

*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*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗОВ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Дальнейшее развитие получила математическая модель по определению воздействия опасных факторов чрезвычайных ситуаций на системы хранения взрывоопасных газов из композитных материалов.

**Ключевые слова:** пропан-бутан, взрывоопасные газы, термодинамические характеристики, композитные баллоны.

**Постановка проблемы.** В последние десятилетия композитные материалы находят широкое применение в промышленной среде [1-5, 7-9]. Наибольший прогресс достигнут в области композитных трубопроводов, баков хранения и оборудования для жидких текучих сред. Высокая стоимость замены стали (сплавов) и увеличение срока службы новых конструкций способствуют применению композитов, выдерживающих экстремальные условия. Эта тенденция наблюдается и в изготовлении композитных баллонов для газов пропан-бутан. Одной из проблем является отсутствие информации о пожаровзрывоопасных характеристиках данных систем и, как следствие, действий оперетивно-спасательных сил в условиях чрезвычайных ситуаций (ЧС) при наличии в области воздействия опасных факторов ЧС композитных баллонов с газом пропан-бутан.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Анализ показал, что по всем потребительским качествам композитные баллоны являются не хуже, чем металлические [2]. Следует отметить, что выбору композитов способствует ряд преимуществ этих составов по сравнению со сталью, что обуславливает большую надёжность данных систем [2, 9]:

- Показатели коэффициентов удельной прочности и жесткости. При одинаковой прочности композиты могут быть на 80% легче стали и на 60% легче алюминия.

- Устойчивость к коррозии практически в любой химической среде.

- Низкая теплопроводность.

- Износоустойчивость.

Одним из наиболее распространенных видов ЧС являются пожары. В работах [2–5] проанализирована изученность вопроса пожаровзрывоопасности (ПВО) композитных баллонов с газом "пропан-бутан" и для композитных баллонов получено аналитическое выражение, которое отображает время достижения критических температур для систем хранения газа в композитных баллонах при воздействии на них тепловых потоков [2]

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

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 данное выражение не учитывает нелинейность изменения температуры в стенке, что оказывает существенное воздействие на показатели прочности баллона.

Анализ экспериментальных данных [9] показал, что изменение относительной прочности композита от температуры может варьироваться в широком диапазоне значений, особенно при температуре свыше  $200^\circ\text{C}$  (рис. 1).

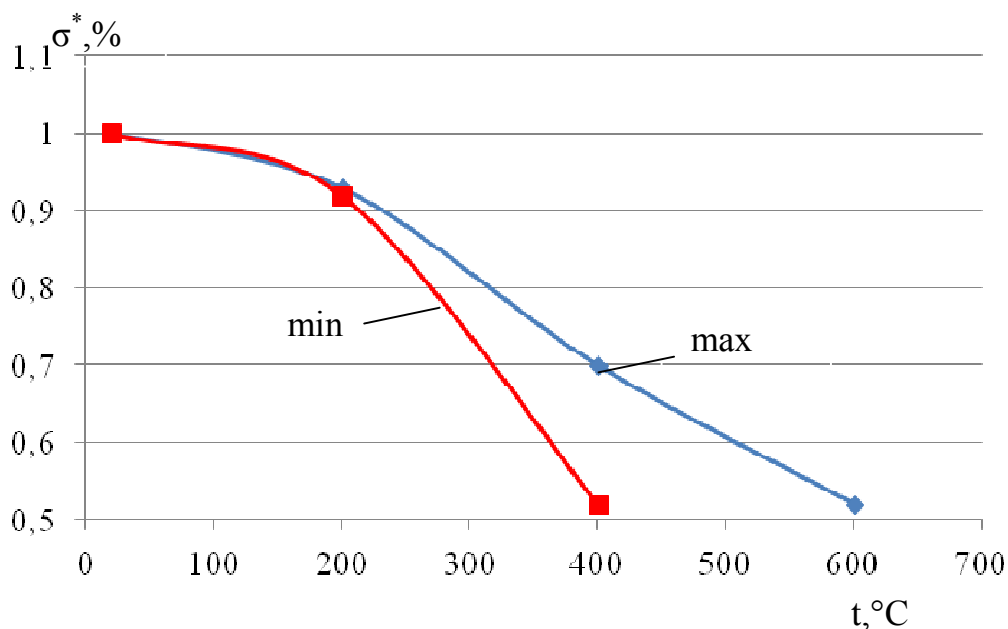


Рис. 1. Зависимость относительной прочности материала от температуры [9]

Из рисунка следует, что, например, относительная прочность равная 0,5 может достигаться в интервале температур (400–600)°С, что может оказывать существенное влияние на состояние композитного баллона в условиях пожара.

В работе [8] получена математическая модель по определению воздействия опасных факторов пожара на композитные системы хранения газов. Однако в данной работе температура в стенке принимается как средняя, в то время как ее распределение имеет параболический вид и в качестве граничных условий на внешней стороне стенки принимаются – первые, в то время как, например, при воздействии лишь конвективных потоков от пожара, рациональнее применять граничные условия третьего рода.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является построение математической модели по определению воздействия опасных факторов ЧС на композитные системы хранения газов с учетом вышеизложенных недостатков.

В данной статье будет рассмотрена ситуация когда огонь не оказывает непосредственное воздействие на баллон, а учитывается лишь воздействие конвективных тепловых потоков от источника огня в соответствии со стандартным температурным режимом при пожаре. Тогда зависимость температуры можно записать в виде [6]

$$T_1 = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + T_0 + 273, \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура в помещении;  $\tau$  – длительность пожара в мин.

Аппроксимация кривых (рис.1) позволила представить зависимости относительной прочности от температуры в следующем виде

$$\sigma_{\max}^* = -6,05 \cdot 10^{-7} T^2 - 4,882 \cdot 10^{-4} T + 1,02, \quad (3)$$

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

Тогда, усредненное значение относительной прочности, можно представить в виде рис. 2.

С учетом того, что площадь поперечного сечения баллона равна  $\pi(r_1^2 - r_2^2)$ , относительную прочность стенки баллона можно записать как

$$\sigma_s^* = \int_{r_2}^{r_1} \frac{2\pi \sigma^*(T(r, \tau))}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} dr. \quad (5)$$

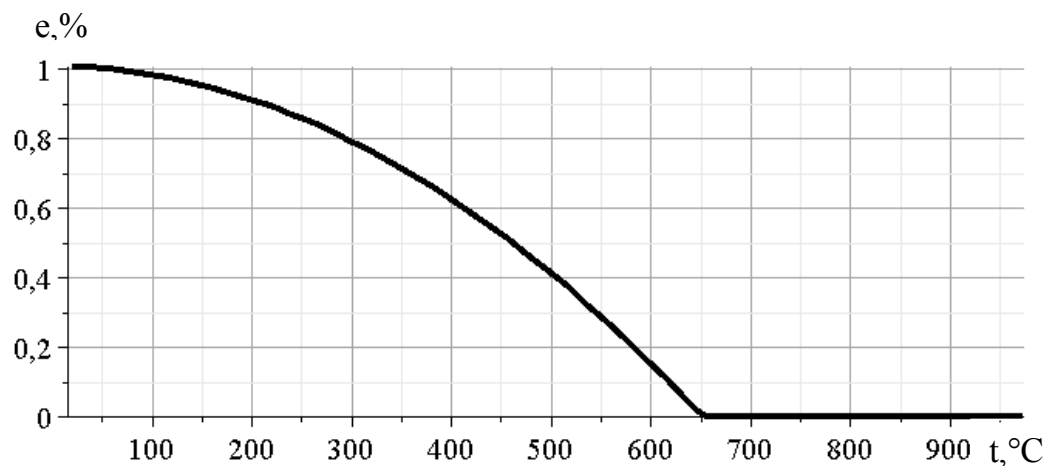


Рис. 2. Среднее значение относительной прочности материала от температуры [7, 9]

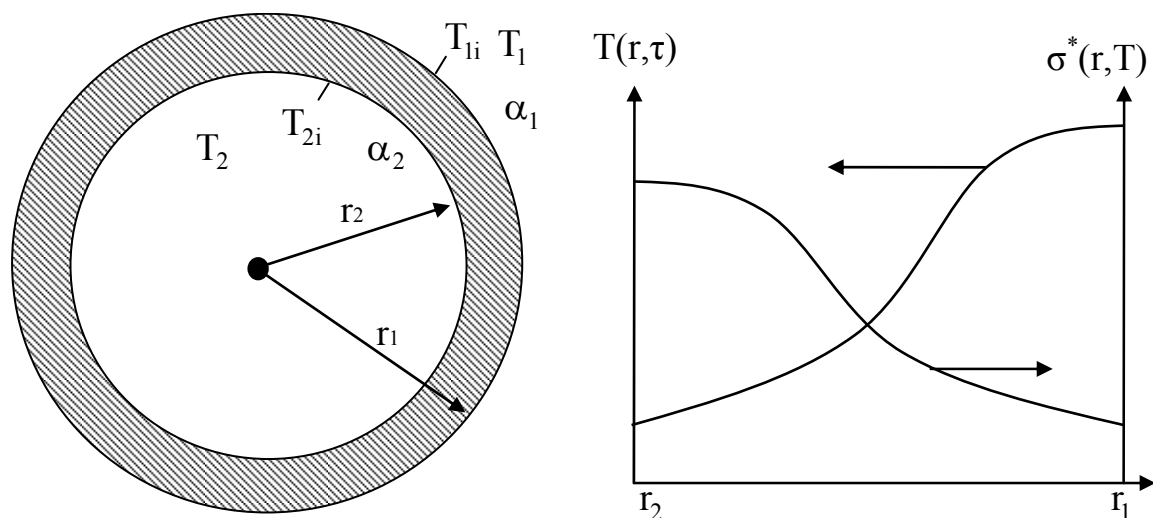


Рис. 3. Схема поперечного разреза баллона и распределения температуры, относительной прочности в стенке композитного баллона при воздействии тепловых потоков:  $T_{1i}$ ,  $T_{2i}$  – температура внешней и внутренней поверхности стенки баллона;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – усредненные значения коэффициента теплоотдачи на внешней и внутренней поверхности стенки баллона;  $T_2$  – температура газа

В условиях пожара коэффициент теплоотдачи от нагретых продуктов сгорания к объекту можно представить в виде [6]

$$\alpha = 11,63 \cdot \exp(0,0023T). \quad (6)$$

Уравнение сохранения тепла при передаче тепла от стенки баллона к газу, с учетом граничных условий третьего рода можно записать в виде

$$S \int_0^{\tau} \alpha_2 (T_{2i} - T_2) d\tau = (T_2 - T_0) c_{gi} m_{gi}. \quad (7)$$

Тогда математическую модель по определению воздействия продуктов сгорания на баллон с пропан-бутаном можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + T_0 + 273; \\ \alpha_1 (T_1 - T_{1i}) = \lambda_b \frac{\partial T}{\partial r}; \alpha_1 = 11,63 \cdot \exp(0,0023T_1); \\ \frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) + \frac{\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau)}{r} \right); \\ \alpha_2 (T_{2i} - T_2) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}; \\ S \int_0^{\tau} \alpha_2 (T_{2i} - T_2) d\tau = (T_2 - T_0) c_{gi} m_{gi}; \\ \sigma_s^* = \int_{r_2}^{r_1} \frac{2\pi r \sigma^*(T(r, \tau))}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} dr; \\ P_{\max} = f \left[ T_{2i}, c_{p_{gi}}, m_{gi}, V_{bi}, \sigma^*(T(r, \tau)) \right]; \\ \tau_{\max} = \varphi \left[ T_{2i}, c_{p_{gi}}, m_{gi}, V_{bi}, \sigma^*(T(r, \tau)) \right]. \end{array} \right. \quad (8)$$

Решение данной системы уравнений позволяет определить изменение давления газа пропан-бутан, а также время до достижения предельного давления, с учетом изменения прочности баллона, и выделения взрывоопасного газа из баллона.

**Выводы.** В результате проведенной работы дальнейшее развитие получила математическая модель по определению воздействия опасных факторов ЧС на композитные системы хранения взрывоопасных газов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев В.В. Композиционные наноматериалы / А.Ю. Алентьев, Б.И.Лазорьяк, О.Н. Шорникова // Учебное пособие для студентов. – Москва: МГУ, 2010.-С.16-19.
2. Ключка Ю.П. Характеристики композитных баллонов с газом «пропан-бутан» с учётом их пожаровзрывоопасных свойств / Ю.П. Ключка, А.И. Тарариев // Проблемы пожарной безопасности. –

2014. – Вып. 35. – С. 93-99.

3. Лурье С.А. Моделирование зависимостей физико-механических характеристик от параметров микро- и наноструктуры полимерных композиционных материалов / Ю.М. Миронов, В.А. Нелюб, А.С. Бородулин, И.В. Чуднов, И.А. Буянов, Ю.О. Соляев. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 – С. 13-19.

4. 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. – Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol34/kluchka.pdf>.

5. Международный научно-технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе» [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://www.metaninfo.ru/aftmarchive/aftm\\_3.pdf](http://www.metaninfo.ru/aftmarchive/aftm_3.pdf).

6. Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі / І.Б. Рябова, І.В. Сайчук, А.Я. Шаршанов // Навчальний посібник. – Харків: АПБУ, 2002. – 382 с.

7. Павлов В.П. Прочность конструкций из стеклопластиков при повышенных и высоких температурах / В.С. Жернаков // Автореферат. – Уфа: УГАТУ, 2005. – 24 с.

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

9. Гутников С.И. Стекланные волокна / С.И. Гутников, Б.И. Лазорьяк, Селезнев А.Н. // Учебное пособие для студентов. – Москва: МГУ, 2010. – 126 с.

В.І. Кривцова, Ю.П. Ключка, А.І. Тарарієв

**Математична модель з визначення впливу небезпечних факторів надзвичайних ситуацій на системи зберігання вибухонебезпечних газів з композитних матеріалів**

Подальший розвиток отримала математична модель по визначенню впливу небезпечних чинників надзвичайних ситуацій на системи зберігання вибухонебезпечних газів з композитних матеріалів.

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

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

**Mathematical model for determination of hazard emergency factors influence on explosive storage of composite materials systems**

It has been continued the development of a mathematical model to identify the impacts of emergency hazards on the storage systems of explosive gases from composite materials.

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