

Г. П. Павлихин, В. А. Львов, А. В. Бурлаков

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНОГО ГАЗА В ОБЪЕКТАХ ПРИ СОДЕРЖАНИИ ИХ ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Представлены основные этапы создания методики разработки требований, предъявляемых к защитному газу, и рассмотрены основные особенности практической реализации этой методики.

Содержание объектов под избыточным давлением защитного газа является одним из основных методов обеспечения надежной и безопасной эксплуатации оборудования различного назначения. В частности, широко применяется в настоящее время система содержания кабельных линий городских телефонных сетей под избыточным (0,04 0,05 МПа) давлением воздуха [1–3].

Особенности технологических процессов (включая их устойчивость и безопасность) [4] и многообразие эксплуатационных условий привели к тому, что степень регламентирования требований, предъявляемых к защитному газу и контролю его параметров, оказалась различной и до сих пор не поддается полной унификации. Разработку указанных требований нельзя отнести к разряду тривиальных задач, так как в реальных объектах защитный газ образует многокомпонентную неравновесную термодинамическую систему, как правило, открытого типа, которая может иметь большое число степеней свободы.

В результате при решении конкретных задач, особенно в нестандартных условиях, разработчики вынуждены либо использовать свой предшествующий опыт, либо заимствовать аналогичные решения из смежных отраслей. Подобная практика не только сдерживает внедрение новых перспективных средств контроля, но и зачастую может привести к серьезным ошибкам, в частности, при создании новых объектов. Вместе с тем, методика разработки требований, предъявляемых к защитному газу и контролю его параметров, в настоящее время может быть сформулирована для многих объектов. Рассмотрим основные этапы создания подобной методики.

Начальный этап разработки должен быть посвящен детальному анализу особенностей функционирования объекта, содержащегося под

избыточным давлением, и должен обеспечить выбор защитного газа с определением количества химически однородных веществ, которые могут входить в его состав и оказывать определяющее воздействие на поведение объекта. Кроме того, при этом анализе необходимо найти число независимых параметров, определяющих физическое состояние фазы защитного газа при ее заданном составе.

На следующем этапе необходимо определить число степеней свободы рассматриваемой системы, т.е. найти число параметров состояния защитного газа, выступающих в роли независимых переменных и подлежащих контролю. После этого необходимо найти требуемые расходные характеристики защитного газа и количественные величины параметров состояния, обеспечивающие работоспособность объекта.

Третий этап разработки должен включать в себя анализ кинетических особенностей рассматриваемой системы. В случае одновременного функционирования нескольких объектов должны быть учтены особенности их совместной работы. Основной задачей данного этапа следует считать не только определение методов контроля и мест установки индикаторов состояния системы, но формулирование требований к источнику защитного газа и быстродействию системы в целом.

На последнем этапе разработки требований необходимо выбрать аппаратное обеспечение системы контроля состава защитного газа, его расходных характеристик и независимых параметров. При этом должны быть окончательно регламентированы требования, предъявляемые к конструкции и испытаниям системы контроля, а также сформулированы необходимые требования к аппаратному оформлению средств сигнализации, управления и защиты объектов.

Рассмотрим основные особенности практической реализации каждого из этапов. В качестве теоретической основы построения первых двух этапов представленной методики может быть использовано правило фаз Гиббса. Известно [5], что общее число параметров, определяющих состояние неравновесной системы, равно $\Phi(K - 1) + H$, где Φ — число фаз, которые могут находиться в равновесии между собой, K — число компонентов в системе, H — число независимых параметров, определяющих физическое состояние фазы при ее заданном составе ($H \geq 2$). Если Φ фаз, из которых состоит термодинамическая система, находятся в равновесии друг с другом, то эти параметры уже не являются независимыми, а связаны $K(\Phi - 1)$ соотношениями. Таким образом, число степеней свободы равновесной термодинамической системы составляет $C = \Phi(K - 1) + H - K(\Phi - 1)$, т.е.

$$C = K + H - \Phi. \quad (1)$$

При отсутствии дополнительных факторов, определяющих физическое состояние фазы, уравнение (1) принимает вид

$$C = K - \Phi + 2. \quad (2)$$

В наиболее простом случае (при $K = 1$, $\Phi = 1$) согласно уравнению (2) имеем $C = 2$. Другими словами, для однозначной характеристики состояния объекта помимо состава фазы необходимо контролировать еще не менее двух параметров состояния, выступающих в роли независимых переменных. Для многокомпонентной газовой фазы при отсутствии дополнительных факторов и фазовых переходов в рамках применимости законов идеального газа получим

$$C = (K - 1) + 2 = K + 1. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что правило фаз Гиббса позволяет найти только число параметров (степеней свободы), определяющих состояние равновесной термодинамической системы, но не определяет самих параметров. Единственное ограничение состоит в том, что выбранные параметры должны быть действительно определяющими и независимыми.

Теоретически подобный выбор достаточно произволен, и все параметры следует признать равноправными. Однако на практике он должен осуществляться наиболее рационально с тем, чтобы выбранные параметры не только имели известную функциональную взаимосвязь, но и регистрировались простыми техническими средствами. Например, при выводе выражений (1)–(3) используется допущение, что все компоненты, входящие в состав фазы, известны. В этом случае состав фазы определяется количеством компонентов в ней. Эти количества, однако, не являются независимыми, поскольку их сумма равна полному количеству фаз. Поэтому состав фазы определяется не K , а $K - 1$ независимыми аргументами.

На стадии проектирования полное количество возможных компонентов защитного газа, как правило, неизвестно. Поэтому на практике выделяют основной компонент защитного газа и контролируют количественный состав только лимитируемых компонентов, т.е. тех компонентов, которые способны оказать существенное воздействие на поведение объекта и защитного газа. Все прочие вещества включают в состав основного компонента. Следует особо подчеркнуть, что при подобном подходе контроль полного количества компонентов защитного газа является обязательным и не может быть заменен дополнительным контролем какого-либо другого независимого параметра.

Таким образом, уже на начальных стадиях разработки следует провести условное разграничение определяющих и независимых параметров на параметры, подлежащие прямому и косвенному контролю.

В рамках принятых допущений к параметрам, подлежащим прямому контролю, наряду с полным количеством компонентов защитного газа и количественным составом лимитируемых компонентов следует также отнести количественные характеристики дополнительных факторов, определяющих воздействие рассматриваемого объекта на физическое состояние фазы при ее заданном составе. При наличии таких факторов в рамках применения законов идеального газа использование выражений (2) и (3) становится недопустимым, что обуславливает применение правила фаз Гиббса в виде

$$C = K - \Phi + 2 + H_{\Phi}, \quad (4)$$

где $H_{\Phi} = H - 2$ — число независимых параметров, определяющих воздействие рассматриваемого объекта на физическое состояние фазы при ее заданном составе.

Неправильное определение числа H_{Φ} может стать причиной многих ошибок. Так, для бинарной системы N_2-H_2O согласно выражению (3) имеем $C = 2 + 1 = 3$, что действительно справедливо для плоской границы раздела фаз. Однако если в рассматриваемом объекте может возникнуть дисперсная система (ввиду наличия пористой изоляции, пыли и т.п.), то без введения дополнительных ограничений применение выражения (3) некорректно. Действительно, поскольку присутствие дисперсной системы может оказать определяющее воздействие на начало конденсации влаги (на физическое состояние фазы H_2O), то $H_{\Phi} = 1$ и согласно выражению (4) имеем $C = 2 - 1 + 2 + 1 = 4$. При этом вводимый параметр должен характеризовать именно дисперсные свойства системы, например минимальный размер пор.

Если выбор параметров, подлежащих прямому контролю, произведен, то к разряду параметров, подлежащих косвенному контролю, относят оставшиеся независимые характеристики системы. При этом их определение допускает некоторую свободу действий, а именно контроль одного параметра может быть заменен контролем какого-либо другого параметра, имеющего однозначную взаимосвязь с первым параметром. Например, в случае применения уравнения (3) к параметрам косвенного контроля могут быть отнесены такие параметры состояния, как абсолютное давление и температура. Однако это не исключает возможности использования плотности и избыточного давления газа либо применение любых других определяющих комбинаций. Более того, во многих практических случаях подобные параметры регистри-

руют именно косвенным методом контроля. В частности, изменение давления в герметичном объекте, который имеет большую протяженность [3, 6], определяют через расходные характеристики защитного газа, подаваемого в него, т.е. через контроль перепада давлений (дифференциального давления) между источником защитного газа и объектом.

Таким образом, очевидно, что, несмотря на простоту выражений (1)–(4), к особенностям их практического применения нужно подходить очень внимательно.

На третьем этапе разработки, включающем в себя анализ кинетических особенностей рассматриваемой системы, необходим не только учет статических и динамических характеристик системы в различных режимах ее работы, но и всестороннее изучение физической кинетики неравновесных процессов, протекающих в системе. В первую очередь, это относится к застойным зонам продуваемых оболочек и к объектам, которые содержатся в герметичных оболочках, заполненных защитным газом под статическим избыточным давлением.

В подобных системах принципиально невозможно достичь абсолютной непроницаемости оболочки, и негерметичность системы становится источником загрязнения защитного газа. На первый взгляд может показаться, что негерметичность системы, работающей под избыточным давлением, влечет за собой только дополнительный расход защитного газа, но никак не изменяет его состав внутри оболочки системы. Однако известно [7], что при определенных условиях утечка защитного газа через неплотности оболочки сопровождается загрязнением защитного газа компонентами окружающей среды. Например, для стационарных условий газодинамический поток i_n лимитированного компонента в канале утечки длиной x_k определяется произведением его концентрации $c(x)$ на скорость истечения газа u . Если концентрация c_0 лимитированного компонента в окружающей среде больше, чем в канале ($c_0 > c(x)$), то гидродинамический поток компенсируется противоположно направленным диффузионным потоком $i_d = -Ddc/dx$. В результате относительное уменьшение концентрации на входе в канал (внутри оболочки) составит

$$\frac{c(x_k)}{c_0} = \exp\left(-\frac{ux_k}{D}\right), \quad (5)$$

где D — коэффициент диффузии лимитированного компонента в защитном газе.

Результаты расчета относительного уменьшения концентрации смеси H_2O —воздух в идеальном круглом канале диаметром $0,2 \dots 2$ мкм

при перепадах давления $10 \dots 10^6$ Па и температуре 20°C представлены в таблице.

Наиболее заметно преобладающее влияние процессов переноса начинает проявляться при наличии микротечей, характерный размер каналов которых сопоставим с длиной свободного пробега молекул защитного газа [5], а парциальное давление загрязняющего компонента в защитном газе мало (менее 10 Па) [8]. По данным работы [8] при наличии микротечи в трубопроводе с аргоном даже при давлении 1 МПа наблюдалось его загрязнение компонентами атмосферного воздуха (кислород, влага, азот). При этом повышение объемной доли кислорода в аргоне при расходе 5 л/ч достигало $2 \cdot 10^{-7}$.

D , мкм	P , Па									
	10	100	1000	10000	40000	50000	100000	1000000		
0,2	0,9999	0,9997	0,9970	0,9704	0,8868	0,8605	0,7406	0,0496		
0,4	0,9998	0,9988	0,9880	0,8868	0,6185	0,5485	0,3008	$6,1 \cdot 10^{-6}$		
0,6	0,9997	0,9973	0,9733	0,7631	0,3392	0,2589	0,0670	$1,8 \cdot 10^{-12}$		
0,8	0,9995	0,9952	0,9530	0,6185	0,1463	0,0905	0,0081	$1,3 \cdot 10^{-21}$		
1,0	0,9992	0,9925	0,9276	0,4720	0,0496	0,0234	0,0005	$2,5 \cdot 10^{-33}$		
1,2	0,9989	0,9892	0,8975	0,3392	0,0132	0,0044	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-47}$		
1,4	0,9985	0,9853	0,8631	0,2296	0,0027	0,0006	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-64}$		
1,6	0,9980	0,9809	0,8251	0,1463	0,0004	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-84}$		
1,8	0,9975	0,9759	0,7841	0,0878	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$2,3 \cdot 10^{-106}$		
2,0	0,9970	0,9704	0,7406	0,0496	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-14}$	$3,9 \cdot 10^{-131}$		

К локальному повышению концентрации лимитирующих компонентов внутри системы могут приводить также другие процессы переноса [9].

Определяющее влияние процессов переноса неоднократно экспериментально регистрировалось авторами в условиях содержания кабельных линий городских телефонных сетей под избыточным воздушным давлением. В данном случае воздух с абсолютной влажностью не более $0,3 \text{ г/м}^3$ должен подаваться расходом до $0,04 \text{ л/мин}$ в герметичную оболочку кабеля при давлении $0,04 \dots 0,05 \text{ МПа}$ [6]. Контролируя абсолютную влажность на входе в оболочку (входной штуцер в помещении ввода кабелей), можно убедиться, что влажность воздуха, выпускаемого из оболочки, превышает влажность воздуха, подаваемого в нее. При этом в процессе непрерывной эксплуатации кабеля указанное превышение увеличивается. Например, если в начале эксплуатации кабеля относительное изменение влажности не превышало 20% , то после года эксплуатации было зафиксировано, что абсолютная влажность в потоке воздуха, выходящем из кабельной оболочки, более чем в три раза превышает абсолютную влажность воздуха, подаваемого в нее. Повторение эксперимента на кабелях нескольких типов в различных эксплуатационных условиях, в том числе и на негерметичных кабелях (с расходом воздуха до 1 л/мин), показало, что качественная картина повышения концентрации влаги как легкого компонента атмосферного воздуха в более теплой части кабельной оболочки сохранялась.

Представленные примеры наглядно показывают, что в реальных условиях можно ограничиться контролем лимитированных компонентов защитного газа в его источнике только в том случае, если определены условия, при которых влиянием кинетических свойств рассматриваемой системы можно обоснованно пренебречь. В противном случае контроль должен осуществляться непосредственно в определяющих точках самого объекта.

Это также относится к таким параметрам защитного газа, как расход, давление и температура, с той лишь разницей, что в этом случае определяющими будут газодинамические процессы системы.

Переходя к рассмотрению последнего этапа разработки требований, необходимо уточнить, что аппаратурное оформление единичного объекта в обычных климатических условиях, как правило, не вызывает затруднений. Современной промышленностью налажен серийный выпуск необходимых средств контроля параметров защитного газа, которые обладают требуемыми техническими характеристиками (диапазоном измерения, точностью, быстродействием и др.). Трудности

могут появиться лишь ввиду специфики практического применения этих средств. Например, согласно ГОСТ Р 51330.3–99 величина минимального избыточного давления в оболочке может составлять 25 Па ($\sim 2,5$ мм. вод. ст.). Объективный контроль (с учетом погрешности измерений) такой величины требует использования средств измерения давления из области микроманометрии и практически исключает возможность применения манометров и датчиков области средних давлений, верхний предел измерения которых обычно не опускается ниже 10 кПа. При выборе средств измерения расхода защитного газа основные трудности могут быть связаны не только с малой величиной контролируемого расхода (менее 0,01 л/мин) и широким диапазоном ее возможного изменения (более чем на два порядка), но и с необходимостью контроля направления движения защитного газа.

Ситуация значительно усложняется, когда одновременно необходимо контролировать несколько десятков или даже сотен объектов, подключенных к одному или нескольким источникам защитного газа [3, 6, 9]. В этом случае необходимо исследование возможностей контроля параметров защитного газа непосредственно в его источнике, поскольку простое тиражирование системы контроля единичного объекта, как правило, приводит к неоправданным затратам. При этом главной задачей проводимых исследований следует признать определение четких границ применимости такого метода контроля.

Необходимость дистанционного контроля нескольких десятков источников защитного газа, эксплуатирующихся в различных зданиях, зачастую удаленных друг от друга на значительные расстояния (до десятков километров) и обслуживающих несколько тысяч объектов [3, 6], может принципиально изменить всю систему контроля. В таких условиях влияние субъективных факторов становится настолько большим, что необходимость создания автоматизированной системы контроля практически не вызывает сомнения. Очевидно, что при создании подобной автоматизированной системы все особенности аппаратурного оформления средств контроля, сигнализации, управления и защиты объектов должны учитываться на ранних стадиях проектирования.

В заключение следует особо подчеркнуть, что рассмотренные основные особенности практической реализации методики разработки требований, предъявляемых к защитному газу и контролю его параметров, позволяют исключить из процесса разработки только грубые ошибки, но не исключают необходимости проведения дополнительных исследований исходя из условий конкретной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О х р а н а труда в машиностроении / Под ред. Е.Я. Юдина, С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1983. – 432 с.
2. П р а в и л а устройства электроустановок. – СПб.: ДЕАН, 2001. – 928 с.
3. Р у к о в о д с т в о по эксплуатации линейно-кабельных сооружений местных сетей связи. – М.: УЭС Госкомсвязи России, 1998. – 291 с.
4. Б е з о п а с н о с т ь жизнедеятельности / Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1999. – 448 с.
5. С и в у х и н Д. В. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – 592 с.
6. Р у к о в о д с т в о по содержанию кабельных линий городских телефонных сетей под избыточным воздушным давлением. – М.: Радио и связь, 1982. – 72 с.
7. Т р е н д е л е н б у р г Э. Сверхвысокий вакуум. – М.: Мир, 1966. – 371 с.
8. Е г о р о в В. А., З е л е в е н с к и й Я. Д., Ш и т и к о в В. В. Промышленное производство газов для метрологических целей. – М.: НИИТЭХИМ, 1987. – 49 с.
9. P r i c e J. It's raining in our cables // Outside Plant. – 1998 (June). – P. 44–47.

Статья поступила в редакцию 1.07.2003

Геннадий Петрович Павлихин родился в 1941 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Экология и промышленная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана, проректор МГТУ им. Н.Э. Баумана по международным связям. Автор 200 научных работ в области промышленной экологии и криогеники.

G.P. Pavlikhin (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), professor of “Ecology and Industrial Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University, vice-rector for international relations of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 200 publications in the field of industrial ecology and cryogenics.

Владимир Анатольевич Львов родился в 1956 г., окончил в 1980 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Заведующий лабораторией НИИ “Энергетическое машиностроение” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области промышленной чистоты и криогеники.

V.A. Lvov (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1980. Head of laboratory of the research institute “Power Engineering” of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of industrial cleanness and cryogenics.

Александр Владимирович Бурлаков родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Экология и промышленная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

A.V. Burlakov (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Post-graduate of “Ecology and Industrial Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University.