

УДК 614.8.084 (614.8.49)

***НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ  
ПРЕКРАЩЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ВОПРОСАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ***

***Троценко А.А.***

*к.б.н., доцент*

*Мурманский государственный арктический университет,*

*Мурманск, Россия*

***Чунин А.И.***

*ст. преподаватель*

*Мурманский государственный арктический университет,*

*Мурманск, Россия*

***Бурлака А. В.***

*бакалавр,*

*Мурманский государственный арктический университет,*

*Мурманск, Россия*

**Аннотация**

В статье рассмотрены примеры применения критериев пожаровзрывоопасности в прогнозировании чрезвычайной ситуации при транспортировке, хранении и обращении с горючим веществом – пропаном.

**Ключевые слова:** пропан, температура вспышки, температура самовоспламенения, минимальная энергия зажигания.

***SOME ASPECTS OF PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE THEORY OF  
FLAME STOP IN THE SUBJECT OF PREDICTING EMERGENCY  
SITUATIONS***

***Trotsenko A.A.***

*Ph.D in Biology sciences*

*Murmansk Arctic State University*

*Murmansk, Russia*

***Chuunin A.I.***

*senior lecturer*

*Murmansk Arctic State University*

*Murmansk, Russia*

***Burlaka A.V.***

*bachelor*

*Murmansk Arctic State University*

*Murmansk, Russia*

## Annotation

In this article were discussed usage examples of some fire and explosion risks criterias for emergency forecasting in transporting, storing and applying of combustible substance - propane.

**Keywords:** propane, flash point, ignition temprature, minimal ignition temperature (fire point).

Активное развитие промышленного производства увеличивает степень его негативного воздействия на окружающую среду, повышает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, связанных с пожарами и взрывами. Современная промышленность характеризуется значительным многообразием пожаро- и взрывоопасных объектов (рис. 1).

Для пожаро- и взрывоопасных объектов (ПВОО) характерно то, что на них производят, используют, перерабатывают, хранят или транспортируют легковоспламеняющиеся, пожаро- и взрывоопасные вещества, создающие реальную угрозу для человека и способствующие развитию техногенной чрезвычайной ситуации [1].



Рис. 1 - Типология пожаро- и взрывоопасных объектов [2, 4].

В ходе уже сложившейся чрезвычайной ситуации, связанной с возгоранием ПВОО основные принципы прекращения горения основаны на понимании основных путей прекращения горения, заключающихся в снижении скорости тепловыделения, увеличении скорости теплоотвода от зоны реакции горения, снижении температуры горения. Это достигается за счет охлаждения реагирующих веществ сплошными или распыленными струями воды; изоляции веществ слоем пены, продуктами взрыва, огнезащитными полосами, созданием разрыва в горючем веществе; разбавления веществ до негорючих концентраций струями тонкораспыленной воды, газовойдынными струями, негорючими парами или газами; химического торможения реакции горения огнетушащим порошком или галопроизводными углеводородов.

При этом востребованность приобретает анализ условий возникновения реальных процессов горения и их усиления под воздействием различных факторов окружающей среды. При рассмотрении условий возникновения горения анализ необходимо проводить на термодинамическом уровне, позволяющем установить количественные закономерности, связывающие между собой параметры горючей смеси и условий воспламенения [5]. Основными критериями пожаровзрывоопасности веществ являются: температура вспышки, температура самовоспламенения и минимальная энергия зажигания [3].

В связи с этим целью нашего исследования является расчет дополнительных параметров окружающей среды для обеспечения безопасных режимов работы с горючими веществами – сжиженными углеводородными газами.

В данном исследовании приведены примеры расчетов и рационализаторские предложения по безопасным режимам работы с пропаном.

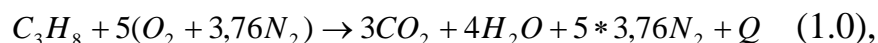
Пропан ( $C_3H_8$ ) представляет собой бесцветный газ, который в настоящее время широко используется в промышленности, в быту и в автомобильном транспорте.

Целью данных расчетов является безопасная транспортировка большого количества пропана из точки А (с температурой окружающей среды +25 °С), в точку В (с температурой окружающей среды + 60 °С). При этом в ходе транспортировки учитываются необходимые остановки транспортного средства.

Нами проанализированы следующие свойства исследуемого вещества:

1. Основными свойствами пропана: уравнение реакции по воздуху; степень горения; концентрационные пределы распространения пламени (КПРП).
2. Условия теплового самовозгорания.
3. Минимальная энергия зажигания.
4. Минимальная электрическая энергия, при которой пропан будет безопасен для других менее горючих веществ.

Рассмотрим уравнение реакции по воздуху (1.0):



где:

$\beta$  – коэффициент в химической реакции перед кислородом ( $\beta = 5$ ), показывающий, сколько необходимо кислорода для полного сгорания 1 моль горючего вещества.

Коэффициент горючести будет рассчитываться следующим образом (1.1):

$$Kr = 4 * (C)_n + 4 * (S)_n + (H)_n - 2(O)_n - 3(F)_n - 2(Cl)_n - 5(Br)_n \quad (1.1),$$

подставим значения:

$$Kr = 4 * 3 + 8 = 20.$$

Анализ значения коэффициента горючести ( $> 1$ ) свидетельствует о том, что пропан хорошо горит.

Рассчитаем концентрационные пределы распространения пламени (1.2):

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{\alpha * \beta + b} \% \quad (1.2),$$

где:

$\alpha$  и  $b$  – коэффициенты из таблицы 1;

$\beta$  – коэффициент в химической реакции (стоит перед кислородом).

Таблица 1 - Значение коэффициентов распространения пламени [6]

<b>КПРП</b>	<b>А</b>	<b>В</b>
НКПРП	8,684	4,679
ВКПРП $\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
ВКПРП $\beta > 7,5$	0,768	6,554

Низший концентрационный предел распространения пламени (НКПРП) рассчитаем по формуле 1.3:

$$\varphi_{(H)t} = \varphi_H \left(1 - \frac{T - T_0}{1150 - T_0}\right), \% \quad (1.3)^*$$

*\*Примечание: взамен 1150 возьмем температуру, равную 1550, т.к. в соответствии с задачами нашего исследования нам необходимо предвидеть наиболее опасные режимы работы с анализируемым веществом.*

Высший концентрационный предел распространения пламени (ВКПРП) рассчитываем по формуле:

$$\varphi_{(B)t} = \varphi_B \left(1 + \frac{T - T_0}{1100 - T_0}\right), \% \quad (1.4).$$

Для расчетов НКПРП и ВКПРП необходимо знать начальную температуру и температуру с изменениями. Следовательно,  $T_0$  будет равна  $+25^\circ\text{C}$ , а за  $T$  берется температура, равная  $80^\circ\text{C}$ , которая образуется от суммы следующих учтенных температур:

$60^\circ\text{C}$  – температура окружающей среды;

$10^\circ\text{C}$  – от дорожного полотна;

$10^\circ\text{C}$  – от работающего двигателя автотранспорта (при условии, что нет охлаждающей системы в кузове при транспортировке пропана).

Для более точных расчетов будем рассчитывать температуру в градусах Кельвина. Проведем необходимые расчеты:

$$\varphi_H = \frac{100}{8,684 * 5 + 4,679} = 2,08\%$$

$$\varphi_{(H)t} = 2,08 * \left(1 - \frac{(273 + 80) - (273 + 25)}{1550 - (273 + 25)}\right) = 1,99\%$$

$$\varphi_B = \frac{100}{1,550 * 5 + 0,560} = 12,03\%$$

$$\varphi_{(B)t} = 12,03 * \left(1 + \frac{(273 + 80) - (273 + 25)}{1100 - (273 + 25)}\right) = 12,85\%$$

ВКПРП (12,85%) – это порог концентрации газа в паровоздушной смеси, равный данному значению и ниже, при котором при стандартных условиях (независимо от расстояния до источника зажигания) произойдет самовозгорание пропана.

НКПРП (1,99%) – это порог концентрации газа в паровоздушной смеси, равный данному значению и выше, при котором при стандартных условиях произойдет самовозгорание пропана.

Важно знать: ниже НКПРП возгорание не произойдет, но если есть источник зажигания, то 1,5% содержания НКПРП будет достаточно для самовоспламенения вещества. Следовательно, наиболее безопасным пропан будет, если его концентрация меньше 1% в паровоздушной смеси при заданных условиях.

Для снижения пожаровзрывоопасности веществ, а именно, более безопасных режимов работы в практике применяют флегматизатор – жидкое, твердое или газообразное вещество, добавляемое в качестве примеси к горючему веществу, для снижения его чувствительности к факторам окружающей среды.

Отсюда следует, что представляется возможным снизить зоны поражения с использованием флегматизатора. При этом необходимо знать, что он не устраняет зону поражения, а всего лишь снижает ее, за счет снижения ВКПРП.

Имея значения КПРП, рассчитаем безопасные концентрации пропана по формулам (1.5 и 1.6):

$$\varphi_{\text{без}(H)} \leq 0,9 * (\varphi_H - 0,7 * R)\% \quad (1.5),$$

$$\varphi_{\text{без}(H)} \leq 0,9 * (2,08 - 0,7 * 0,95) = 1,27\%$$

$$\varphi_{\text{без}(B)} \geq 1,1 * (\varphi_B + 0,7 * R)\% \quad (1.6),$$

$$\varphi_{\text{без}(B)} \geq 1,1 * (12,03 + 0,7 * 0,95) = 13,96\%$$

Исходя из полученных значений, сформулируем вывод: пожаровзрывобезопасные концентрации пропана будут при нижнем значении  $\varphi_{\text{без}} \leq 1,27\%$  (т.е. безопасная концентрация равна 1,27% или меньше этого значения) и при верхнем значении  $\varphi_{\text{без}} \geq 13,96\%$  (т.е. безопасной будет концентрация, равная 13,96% или выше).

Рассмотрим условия теплового самовозгорания. Эти условия применяются при выборе безопасных условий переработки, транспортировки и хранения самовоспламеняющихся горючих веществ. Безопасной считается температура вещества, равная:

$$t_{\text{без}} < 0,8 * t_c,$$

где:

$t_c$  – минимальная температура среды, при которой наблюдается самовозгорания вещества.

В нашей стране и за рубежом законодательным путем установлены единые значения параметров для различных веществ. Так, температура самовоспламенения пропана составляет:

$$t_{c(\text{пропана})} = 470^\circ\text{C}.$$

$$t_{\text{без}} < 0,8 * 470 = 360^\circ\text{C},$$

следовательно: безопасной температурой для пропана будет являться температура ниже  $360^\circ\text{C}$ .

Исследуем минимальную энергию зажигания. При расчете данного параметра к значениям температуры окружающей среды прибавим  $10^\circ\text{C}$ , т.к. транспортировка пропана производится на автотранспорте с работающим двигателем, от которого исходит тепло, а также прибавим  $10^\circ\text{C}$  с учетом дополнительного тепла от дорожного полотна.

Расчеты произведем при следующих значениях температуры:

1)  $25^{\circ}\text{C}+10^{\circ}\text{C}$  – начальная точка отправления, где температура окружающей среды  $25^{\circ}\text{C}$  (температуру дорожного полотна учитывать не будем, т.к. температура окружающей среды не велика);

2)  $60^{\circ}\text{C}+10^{\circ}\text{C}+10^{\circ}\text{C}$  – точка прибытия, где температура окружающей среды  $60^{\circ}\text{C}$ ;

3)  $470^{\circ}\text{C}$  – температура самовоспламенения пропана.

Данные расчеты произведем по формуле (1.7):

$$W_s = \alpha * q * l_k^3 \text{ Дж} \quad (1.7),$$

где:

$$\alpha = 0,5;$$

$$l = 0,25\text{мм} (10^{-3} \text{ м}),$$

$q$  находится по формуле (1.8):

$$q = \int_{t_{нач}}^{t_{св}} C_p * \rho_r * dt. \quad (1.8),$$

где:

$$t_{нач} = 25 + 10 = 35^{\circ}\text{C};$$

$$t_{прибытия} = 60 + 10 + 10 = 80^{\circ}\text{C};$$

$$t_{св} = 470^{\circ}\text{C};$$

$dt$  – разница температур.

Отсюда по таблице 2:

Таблица 2 - Значения воздуха при различных температурах

$t, ^{\circ}\text{C}$	Теплоемкость воздуха, кДж ( $C_p$ )	Тепло, затрачиваемое на нагрев $1 \text{ м}^3$ воздуха, кДж ( $\rho_r$ )
35	1,152	17
80	1,099	66,2
470	0,560	294,3

При температуре самовоспламенения пропана  $470^{\circ}\text{C}$ :

$$q = (0,560 * 294,3) * 10^6 = 1,648 * 10^8$$



$$W_{470} = 0,5 * 1,648 * 10^8 * (0,25 * 10^{-3})^3 = 0,824 * 10^8 * 0,015625 * 10^{-9} = 0,01287 * 10^{-1} = 1,287 * 10^{-3} \text{ Дж}$$

При начальной температуре 35°C:

$$q = (1,152 * 17) * 10^6 = 1,958 * 10^7$$

$$W_{\text{заж}}(35) = 0,5 * 1,958 * 10^7 * (0,25 * 10^{-3})^3 = 1,32 * 10^7 * 0,015625 * 10^{-9} = 0,01 * 10^{-3} \text{ Дж} .$$

При начальной температуре 80°C:

$$q = (1,099 * 66,2) * 10^6 = 7,275 * 10^5$$

$$W_{\text{заж}}(80) = 0,5 * 7,275 * 10^5 * (0,25 * 10^{-3})^3 = 36,3 * 10^6 * 0,015625 * 10^{-9} = 0,56 * 10^{-3} \text{ Дж} .$$

Из расчетов следует, что при источнике зажигания с минимальной энергией  $W_{\text{заж}}(35^\circ\text{C})$ , равной  $0,01 \cdot 10^{-3}$  Дж произойдет возгорание пропана. В этом случае сам пропан станет источником зажигания для менее легковоспламеняющихся веществ и нарушения правил обращения с горючими веществами, что может повлечь за собой возникновение пожароопасной ситуации.

Что касается безопасной минимальной энергии зажигания, то для пропана это значение будет рассчитано следующим образом (1.9):

$$W_{\text{без}} < 0,4 * W_{\text{мин}} , \text{ Дж} \quad (1.9),$$

подставляем:

$$0,4 * 0,01 * 10^{-3} = 0,004 * 10^{-3} \text{ Дж} .$$

Следовательно, пропан можно хранить и транспортировать при электрическом источнике зажигания не более  $4 \cdot 10^{-6}$  Дж.

**Выводы** по результатам проведенного исследования:

1. Рассчитан пожаровзрывобезопасный концентрационный режим работы с пропаном: в нижней концентрации – 1,27% и менее; в верхней концентрации – 13,96% и более.

2. При выборе безопасных условий переработки, транспортировки и хранения самовоспламеняющихся горючих веществ большое внимание уделяют зависимости между окружающей средой, массой вещества и временем

до момента его самовозгорания. Для пропана безопасной температурой самовоспламенения, будет температура меньше  $360^{\circ}\text{C}$ .

3. Пропан представляется возможным хранить и транспортировать при электрическом источнике зажигания не более  $4 \cdot 10^{-6}$  Дж.

По итогам работы вынесены следующие **рекомендации**:

1. Перед транспортировкой любого горючего вещества необходимо обязательно проводить расчеты с учётом факторов окружающей среды: относительной влажности, температуры дорожного покрытия, температуры от двигателя, перепадов температур.

2. Обязательно использовать флегматизатор.

3. Соблюдать правила перевозки пожаровзрывоопасных грузов с использованием систем охлаждения.

4. При транспортировке пропана не совершать остановок в местах потенциального или фактического нахождения большого количества других горючих веществ, так как они могут стать источником зажигания для пропана и наоборот.

### **Библиографический список**

1. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. М.: Пожнаука. 2007. 265 с

2. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 (с изм. №1). СП 56.13330.2011; введ. в действ. 20.05.2011 г.

3. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения (с изм. №1). ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84): межгосударственный стандарт; введ. в действ. 01.01.1991 г.

4. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изм. на 29.07.2017 г.): принят 22.07.2008 г.

5. Тотая, А.В. Теория горения и взрыва / А.В. Тотая, О.Г. Казакова. М.: Юрайт. 2015. 295 с.

6. Троценко, А.А. Анализ дополнительных параметров по оценке уровня опасности горючих веществ и последствий взрыва при прогнозировании чрезвычайных ситуаций / А.А. Троценко, И.И. Коновалова, И.П. Курляндская // INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL: Международный научно-исследовательский журнал. Екатеринбург. 2017. № 07 (61) 2017. Часть 3 (июль). С. 91-95. URL: [http:// www.research-journal.org](http://www.research-journal.org); <https://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/07-3-61.pdf>.

7. Троценко А.А. Некоторые аспекты химизма самовозгорания и самовоспламенения // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 9. С. 284.