

*Ю.П. Ключка, д.т.н., ст. научн. сотр., нач. НИЛ МЧС, НУГЗУ,
А.И. Тарариев, адъюнкт НИЛ МЧС, НУГЗУ*

АНАЛИЗ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ГАЗА «ПРОПАН-БУТАН»

Рассмотрены чрезвычайные ситуации, связанные с системами хранения газа «пропан-бутан», проанализированы пожаровзрывоопасные характеристики данных систем. Рассмотрены механические и термодинамические характеристики систем хранения, проведен анализ изученности вопроса ПВО данных систем.

Ключевые слова: «Пропан-бутан», баллон, пожаровзрывоопасные характеристики.

Постановка проблемы. В настоящее время сжиженные углеводородные газы (СУГ), в частности, пропан-бутановые системы широко используют, ввиду их значительного энергетического потенциала. Несмотря на широкое использование СУГ и довольно глубокую проработку в вопросах их получения, использования и хранения [1, 2], открытыми остаются вопросы о пожаровзрывоопасности этих систем, в частности, во внештатных ситуациях и в условиях ЧС.

Анализ последних исследований и публикаций. СУГ – представляют собой смесь химических соединений, состоящую в основном из водорода и углерода с различной структурой молекул. Основными компонентами СУГ являются пропан и бутан, в виде примесей в них содержатся более легкие углеводороды (метан и этан) и более тяжелые (пентан) [1, 2]. Пропан-бутан не имеет запаха, поэтому в него, в целях безопасности населения, добавляют одоранты (например, этилмеркоптал), содержащие пахучие вещества [1].

Анализ литературы показал, что в быту данные газы используются предпочтительно для систем отопления в жилых домах, что обуславливает повышенную опасность в связи с вытоком газа в замкнутом пространстве с возможной детонацией, а также на автотранспорте в качестве топлива.

Хранение большой массы природного газа под давлением близким к атмосферному, выгодно отличается от способа хранения газов в резервуарах высокого давления при температуре окружающей среды, поскольку изотермическое хранилище СУГ, как и любой другой объект хранения и переработки горючего газа, является потенциально пожаровзрывоопасным объектом [3].

На данный момент системы хранения пропано-бутановых сме-

сей существуют предпочтительно в:

- системах сжиженного продукта под давлением, близким к атмосферному;
- системах хранения газов в резервуарах высокого давления при температуре окружающей среды.

Для бытовых систем используются баллоны (табл. 1), которые заполняются газом на 85% его объема [3-5].

Табл. 1. Масса газа в баллонах разной ёмкости

Наименование баллона	Объем баллона 85%, л	Расчетное значение массы пропан-бутан, кг	Масса пропан-бутана, кг	Масса пустого баллона, кг
Баллон бытовой 5 л	4,25	2,3	2	4
Баллон бытовой 12 л	10,2	5,6	5	6
Баллон бытовой 27 л	22,95	12,62	11,4	14,5
Баллон бытовой 50 л	42,5	23,375	21,2	22

Анализ таблицы показывает, что значения массы газа, приводимые заводом, ниже тех, которые мы можем получить расчетным путем, это обусловлено тем, что баллон рассчитан на давление 1,6 МПа, и закачивая в него большие объемы (массы) газа существует риск превышения данного значения, в силу физико-химических свойств пропан-бутановой смеси. В таблице 2 приведены параметры газовых смесей «пропан-бутан» в зависимости от времени года.

Табл. 2. Процентное соотношение газов «пропан-бутан» при их использовании в различных климатических условиях [3-5]

Период	Соотношение пропана и бутана, %	Максимальное давление насыщенных паров
Зима	60/40	При температуре -20°C – не менее 0,16 МПа
Лето	40/60	При температуре +45°C – не более 1,6 МПа

Данные системы являются пожаровзрывоопасными по причине того, что при испарении 1л сжиженного газа образуется около 250 л газообразного [4]. Таким образом, даже незначительная утечка СУГ может быть опасной, так как объем газа при испарении увеличивается в 250 раз. Плотность газовой фазы в 1,5–2,0 раза больше плотности воздуха. Этим объясняется тот факт, что при утечках газ с трудом рас-

сеивается в воздухе, особенно в закрытом помещении. Пары его могут накапливаться в естественных и искусственных углублениях, образуя взрывоопасную смесь.

При взрыве пропан-бутана (рис. 1) помимо основных факторов пожара (открытый огонь, повышенная температура окружающей среды, токсичные продукты горения и т. д.) проявляются вторичные факторы: волна сжатия, образующаяся при взрыве баллона и влекущая за собой разрушение зданий или отдельных их частей, разрушение (или повреждение) наружного и внутреннего водопроводов, пожарной техники, стационарных средств тушения, технологического оборудования, возникновение новых очагов пожаров и взрывов [4]. Кроме того, при взрыве баллона пропан-бутана в очаге пожара возможно образование «огненного шара» диаметром 10 м [4].



Рис. 1. Последствия взрыва систем хранения газа пропан-бутан

Аварийные ситуации, вызванные выбросом СУГ, имеют ряд характерных особенностей, которые в значительной степени обусловлены физико-химическими свойствами газа. При аварийных разливах и выбросах СПГ появляются дополнительные по сравнению с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями опасные факторы: быстроразвивающиеся пожаровзрывоопасные облака, распространяющиеся на большие расстояния; высокая среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени (для пожара пролива СПГ 220 кВт/м^2 [5]); высокотемпературный горящий факел, возникающий при истечении паровой и (или) жидкостной фазы СПГ.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является провести анализ: характеристик газа «пропан-бутан» и системы в целом; изученности вопроса пожаровзрывоопасности систем такого типа при воздействии внешних источников тепла.

Пожаровзрывоопасность систем хранения сжиженного газа определяется следующими параметрами: вероятностью повреждения резервуара (баллона) и утечки продукта, ее количественными характеристиками; интенсивностью испарения сжиженного газа с поверхности; скоростью смешения его паров с воздухом и образованием взрывоопасной смеси в зависимости от метеорологических условий и расстояния от места испарения; характерными размерами технологического оборудования; вероятностью появления источника зажигания; характеристиками пожара или взрыва.

Источники зажигания могут быть механическими (фрикционные искры), термические (нагретые поверхности), электрические (короткое замыкание).

На рис. 2 приведены полученные зависимости теплоты сгорания газа «пропан-бутан» и массы газа в зависимости от объемного количества пропана.

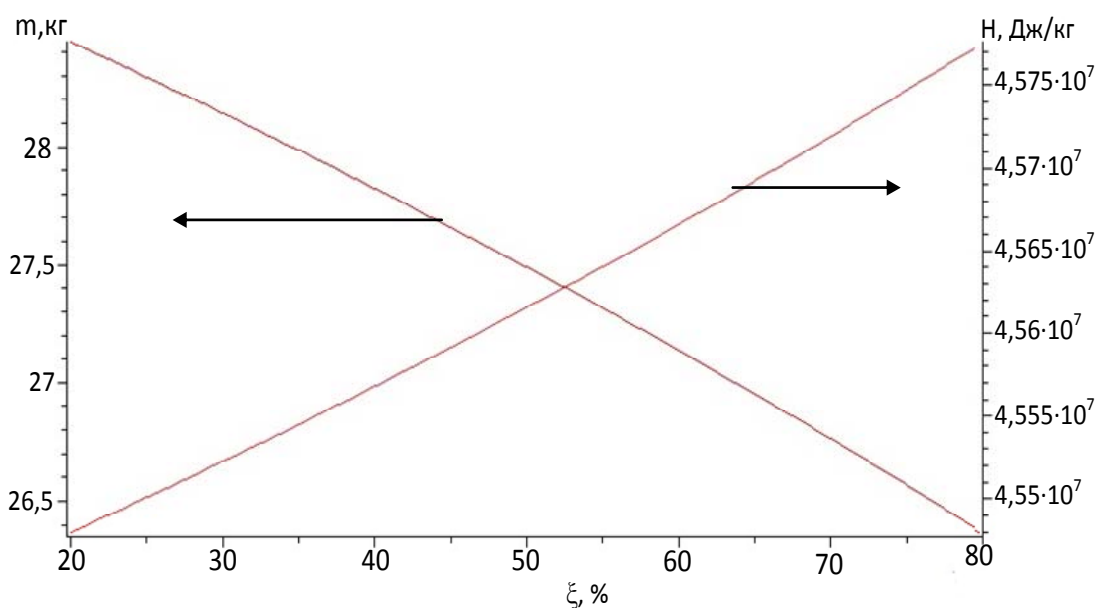


Рис. 2. Зависимости теплоты сгорания газа «пропан-бутан» и массы газа в зависимости от объемного количества пропана

Анализ рисунка показывает, что увеличение доли пропана влечет за собой уменьшение общей массы газа и увеличению теплоты его сгорания.

Кроме того, при воздействии на баллон с газом источников тепла следует учитывать, что в баллоне может находиться разное количество газа, и, соответственно, система имеет разную теплоёмкость

$$c = c_{sb} \cdot m_{sb} + m_{p-b} (c_p \cdot \mu_p + c_b \cdot (1 - \mu_p)), \quad (1)$$

где c_{sb} – теплоёмкость стали баллона; m_{sb} – масса баллона; c_p – теплоёмкость газа пропан; μ_p – объемный процент содержания газа пропан в баллоне; c_b – теплоёмкость газа бутан; m_{p-b} – масса газа «пропан-бутан» в баллоне.

Так, на рис. 3 приведены полученные зависимости теплоемкости системы от степени ее заполнения.

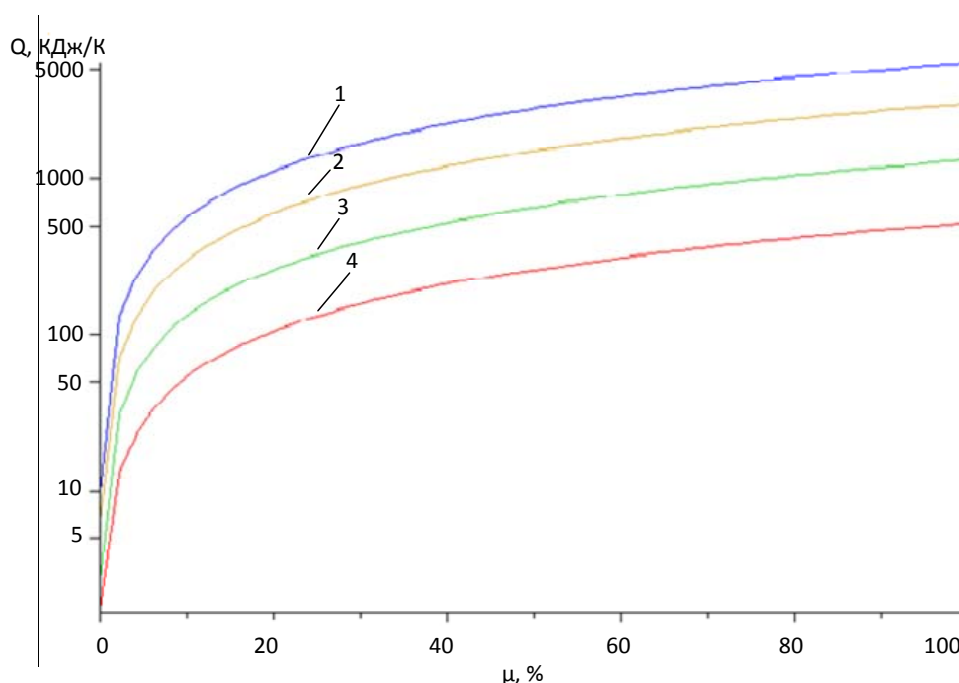


Рис. 3. Зависимость теплоемкости системы с газом «пропан-бутан» от степени ее заполнения: 1 – баллон объемом 50 л; 2 – баллон объемом 27 л; 3 – баллон объемом 12 л; 4 – баллон объемом 5 л

Анализ рисунка показывает, что теплоемкость системы может увеличиваться более чем в 100 в зависимости от степени заполнения.

В соответствии с [6] расчёт избыточного давления взрыва (рис. 4) для систем такого типа производится в соответствии с выражением

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_o \cdot Z}{V \cdot \rho_n \cdot C_p \cdot T_o} \cdot \frac{1}{K_n}, \quad (2)$$

где m – масса ГГ; H_T – теплота сгорания; P_o – начальное давление; Z – коэффициент участия ГГ во взрыве; V – свободный объем помещения; ρ_n – плотность воздуха до взрыва при начальной температуре T_o ; C_p – теплоёмкость воздуха; T_o – начальная температура.

Анализ рисунка показывает, что избыточное давление взрыва может изменяться в диапазоне 5% в зависимости от состава смеси «пропан-бутан».

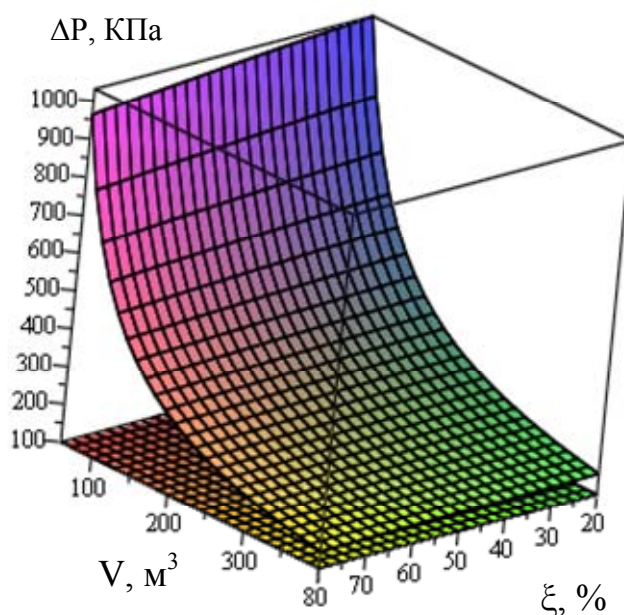


Рис. 4. Зависимость избыточного давления взрыва газа «пропан-бутан» в системах хранения от объемного содержания пропана (ξ) и свободного объема помещения (V)

Исходя из анализа, ПВО систем хранения газа «пропан-бутан» можно отобразить в следующем виде (рис. 5).

На сегодняшний день существует ряд работ посвященных хранению газов, их получению, использованию, оценке последствий взрывов и т.д. Например, в работе [9] приводятся исследования, посвященные модернизации автомобильной криогенной цистерны для доставки природного газа потребителям в сжиженном виде. В автомобильной цистерне для транспортирования сжиженного природного газа, содержащей основную оболочку, установлена и закреплена дополнительная оболочка, а пространство между основной и дополнительной оболочкой используют для перевозки жидкостей, имеющих температуру кипения выше температуры окружающего воздуха, и температуру плавления, сопоставимую с температурой кипения перевозимого сжиженного природного газа, а пространство между дополнительной оболочкой и сосудом заполнено изолирующим материалом [9, 10]. Для расчета необходимого количества хладоносителя и определения теплоемкости хладоносителя в жидком состоянии использовалось уравнение Роулинсона-Бонди [9]. Однако в данной работе рассматривается стационарный случай нагрева цистерны с учетом равномерно распределенной тепловой нагрузки.

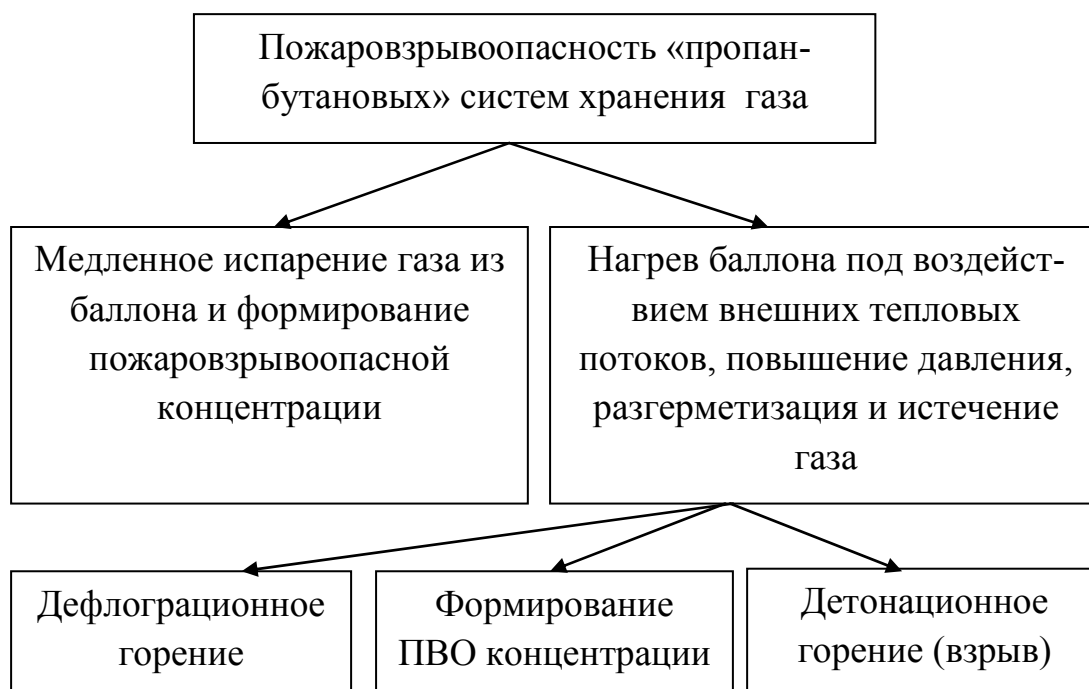


Рис. 5. ПВО систем хранения газа «пропан-бутан»

В работе [11] рассматриваются методологические основы применения модели определения уровня допустимого риска эксплуатации бесшовных стальных баллонов, предназначенных для хранения и эксплуатации газов. Одной из опасных ситуаций, которая рассматривается, является воздействие пожара на баллон, в результате чего происходит повышение давления. Однако изложенный математический аппарат не позволяет учесть условий пожара, в полной мере механических и геометрических характеристик баллона, и как следствие, не позволяет определить изменение давления в условиях пожара и иные параметры.

В работе [12] приводятся математические модели по расчету систем хранения водорода в жидком виде с учетом наличия газообразной и жидкой фазы.

В частности, для определения количества тепла необходимого для разрушения бака и создания ПВО концентрации использовалось следующее выражение

$$\Delta H = H_{pk} - (H_{GG} \cdot m_{GGH_2} + H_L \cdot m_{LH_2}), \quad (3)$$

где m_{GGH_2} , m_{LH_2} – масса газообразной и жидкой фаз газа; H_{pk} – энтальпия газа после критической точки; H_L , H_{GG} – энтальпия жидкой и газообразной фазы.

Однако данные модели не позволяют определять характеристики для многокомпонентных фаз, в частности, для «пропан-бутана».

В [13] приведены подходы к решению задач прочности обечаек (баллонов) при повышенных температурах, однако данный ГОСТ не учитывает неравномерность нагрева конструкции, возникновения дополнительных напряжений и, как следствие, изменение времени до разрушения данных систем под воздействием внешних источников тепла.

Таким образом, анализ литературы показал, что на сегодняшний день отсутствуют математические модели, позволяющие в полной мере провести оценку ПВО характеристик систем хранения газа «пропан-бутан» в условиях воздействия внешних тепловых потоков.

Выводы: В результате проведенной работы:

- рассмотрены чрезвычайные ситуации связанные с системами «Пропан-бутан»;
- проанализированы пожаровзрывоопасные характеристики;
- рассмотрен механизм и термодинамические характеристики систем хранения;
- проведен анализ изученности вопроса ПВО данных систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила безопасности систем газоснабжения Украины, ДНАОП 0.00-1.20-98. – [Действующий от 1997-10-01]. – К.: Госнадзорхрантруда Украины, 1997. – IV, 73 с.

2. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, ДНАОП 0.00-1.07-94*. [Действующий от 1994-10-18]. – К. : Госнадзорхрантруда Украины, 1994. – IV, 137 с.

3. Михайлюк О.П. Теоретичні основи пожежної профілактики технологічних процесів та апаратів: Задачник/ О.П. Михайлюк, В.М. Сирих. – Харків: ХЛІВ, 1998. – 119 с.

4. Баратов А.Н. Справочник пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Тома 1/ А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук, 1990. – 496 с.

5. Баратов А.Н. Справочник пожаро-взрывобезопасность веществ и материалов. Тома 1/ А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук, 1990. – 384 с.

6. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. НАПВ Б.03.002-07. – [Действующий от 2007-12-03]. – Наказ МНС України № 833. – 40 с.

7. Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта. Технические условия ГОСТ 27578-87. – [Действующий от

2001-07-15]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – IV, 18 с. – (Национальный стандарт Украины).

8. Вильяме А.Ф. Сжиженные нефтяные газы: / Ломм В.Л. – Пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 399 с.

9. Разработка конструкции автомобильной цистерны для доставки сжиженного природного газа. / [Электронный ресурс]/ О.Н. Медведева, В.О. Фролов // Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Medvedeva/Medvedeva_1.pdf.

10. Патент № 115309 РФ. Цистерна для транспортировки сжиженного природного газа / Медведева О.Н., Фролов В.О. Заявл.: 21.07.2011; опубл.: 27.04.2012.

11. Модель для определения значимости риска эксплуатации бесшовных баллонов. / [Электронный ресурс]/ В. В. Толмачев, И.Н. Федорова // Режим доступа: <http://asms.ru/kompet/2012/nov-dec/tolmachev42.pdf>.

12. Ключка Ю.П. Определение параметров нагрева жидкого водорода в баке автомобиля / Ю.П. Ключка // Науковий вісник будівництва: збірник наукових праць. – Харків: ХНУБА, 2012. – Вип. 68. – С. 348-352.

13. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность – [Действующий от 1989-07-15]. – М. 1989. – IV, 18 с.

Yu.P. Kluchka, A.I. Tarariev

Fire and explosion hazard analysis of gas storage "lpg"

Considered an emergency situation related to the storage of gas, "propane-butane", analyzes the characteristics of these systems, fire and explosion hazard. We consider the mechanical and thermodynamic characteristics of storage systems, the analysis of the Study of the Defense Information Systems.

Keywords: Propane and butane, fire and explosion hazard characteristics.

Ю.П. Ключка, А.І. Тарарієв

Аналіз пожежевибухонебезпеки систем зберігання газу «пропан-бутан»

Розглянуто надзвичайні ситуації пов'язані з системами зберігання газу «пропан-бутан», проаналізовано пожежевибухонебезпечні характеристики даних систем. Розглянуто механічні та термодинамічні характеристики систем зберігання, проведено аналіз вивченості питання ПВН даних систем.

Ключові слова: «Пропан-бутан», балон, пожежевибухонебезпечні характеристики.