

12

## Экспериментальная оценка взрыво- и пожароопасности литиевых источников тока

© В.А. Архипов, А.И. Коноваленко, В.Т. Кузнецов, А.С. Жуков

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
E-mail: zharova@niipmm.tsu.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2018 г.

В окончательной редакции 26 апреля 2019 г.

Принято к публикации 26 апреля 2019 г.

Предложена методика количественной оценки взрыво- и пожароопасности литий-тионилхлоридных элементов, описана экспериментальная установка и приведены результаты экспериментов с литий-тионилхлоридными элементами типоразмеров D и DD.

**Ключевые слова:** химический источник тока, взрыво- и пожароопасность, манометрическая бомба, давление.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48082.17561

Литий-тионилхлоридные ( $\text{Li/SOCl}_2$ ) химические источники тока обладают высокой плотностью энергии, широким диапазоном эксплуатационных температур, длительным сроком хранения [1]. В настоящее время для электропитания различных объектов широко применяются литий-тионилхлоридные элементы (ТХЛ-элементы) отечественных (НПП „Литий“, Дубна; АО ИФ „Орион-ХИТ“, Новочеркасск; АО „Литий-элемент“, Саратов) и зарубежных („SAFT“, Франция; „EVE ENERGY Co.“, Китай; „EXIUM“, Южная Корея и др.) производителей.

Основным недостатком ТХЛ-элементов является их повышенная взрыво- и пожароопасность, связанная с возможностью возникновения неуправляемых экзотермических химических реакций при нештатных ситуациях их эксплуатации (перегрев, повреждения корпуса, разгерметизация, перезаряд или переразряд) [2,3]. В ГОСТ Р МЭК 60086-4-2009 [4] описаны методики испытаний на внутреннее короткое замыкание при неправильном применении ТХЛ-элементов. В соответствии с [4] определяется только факт возникновения взрыва или возгорания ТХЛ-элемента. Количественное определение характеристик этих процессов является объективной информацией для потребителей, позволяющей оценивать масштабы негативного воздействия результатов нештатных ситуаций при эксплуатации ТХЛ-элементов на оборудование и обслуживающий персонал.

В настоящей работе рассмотрена методика количественной оценки энергии взрыва и горения ТХЛ-элементов при возникновении внутреннего короткого замыкания вследствие механического повреждения их корпуса.

Для количественной оценки энергии взрыва и горения ТХЛ-элемента предлагается осуществлять его взрыв в манометрической бомбе постоянного объема (МБ), которая широко применяется для исследования горения порохов и взрывчатых веществ [5]. Повреждение корпуса ТХЛ-элемента осуществляется его пробитием заостренным металлическим стержнем поперек оси симметрии

элемента. При этом происходит короткое замыкание обкладок элемента и максимальное выделение энергии. По величине изменения давления в МБ при взрыве и горении ТХЛ-элемента рассчитываются тротильный эквивалент взрыва и количество теплоты, выделяемой при последующем горении содержимого ТХЛ-элемента [6].

Схема МБ для определения характеристик взрыва и горения ТХЛ-элемента приведена на рис. 1. МБ содержит корпус 1 с крышкой 2, кольцевой гайкой 3 и уплотнителем 4. В корпусе размещается подложка 17 с испытываемым ТХЛ-элементом 16. По оси крышки 2 установлена втулка 5 с осевым отверстием, в котором располагается заостренный стержень 8. Метание стержня 8 осуществляется пороховым зарядом 10, размещенным в полости 18 переходника 6, инициируемым электрическим капсюлем—воспламенителем 9. Переходник 6 закрыт пробкой 7 с центральным электродом 11 и электрическим изолятором 12. В корпусе МБ имеются гнезда для установки датчика давления 13 и клапана сброса давления 14 с шаровым элементом 15, подсоединенного к вытяжной системе 19.

Для определения энергии взрыва и горения ТХЛ-элемента использовалась МБ с внутренним диаметром 120 мм и свободным объемом  $V = 21$ . Пробивание ТХЛ-элемента осуществлялось заостренным металлическим стержнем диаметром 4.5 мм и длиной 40 мм.

Типичные осциллограммы изменения давления в МБ при пробитии ТХЛ-элемента приведены на рис. 2, а и 3, а. Теплота, выделяемая при взрыве ТХЛ-элемента в МБ при отсутствии тепловых потерь через стенки бомбы, расходуется только на повышение внутренней энергии газа:

$$Q_{\text{EXP}} = \Delta U = U_1 - U_0, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{EXP}}$  — количество теплоты, выделяемое при взрыве [J],  $\Delta U$  — изменение внутренней энергии газа [J],  $U_1, U_0$  — конечное и начальное значения внутренней энергии газа [J].

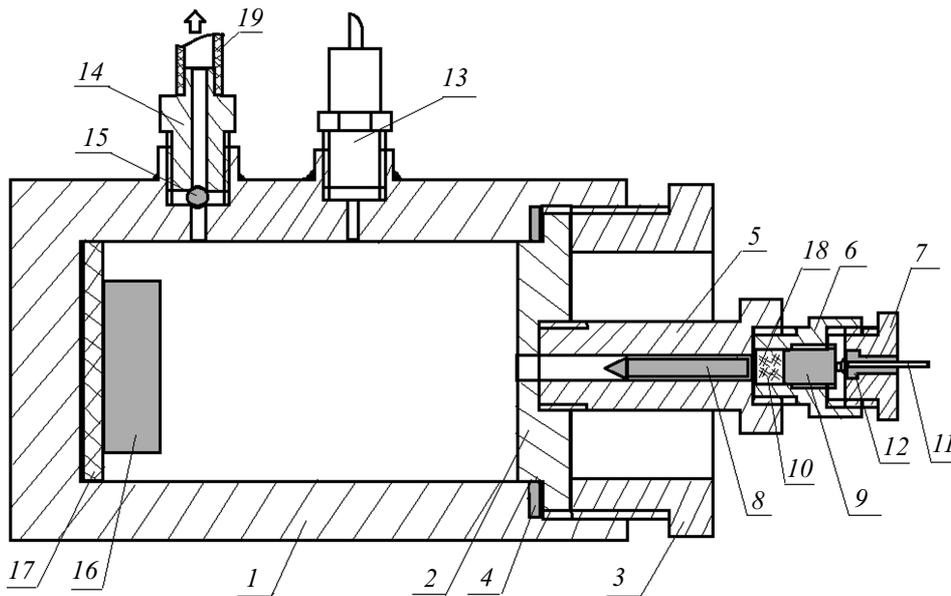


Рис. 1. Схема МБ для определения характеристик взрыва ТХЛ-элемента. Пояснения в тексте.

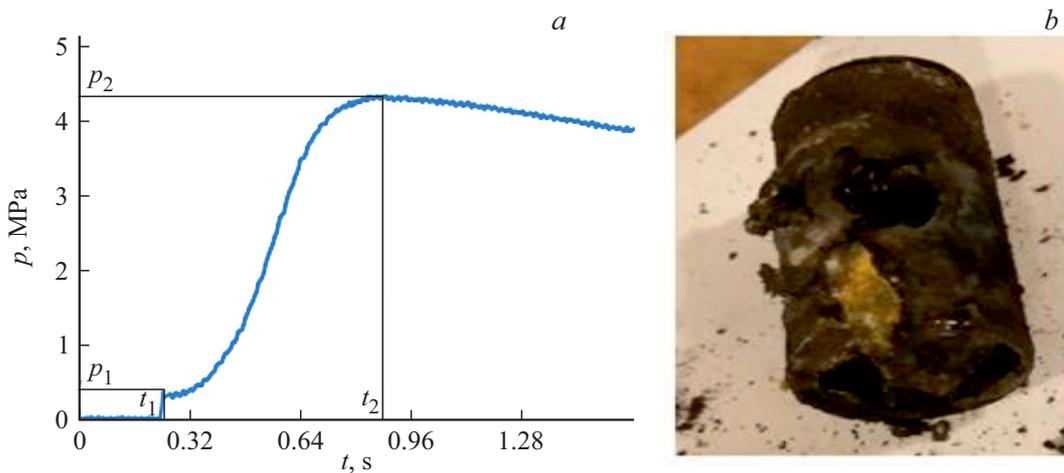


Рис. 2. Изменение давления в МБ при взрыве ТХЛ-элемента типа ER34615M фирмы EVE ENERGY (а) и вид элемента после испытаний (b).

Внутренняя энергия газа определяется формулой [7]:

$$U = \rho V C_V T, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность газа [kg/m<sup>3</sup>],  $C_V$  — удельная изохорическая теплоемкость газа [J/(kg · K)],  $T$  — температура газа [K].

Используя уравнение состояния Менделеева–Клапейрона  $p = \rho RT$  и уравнение Майера  $R = C_P - C_V$ , выражение для внутренней энергии газа (2) можно представить в виде

$$U = \frac{V}{k-1} p, \quad (3)$$

где  $C_P$  — удельная изобарическая теплоемкость газа [J/(kg · K)],  $R$  и  $k = C_P/C_V$  — газовая постоянная и показатель адиабаты газообразных продуктов взрыва.

Тогда выражение (1) с учетом (3) примет вид

$$Q_{\text{EXP}} = \frac{V}{k-1} (p_1 - p_0), \quad (4)$$

где  $p_0 = 0.1$  МПа — начальное давление,  $p_1$  — пиковое значение давления (рис. 2, 3).

Для оценки взрывоопасности ТХЛ-элемента удобно использовать массу тринитротолуола (тротила)  $m_{\text{TNT}}$ , при взрыве которой выделяется энергия, равная энергии взрыва ТХЛ-элемента  $Q_{\text{EXP}}$ . Расчет  $m_{\text{TNT}}$  проводится по формуле

$$m_{\text{TNT}} = \frac{Q_{\text{EXP}}}{q_{\text{TNT}}}, \quad (5)$$

где  $q_{\text{TNT}} = 4.52$  МДж/кг — удельная энергия взрыва тротила [8].

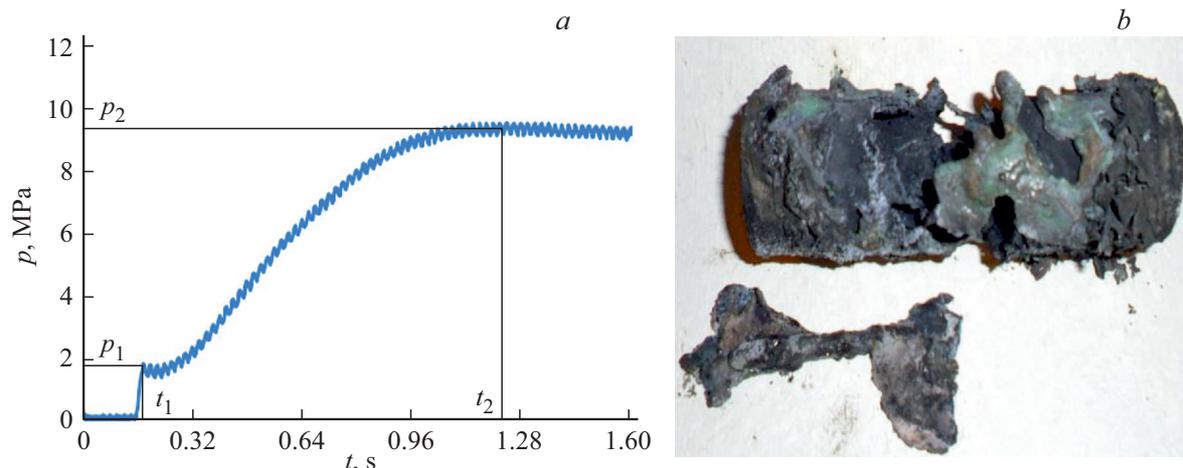


Рис. 3. Изменение давления в МБ при взрыве ТХЛ-элемента 130916-01Н DD фирмы EXIUM (a) и вид элемента после испытаний (b).

Результаты испытаний ТХЛ-элементов различных производителей в МБ

Характеристика	Производитель					
	EVE ENERGY (Китай)	SAFN (Франция)	MINAMOTO (Китай)	FANSO (Китай)	EXIUM (Южная Корея)	ELECTROCHEM (США)
Марка	ER34615M	LSH 20 hts	ER-34615M (D)	ER34615M	SC-DD01	CSC 93 DD
Типоразмер	D	D	D	D	DD	DD
Энергоемкость, Ah	14	13	16.5	14	27–32	30
Масса TNT взрыва, g	0.5	0.55	0.15	0.33	2.4	7.2
Тепловыделение при горении Q, kJ	3.9	19.6	14.6	4.6	15.6	19.9

При воспламенении и горении ТХЛ-элемента давление в МБ повышается от пикового значения  $p_1$  (в момент взрыва  $t_1$ ) (рис. 2, 3) до максимального давления  $p_2$  (достигаемого в момент времени  $t_2$ ).

Полагая, что количество теплоты, выделяемое при горении ТХЛ-элемента в МБ при отсутствии тепловых потерь, расходуется только на повышение внутренней энергии газа, по аналогии с тепловыделением при взрыве ТХЛ-элемента получим выражение

$$Q_{\text{СОМ}} = \frac{V}{k-1} (p_2 - p_1). \tag{6}$$

Эксперименты показали, что изменение давления в МБ при срабатывании заряда бездымного пороха массой 0.15 g не превышает 0.01 МПа, однако стержень пробивает ТХЛ-элемент насквозь. При испытании ТХЛ-элемента в момент пробития стержнем происходит внутреннее короткое замыкание, которое сопровождается выбросом газообразных продуктов (взрывом) и пиком давления в МБ  $p_1 > 0.1$  МПа. Поэтому приходом газа от сгорания порохового заряда можно пренебречь.

Графики изменения давления в МБ (a) и внешний вид ТХЛ-элементов после испытаний (b) приведены на рис. 2 (для элемента типоразмера D фирмы EVE ENERGY) и на рис. 3 (для элемента типоразмера DD фирмы EXIUM).

В таблице приведены экспериментальные данные по энергии взрыва и горения ТХЛ-элементов типоразмеров D и DD ряда производителей, полученные с использованием предлагаемой методики.

Экспериментальные данные по взрыво- и пожароопасности ТХЛ-элементов различных производителей, представленные в таблице, показывают, что тепловой эффект взрыва и горения элемента питания зависит не только от его энергоемкости, но и от конструктивного исполнения и используемых материалов при изготовлении элемента.

Таким образом, предлагаемая методика оценки взрыво- и пожароопасности ТХЛ-элементов позволяет спрогнозировать риски нештатного (аварийного) нарушения работы и негативное воздействие на аппаратуру и обслуживающий персонал и может применяться при испытании на внутреннее короткое замыкание любого первичного или вторичного химического источника тока.

**Финансирование работы**

Результаты исследования получены в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 9.9036.2017/8.9).

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Нижниковский Е.А.* Современные электрохимические источники тока. М.: Радиотехника, 2015. 296 с.
- [2] *Белов О.И., Болдырев М.А., Воронцов П.С., Нижниковский Е.А.* // Лесной вестник. 2012. № 2. С. 103–106.
- [3] *Нижниковский Е.А.* // Электрохимическая энергетика. 2001. Т. 1. № 3. С. 39–44.
- [4] ГОСТ Р МЭК 60086-4-2009. Батареи первичные. Ч. 4. Безопасность литиевых батарей. М.: Стандартинформ, 2011. 27 с.
- [5] *Похил П.Ф., Мальцев В.М., Зайцев В.М.* Методы исследования процессов горения и детонации. М.: Наука, 1969. 301 с.
- [6] *Архипов В.А., Басалаев С.А., Коноваленко А.И., Кузнецов В.Т., Бездворных Т.А., Войков Г.Г.* Способ оценки взрыво- и пожароопасности химических источников тока. Заявка № 2018131617 на патент РФ, МПК F42В 35/00, Н01М 10/00. Заявл. 03.09.2018.
- [7] *Базаров И.П.* Термодинамика. М.: Высш. шк., 1991. 376 с.
- [8] *Карауш С.А.* Оценка параметров промышленных взрывов. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2014. 96 с.