

Алексеев С. Г., канд. хим. наук, доц.,  
Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России  
Пищальников А. В., соискатель,

Судебно-экспертное учреждение федеральной противопожарной службы «Испытательная  
пожарная лаборатория по Пермскому краю»

Барбин Н. М., д-р техн. наук  
Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России

Калач А. В., д-р хим. наук, доц.,

Калач Е. В. канд. техн. наук,

Плаксицкий А. Б. канд. физ.-мат. наук

Воронежский институт Государственной противопожарной службы МЧС России

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ БЕЗОПАСНЫХ ОБЪЕМОВ ПОМЕЩЕНИЙ С ЛЕГКОВОСПЛАМЕНЯЮЩИМИСЯ ЖИДКОСТЯМИ

pab13@mail.ru

В представленной работе найдены удельные безопасные объемы помещений объектов, в которых хранятся или используется ЛВЖ, на примере территории г. Воронежа и Воронежской области. Дан сравнительный анализ отечественного и американского подходов прогноза удельных безопасных объемов помещений.

**Ключевые слова:** помещение, избыточное давление, ЛВЖ, безопасность, расчет.

При проектировании новых промышленных, складских и лабораторных помещений, в которых используются и/или хранятся легко воспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ), необходима обязательная проверка на отнесение их к категории взрывоопасных (категория «А» или «Б» по СП 12.13130.2009[1]). Аналогичная ситуация возникает у надзорных органов госпожнадзора при проведении проверок вышеупомянутых помещений. Проведение расчетов по каждому случаю достаточно трудоемкая задача, поэтому применение подхода определения удельного безопасного объема помещения [2, 3] значительно облегчает решение этого вопроса. В США используется совершенно иной подход для определения избыточного давления взрыва в помещениях, поэтому сравнение двух подходов представляет не только научный, но и практический интерес. Поскольку американская и отечественная классификации воспламеняющихся жидкостей на ЛВЖ и горючие жидкости (ГЖ) отличаются друг от друга [4], то предпочтение было отдано отечественному подходу, приведенному в ГОСТ 12.1.044-89\* [5]. Таким образом, возникает потребность в проведении расчетов удельных безопасных объемов помещения для ряда основных растворителей из класса ЛВЖ по отечественной и американской методикам.

**1. Определение удельных безопасных объемов помещения по СП 12.13130.2009.** Удельный безопасный объем помещения это минимальный объем помещения, отнесенный к аварийному разливу 1 л ЛВЖ, при котором со-

здается избыточное давление взрыва паровоздушной смеси не более 5 кПа.

В Сводах правил[1] для расчета избыточного давления взрыва газо- и паровоздушных горючих смесей предлагаются уравнения:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{mZ}{V_{\text{св}} \rho_{\text{п}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}}, \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{m \Delta H_{\text{гор}} P_0 Z}{V_{\text{св}} \rho_{\text{в}} C_p T_0 K_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где  $P_0$  – начальное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа [1]);  $m$  – масса горючих паров ЛВЖ/ГЖ;  $Z$  – коэффициент участия горючих газов и паров в горении, для ЛВЖ  $Z=0,3$  [1];  $V_{\text{св}}$  – свободный объем помещения,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара ЛВЖ при расчетной температуре  $t_p$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , вычисляемая по формуле:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)}; V_0 – \text{киломолярный объем,}$$

равный  $22,413 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  [1];  $t_p$  – рабочая температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_{\text{ст}}$  – стехиометрическая концентрация паров ЛВЖ/ГЖ, % (об.);  $K_{\text{н}}$  – безразмерный коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения,  $K_{\text{н}} = 3$  [1];  $\Delta H_{\text{гор}}$  – низшая теплота сгорания,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха при  $38^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho_{\text{в}} = 1,1355 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $C_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении,  $C_p = 1,01 \times 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{град})$  [1];  $T_0$  – начальная температура воздуха,  $T_0 = t_p + 273 = 311 \text{ К}$ .

Если вместо избыточного давления подставить 5 кПа и учесть, что свободный объем помещения составляет 80 % от объема помеще-

ния [1], а также, что  $K_n = 3$  и  $Z = 0,3$ , то из формул (1) и (2) можно вывести уравнения для опреде-

$$\Delta V_1 = (P_{\max} - P_o) \frac{100 \times m \times 0,3}{0,8 \times 5 \times \rho_n \times C_{ст} \times 3} = (P_{\max} - P_o) \frac{2,5m}{\rho_n C_{ст}} \quad (3)$$

$$\Delta V_2 = \frac{m \Delta H_{гор} \times 0,3}{0,8 \times 5 \times \rho_B C_p T_o \times 3} = \frac{m \Delta H_{гор} P_o}{40 \times \rho_B C_p T_o} \quad (4)$$

Неизвестная масса горючих паров ЛВЖ (m) рассчитана с помощью уравнений (5) и (6) [1].

$$W = 10^{-6} \times \eta \sqrt{M} \times P_{нас}, \quad (5)$$

$$m = W F_n \tau, \quad (6)$$

где W – интенсивность испарения растворителя, кг/(м<sup>2</sup>×с); P<sub>нас</sub> – давление насыщенных паров при рабочей температуре (t<sub>p</sub>), кПа, вычисляемое по уравнению Антуана:  $\lg P_{нас} = A - \frac{B}{C + t_p}$ ; A, B и C –

константы [6]; η – коэффициент, учитывающий скорость и температуру воздушного потока над поверхностью испарения (см. табл. 2); F<sub>n</sub> – расчетная площадь испарения, для 1 л чистого сольвента F<sub>n</sub> = 1 м<sup>2</sup> [1]; τ – максимальное расчетное время свободного испарения, τ = 3600 с [1]

Рабочая температура в помещении принимается с учетом технологического процесса или по абсолютной максимальной температуре для определенной территории субъекта Российской

Федерации. Принимая во внимание, что абсолютная максимальная температура воздуха в нашей стране колеблется от 22 до 45 °С [7], а ограниченный объем статьи не позволяет рассмотреть данный температурный диапазон в полном объеме, поэтому расчеты выполнены для региона Воронежской области, где рабочая аварийная температура (t<sub>p</sub>) составляет 38 °С [7].

Для исследования выбраны растворители с учетом американской базы данных [8]. Исходные данные, включая результаты промежуточных расчетов для 9 ЛВЖ, приведены в таблице 1. Прогноз определения удельных безопасных объемов (ΔV<sub>1</sub> и ΔV<sub>2</sub>) помещений по уравнениям (3) и (4) представлен в таблице 2, из которой видно, что результаты расчетов ΔV<sub>1</sub> и ΔV<sub>2</sub> различаются в 1,2–2,8 раза. Это вероятно обусловлено несовершенством методик определения избыточного давления, изложенных в СП 12.13130.2009 [1].

Таблица 1

Исходные данные для определения удельных безопасных объемов помещений с ЛВЖ по СП 12.13130.2009

ЛВЖ	t <sub>всп</sub> , °С	M, кг/кмоль	P <sub>нас</sub> , кПа (38 °С)	ρ <sub>n</sub> , кг/м <sup>3</sup> (38 °С)	C <sub>ст</sub> , % (об.)	P <sub>max</sub> , кПа	ΔH <sub>гор</sub> , кДж/кг	ρ <sub>ж</sub> , кг/м <sup>3</sup>	w <sub>в</sub> × 10 <sup>2</sup> , кг/(м <sup>2</sup> ×с)	k <sub>p</sub>
Метанол	6 15	32,041	32,258	1,255	12,11	620	20000 (23839,0)	796 (786,9)	2,2 (2,59)	8
Этанол	13	46,068	16,134	1,804	6,44	680	26800 (30563,5)	794 (785)	2,2 (3,7)	8
Бензол	-11	78,114	22,441	3,059	2,68	880	40100 (40576,1)	874 (873,7)	8,5 (11,2)	2,7
Гексан	-23 -22	86,178	30,831	3,374	2,13	850	44700 (45103,3)	650 (654,8)	7,4 (10,3)	1,9
Гептан	-4	100,205	11,309	3,924	1,84	843	44600 (44917,9)	675 (683,8)	10,1 (8,97)	1,1
Ксилол	29 23	106,168	2,386	4,157	1,93	765	40800 (52830,4)	870 (855)	9 (8,8)	1,4
Ацетон	-18	46,068	52,387	1,804	6,44	570	25800 (39537,2)	791 (790,8)	4,1 (5,96)	1,9
1,4-Диоксан	12	88,104	9,351	3,450	3,97	820	26200 (23990,5)	1035 (1033)	1,8	5,4
Диэтиловый эфир	-41 -45	74,122	114,343	2,902	3,33	720	34200 (34146,4)	714 (713,5)	8,5 (10,83)	0,7

Примечания.

t<sub>всп</sub> – температура вспышки в закрытом тигле [6, 9, 10]; P<sub>max</sub> – максимальное давление взрыва [9, 10]; ΔH<sub>гор</sub>, ρ<sub>ж</sub>, w<sub>в</sub> – низшая теплота сгорания, плотность и массовая скорость выгорания ЛВЖ [8, 11], для сравнения в скобках показаны отечественные значения этих параметров [9, 10], низшая теплота сгорания для 1,4-диоксана рассчитана по формуле Менделеева [12]; k<sub>p</sub> – эмпирическая константа; ксилол – смесь орто-, пара- и метаксилолов, в которой основным компонентом является мета-ксилол (~40–65 %), максимальное давление взрыва и низшая теплота сгорания взяты по основному веществу смеси [9].

Таблица 2

## Результаты определения удельных безопасных объемов помещений с ЛВЖ по СП 12.13130.2009

Скорость воздушного потока 0 м/с, $\eta = 1$ [1]					
ЛВЖ	$W \times 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ×с)	м, кг	$\Delta V_1$	$\Delta V_2$	$\Delta V_2/\Delta V_1$
Метанол	0,182594	0,657	56,2	110,9	2,0
Этанол	0,109504	0,394	49,1	85,3	1,7
Бензол	0,198334	0,714	169,6	205,1	1,2
Гексан	0,286211	0,655*	170,7	209,1	1,2
Гептан	0,113210	0,408	104,5	129,6	1,2
Ксилол	0,024585	0,089	18,3	33,1	1,8
Ацетон	0,355567	0,791*	79,8	221,3	2,8
1,4-Диоксан	0,087771	0,316	41,5	53,7	1,3
Диэтиловый эфир	0,984428	0,714*	114,3	172,5	1,5
Скорость воздушного потока 0,1 м/с, $\eta = 1,6$ [1]					
ЛВЖ	$W \times 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ×с)	м, кг	$\Delta V_1$	$\Delta V_2$	$\Delta V_2/\Delta V_1$
Метанол	0,292151	0,787*	67,2	132,8	2,0
Этанол	0,175206	0,631	78,6	136,5	1,7
Бензол	0,317335	0,874*	207,5	250,9	1,2
Гексан	0,457938	0,655*	170,7	209,1	1,2
Гептан	0,181135	0,652	167,2	207,4	1,2
Ксилол	0,039337	0,142	29,3	53,0	1,8
Ацетон	0,568908	0,791*	79,8	221,3	2,8
1,4-Диоксан	0,140433	0,506	66,4	85,9	1,3
Диэтиловый эфир	1,575084	0,714*	114,3	172,5	1,5
Скорость воздушного потока 0,2 м/с, $\eta = 2,3$ [1]					
ЛВЖ	$W \times 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ×с)	м, кг	$\Delta V_1$	$\Delta V_2$	$\Delta V_2/\Delta V_1$
Метанол	0,419967	0,787*	67,2	132,8	2,0
Этанол	0,251858	0,785*	97,8	169,8	1,7
Бензол	0,456169	0,874*	207,5	250,9	1,2
Гексан	0,658286	0,655*	170,7	209,1	1,2
Гептан	0,260382	0,684*	175,3	217,4	1,2
Ксилол	0,056546	0,204	42,1	76,1	1,8
Ацетон	0,817805	0,791*	79,8	221,3	2,8
1,4-Диоксан	0,201873	0,727	95,4	123,4	1,3
Диэтиловый эфир	2,264184	0,714*	114,3	172,5	1,5
Скорость воздушного потока 0,5 м/с, $\eta = 3,2$ [1]					
ЛВЖ	$W \times 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ×с)	м, кг	$\Delta V_1$	$\Delta V_2$	$\Delta V_2/\Delta V_1$
Метанол	0,584302	0,787*	67,2	132,8	2,0
Этанол	0,350411	0,785*	97,8	169,8	1,7
Бензол	0,634670	0,874*	207,5	250,9	1,2
Гексан	0,915876	0,655*	170,7	209,1	1,2
Гептан	0,362270	0,684*	175,3	217,4	1,2
Ксилол	0,078673	0,283	58,6	105,9	1,8
Ацетон	1,137815	0,791*	79,8	221,3	2,8
1,4-Диоксан	0,280867	1,011	132,8	171,7	1,3
Диэтиловый эфир	3,150168	0,714*	114,3	172,5	1,5
Скорость воздушного потока 1 м/с, $\eta = 4,6$ [1]					
ЛВЖ	$W \times 10^3$ , кг/(м <sup>2</sup> ×с)	м, кг	$\Delta V_1$	$\Delta V_2$	$\Delta V_2/\Delta V_1$
Метанол	0,839934	0,787*	67,2	132,8	2,0
Этанол	0,503716	0,785*	97,8	169,8	1,7
Бензол	0,912338	0,874*	207,5	250,9	1,2
Гексан	1,316572	0,655*	170,7	209,1	1,2
Гептан	0,520764	0,684*	175,3	217,4	1,2
Ксилол	0,113093	0,407	84,2	152,3	1,8
Ацетон	1,635610	0,791*	79,8	221,3	2,8
1,4-Диоксан	0,403746	1,033*	135,6	175,4	1,3
Диэтиловый эфир	4,528367	0,714*	114,3	172,5	1,5

\* За расчетное время  $\tau$  (3600 с) растворитель испаряется полностью.

**2. Определение удельных безопасных объемов помещения по методу Карлссона и Квинтая.** Комиссия по регулированию атомной энергетики США (U.S. Nuclear Regulatory Commission) рекомендует метод Карлссона и Квинтая (The Method of Karlsson and Quintiere) для прогнозирования избыточного давления в закрытых помещениях [8]. В этом методе рассматриваются условия повышения избыточного давления в помещении в результате горения проливной жидкости. Задача решается в приближении идеальных газов, для которых при постоянном объеме справедливо отношение (7).

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta T}{T_0} \quad (7)$$

В дальнейшем уравнение (7) с учетом формулы (8) преобразуется в соотношение (9), которое используется для определения избыточного давления в закрытом помещении [8, 11, 13].

$$q\tau_1 = V\rho_v C_v \Delta T \quad (8)$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{q\tau_1}{V\rho_v C_v T_0} \quad (9)$$

где  $q$  – скорость тепловыделения, кВт/м<sup>2</sup>;  $\tau_1$  – время после поджигания, обычно принимают, что  $\tau_1 = 10$  с;  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $\rho_v$  – плотность воздуха при 38 °С,  $\rho_v = 353/T_0 = 1,1350$  кг/м<sup>3</sup>[8];  $C_v$  – теплоемкость воздуха при постоян-

ном объеме,  $C_v = 0,723$  кДж/(кг×град.). (Для воздуха  $C_p - C_v = 0,287$  кДж/(кг×град) [12]).

Для определения скорости тепловыделения ( $q$ ) предложено уравнение (10) [8, 13].

$$q = w_v \Delta H_{гор} F_{и} (1 - 1/e^{k_{\beta} D}) \quad (10)$$

где  $D$  – диаметр площади горения,  $D = \sqrt{\frac{4F_{и}}{\pi}} = 1,284\text{м}$ .

В применении к условиям нашей задачи ( $\Delta P = 5$  кПа) уравнение (9) преобразовано в формулу (11).

$$\Delta V_3 = \frac{q\tau_1 P_0}{5\rho_v C_v T_0} \quad (11)$$

где  $\Delta V_3$  – удельный объем помещения, м<sup>3</sup>.

Исходные данные ( $\Delta H_{гор}$ ,  $w_v$ ,  $k_{\beta}$ ) представлены в таблице 1. В ходе предварительных расчетов найдено, что значение коэффициента  $k_{\beta}$  для метанола и этанола можно принять не 100, как это указано в работе [8], а 8, так как при  $k_{\beta} \geq 8$  величины скорости тепловыделения ( $q$ ) для этих соединений практически не изменяются.

Результаты расчетов  $q$  и  $\Delta V_3$  приведены в таблице 3. Принимая во внимание, что  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  найдены с учетом свободного объема помещения, нами произведен расчет удельных безопасных объемов помещений ( $\Delta V_4$ ) с поправкой на свободный объем помещений.

Таблица 3

**Результаты определения удельных безопасных объемов помещений с ЛВЖ по методу Карлссона и Квинтая**

ЛВЖ	$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	$\Delta V_3$ , м <sup>3</sup>	$\Delta V_4$ , м <sup>3</sup>	$\Delta V_4/\Delta V_1$
Метанол	44,00	34,8	43,5	0,8
Этанол	58,96	46,7	58,3	1,2
Бензол	330,21	261,4	326,7	1,9
Гексан	301,94	239,0	298,7	1,7
Гептан	340,75	269,7	337,1	3,2
Ксилол	306,36	242,5	303,1	16,6
Ацетон	96,56	76,4	95,5	1,2
1,4-Диоксан	47,11	37,3	46,6	1,1
Диэтиловый эфир	172,37	136,4	170,5	1,5

Примечание.

$$V_4 = V_3/0,8.$$

**3. Сравнительный анализ методов расчета избыточного давления в помещениях по СП 12.13130.2009 и методу Карлссона и Квинтая.** В СП и методе Карлссона и Квинтая заложены различные сценарии развития теоретической аварийной ситуации, связанной с разлитием ЛВЖ. В сводах правил рассматривается вариант объемной вспышки (взрыва) паровоздушной смеси, а в американской методике рассматривается сравнительно медленный рост избыточного давления в результате выгорания воспламеняющейся жидкости. Несмотря на это

для спиртов, ацетона и диоксана результаты прогноза  $\Delta V_4$  сопоставимы с результатами расчета  $\Delta V_1$ , а для диэтилового эфира с величиной  $\Delta V_2$  (см. табл. 2 и 3). Для углеводородных растворителей (бензол, гексан, гептан, ксилол) американский подход дает завышенные значения удельного безопасного объема по сравнению с отечественной методикой (см. табл. 2 и 3).

#### Выводы.

1. Найдены удельные безопасные объемы помещений объектов, в которых храниться или

используется ЛВЖ, на примере территории г. Воронежа и Воронежской области. Полученные результаты могут использоваться проектными организациями и надзорными органами в их практической деятельности.

2. Показано, что российская и американская методики определения избыточного давления в результате расчетной аварийной ситуации, связанной с разлитием ЛВЖ, построены на различных сценариях развития событий. В отечественном методе заложен вариант объемной вспышки (взрыва) паровоздушной смеси, сопровождающийся мгновенным подъемом избыточного давления в помещении, а в американский метод базируется на сравнительно медленном росте избыточного давления в результате выгорания ЛВЖ. Несмотря на это оба подхода дают сопоставимые результаты прогноза безопасных объемов помещений, в которых хранятся или используются неуглеводородные растворители.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. О взрывопожароопасности водочной продукции / С. Г. Алексеев, Н.М. Барбин, А.С.Авдеев, А.В. Пищальников // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18, № 2. С. 20-23.
3. Пожаровзрывобезопасность хроматографической аналитической лаборатории / О. Б. Рудаков, С.Г.Алексеев, Н.В.Бердникова, А.В.Калач, Н.М. Барбин // Пожаровзрывобезопасность. 2012.Т. 21, № 1.С. 57-60.
4. Алексеев С. Г. , Смирнов В. В., Барбин Н.М.Температура вспышки. Часть I. История вопроса, дефиниции, методы экспериментального определения // Пожаровзрывобезопасность.2012.Т. 21, № 1. С. 35-41.
5. ГОСТ 12.1.044–89\*. ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. Доступ из сборника НСИС ПБ. 2011. № 2 (45).
6. Smallwood, I. M. Handbook of Organic Solvent Properties N.Y.: Halsted Press, 1996. 303 P.
7. СНиП 23-01-99\*. Строительная климатология. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Iqbal N. Fire Dynamics Tools (FDTs):Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission. Fire Protection Inspection Program. Final Report. NU-REG. Washington: NRR & NRC, 2004. 1008 pp.
9. .Корольченко А.Я, Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник: в 2-х. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. Ч. 1. 713 с.
10. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник: в 2-х ч. М.: Асс. «Пожнаука», 2004. Ч. 2. 774 с.
11. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / byed. P. J. Di Nenno. – Quincy: NFPA, 2002. 1604 pp.
12. Демидов П. Г., Саушев В. С.Горение и свойства горючих веществ– М.: ВИПТШ, 1975. 280 с.
13. Karlsson B., Quintiere J.G.. Enclosure Fire Dynamics– Boca Raton: CRC Press, 2000. 336 pp.