



И  
Ф  
В  
Э

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000-22  
ОЭФ

А.В. Плескач

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ  
НА ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ  
В ГАЗОВЫХ ПУЛЬТАХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР**

Протвино 2000

## Аннотация

Плескач А.В. Изучение влияния атмосферных условий на точность работы регуляторов давления в газовых пультах пропорциональных камер: Препринт ИФВЭ 2000-22. – Протвино, 2000. – 9 с., 5 рис., библиогр.: 5.

Рассмотрено влияние нестабильности атмосферного давления и температуры окружающей среды на точность работы различных типов регуляторов давления в газовых пультах пропорциональных камер. Показано, что для поддержания состава смеси с требуемой точностью не хуже чем 1% необходимо часть надмембранныго объема регулятора поддерживать при стабильной температуре, например температуре жидкого азота. Получено выражение, устанавливающее связь между величиной стабилизирующего объема и погрешностью регулятора давления, вызываемой изменением внешних условий.

## Abstract

Peskach A.V. Study of Atmospheric Conditions Influence on the Precision Functioning of Pressure Regulators in Gas Desks for Proportional Chambers: IHEP Preprint 2000-22. – Protvino, 2000. – p. 9, figs. 5, refs.: 5.

The impact of atmospheric pressure and temperature changes on the precision functioning of different types of regulators installed in gas desks for proportional chambers is considered. It is shown that for the maintenance of stability of a gas mixture composition within 1% it is necessary to keep a portion of the volume above a membrane at a fixed temperature (for example, at a temperature of liquid nitrogen). The expression has been obtained, which relates the size of the stabilized volume with the error of a pressure regulator, caused by the change of atmospheric conditions.

## Введение

При подготовке газовой смеси для пропорциональных камер давление в линиях питания ее компонентами должно поддерживаться перед натекателями постоянным, с тем чтобы обеспечивать постоянство расхода, гарантирующее стабильность состава смеси.

Стабилизация давления перед натекателем в каждой из линий питания обычно осуществляется с помощью регулятора мембранныго типа. Для поддержания состава смеси с требуемой относительной точностью 1% [1] необходимая чувствительность регулятора обеспечивается за счет увеличения размера мембранны, чем достигается соответствующая точность поддержания давления.

Однако результирующее воздействие нестабильности внешних условий — атмосферного давления или температуры окружающей среды, — происходящее по всей площади мембранны, не зависит от размера последней и фактически определяет предельную точность регулирования давления.

Настоящая работа посвящена изучению влияния внешних факторов на точность различных типов регуляторов давления и разработке мер, позволяющих уменьшить влияние атмосферных факторов.

### 1. Регулятор давления статического типа

На рис. 1 приведена схема регулятора давления статического типа. У регуляторов этого типа регулируемый параметр при различных постоянных по величине внешних возмущающих воздействиях на регулируемый объект принимает по окончании переходного процесса, т.е. в установившемся режиме, значения, зависящие от величины внешнего возмущающего воздействия (нагрузки). Поэтому статическому регулятору свойственна нерав-

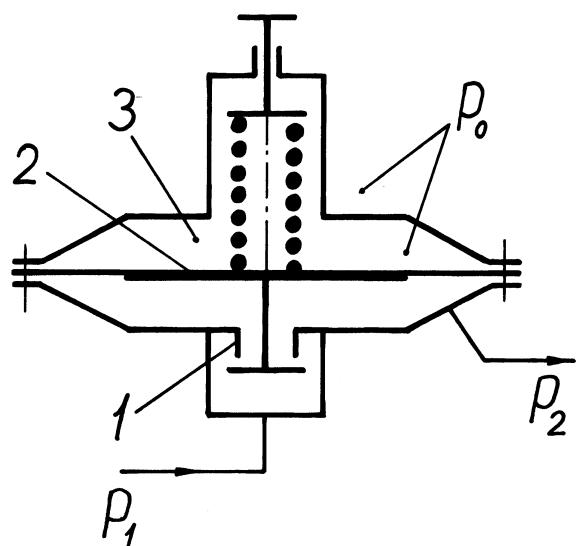


Рис. 1. Схема статического регулятора давления: 1 — регулирующий орган, 2 — мембрально-пружинный привод, 3 — надмембранный объем.

номерность регулирования, которая представляет собой отношение диапазона изменения регулируемого параметра к его номинальному значению. Обычно для регуляторов давления этого типа она составляет  $7 \div 14\%$  [2]. Поэтому при повышенных требованиях, предъявляемых к точности, предпочтение отдается астатическим регуляторам [3], описанным далее.

В состоянии равновесия давление на выходе из регулятора определяется следующим образом:

$$P_2 = P_0 + \frac{F_{(x)}}{S_M}, \quad (1)$$

где  $P_0$  — атмосферное давление,  $P_2$  — регулируемое давление,  $S_M$  — эффективная площадь мембранны,  $F_{(x)}$  — усилие, создаваемое пружиной (жесткостью мембранны в силу ее малости пренебрегаем).

Из приведенной зависимости (1) следует, что при неизменном усилии пружины ( $F_{(x)}=\text{const}$ ) давление на выходе регулятора ( $P_2$ ) зависит от величины атмосферного давления ( $P_0$ ) и изменение последнего на  $\Delta P_0$  вызывает такое же изменение давления на выходе регулятора, т.е.  $\Delta P_2 = \Delta P_0$ . Обычно атмосферное давление изменяется в диапазоне 720 – 780 мм рт.ст. и изменение давления для середины диапазона составит  $\pm 30$  мм рт.ст., т.е.  $\Delta P_0=0,04 \text{ кГ/см}^2$ . Поскольку  $\Delta P_2 = \Delta P_0$ , то атмосферная погрешность поддержания давления в регуляторах этого типа может составлять  $\Delta P_2=0,04 \text{ кГ/см}^2$ , что существенно больше допустимого изменения давления  $0,01 \text{ кГ/см}^2$ , обеспечивающего требуемую стабильность состава смеси [4].

Здесь и далее допустимое изменение давления рассматривается для общего случая, включающего и произвольное соотношение давлений компонентов смеси.

## 2. Регулятор давления астатического типа

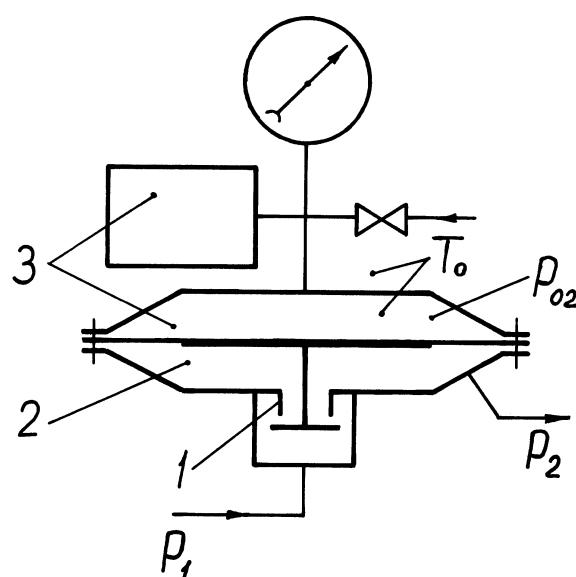


Рис. 2. Схема астатического регулятора давления: 1 — регулирующий орган, 2 — мембранный-газовый привод, 3 — опорный объем.

На рис. 2 приведена схема регулятора давления астатического типа. У регуляторов этого типа при различных по величине внешних воздействиях на регулируемый объект отклонение регулируемого параметра от заданного значения по окончании переходного процесса становится равным нулю. Следовательно, величина регулируемого параметра не зависит от нагрузки на объект.

На приведенной схеме регулятора на рис. 2 в качестве рабочего тела в опорном объеме используется газ под заданным давлением. Поскольку сжимаемость газа большая, а объем его над мембраной много больше описываемого ею объема, то практически изменением опорного давления во время процесса регулирования можно пренебречь, что позволяет такой регулятор считать астатическим. Для увеличения эффекта независимости регу-

лируемого параметра от положения регулирующего органа или в случае конструктивного ограничения величины опорного объема над мембраной последний искусственно увеличивают за счет дополнительного (расширительного) объема, как это показано на рис. 2.

Давление, поддерживаемое регулятором, задается давлением газа в опорном объеме и после установления герметично отсекается с помощью вентиля.

Очевидно, что, будучи замкнутым, опорный объем не подвержен влиянию атмосферного давления. Однако изменение температуры окружающей среды будет приводить к изменению давления газа в опорном объеме, определяемому из рассмотрения изохорического процесса:

$$\Delta P_{02} = \frac{\Delta T_0}{T_0} P_{02}, \quad (2)$$

где  $T_0$  — температура окружающей среды,  $\Delta T_0$  — изменение температуры окружающей среды,  $P_{02}$  — опорное давление, практически равное поддерживаемому.

В соответствии с логикой регулирования изменение опорного (задаваемого) давления приводит к точно такому же изменению регулируемого давления, т.е.  $\Delta P_2 = \Delta P_{02}$ .

Из полученной зависимости (2) следует, что, в отличие от статического регулятора давления, в астатическом регуляторе погрешность, вызванная изменением  $T$ , зависит от величины поддерживаемого давления.

В неотапливаемое время года температура в помещении может изменяться в диапазоне 10-30°C и изменение температуры для середины диапазона составит ±10°C, т.е.  $\Delta T_0=10$  К. Из полученной зависимости (2) следует, что при поддержании давления  $P_2=2$  кГ/см<sup>2</sup> (здесь и далее величины давления приводятся в абсолютных единицах, температура — в градусах Кельвина) изменение температуры окружающей среды на  $\Delta T_0=10$  К приведет к погрешности в поддержании давления равной  $\Delta P_2=0,07$  кГ/см<sup>2</sup>, что также существенно выше допустимого изменения давления 0,01 кГ/см<sup>2</sup>, обеспечивающего требуемую стабильность смеси [4].

### 3. Астатический регулятор давления с охлаждением (в общем случае — со стабилизацией) части опорного объема

Из приведенного рассмотрения статического и астатического регуляторов давления следует, что оба типа регуляторов чувствительны к изменению параметров окружающей среды. При этом погрешность, вызываемая ею, для них одного порядка и существенно превышает допустимую.

Чтобы исключить чувствительность статического регулятора давления к атмосферному давлению, его надмембранный полость можно, например, изолировать, установив там давление равное атмосферному. Но в этом случае запершая надмембранный полость статического регулятора, так же как и опорный объем астатического, станет чувствительной к изменению окружающей температуры. Поэтому далее мы будем рассматривать точностную модернизацию только для астатического регулятора, распространяя полученный результат (с учетом коррекции на надмембранные давление) и на статический регулятор.

Чтобы уменьшить влияние температуры на замкнутый объем (опорный), необходимо часть надмембранных объемов (опорного) поддерживать при постоянной температуре.

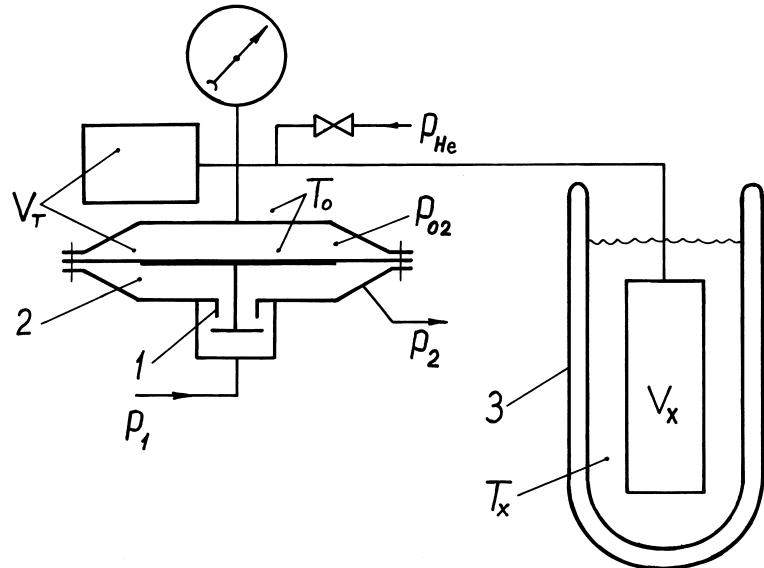


Рис. 3. Схема астатического регулятора давления с охлаждением части опорного объема жидким азотом: 1 — регулирующий орган, 2 — мембранный-газовый привод, 3 — дьюар с жидким азотом,  $V_T$  — теплая часть опорного объема,  $V_X$  — холодная часть опорного объема.

На рис. 3 представлена схема астатического регулятора давления с частью опорного объема, поддерживаемого при температуре жидкого азота. В качестве рабочего тела опорного объема используется газообразный гелий. Тepлый ( $V_T$ ) и хoлoдный ( $V_X$ ) объемы соединены капилляром  $d_y=1$  мм, что позволяет при расчете его собственным объемом пренебречь. Соотношение между относительной величиной холoдного объема и погрешностью регулируемого давления при изменении температуры на  $\Delta T_0$  определяется из условия постоянства суммарной массы газа в холoдном и теплом объемах:

$$\frac{P_2}{RT_0}V_T + \frac{P_2}{RT_X}V_X = \frac{P'_2}{R(T_0 + \Delta T_0)}V_T + \frac{P'_2}{RT_X}V_X, \quad (3)$$

где  $P_2$  — регулируемое давление при температуре окружающей среды  $T_0$ ;  $P'_2$  — регулируемое давление после изменения температуры окружающей среды на  $\Delta T_0$ , т.е. при температуре  $T_0 + \Delta T_0$ ;  $V_T$  — теплая часть опорного объема (теплый объем);  $V_X$  — холoдная часть опорного объема (холoдный объем);  $T_X$  — температура холoдного объема;  $R$  — газовая постоянная.

После проведения ряда преобразований получим из уравнения (3) следующее выражение для определения величины регулируемого давления после изменения окружающей температуры на  $\Delta T_0$ :

$$P'_2 = P_2 \frac{V_T T_X + V_X T_0}{V_T T_X + V_X (T_0 + \Delta T_0)} \left( 1 + \frac{\Delta T_0}{T_0} \right). \quad (4)$$

Определив  $P'_2$ , находим изменение давления  $\Delta P_T = P'_2 - P_2$ , вызванное изменением температуры, которое после проведения ряда преобразований получаем в виде следующего выражения:

$$\Delta P_T = \frac{\Delta T_0 / T_0}{1 + \frac{V_X T_0}{V_T T_X} \left( 1 + \frac{\Delta T_0}{T_0} \right)} \cdot P_2. \quad (5)$$

На рис. 4 представлена полученная из выражения (5) погрешность регулирования ( $\Delta P_T$ ) в зависимости от соотношения холодного и теплого объемов ( $V_X/V_T$ ) при изменении температуры окружающей среды на  $\Delta T_0=10$  К для нескольких значений  $P_2$ . Выбранные значения  $P_2$  характеризуют возможный диапазон используемых величин давлений компонентов для приготовления газовой смеси при различных режимах истечения через натекатель, включая и критический ( $P_2=3$  кГ/см<sup>2</sup>). Зависимость  $\Delta P_T = f(V_X/V_T)$  для  $P_2=1$  кГ/см<sup>2</sup> характеризует температурную погрешность статического регулятора с надмембранным объемом, изолированным от атмосферы.

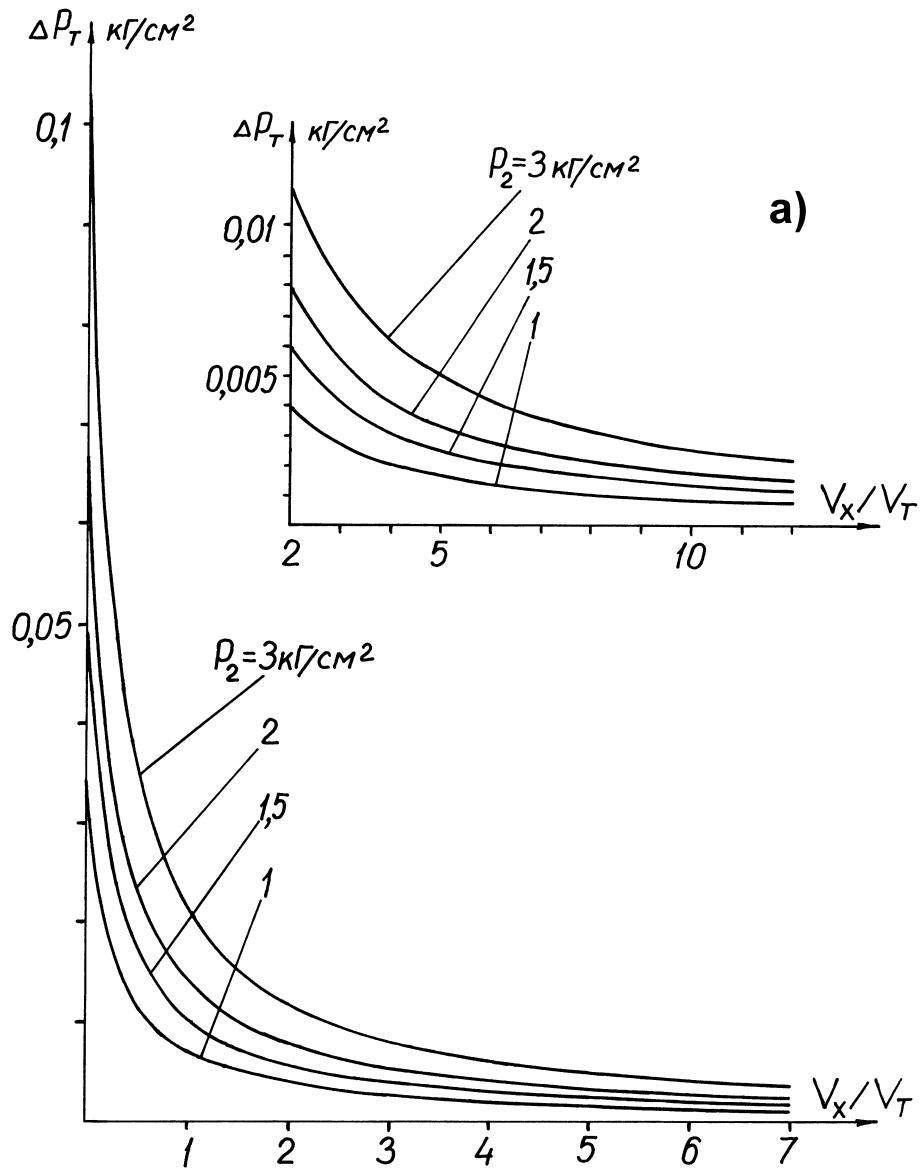


Рис. 4. Температурная погрешность регулирования в зависимости от соотношения ( $V_X/V_T$ ) холодной и теплой частей опорного объема астатического регулятора при изменении температуры окружающей среды на  $\Delta T_0=10$  К; а) — то же, но при продолжении по оси абсцисс и увеличении масштаба по оси ординат.

Из выражения (5) следует, что при  $(V_X/V_T) \rightarrow \infty$   $\Delta P_T \rightarrow 0$ . Так, например, при  $V_X/V_T=20$   $\Delta P_T = 4,35 \cdot 10^{-4}P_2$ . Зависимость, представленная на рис. 4, иллюстрирует возможность уменьшения температурной погрешности регулятора давления в случае идеальной стабилизации давления в закрытом дьюаре с жидким азотом.

Однако использование для термостатирования части опорного объема открытого дьюара с жидким азотом предопределяет зависимость температуры кипения последнего от атмосферного давления (в соответствии с кривой насыщенных паров) и появление погрешности регулирования ( $\Delta P_p$ ), обусловленной этой зависимостью.

В соответствии с кривой насыщения для жидкого азота [5] при изменении атмосферного давления в интервале 720 – 780 мм рт.ст. изменение температуры кипения для середины интервала составит  $\pm 0,3$  К, т.е.  $\Delta T_X=0,3$  К. Изменение давления ( $\Delta P_p$ ) на выходе регулятора, которое будет вызвано изменением температуры кипения (термостатирования) на  $\Delta T_X$ , определяется из равенства (2) путем замены в его правой части  $T_X$  на  $(T_X + \Delta T_X)$  и сохранения в обеих частях равенства неизменной  $T_0$ . После преобразований получим следующее выражение для определения погрешности поддержания давления, вызванной изменением температуры кипения, обусловленным изменением атмосферного давления:

$$\Delta P_p = \frac{\Delta T_X/T_X}{1 + \frac{V_T}{V_X} \frac{T_X}{T_0} \left(1 + \frac{\Delta T_X}{T_X}\right)} \cdot P_2. \quad (6)$$

Из полученного выражения (6) следует, что при  $\frac{V_X}{V_T} \rightarrow \infty$  ( $\frac{V_T}{V_X} \rightarrow 0$ ), когда, как показано выше,  $\Delta P_T \rightarrow 0$ ,  $\Delta P_p \rightarrow (\Delta T_X/T_X)P_2$ . Таким образом, видно, что термостабилизация части опорного объема в закрытом дьюаре с жидким азотом имеет ограничение по достигаемому уменьшению погрешности регулирования давления величиной  $(\Delta T_X/T_X)P_2$ . Так, если, например, регулируемое давление  $P_2=2$  кГ/см<sup>2</sup>, то теоретически достижимая наименьшая погрешность составит  $\Delta P_p=0,0064$  кГ/см<sup>2</sup>.

Очевидно, что в зависимости от характера протекания атмосферных процессов  $\Delta P_T$  и  $\Delta P_p$  могут в том или ином соотношении либо складываться, либо вычитаться. При выборе допустимого отношения  $V_X/V_T$  будем руководствоваться наиболее неблагоприятным случаем, когда отклонения рассматриваемых атмосферных параметров принимают максимальные значения и имеют одинаковый знак, в результате чего погрешности регулирования  $\Delta P_T$  и  $\Delta P_p$ , ими вызываемые, будут складываться.

На рис. 5 представлена зависимость суммарной атмосферной погрешности ( $\Delta P_T + \Delta P_p$ ) от отношения холодного и теплого объемов ( $V_X/V_T$ ) при изменении внешней температуры на  $\Delta T_0=10$  К и температуры кипения азота на 0,3 К для нескольких значений регулируемого параметра  $P_2$  — тех же, что и на рис. 4. Эта зависимость будет иметь место при термостатировании холодной части опорного объема кипящим под атмосферным давлением жидким азотом (в закрытом дьюаре).

Из зависимостей, представленных на рис. 5, следует, что для критического режима истечения через натекатель ( $P_2=3$  кГ/см<sup>2</sup>) уже начиная с  $V_X/V_T=2,5$  величина  $(\Delta P_T + \Delta P_p) < 0,02$  кГ/см<sup>2</sup>, что обеспечивает в этом режиме поддержание состава смеси с относительной точностью до 1% [4]. Для докритического режима истечения поддержание состава смеси с точностью 1% обеспечивается для  $P_\Sigma/P_2=0,6$  ( $P_2=2$  кГ/см<sup>2</sup>) при  $(\Delta P_T + \Delta P_p) < 0,01$  кГ/см<sup>2</sup> [4], и в соответствии с приведенной на рис. 5 зависимостью это условие обеспечивается только при  $V_X/V_T \geq 5$ .

Из зависимости, представленной на рис.5, также следует, что для статического регулятора давления (кривая  $P_2=1 \text{ кГ/см}^2$ ) требуемая для обеспечения стабильности смеси (для докритического режима истечения через натекатель) погрешность поддержания давления обеспечивается уже при  $V_X/V_T \geq 1$ .

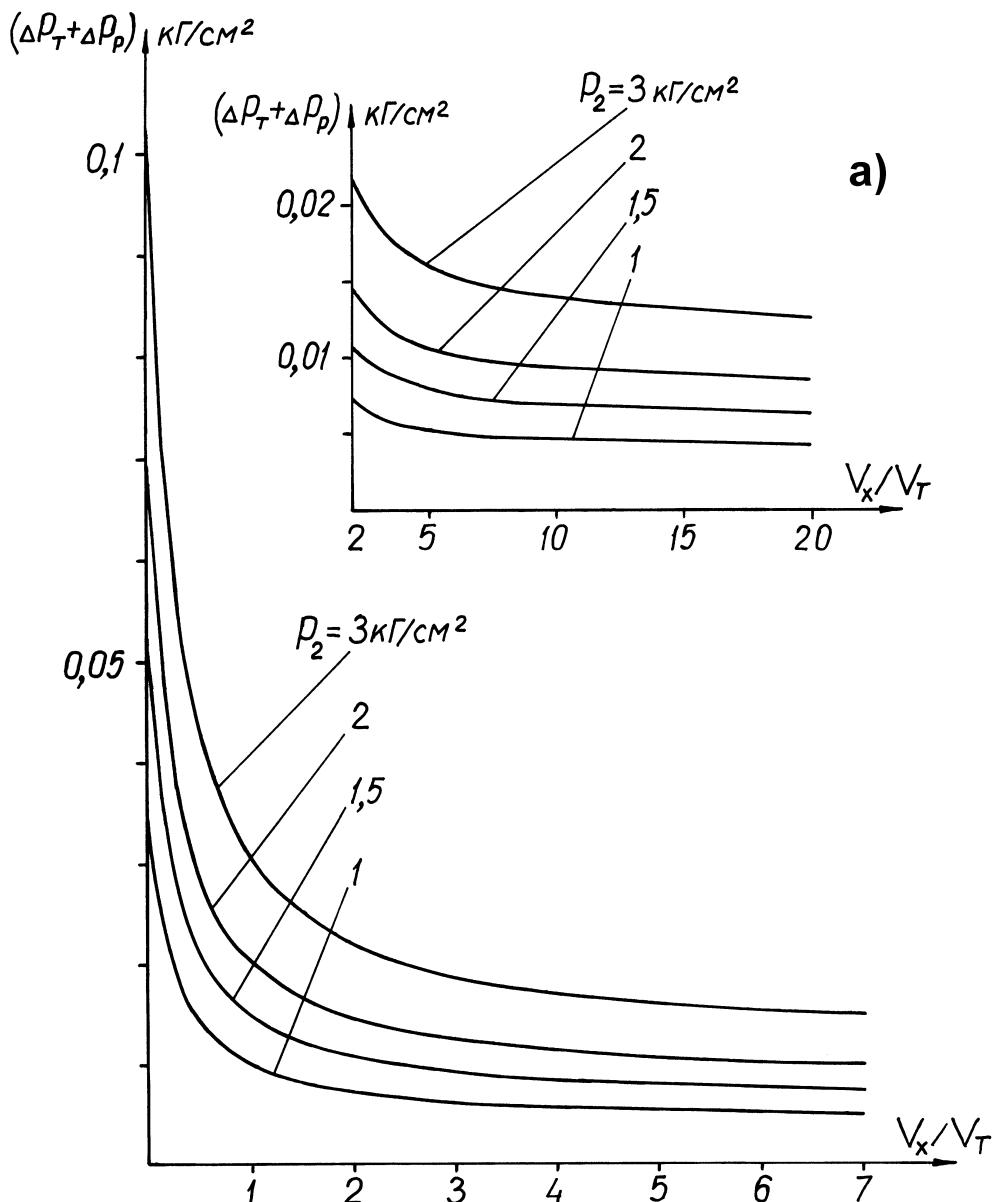


Рис. 5. Сумма температурной погрешности регулирования (для  $\Delta T_0=10 \text{ K}$ ) и погрешности от изменения температуры кипения жидкого азота ( $\Delta T_X=0,3 \text{ K}$ ), вызванной изменением атмосферного давления, в зависимости от соотношения ( $V_X/V_T$ ) холодной и теплой частей опорного объема астатического регулятора давления с термостатированием холодного объема в открытом дьюаре с жидким азотом; а) — то же, но при продолжении по оси абсцисс и увеличении масштаба по оси ординат.

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Влияние атмосферных условий на поддержание стабильным заданного состава смеси предъявляет повышенные требования к собственной нестабильности регулятора ( $\Delta P_{peg.}$ ) давления, которая определяется как разность между допустимым изменением давления, обеспечивающим требуемую стабильность смеси, и погрешностью, вызываемой возможным изменением параметров окружающей среды:

$$\Delta P_{peg.} = [\Delta P] - (\Delta P_T + \Delta P_p). \quad (7)$$

Из графиков, приведенных на рис. 5, следует, что  $\Delta P_{peg.}$ , определяемая по (7), зависит от  $V_X/V_T$  и  $P_2$  и при  $V_X/V_T=20$  (что технически реализуемое в компактном исполнении) для обычно поддерживаемого в газовых системах среднего давления компонентов  $P_2=2 \text{ кГ/см}^2$  при обеспечении стабильности смеси в 1% составит  $\Delta P_{peg.}=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кГ/см}^2$  (т.е. 0,125% от поддерживаемого). В то же время для критического режима истечения при  $P_2=3 \text{ кГ/см}^2$  собственная погрешность регулятора составит  $\Delta P_{peg.}=7 \cdot 10^{-3} \text{ кГ/см}^2$  (т.е. 0,24% от поддерживаемого).

Из приведенных результатов следует, что лучшая точностная характеристика (при прочих равных условиях) реализуется при поддержании перед натекателем повышенного давления, которое соответствует критическому режиму истечения.

В статическом регуляторе давления термостатирование части надмембранныго объема при температуре жидкого азота, кипящего при атмосферном давлении в открытом дьюаре (при  $V_X/V_T \rightarrow \infty$ ), приводит к максимально возможному уменьшению погрешности, вызываемой изменением атмосферного давления, в 10 раз. При этом следует иметь в виду, что статический регулятор поддерживает давление менее точно, чем астатический, т.е. имеет большую собственную погрешность регулирования [5], которая должна складываться с рассматриваемой.

Кроме того, как это следует из формулы (1), для статического регулятора существует иной путь практически полного исключения погрешности, вызываемой изменением атмосферного давления, который заключается в организации постоянной откачки надмембранныго объема этого типа регулятора до  $\sim 10^{-1} \text{ мм рт.ст.}$  (т.е.  $P_o \simeq 0$ ) с помощью форвакуумного насоса. Реализация этого решения потребует создания вакуумноплотного уплотнения подвижного штока винта, регулирующего усилие сжатия пружины, задающей величину поддерживаемого (регулируемого) давления.

В астатическом регуляторе термостатирование части опорного объема при температуре жидкого азота, кипящего при атмосферном давлении (при  $V_X/V_T \rightarrow \infty$ ), приводит к максимально возможному уменьшению погрешности, вызываемой изменением параметров окружающей среды, в 9 раз. При этом, естественно, к этой погрешности также должна добавляться собственная погрешность регулятора.

В случае необходимости еще большего уменьшения погрешности, обусловленной нестабильностью атмосферных условий, с целью более точного поддержания состава смеси следует исключить влияние атмосферного давления на температуру кипения жидкого азота в дьюаре путем прецизионной стабилизации давления в последнем. Но такая модернизация приведет к существенно большему усложнению системы, так как помимо стабилизации давления необходимо также обеспечить и стабильность температуры поступающего на заполнение закрытого дьюара жидкого азота с точностью, лучшей чем  $\sim 0,1 \text{ К}$ .

## **5. Выводы**

1. Типичное изменение параметров внешней среды для каждого из рассмотренных типов регуляторов, используемых в газовых системах, приводит к погрешности регулируемого давления, превышающей допустимую в 4 – 7 раз.
2. Регулятор давления астатического типа предпочтительнее, так как он более точно поддерживает давление, чем статический.
3. Поддержание части опорного объема астатического регулятора при температуре свободно кипящего жидкого азота при соотношении между холодным и теплым объемами равным 20 уменьшает атмосферную погрешность этого регулятора в 8 раз, что позволяет обеспечить требуемую точность поддержания состава газовой смеси.

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] Ионин А.А. Газоснабжение. — М.: Стройиздат, 1975.
- [3] Каргу Л.И. и др. Основы автоматического регулирования и управления. — М.: Высшая школа, 1974.
- [4] Плескач А.В. — Препринт ИФВЭ 2000-10, Протвино, 2000.
- [5] Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергия, 1985.

*Рукопись поступила 19 июня 2000 г.*

А.В.Плескач

Изучение влияния атмосферных условий на точность работы регуляторов давления в газовых пультах пропорциональных камер.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 23.06.2000. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.  
Печ.л. 1,12. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 130. Заказ 162. Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

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

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2000-22, ИФВЭ, 2000

---