

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИГОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОГНЕВОГО ИСПЫТАНИЯ МЕТАЛЛОБЕТОННОГО КОНТЕЙНЕРА

**А.Д. Голиков, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;**

**П.М. Агеев, кандидат технических наук;**

**И.А. Сорокин.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Рассмотрены вопросы проведения огневого испытания металлобетонного контейнера, предназначенного для транспортирования и длительного хранения отработавшего ядерного топлива реакторов РБМК-1000. Проанализированы основные требования к тепловым (огневым) испытаниям в соответствии с правилами МАГАТЭ. Дано обоснование параметров полигонной установки, на которой были проведены тепловые испытания опытного образца. Проведен анализ результатов, который показал соответствие параметров огневых испытаний контейнера требованиям Правил МАГАТЭ.

*Ключевые слова:* огневые испытания, полигонная установка, металлобетонный контейнер, ядерное топливо

Транспортный упаковочный комплект на основе металлобетонного контейнера (ТУК МБК) предназначен для транспортирования и длительного хранения отработавшего ядерного топлива реакторов РБМК-1000.

Согласно нормам ОПБЗ-83 [1] и правилам МАГАТЭ [2] такие контейнеры должны выдерживать испытания, имитирующие нормальные и аварийные условия транспортирования. Условия проведения этих испытаний строго регламентированы и включают в себя механические испытания и тепловое испытание.

В соответствии с пояснительными материалами к правилам МАГАТЭ [3] основные требования по тепловым (огневым) испытаниям состоят в следующем:

- 1) начальные условия теплового испытания должны предусматривать нахождение упаковки в установившемся состоянии при окружающей среде с температурой, равной 38 °С;
- 2) средняя температура пламени вокруг контейнера  $t_{\phi}$  должна быть не менее 800 °С (или распределение температуры пламени вокруг контейнера должно быть таким, чтобы обеспечить подведение эквивалентного полного теплового потока к контейнеру);
- 3) минимальная длительность воздействия пламени  $\tau_r$  должна составлять 30 мин;
- 4) пламя должно полностью охватывать контейнер, для чего поверхность горения топлива должна выступать за пределы горизонтальной проекции контейнера на расстояние (b) не менее, чем на 1 м и не более, чем на 3 м;
- 5) контейнер должен находиться на высоте  $H_0 = 1$  м над поверхностью топлива;
- 6) после прекращения воздействия пламени контейнер не должен подвергаться искусственному охлаждению.

При проведении тепловых расчетов контейнера, помимо требований 2) и 3), должны приниматься:

- 7) коэффициент эмиссии (степень черноты) пламени  $\varepsilon_{\phi} = 0,9$ ;
- 8) коэффициент поверхностного поглощения (степень черноты поверхности), равный 0,8 либо фактическому в условиях испытаний.

Кроме этого, для обеспечения указанных выше условий и воспроизводимости результатов испытаний рекомендуется:

- 9) использовать в качестве топлива горючую жидкость с теплотой сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 46\text{--}49$  МДж·кг<sup>-1</sup>, температурой дистилляции  $t_{\text{дист.макс}}$  не более 330 °С, температурой воспламенения  $t_{\text{всп.мин}}$  не менее 46 °С;

10) не проводить испытания при скорости ветра  $V_v$  более  $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , а также при осадках, в том числе и в период выдержки после огневого воздействия;

11) контейнер должен располагаться горизонтально, наименьший габаритный размер должен быть расположен по вертикали.

Исходными данными для проведения расчетов по обоснованию параметров полигонной установки для проведения огневого испытания являлись:

– геометрические размеры МБК: длина  $L = 6,27 \text{ м}$ ; диаметр  $D = 3,15 \text{ м}$ .

– требования и рекомендации МАГАТЭ по тепловым испытаниям контейнеров (упаковок), используемых для перевозок ядерных материалов [1–3].

Достаточно сложным является выполнение требования 1). Компенсировать его невыполнение можно проведением испытаний в максимально теплый период года, а также тем обстоятельством, что температура факела  $t_f$  будет превышать  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Условия 2) и 9) позволяют определить вид горючей жидкости. Этим условиям соответствуют керосин и дизельное топливо. Опыт проведения крупномасштабных экспериментов показывает, что по экологическим соображениям использование керосина предпочтительнее. Для дальнейших расчетов принимались характеристики топлива по данным [4] и [5]:

– средняя линейная скорость выгорания керосина при диаметре резервуара 7–10 м в полигонных условиях  $m_L = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  ( $4,2 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$ );

– средняя плотность керосина  $\rho_{ж} = 800 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Средняя массовая скорость выгорания топлива определялась из выражения:

$$m_0 = m_L \cdot \rho_{ж} \cdot \quad (1)$$

Подстановка приведенных выше параметров в формулу (1) дает величину:  $m_0 = 5,60 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Высота налива жидкости в емкости определялась через линейную скорость выгорания и время горения:

$$Z_{ж} = m_L \cdot \tau_{г},$$

С учетом условия 3) высота налива керосина  $Z_{ж} = 0,126 \text{ м}$ .

По данным [6] величина теплового потока на омываемую пламенем от нефтепродуктов поверхность достигает максимального значения при толщине пламени 1,6 м. Таким образом, в соответствии с условием 4) и 7) принималось  $b = 1,6 \text{ м}$ .

С учетом условия 4) определялись размеры очага горения:

– Ширина очага горения  $A = D + 2 \cdot b = 6,35 \text{ м}$ .

– Длина очага горения  $B = L + 2 \cdot b = 9,47 \text{ м}$ .

– Площадь очага горения  $F_{г} = A \cdot B \approx 60 \text{ м}^2$ .

– Объем топлива, требуемый для испытания:  $V_{ж} = F_{г} \cdot Z_{ж} = 7,6 \text{ м}^3$ .

– Масса топлива, требуемого для испытания:  $M = V_{ж} \cdot \rho_{ж} = 6060 \text{ кг}$ .

Высота борта емкости для налива топлива  $H_б$  должна быть не менее высоты налива жидкости  $Z_{ж}$ . Практика проведения огневых испытаний показывает, что достаточной является высота бортов, вдвое превышающих высоту налива жидкости. Таким образом, для поддонов с керосином  $H_б = 0,252 \text{ м}$ .

При проведении огневых испытаний при использовании металлических (стальных) емкостей (поддонов) в завершающей стадии горения возможно их коробление, приводящее к «перетеканию» ГЖ к одному из бортов поддона и уменьшению площади горения. Для предотвращения этого явления очаг горения следует создавать из поддонов небольших размеров и располагать их на ровной поверхности. В частности, для указанных выше размеров очага горения было рекомендовано использование 48 поддонов с максимальными размерами  $0,8 \times 1,6 \text{ м}$ . Допускалось принимать размеры поддонов такими, чтобы расстояния между ними были не более 0,1 м. При этом общие размеры очага горения должны были соответствовать определенным выше размерам A и B.

Необходимость выполнения условия 10) связано с отклонением факела пламени жидкости от вертикали, что может привести не только к снижению толщины пламени до величины менее 1 м, но и к его сносу с поверхности контейнера. По данным [7] погодные условия на Европейской части России со скоростью ветра более  $2 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  составляют 75 %, при ветре более  $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  – 51 % времени в году. Кроме того, с увеличением скорости ветра до 8–10 м/с скорость выгорания нефтепродуктов возрастает на  $30 \div 50$  % [5]. В связи с этим при проведении огневого эксперимента необходимо применение ветрозащитных ограждений.

Размеры ветрозащитного ограждения в плане рекомендовалось принять равными размерам очага горения.

Высота верхней кромки ветрозащитного ограждения определялась с учётом возможного отклонения пламени ветром. По данным работы [8] максимальный угол отклонения оси факела пламени от вертикали при воздействии ветра составляет  $60^\circ$ . Следовательно, высоту экрана необходимо принимать такой, чтобы при этом отклонении толщина пламени над контейнером была не менее величины  $b$ .

Расчеты показали, что высота ветрозащитного ограждения должна составить:

$$H = Z_{\text{ж}} + H_0 + 0,5 \cdot D + (0,5 \cdot D + b) \cdot \text{tg } 30^\circ.$$

В случае сжигания керосина  $H = 4,53 \text{ м}$ .

Конструкция ограждений должна обеспечить условия горения жидкости, близкие к условиям открытой площадки. Для этого в нижней части ограждения по периметру следует предусмотреть щель для поступления воздуха, необходимого для горения. Размер щели должен обеспечивать расход газов на уровне верхней кромки ограждения, соответствующий расходу газов при горении на открытой площадке. Расход газов в факеле зависит от мощности тепловыделения очага пожара  $Q$ :

$$Q = \eta \cdot m_0 \cdot F_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}},$$

где  $\eta$  – коэффициент недожога при горении жидкости, равный 0,75;  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая теплота сгорания топлива.

С учетом того, что для керосина  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 43\,500 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ ,  $Q = 1,1 \cdot 10^8 \text{ Вт}$ .

В соответствии с оценками, данными в работе [8], при таких интенсивностях тепловыделения очага на высоте 4,6 м скорость газов в пламени факела  $V_{\text{г}}$  составит порядка  $14,9 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Расход газов на уровне верхней кромки ограждения, приведенный к нормальным условиям, составит:

$$Q_{\text{г}} = \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_0} \cdot V_{\text{г}} \cdot F_{\text{г}} = 229 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$

где  $\rho_0$  – плотность наружного воздуха при  $0^\circ\text{C}$ , равная  $1,29 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газов в ограждении при  $800^\circ\text{C}$ , равная  $0,33 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Массовый расход газов составил:

$$G_{\text{г}} = Q_{\text{г}} \cdot \rho_0 = 295,7 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Расход топлива при горении составил:

$$M = m_0 \cdot F_{\text{г}} = 3,37 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Расход воздуха, поступающего в факел, рассчитывался по формуле:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{г}} - M = 292,3 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}.$$

Максимальный объемный расход воздуха, который должен поступать в факел:

$$Q_B = \frac{1}{\rho_0} G_B, \quad Q_B = 227 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Воздух в зону горения должен поступать за счет перепада давления, создаваемого тягой продуктов горения в ограждении, равного:

$$\Delta P = g \cdot H \cdot (\rho_0 - \rho_f) = 42,5 \text{ Па}.$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ .

Величина гидравлического сопротивления щели, обеспечивающая расход воздуха  $Q_B$ , при этом перепаде давления должна быть равна:

$$R = \Delta P / Q_B^2, \quad R = 0,000868 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-6}.$$

Значение  $R$  определялось геометрическими и аэродинамическими характеристиками щели по формуле:

$$R = (\xi_{щ} + \xi_{пов}) \frac{\rho_0}{2(H_{щ} \cdot P_{щ})^2}, \quad (2)$$

где  $\xi_{щ} = 0,5$  – коэффициент сопротивления входа щели;  $\xi_{пов} = 1,41$  – коэффициент сопротивления поворота потока воздуха на  $90^\circ$ ;  $H_{щ}$  – высота щели в нижней части ограждения, м;  $P_{щ} = 31,6 \text{ м}$  – периметр ограждения.

Из формулы (2) определялась высота щели:

$$H_{щ} = \sqrt{\frac{(\xi_{щ} + \xi_{пов}) \rho_0}{2P_{щ}^2 R}} = 1,2 \text{ м}.$$

Щель должна быть защищена от ветра. Высота соответствующих дополнительных экранов  $H_d$  должна быть не ниже верхней кромки щели:

$$H_d = H_{щ} + H_б. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что высота дополнительных экранов  $H_d$  при использовании керосина составляет  $1,45 \text{ м}$ .

Для беспрепятственного доступа воздуха к щели дополнительный экран следует располагать от ветрозащитного ограждения на расстоянии  $a$ , равном  $H_d$ .

С использованием приведенных выше значений параметров на территории испытательной станции КБСМ была построена полигонная установка и проведены тепловые испытания опытного образца ТУК МБК. При испытаниях проводились измерения температуры газовой среды и поверхности кожуха МБК. В качестве горючего использовался керосин (топливо Т1 ГОСТ 10227-84).

В ходе проведения испытаний высота факела пламени составляла  $2-2,5H$ . Результаты проведенных испытаний показали соответствие параметров огневых испытаний ТУК МБК требованиям Правил МАГАТЭ. Относительно невысокие температуры на верхней части поверхности ТУК обусловлены экранирующим эффектом корпуса испытываемого объекта.

## Литература

1. Правила безопасной перевозки радиоактивных веществ. МАГАТЭ, Вена, 1991.
2. Справочный материал по применению правил МАГАТЭ по безопасной перевозке радиоактивных веществ. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 1974.
3. Пояснительный материал к правилам МАГАТЭ по безопасной перевозке радиоактивных веществ. Международное агентство по атомной энергии. Вена, 1990.
4. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М.: Изд-во АН СССР. 1961.
5. Кимстач И.Ф., Девишев П.П., Евтюшкин Н.М. Пожарная тактика. М.: Стройиздат, 1984. 540 с.
6. Fry C.J. A development in the calculation of heat transfer by radiation between diffusely reflecting grey surfaces. First National Heat Transfer Conference, U.K., Inst. Eng. July 1984.
7. Анализ размещения атомных станций с точки зрения метеорологических условий и распределения населения: Отчёт о НИР/ИАЭ им. И.В. Курчатова. Инв. N 36/2113.811, 1981.
8. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. С. 128.

