

*В.И. Кривцова, д.т.н., профессор, НУГЗУ,  
Ю.П. Ключка, д.т.н., с.н.с, нач. НИЛ, НУГЗУ,  
А.И. Тарариев, адъюнкт, НУГЗУ*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДО РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ**

Получена система уравнений для определения времени достижения критических температур для систем хранения сжиженного газа в композитных баллонах при воздействии на них тепловых потоков. Даная система позволит построить математическую модель по описанию ПВО характеристик композитных баллонов для сжиженных газов, а также при определении диапазона параметров, которые могут привести к ПВО ситуации.

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

**Постановка проблемы.** Тенденция перехода от металлических газовых баллонов к композитным [1-3] требует детального изучения свойств этих систем в нормальных условиях эксплуатации, а также в чрезвычайных ситуациях, например, в условиях пожара.

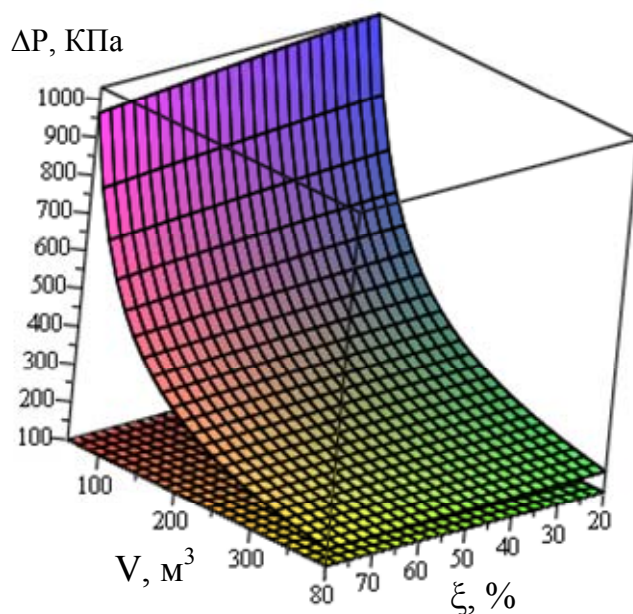
Применение композитных баллонов с газом пропан-бутан используется при приготовлении пищи, обогреве помещений, проведении ремонтно-строительных работ. Зачастую данные баллоны находятся в свободной продаже, а фирмы изготовители и методы их контроля при производстве оставляют желать лучшего. Кроме того бесконтрольно проводится процесс их заправки, где качество и объем заправляемого газа определяется не нормативными документами, а пожеланием заказчика.

Таким образом, проблема в отсутствии данных о ПВО характеристиках данных систем требует своего решения.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работах [3, 4] проведено изучение вопроса изученности ПВО характеристик композитных баллонов с газом «пропан-бутан».

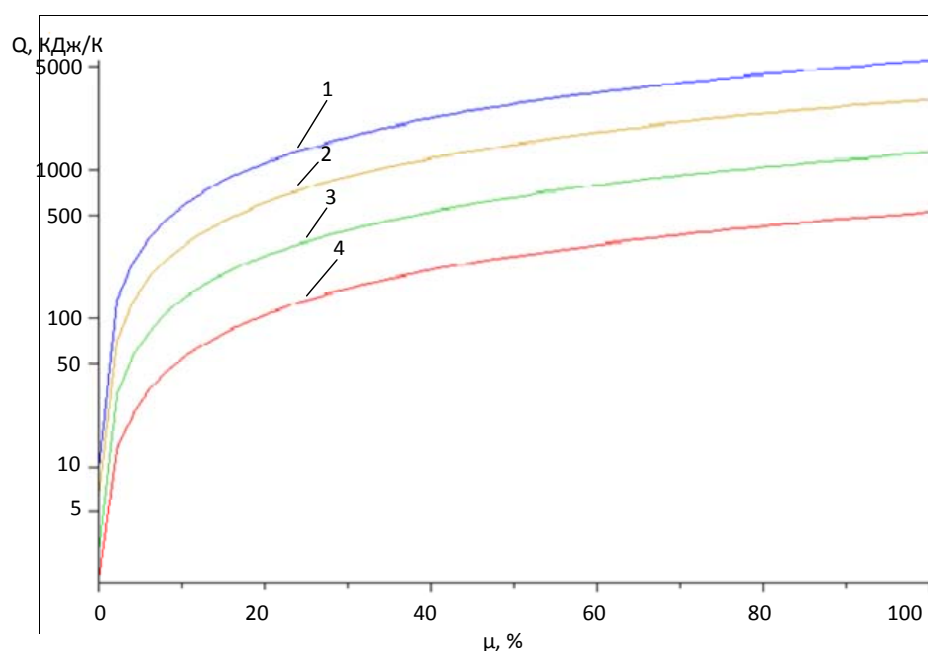
Избыточное давление взрыва для данного газа можно представить в виде (рис. 1). Анализ рисунка показывает, что избыточное давление взрыва практически инвариантно к составу смеси.

Привести к взрыву газозвушной смеси может разгерметизация баллона с газом пропан-бутан, что возможно в случае повышения давления в баллоне. Изменение давления наиболее вероятно при повышении температуры газа. Большое значение при этом имеет теплоемкость газа, поскольку от этого будет зависеть скорость роста давления, и, как следствие, время до разрушения данной системы.



**Рис. 1.** Зависимость избыточного давления взрыва газа «пропан-бутан» в системах хранения от объемного содержания пропана и свободного объема помещения

В [3] показано, что при воздействии на баллон с газом источников тепла следует учитывать степень заполнения баллона газом (рис. 2).



**Рис. 2.** 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.

Изменение давления под воздействием тепловых потоков может происходить как в условиях чрезвычайной ситуации, например при пожаре, так и при изменении внешней температуры. Данный случай возможен при перемещении сосуда с газом из одних температурных условий в другие, что зачастую происходит при внесении баллона с газом в зимний период с открытого пространства в помещение с комнатной температурой.

В [4] получена зависимость для определения времени достижения критических температур для систем хранения газа в композитных баллонах при воздействии тепловых потоков

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

где  $A_i = \frac{c_{gi} m_{gi} \delta_i}{\lambda_i S_i}$ ;  $c_{gi}, m_{gi}$  – теплоемкость и масса газа в  $i$ -ой системе;

$T_{2i}$  – температура газа в  $i$ -ой системе в процессе воздействия тепловых потоков;  $\lambda_i, S_i, \delta_i$  – теплопроводность стенок, площадь и толщина стенок сосуда в  $i$ -ой системе.

Однако, несмотря на широкое использование баллонов такого типа, на сегодняшний день отсутствуют какие либо рекомендации касательно расчета времени до разрушения данных систем, что является актуальной задачей при определении времени до взрыва в помещении при участии пропан-бутановых смесей. Данный вопрос является также актуальным при оценке причин возникновения пожара, его развития.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является аналитическое описание времени до возникновения пожаровзрывоопасной ситуации с композитным баллоном с газом пропан бутан при изменении температуры внешней среды. Кроме того, решение данной задачи позволит проводить сравнение таких систем от разных производителей и проводить сравнение по данному показателю.

Разгерметизация баллона возможна при превышении давления паров газа критического давления, которое способен выдержать сосуд. Для насыщенных паров пропана и бутана зависимость давления от температуры можно представить в следующем виде (средняя погрешность аппроксимации не более 1,5%)

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

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

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

Предварительный анализ показал, что применение защитных кожухов (рис. 3) на композитных баллонах приводит к уменьшению теплового потока через стенки сосуда.



**Рис. 3. Фото композитного баллона с защитным кожухом**

С учетом наличия кожуха, который плотно прилегает к корпусу значение  $A_i$  можно представить в виде

$$A_i = \frac{c_{gi} m_{gi}}{S_i} \left[ (1 - \varepsilon) \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \varepsilon \frac{\delta_i \lambda_{ki} + \delta_{ki} \lambda_i}{\lambda_i \lambda_{ki}} \right], \quad (4)$$

где  $\lambda_{ki}, \delta_{ki}$  – теплопроводность и толщина защитного кожуха,  $\varepsilon$  – коэффициент покрытия площади баллона защитным кожухом.

В [5, 6, 7] приведены зависимости относительной прочности композитных материалов от температуры в следующем виде

$$\sigma_{\max}^* = -6,05 \cdot 10^{-7} T^2 - 4,882 \cdot 10^{-4} T + 1,02, \quad (5)$$

$$\sigma_{\min}^* = -4,094 \cdot 10^{-6} T^2 + 4,561 \cdot 10^{-4} T + 0,992. \quad (6)$$

Тогда систему уравнений, описывающую состояние газа в баллоне и позволяющую определить время до разрушения можно представить в следующем виде

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \int_0^{\tau_i} (T_{1i} - T_{2i}) d\tau = (T_{2i} - T_0) A_i; \\
 A_i = \frac{c_{gi} m_{gi}}{S_i} \left[ (1 - \varepsilon) \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \varepsilon \frac{\delta_i \lambda_{ki} + \delta_{ki} \lambda_i}{\lambda_i \lambda_{ki}} \right]; \\
 \frac{\partial P}{\partial T_{2i}} = \frac{\beta_p}{\beta_{сж}}; \\
 P_{kr} = k(T) \cdot P_r; \\
 k(T) = f(\sigma_{\max}^*; \sigma_{\min}^*); \\
 P_B = 4,9119 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 3,413 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 8,0225 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,3574; \\
 P_P = 8,0082 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 4,8045 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 9,794 \cdot 10^{-2} \cdot T - 6,7576; \\
 T_{2i} = \phi(P_{kr}, c_{gi}, m_{gi}, V_{bi}, k(T)),
 \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $V_{bi}$  – объем баллона,  $\beta_p, \beta_{сж}$  – коэффициенты расширения и сжатия газа.

Решение данной системы уравнений позволит определить изменение давления газа пропан-бутан при изменении температуры внешней среды, а также время до достижения предельного давления и выделения взрывоопасного газа из баллона.

**Выводы.** В результате проведенной работы рассмотрено поведение композитного баллона с газом пропан-бутан при изменении температуры внешней среды. Учтены особенности конструкции данных баллонов. Получена система уравнений, которая позволит определять время достижения критических температур для систем хранения газа в композитных баллонах при воздействии на них тепловых потоков. Даная система может быть использована для построения математической модели по описанию ПВО характеристик композитных баллонов для сжиженных газов, а также при определении диапазона параметров, которые могут привести к ПВО ситуации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
- 2.Одинадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД. – 2013. – 214 с.
3. 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.
4. Ключка Ю.П. Характеристики композитных баллонов с газом «пропан-бутан» с учётом их пожаровзрывоопасных свойств / Ю.П. Ключка, А.И. Тарариев, М.В. Болотских // Проблемы пожарной безопасности. – 2014. – Вып. 35. – С. 93-99. – Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol35/kluchka.pdf>.
5. Ключка Ю.П. Математическая модель по определению воздействия опасных факторов чрезвычайных ситуаций на системы хранения взрывоопасных газов из композитных материалов / Ю.П. Ключка, А.И. Тарариев, М.В. Болотских // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2014. – Вип. 20. – С. 87-92.
6. Павлов В.П. Прочность конструкций из стеклопластиков при повышенных и высоких температурах / В.С. Жернаков // Автореферат. – Уфа: УГАТУ, 2005. – 24 с.
7. Гутников С.И. Стеклые волокна / С.И. Гутников, Б.И. Лазорьяк, Селезнев А.Н. // Учебное пособие для студентов. – Москва: МГУ, 2010. – 126 с.

V.I. Krivtsova, Yu.P. Kluchka, A.I. Tarariev

**Визначення часу до руйнування систем зберігання вуглеводневих вибухонебезпечних газів під впливом теплових потоків**

Отримана система рівнянь для визначення часу досягнення критичних температур для систем зберігання зрідженого газу в композитних балонах при впливі на них теплових потоків. Дана система дозволить побудувати математичну модель за описом ПВН характеристик композитних балонів для скраплених газів, а також при визначенні діапазону параметрів, які можуть призвести до ПВН ситуації.

**Ключові слова:** пропан-бутан, вибухонебезпечні гази, композитні балони.

V.I. Krivtsova, Yu.P. Kluchka, A.I. Tarariev

**The time to fracture hydrocarbon storage of explosive gases under the influence of heat flow**

A system of equations for determining the time required to reach the critical temperature for the storage of liquefied gas in composite cylinders when exposed to heat flow. This system will build a mathematical model to describe the characteristics of the air defense of composite cylinders for liquefied gases, as well as in determining the range of parameters that can lead to a defense situation.

**Keywords:** propane, butane, explosion gases, composite cylinders.