delta\alpha/\alpha = 1\%$.

Из приведенной табл.4 и рис.6 следует, что при работе в докритическом режиме истечения с одинаковыми давлениями в линиях питания даже при изменении температуры на 10⁰С (что может иметь место в неотопляемом помещении) изменение состава смеси не превышает 0,6%, т.е. остается в пределах допустимого ее изменения: $\leq 1\%$.

5. Влияние локального изменения температуры одной из линий питания на состав газовой смеси

Такое явление возможно в результате локального охлаждения (нагрева) баллона с изобутаном или аргоном при достаточном удалении их друг от друга в случае возникновения градиента температуры у холодной стены, где они находятся. При этом

предполагается, что газ по пути к газовому пульту не успевает прогреться, что возможно при достаточно большом расходе или использовании трубок из материала (например, полиэтилена) с малым коэффициентом теплопроводности. Такая ситуация маловероятна, но рассмотрение ее для оценки опасности тем не менее целесообразно. Представляется, что результирующая разница температур линий питания на газовом пульте не превысит 5°C и будет заложена в анализ, результаты которого приведены в табл.5. Выражение для определения изменения состава смеси получаем из формул (14) и (15), полагая, что изменение температуры в одной из двух линий питания (например, в линии изобутана) равно нулю:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_1 = -n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} \alpha_2, \quad (16)$$

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)_2 = n_{T_1} \frac{\Delta T}{2T} \alpha_1. \quad (17)$$

Таблица 5.

ΔT $^{\circ}\text{C}$	p_i кГ/см ²	p_{Σ}/p_i	Аргон	Изобутан	p_{Σ} кГ/см ²
			$\Delta\alpha/\alpha$ %	$\Delta\alpha/\alpha$ %	
5	2,48	0,484*	0,21	-0,64	1,2
	2,0	0,6	0,33	-1,0	
	1,7	0,7	0,52	-1,56	
	1,5	0,8	0,83	-2,48	
	1,3	0,9	1,95	-5,84	

* Критическое отношение для аргона.

Анализ табл.5 показывает, что в случае локального изменения температуры на 5°C в одной из линий питания (например, в линии изобутана) наиболее предпочтительным является критический режим течения через натекатель ($p_{\Sigma}/p_i < \psi_{кр}$), также допустим и близкий к нему $p_{\Sigma}/p_i = 0,6$, однако снижение давления питания до $1,3$ кГ/см² приводит к весьма значительному изменению состава газовой смеси (до $\sim 6\%$).

Сравнение результатов, приведенных в табл. 4 и 5, показывает, что локальное охлаждение (нагревание) одной из линий питания намного опаснее, чем такое же изменение температуры всего помещения. Поэтому следует баллонное хозяйство располагать компактно, а трассы, ведущие от него к газовому пульту, изготавливать из материала, обладающего хорошей теплопроводностью.

6. Определение доли паров изопропанола и ее изменения в зависимости от давления питания в составе формируемой газовой смеси

Доля паров изопропанола (C_3H_8O) в смеси:

$$\alpha_{C_3H_8O} = \left(\frac{p_{нас}}{p_{\Sigma}}\right) \frac{rV_1}{V_1 + V_2} = r \left(\frac{p_{нас}}{p_{\Sigma}}\right) \frac{V_1}{V_1 + V_2},$$

где $p_{нас}$ – давление насыщенных паров изопропанола при рабочей температуре; r – доля расхода аргона на смеситель с парами изопропанола (см. рис.1).

Изменение доли паров изопропанола из-за изменения давления питания определяется в соответствии с наиболее неблагоприятной схемой его изменения, приведенной на рис.4, и с учетом относительной малости доли его паров по сравнению с долями основных компонентов: аргона и изобутана.

В этом случае изменение доли паров изопропанола:

$$\Delta\alpha_{C_3H_8O} = r \left(\frac{p_{nac}}{p_\Sigma} \right) \left(n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p2} \frac{\Delta p}{p_2} \right) \alpha_1 \alpha_2.$$

Относительное изменение доли паров изопропанола вследствие повышения давления питания:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)_{C_3H_8O} \simeq \left(n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p2} \frac{\Delta p}{p_2} \right) \alpha_2. \quad (18)$$

7. Изменение доли паров бромистого фреона (13B1) в зависимости от изменения давления питания

Смесь аргона с парами бромистого фреона готовится в отдельном баллоне заранее. Поэтому расход бромистого фреона всегда составляет постоянную долю (β) от фиксируемого расхода этой смеси (98% Ar+2% 13B1).

Доля паров бромистого фреона в газовой смеси:

$$\alpha_{13B1} = \beta \frac{xV_1}{V_1 + V_2} = x\beta \frac{V_1}{V_1 + V_2},$$

где β – доля паров бромистого фреона в баллоне, x – доля объемного расхода смеси (Ar+13B1) в общем расходе аргона V_1 .

В связи с учетом малости доли паров бромистого фреона в общем составе смеси изменение доли его паров из-за изменения давления питания определяется следующим выражением:

$$\Delta\alpha_{13B1} = x\beta \left(n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p2} \frac{\Delta p}{p_2} \right) \alpha_2 \alpha_1.$$

Относительное изменение доли паров бромистого фреона в смеси, обусловленное изменением давления питания:

$$\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)_{13B1} \simeq \left(n_{p1} \frac{\Delta p}{p_1} + n_{p2} \frac{\Delta p}{p_2} \right) \alpha_2. \quad (19)$$

8. Обсуждение результатов расчетов

Совокупность приводимых далее табл.6 и 7 дает результаты расчета изменения полного состава смеси в зависимости от величины давлений в линиях питания и их стабильности для докритического (табл.6) и критического (табл.7) режимов истечения через накататель.

Изменение состава смеси определялось относительно следующего, принятого номинальным, состава:

$$74\%Ar + 25\%C_4H_{10} + 0,5\%13B1 + 0,45\%C_3H_8O.$$

Таблица 6.

$p_{Ar}=2 \text{ кГ/см}^2, p_{C_4H_{10}}=2 \text{ кГ/см}^2$					
Δp кГ/см ²	$\Delta\alpha/\alpha, \%$				p_{Σ} кГ/см ²
	Аргон Ar	Изобутан C_4H_{10}	Фреон 13B1	Пропанол-2 C_3H_8O	
0,3	9	-27	9	9	1,2
0,2	6	-18	6	6	
0,1	3	-9	3	3	
0,05	1,5	-4,5	1,5	1,5	
0,02	0,6	-1,8	0,6	0,6	
0,01	0,3	-0,9	0,3	0,3	

Таблица 7.

$p_{Ar}=5 \text{ кГ/см}^2, p_{C_4H_{10}}=2,2 \text{ кГ/см}^2$					
Δp кГ/см ²	$\Delta\alpha/\alpha, \%$				p_{Σ} кГ/см ²
	Аргон Ar	Изобутан C_4H_{10}	Фреон 13B1	Пропанол-2 C_3H_8O	
0,3	4,9	-14,7	4,9	4,9	1,2
0,2	3,3	-9,8	3,3	3,3	
0,1	1,6	-4,9	1,6	1,6	
0,05	0,8	-2,5	0,8	0,8	
0,02	0,33	-0,98	0,33	0,33	
0,01	0,16	-0,49	0,16	0,16	

Из приведенных табл.6 и 7 следует, что установление давлений питания, соответствующих критическому режиму истечения через натекатель, позволяет при $\Delta p = \text{idem}$ примерно в 2 раза уменьшать изменение доли изобутана в составе газовой смеси по сравнению с режимом докритическим (с $p_{\Sigma}/p_1=0,6$).

Однако, как это следует из результатов расчета, представленных в табл.4 и на рис.6, в случае использования докритического режима истечения для полного исключения влияния изменения температуры в помещении на состав смеси, необходимо давления компонентов поддерживать близкими друг к другу.

9. Выводы

1. Изменение температуры в помещении при равенстве давлений питания компонентами не оказывает существенного влияния на состав смеси при его поддержании с точностью до 1%. В случае необходимости полного исключения ее влияния давления питания газовыми компонентами должны быть такими, чтобы перепады давлений на накателях соответствовали критическому режиму истечения каждого из компонентов.

2. Локальное изменение температуры одной из линий питания может оказывать весьма существенное влияние на изменение состава смеси (особенно при низком давлении, поддерживаемом перед накателем). Для исключения риска этого явления необходимо баллоны с газовыми компонентами располагать компактно и трассу от них к газовому пульту прокладывать металлической трубкой (предпочтительно медной).

3. На состав газовой смеси оказывает сильное влияние изменение давления в линиях питания ее компонентами, требуемая точность поддержания которого зависит от величины перепада давления на натекателе и является наименьшей при перепаде давления, соответствующем критическому режиму истечения через натекатель.

4. Для обеспечения стабильности состава смеси с точностью до 1% необходимо поддерживать давления компонентов с точностью до 0,02 кГ/см² при критическом режиме истечения через натекатель и с точностью до 0,01 кГ/см² при поддержании относительного перепада давления в этих линиях перед натекателем и в смесителе равным 0,6.

5. Поскольку изобутан в силу своих термодинамических свойств поступает на газовый пульт в состоянии, близком к насыщению, то для исключения образования его жидкой фазы во время адиабатического снижения давления в натекателе изобутан следует подогревать либо путем естественного нагрева после промежуточного редуцирования, либо путем его искусственного подогрева.

В заключение автор приносит благодарность профессору А.М. Моисееву за постановку задачи и постоянное внимание к работе.

Список литературы

- [1] Глебов В.Ю., Зелинский А.Н. В кн.: Материалы рабочего совещания по методике пропорциональных камер. – Дубна, ОИЯИ, 1973, с.85.
- [2] Ardashev E. et al. – IHEP Preprint 96-98, Protvino, 1996.
- [3] Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1974.
- [4] Ермолов П.Ф. и др. – Препринт НИИЯФ МГУ 99-27/585, М., 1999.
- [5] Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. – М.: Энергия, 1985.
- [6] Ионин А.А. Газоснабжение. – М.: Стройиздат, 1975.
- [7] Жуковский В.С. Термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Рукопись поступила 18 апреля 2000 г.

А.В.Плескач

Изучение факторов, вызывающих изменение состава газовой смеси для пропорциональных камер.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 03.05.2000. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.

Печ.л. 1,75. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 130. Заказ 125. Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

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

