

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%)

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

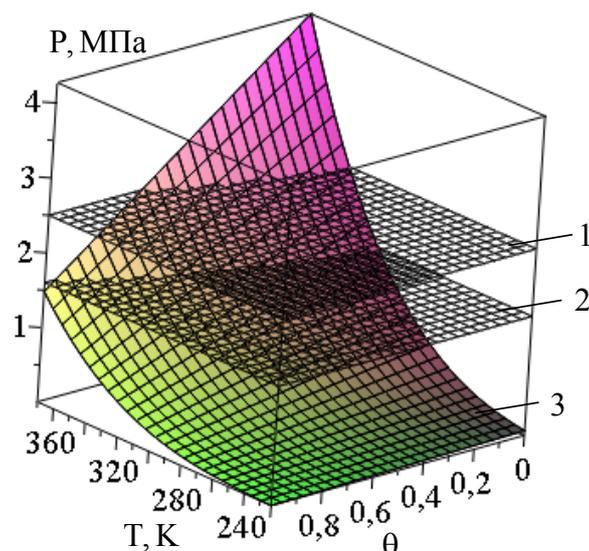
$$P_P = 8,0082 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 4,8045 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 9,794 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,7576, \quad (2)$$

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.

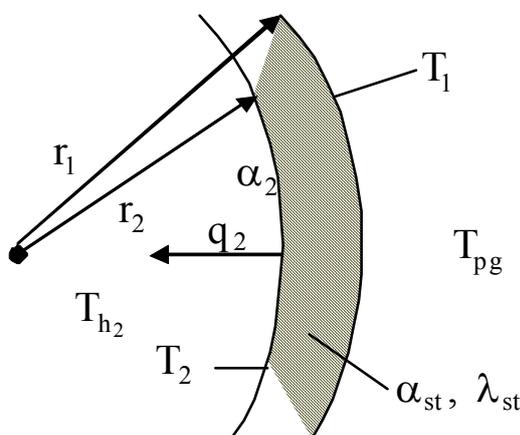
Кроме того, неправильное соотношение газов при заправке, а также заправка сверх дозванного объема может привести к разгерметизации баллонов и возникновению пожаровзрывоопасной ситуации [7].

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]:  $\alpha_{st}$ ,  $\lambda_{st}$  – 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;  $\alpha_2$  – 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

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

где  $\alpha$  – 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;  $\tau$  – 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  $\tau_i$  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  $\lambda_i, S_i, \delta_i$  – 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](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.