

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ С ГАЗОМ "ПРОПАН-БУТАН" С УЧЕТОМ ИХ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНЫХ СВОЙСТВ

В результате проведенной работы проанализирована изученность вопроса ПВО композитных баллонов с газом "пропан-бутан". Для композитных баллонов получено аналитическое выражение, которое позволит определять время достижения критических температур для систем хранения газа при воздействии на них тепловых потоков.

Ключевые слова: пропан-бутан, пожаровзрывоопасные характеристики, композитные баллоны.

Постановка проблемы. Несмотря на широкое использование сжиженных углеводородных газов и довольно глубокую проработку в вопросах их получения, использования и хранения [1], открытыми остаются вопросы о пожаровзрывоопасности этих систем, в частности, во внештатных ситуациях и в условиях ЧС.

Предварительный анализ показал, что зависимость давления насыщенных паров пропана и бутана от температуры можно представить в следующем виде (средняя погрешность аппроксимации не более 1,5%)

$$P_B = 4,9119 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 3,413 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 8,0225 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,3574, \quad (1)$$

$$P_P = 8,0082 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 4,8045 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 9,794 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,7576, \quad (2)$$

где P_B, P_P – давление бутана, пропана; T – температура газов.

Тогда, учитывая первый закон Рауля [2], зависимость давления смеси от температуры можно представить в виде рис. 1 [3].

Анализ рисунка показывает, что при эксплуатации таких систем необходимо минимизировать тепловые потоки через стенку баллона, во избежание разрушения, а также пытаться увеличивать прочность данных систем за счет использования композиционных материалов.

В связи с этим определение пожаровзрывоопасных свойств баллонов из композиционных материалов для сжиженных углеводородных газов является актуальной проблемой. При этом следует учитывать практически полное отсутствие нормативной базы для такого типа изделий.

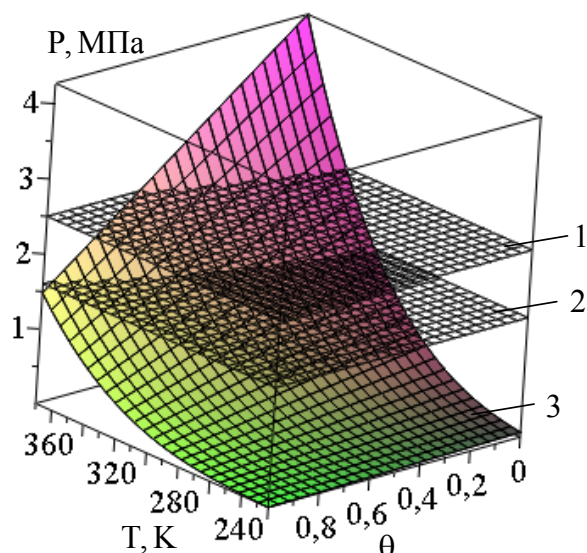


Рис. 1. Зависимость давления пропан-бутановой смеси от температуры и долевой массы бутана [3]: 1 – $P=2,5$ МПа (давление поверки); 2 – $P=1,6$ МПа (рабочее давление); 3 – давление смеси

Анализ последних достижений и публикаций. На сегодняшний день наблюдается тенденция перехода от металлических газовых баллонов, к композитным [4, 5].

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики композитных баллонов для сжиженных газов.

Табл. 1. Сравнительные характеристики газовых баллонов для сжиженных газов [6]

Свойство	Композитный баллон	Металлический баллон	Металлокомпозитный баллон
Лёгкость (вес)	Лёгкий (на 70% легче металлического)	Тяжёлый	Средний вес
Прозрачность	Виден уровень газа для контроля	Непрозрачный	Непрозрачный
Антикоррозийность	Нет коррозии	Коррозийность с наружной и с внутренней стороны	Коррозийность с внутренней стороны (металлический лейнер)
Ударостойкость	Повышенная	Малая	Средняя
Искрообразование	Материал корпуса исключает искрообразование	Повышенная степень искрообразования, в частности, при транспортировке	Материал корпуса исключает искрообразование

Анализ таблицы показывает, что по всем потребительским качествам композитные баллоны являются не хуже, чем металлические.

Кроме того, неправильное соотношение газов при заправке, а также заправка сверх дозванного объема может привести к разгерметизации баллонов и возникновению пожаровзрывоопасной ситуации [7].

В работе [8] проведены исследования по воздействию открытого пламени и огнестрельных выстрелов на композитные баллоны со сжиженным газом "пропан-бутан". В результате исследований установлено, что в результате возникновения огнестрельных отверстий полное разрушение не происходит, а протекает динамичное истечение газа и охлаждение конструкции баллона. При воздействии открытого пламени, происходит плавление внешней отделки баллона, а также медленное истечение газа, что связано с наличием предохранительного клапана.

В работах [9, 10] проанализированы вопросы каскадного развития аварии с выбросом опасных веществ, в том числе и пропан-бутана. На основе зарубежных и отечественных данных рассмотрены условия инициирования каскадного развития аварии воздействием теплового излучения огненного шара.

В работе [11] рассмотрено изготовление металлокомпозитных баллонов высокого давления. Приведены некоторые особенности технологии изготовления и характеристики баллонов.

В работе [12] рассмотрена расчетная схема стенки баллона при воздействии повышенных температур. При этом предполагалось, что на стенки баллона оказывается равномерное воздействие по всей поверхности. На рис. 2 приведена данная расчетная схема.

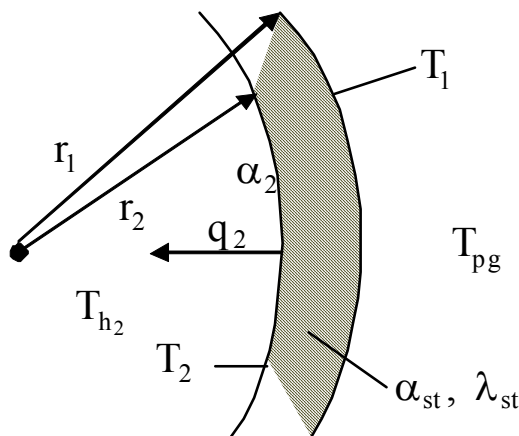


Рис. 2. Расчетная схема нагрева стенки баллона и водорода в нем [12]: α_{st} , λ_{st} – коэффициент температуропроводности и теплопроводности материала баллона; T_{h_2} , T_{pg} – температура водорода и продуктов горения (зависит от материалов, которые участвуют в процессе горения); r_1 , r_2 – внешний и внутренний радиус баллона; T_1 , T_2 – температура внешней и внутренней стенки баллона; α_2 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки баллона к водороду; q_2 – тепловой поток от внутренней стенки

Исходя из данного рисунка в работе [12] уравнение теплопроводности для стенки баллона записано в следующем виде

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) + \frac{\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau)}{r} \right), \quad (3)$$

где α – коэффициент температуропроводности; $T(r, \tau)$ – значение температуры на расстоянии r от центра баллона в момент времени t .

Далее приняты граничные условия первого рода на внешней и третьего рода на внутренней стенке баллона. Тогда можно записать

$$T_1 = T_{pg}; \quad (4)$$

$$\lambda_{st} \frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau) \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 (T_2 - T_{h_2}). \quad (5)$$

На основе выражений (1-3) в [12] приведены зависимости температуры водорода и стенки баллона от времени с учетом зависимости теплопроводности и температуропроводности материала стенки баллона от температуры и без их учета.

В результате было установлено, что учет зависимости теплопроводности и температуропроводности от температуры стенки баллона, практически не влияет на скорость прогрева водорода в баллоне (погрешность около 2%). Кроме того установлено, что при режимах изменения температуры при пожаре, близких к "стандартному", распределение температуры в стенке может быть описано прямолинейной зависимостью.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является аналитическое описание времени достижения температуры газа в баллоне, при воздействии температуры на него в соответствии со стандартной температурной кривой, для различных параметров системы.

В процессе развития пожара происходит изменение температуры. При этом стандартный температурный режим пожара можно описать в виде [13, 14]

$$T_{li} = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + T_0 + 273, \quad (6)$$

где T_0 – начальная температура в помещении; τ – длительность пожара в мин.

Учитывая, что теплоемкость композитных баллонов существенно меньше, нежели газа "пропан-бутан" в баллоне [1, 12], то изменение те-

плосодержания данного баллона с газом Q_i можно записать в виде

$$Q_i = (T_{2i} - T_0) c_{gi} m_{gi}, \quad (7)$$

где c_{gi}, m_{gi} – теплоемкость и масса газа в i -ой системе; T_{2i} – температура газа в i -ой системе в процессе воздействия тепловых потоков.

Количество тепла Q_{pi} , которое передается газу через стенку сосуда за время τ_i можно записать в виде

$$Q_{pi} = \int_0^{\tau_i} \frac{\lambda_i (T_{1i} - T_{2i}) S_i}{\delta_i} d\tau, \quad (8)$$

где λ_i, S_i, δ_i – теплопроводность стенок, площадь и толщина стенок сосуда в i -ой системе; T_{1i} – температура газа на внешней стенке в i -ой системе в процессе воздействия тепловых потоков.

Учитывая, что

$$Q_{pi} = Q_i, \quad (9)$$

то можно записать

$$\int_0^{\tau_i} \frac{\lambda_i (T_{1i} - T_{2i}) S_i}{\delta_i} d\tau = (T_{2i} - T_0) c_{gi} m_{gi}. \quad (10)$$

В результате преобразований (11)–(13), с учетом (4), получим выражение (14), которое позволит определять время достижения критических температур для систем хранения газа в композитных баллонах при воздействии тепловых потоков при пожаре

$$\frac{\lambda_i S_i}{\delta_i} \int_0^{\tau_i} (T_{1i} - T_{2i}) d\tau = (T_{2i} - T_0) c_{gi} m_{gi}, \quad (11)$$

$$\int_0^{\tau_i} T_{1i} d\tau - \int_0^{\tau_i} T_{2i} d\tau = (T_{2i} - T_0) \frac{c_{gi} m_{gi} \delta_i}{\lambda_i S_i}, \quad (12)$$

$$T_{2i} \frac{c_{gi} m_{gi} \delta_i}{\lambda_i S_i} + \int_0^{\tau_i} T_{2i} d\tau = \int_0^{\tau_i} T_{1i} d\tau + T_0 \frac{c_{gi} m_{gi} \delta_i}{\lambda_i S_i}, \quad (13)$$

$$T_{2i} A_i + \int_0^{\tau_i} T_{2i} d\tau = 345 \int_0^{\tau_i} \lg(8 \cdot \tau + 1) d\tau + T_0 (A_i + \tau_i), \quad (14)$$

где $A_i = \frac{c_{gi} m_{gi} \delta_i}{\lambda_i S_i}$.

Выводы. В результате проведенной работы проанализирована изученность вопроса ПВО композитных баллонов с газом "пропан-бутан". Для композитных баллонов получено аналитическое выражение, которое позволит определять время достижения критических температур для систем хранения газа в композитных баллонах при воздействии на них тепловых потоков. Кроме того, путем внесения изменений в выражение (12) можно учитывать не только стандартный температурный режим, но и иные аналитические зависимости для других пожарных нагрузок. Даная зависимость может быть использована для построения математической модели по описанию ПВО характеристик композитных баллонов для сжиженных газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключка Ю. П. Анализ пожаровзрывоопасности систем хранения газа "пропан-бутан" / Ю.П. Ключка, А.И. Тарариев // Проблемы пожарной безопасности. – 2013. – Вып. 34. – С. 98-106.
2. Вильяме А.Ф. Сжиженные нефтяные газы / Ломм В.Л. – Пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 399 с.
3. Ключка Ю.П. Оценка влияния состава пропан-бутановой смеси газов на ее свойства / Ю.П. Ключка, А.И. Тарариев // Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія та практика): Збірник матеріалів Всеукраїнської науково-практичної конференції. Частина 2. – Харків, НУЦЗУ, 2014. – С.84 – 85.
4. Одинадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2013. – 214 с.
5. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 21. – 202 с.
6. Бытовые баллоны. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.autocomponent.info/bitovie-balloni/blog.html>.
7. Особенности заправки техники газом пропан-бутан. Тест на взрыв. [Електронний ресурс] // Режим доступу: http://td-pp.ru/osobennosti_zapravka_propanom.html.
8. Композитные газовые баллоны. Тест на взрыв. [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=cvYTntyVeA0>.
9. Азаров Н.И. Предупреждение промышленных аварий на основе директив Севезо / Азаров Н.И., Давидюк О.В., Лисанов М.В. //

Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 12. – С. 42-47.

10. Азаров Н.И. Анализ возможности каскадного развития аварии на взрывопожароопасных объектах / Азаров Н.И., Давидюк О.В., Лисанов М.В. // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – №5. – С. 42-47.

11. Семенищев С.П. Изготовление металлокомпозитных баллонов / С.П. Семенищев, В.П. Глухов, П.П. Мерзляков, О.В. Килина // Транспорт на альтернативном топливе. – 2013. – № 3 (33). – С. 19-21.

12. Ключка Ю.П. Определение времени разрушения баллона с водородом, обусловленного изменением температурных параметров окружающей среды / Ю.П. Ключка, В.И. Кривцова, В.Г. Борисенко // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2010. – №27. – С. 83-95.

13. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Ройтман В.М.– М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. – 382 с.

14. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

Ю.П. Ключка, А.І. Тарарієв, М.В. Болотських

Характеристики композитних балонів з газом «пропан-бутан» з урахуванням їх пожежовибухонебезпечних властивостей

В результаті проведеної роботи проаналізована вивченість питання ПВН композитних балонів з газом "пропан-бутан". Для композитних балонів отримано аналітичний вираз, котрий дозволить визначати час досягнення критичних температур для систем зберігання газу при впливі на них теплових потоків.

Ключові слова: пропан-бутан, пожежовибухонебезпечні характеристики, композитні балони.

Yu.P. Kluchka, A.I. Tarariev, M.V. Bolotskih

Characteristics of composite gas cylinders "propane-butane" with regard to their fire and explosion risk properties

As a result of the work study analyzed the theme of fire and explosion unsafety composite gas cylinders "propane-butane." For composite cylinders was taken an analytic expression, which identify the time to reach the critical temperature for the storage of gas when exposed to heat flow.

Keywords: propane-butane, fire and explosion unsafety, composite cylinders.