

УДК: 541.11:541.127:542.61

DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.004

© 2024. Все права защищены.

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА АЭРОВЗВЕСИ НИТРИДА УРАНА

Соколов И. П. \*, д-р хим. наук (isokolov@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 13 мая 2024 г.

### *Аннотация*

*Проведен анализ рекомендуемой в нормативных документах методики расчета избыточного давления взрыва. Отмечен ряд упрощений, допущенных при обосновании расчетных формул, снижающих точность определения значений избыточного давления взрыва для горючих пылей.*

*Проведен сравнительный анализ значений максимального давления взрыва аэровзвесей пирофорных материалов, принимающих участие в химико-технологических процессах объектов ядерного топливного цикла. Рассчитаны стандартные тепловые эффекты реакций окисления данных пирофорных материалов на воздухе. Установлены корреляционные зависимости между максимальными давлениями взрыва, тепловыми эффектами реакций, концентрациями частиц пирофорных материалов.*

*В результате проведенного анализа оценены значения максимального давления взрыва и соответствующей ему концентрации частиц нитрида урана, являющегося основным компонентом нитридного топлива. Оценены значения избыточного давления взрыва аэровзвесей нитрида урана с увеличением его массы и расстояния от эпицентра взрыва.*

► **Ключевые слова:** давление взрыва, нитрид урана, ядерный топливный цикл.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

## CALCULATED ESTIMATION OF EXPLOSION PRESSURE FOR URANIUM NITROGEN AEROSOL

Sokolov I. P.\*; D. Sc.

The article was received by the editors' crew on May 13, 2024.

### *Abstract*

*The analysis of the methods recommended in the regulatory document for calculation of excessive explosion pressure was carried out. A number of precision reducing simplifications were noted during calculation formulas justification, which reduce the accuracy of determining the values of excessive explosion pressure for combustible dusts.*

*The comparative analysis of maximum explosion pressure was carried out for aerosol pyrophoric materials used in chemical processing in nuclear fuel cycle facilities. The standard reaction heat effects for oxidation of pyrophoric materials in the air were calculated. The correlation dependences between maximum explosion pressures, reaction heat effects, concentration of pyrophoric materials particles in the air were determined.*

*Values of maximum explosion pressure and corresponding concentration of uranium nitrogen particles, which is the primary component of the nitrogen fuel, were estimated. Values of excessive explosion pressure of uranium nitrogen aerosol as a function of its mass increase and distance from the epicenter of the explosion were estimated.*

► **Keywords:** *explosion pressure, uranium nitrogen, nuclear fuel cycle.*

---

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

### Введение

Использование пирохимического передела для получения нитридного топлива связано с необходимостью предотвращения возможности возникновения взрывоопасных аэрозвесей пиррофорных частиц, основным компонентом которых является нитрид урана. Эта задача непосредственно связана с оценкой взрывоопасности технологических процессов, протекающих с участием пиррофорных материалов, поскольку меры по обеспечению взрыво-безопасности должны быть соизмеримы с существующей потенциальной опасностью.

Применительно к оценке взрывоопасности химико-технологических процессов объектов ядерного топливного цикла, в том числе протекающих с участием пиррофорных материалов, в [1] изложены следующие требования: в п. 6.7.7.2 приведено, что в проекте объекта ядерного топливного цикла должна быть представлена оценка последствий взрыва; в соответствии с п. 6.7.1 одним из принципов предотвращения пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ядерного топливного цикла является минимизация последствий неуправляемых химических экзотермических реакций, сопровождающихся выделением газообразных продуктов.

Основным параметром, определяющим радиационные последствия аварийного взрыва и возможности их минимизации, является достигаемое в результате взрыва давление газообразных продуктов неуправляемых реакций, величина которого зависит от условий возникновения взрыва, характеризующихся критическими значениями параметров технологического процесса.

В связи с отсутствием надежных экспериментальных данных по влиянию технологических параметров на величину избыточного давления, возникающего при взрыве аэрозвеси нитридного топлива, основным способом его оценки становится применение расчетных методов. Наибольшее значение при этом приобретает использование расчетных методов, приведенных, например, в СП 12.13130.2009 [2], где изложены рекомендуемые методы расчета избыточного давления взрыва для горючих пылей, к которым относятся и мелко-дисперсные пиррофорные материалы, включая нитрид урана.

Цель статьи – представление возможностей таких методов для оценки избыточного давления взрыва аэрозвесей данного пиррофорного материала.

### Анализ метода расчета избыточного давления взрыва для горючих пылей

Согласно [2] расчет избыточного давления взрыва для горючих пылей ( $\Delta P$ ) рекомендуется выполнять по формуле:

$$\Delta P = \frac{m H_T P_0 Z}{V_{св} \rho_v C_p T_0} \cdot \frac{1}{K_H} \quad (1)$$

где:  $m$  – масса взвешенной в объеме помещения пыли, кг;

$H_T$  – теплота сгорания, Дж·кг<sup>-1</sup>;

$P_0$  – начальное давление, кПа; допустимо принимать равным 101 кПа;

$V_{св}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$T_0$  – начальная температура воздуха, К;

$\rho_v$  – плотность воздуха при  $T_0$ , кг·м<sup>-3</sup>;

$C_p$  – теплоемкость воздуха, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>; допустимо принимать равной  $1,01 \cdot 10^3$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;

$Z$  – коэффициент участия взвешенной пыли в горении; допустимо принимать  $Z=0,5$ ;

$K_H$  – коэффициент пыления, представляющий собой отношение массы взвешенной в воздухе пыли ко всей массе пыли, поступающей из аппарата в помещение; допустимо принимать:  $K_H=0,5$  для пылей с дисперсностью не менее 350 мкм;  $K_H=1,0$  для пылей с дисперсностью менее 350 мкм.

Выражение (1) представляет собой эмпирическую формулу, которая предложена для определенного массива данных с приемлемой точностью вычисления избыточного давления. Однако сведения о том, были ли включены в этот массив данные о пиррофорных материалах, в [2] не приведены.

В первом приближении (в том числе применительно к частицам с дисперсностью менее 350 мкм) содержание формулы (1) можно интерпретировать следующим образом:

- произведение  $m \cdot H_T \cdot Z$  допустимо принять за тепловой эффект  $Q$ , сопровождающий окисление пыли кислородом воздуха;
- произведение  $V_{св} \cdot \rho_v \cdot C_p$  – за наибольший вклад в суммарную теплоемкость  $C$  продуктов взрыва и воздуха, находящегося в свободном объеме помещения и не участвующего в реакции;
- отношение  $Q/C$  представляет собой температуру свободного объема помещения после взрыва;
- в соответствии с уравнением состояния идеального газа при постоянном объеме помещения:

$$P / P_0 = n T / n_0 T_0 \quad (2)$$

или

$$\Delta P / P_0 = n T / n_0 T_0 + 1, \quad (3)$$

где  $n$  – количество молей;

$n_0$  – начальное количество молей.

Из-за избытка воздуха количество молей  $n \approx n_0$ , а  $T / T_0 > 1$ , в результате упрощения получаем:

$$\Delta P / P_0 \approx T / T_0. \quad (4)$$

Очевидно, что вследствие приведенных (и ряда других) упрощений, используемых при получении формулы (1), точность определения по этой формуле избыточного давления при взрыве пиррофорных материалов не может быть достаточно высока. Однако при ее использовании следует ожидать определения правильного порядка искомой величины и направлений ее изменения при варьировании указанных в ней параметров.

Если же учесть, что в формуле (1) используется ряд постоянных величин, ее можно также использовать в следующем виде:

$$\Delta P = m H_T K / V_{св} = \varphi H_T K, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – концентрация пыли в воздухе, г/м<sup>3</sup>;

$K$  – константа.

В [2] приведен также рекомендуемый метод расчета критериев пожарной опасности для горючих пылей, согласно которому избыточное давление взрыва определяют по формуле:

$$\Delta P = P_0 (0,8 m_{кр}^{0,33} / r + 3 m_{кр}^{0,66} / r^2 + 5 m_{кр} / r^3), \quad (6)$$

где  $r$  – расстояние от центра пылевоздушного облака, м;

$$m_{кр} = Z m H_T / H_{T_0}, \quad (7)$$

при этом  $H_{T_0}$  – константа, принимаемая равной  $4,52 \cdot 10^6$  Дж/кг<sup>-1</sup>;

$Z$  – константа, которую допускается принимать равной 0,1.

Следует отметить, что эмпирическая формула (6) может служить дополнением к формуле (1) при анализе снижения избыточного давления по мере удаления от эпицентра взрыва. В то же время очевидно, что формулу (6) нельзя использовать для определения избыточного давления в самом эпицентре взрыва (при  $r=0$ ).

Анализ формул (1) и (6) позволяет отметить следующие ограничения рассматриваемых методов:

- расчет по этим формулам предполагает неограниченный рост давления с увеличением массы горючей пыли, то есть не учитывает наличие максимального давления взрыва, которое определяется энергетическими возможностями и отличается у различных взрывоопасных систем;

- расчет по этим формулам предполагает применение любых концентраций горючих пылей, в то время как существуют концентрационные пределы, ограничивающие диапазоны концентраций, за пределами которых протекание взрыва, а следовательно, и резкое повышение давления становятся невозможными;

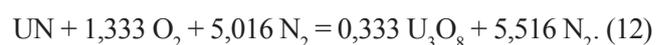
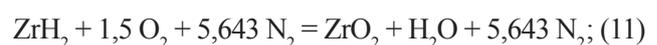
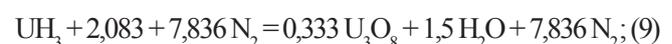
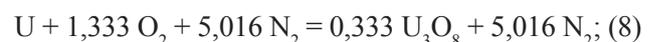
- расчет по этим формулам не учитывает существенное влияние размера частиц горючих смесей на условия возникновения взрыва, а следовательно, на достигаемое давление продуктов взрыва.

В связи с этим при использовании формул (1) и (6) необходимо учитывать отмеченные ограничения.

#### Расчетная оценка максимального давления взрыва аэровзвеси нитрида урана

При проведении оценки максимального давления взрыва аэровзвеси нитрида урана учитывали, что, согласно формуле (1), избыточное давление взрыва пропорционально удельной теплоте сгорания взрывоопасной смеси. Поскольку формула (1) не позволяет непосредственно вычислять максимальное давление взрыва, был применен сравнительный метод анализа с использованием справочных данных для пиррофорных материалов, принимающих участие в химико-технологических процессах объектов ядерного топливного цикла. При этом были использованы приведенные в [3] значения максимального давления взрыва, которые были определены по стандартной методике для аэровзвесей пиррофорных материалов с размером частиц 74 мкм.

В соответствии с данным подходом вначале были рассчитаны тепловые эффекты следующих реакций:



Термодинамические данные для расчета тепловых эффектов реакций (8)–(12) применительно к стандартным условиям были заимствованы из [4]. Рассчитанные значения удельных тепловых эффектов приведены в табл. № 1. Как следует из полученных результатов расчета, удельный тепловой эффект окисления нитрида урана на воздухе оказался меньше, чем для других рассматриваемых пирофорных материалов.

Использование экспериментальных данных по значениям максимального давления взрыва (приведены в табл. № 1) и рассчитанных величин удельных теплот окисления указанных четырех пирофорных материалов позволило установить, что между этими величинами существует корреляционная зависимость, описываемая линейным уравнением:

$$P_{\max} = 400 + 18,6 \cdot 10^{-3} \Delta H^0. \quad (13)$$

В результате экстраполяции по уравнению (13) и рассчитанному значению теплового эффекта было оценено максимальное давление взрыва нитрида урана, которое приведено в табл. № 1. Оно оказалось достаточно большим (в диапазоне 460–470 кПа), но, соответственно, меньше, чем для других рассматриваемых пирофорных материалов.

Применение формулы (1) в виде формулы (5) позволило также оценить концентрации пирофорных материалов, соответствующие экспериментально определенным значениям максимального давления взрыва. Рассчитанные значения приведены в табл. № 1, из которой следует, что, согласно формуле (1), максимальное давление взрыва могло реализоваться в диапазоне изменения концентрации рассматриваемых пирофорных материалов с размером частиц 74 мкм от 150 до 250 г/м<sup>3</sup>.

Между экспериментально найденными значениями избыточного давления взрыва и рассчитанными значениями концентраций пирофорных материалов

в аэрозвесах была также установлена корреляционная зависимость, описываемая линейным уравнением:

$$\Delta P = P_{\max} - P_0 = 720 - 1,2 \varphi. \quad (14)$$

Используя уравнение (14), было оценено значение концентрации нитрида урана с размером частиц 74 мкм, соответствующее расчетному значению максимального давления взрыва, которое приведено в нижней строчке табл. № 1 вместе с расчетными значениями по уравнению (14) для других пирофорных материалов. Как следует из табл. № 1, расчетная величина концентрации нитрида урана составляет порядка 300 г/м<sup>3</sup>, а уравнение (14) достаточно хорошо описывает исходные данные для других пирофорных материалов.

#### Оценка условий соблюдения целевого показателя давления взрыва для нитрида урана

Согласно [2] целевым показателем взрывоопасности может служить расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа. Так, при превышении этого значения помещения относятся к категории А (повышенная взрывопожароопасность) или к категории Б (взрывопожароопасность). Соответственно, при меньших значениях помещения не относятся к взрывоопасным, а только к пожароопасным, умеренно пожароопасным и категории пониженной пожароопасности.

Для оценки возможности превышения давления взрыва аэрозвеси нитрида урана значения 5 кПа были проведены расчеты избыточного давления по рекомендуемой формуле (6). Согласно формуле (6) в качестве варьируемых параметров были использованы масса пирофорного материала и расстояние от эпицентра взрыва. Результаты расчетов показаны в табл. № 2.

Таблица № 1

### Показатели взрывоопасности для пирофорных материалов Explosion indexes for pyrophoric materials

Параметры	Элементы				
	U	UN <sub>3</sub>	Zr	ZrH <sub>2</sub>	UN
$P_{\max}$ [3], кПа	400	520	630	630	-
$\Delta H$ , МДж/кг	5,0	5,9	12,1	12,6	3,6
$P_{\max}$ (13), кПа	493	510	625	635	467
$\varphi_{\max}^2$ , г/м <sup>3</sup>	275	258	160	153	-
$\varphi_{\max}$ (5), г/м <sup>3</sup>	284	251	159	159	295

Таблица № 2

**Расчетная оценка избыточного давления взрыва нитрида урана  
в зависимости от массы и расстояния от эпицентра взрыва  
Calculated estimation of excessive explosive pressure for uranium nitrogen  
from mass and distance to explosion epicenter**

Расстояние от эпицентра взрыва, <i>m</i> , г	Давление взрыва нитрида урана, <i>r</i> , м				
	0,5	1	2	5	10
1 000	617	132	37	10	4
500	359	84	25	7	3
100	59	33	12	4	-
10	30	11	5	-	-
1	10	4	-	-	-

Как следует из табл. № 2:

- при взрыве аэровзвеси нитрида урана можно ожидать возникновения избыточного давления, существенно превышающего 5 кПа, даже для его граммовых количеств;

- избыточное давление взрыва резко снижается на расстоянии свыше 1 м от расстояния эпицентра взрыва;

- с уменьшением массы нитрида урана критическое расстояние от эпицентра взрыва, соответствующее значению избыточного давления 5 кПа, значительно снижается и становится соразмерным с геометрическими характеристиками герметичных боксов, в которых находится пирофорный материал.

Сравнение данных, приведенных в табл. № 1 и 2, позволяет отметить, что использование формулы (6) для малых расстояний от эпицентра взрыва может привести к завышенным результатам, как это видно из значения, рассчитанного для массы нитрида урана 1 кг на расстоянии 0,5 м от эпицентра взрыва, которое существенно превышает рассчитанное значение максимального давления взрыва аэровзвеси нитрида урана.

В связи с этим были также рассмотрены возможности использования формулы (1) применительно к нахождению условий достижения критического значения избыточного давления взрыва. Результаты вычислений применительно к аэровзвеси частиц урана размером 74 мкм показали, что:

- в соответствии с формулой (1) избыточное давление взрыва 5 кПа должно достигаться при концентрации частиц урана 3,6 г/м<sup>3</sup>, в то время как значение нижнего концентрационного предела распространения пламени для этого пирофорного материала, определенное стандартным экспериментальным методом, равно 60 г/м<sup>3</sup> [3], таким образом,

расчетное значение оказалось существенно ниже экспериментально определенного;

- в соответствии с формулой (1) для экспериментально определенной величины максимального давления взрыва аэровзвеси частиц урана, равного 480 кПа, концентрация частиц урана должна соответствовать 2 855 г/м<sup>3</sup>, что противоречит значению 275 г/м<sup>3</sup>, приведенному в табл. № 1.

Отмеченные несоответствия не позволяют рекомендовать формулу (1) для определения избыточного давления взрыва аэровзвесей нитрида урана и других пирофорных материалов, принимающих участие в химико-технологических процессах объектов ядерного топливного цикла, и ставят задачу разработки надежного расчетного метода для решения выявленной проблемы.

**Выводы**

1. Проведен анализ формул, рекомендуемых в СП 12.13130.2009 [2], для расчета избыточного давления взрыва горючих пылей. Отмечены их недостатки для применения к пирофорным материалам, принимающим участие в химико-технологических процессах объектов ядерного топливного цикла.

2. Проведен сравнительный анализ значений максимального давления взрыва аэровзвесей, полученных стандартным экспериментальным методом, для аэровзвесей пирофорных материалов, принимающих участие в химико-технологических процессах объектов ядерного топливного цикла. В результате анализа выявлены корреляционные зависимости между избыточным давлением взрыва, тепловым эффектом экзотермической реакции, концентрацией частиц пирофорных материалов.

3. Определены оценочные значения максимального давления взрыва и снижения избыточного давления с расстоянием для нитрида урана.

## Литература

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05: утв. приказом Ростехнадзора от 02.12.2005 № 11.
2. СП 12.13130.2009. Свод правил. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1). 2009.
3. Соколов И. П., Шарафутдинов Р. Б. Введение в обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла (в двух частях). Ч. 1. Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла / Труды НТЦ ЯРБ. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2019. – 200 с.
4. Кубашевский О., Олкокк К. Б. Metallургическая термoхимия. – М.: Metallургия, 1982.

## References

1. Federal`nye normy i pravila v oblasti ispol`zovaniya atomnoi energii “Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti ob`ektov yadernogo toplivnogo tsikla (OPB OYATTS)” (NP-016-05) [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use “Common conditions of safety guarantee to fuel cycle facilities” (NP-016-05)]. 2005.
2. SP 12.13130. 2009. Opredelenie kategoriy pomeshchenii, zdaniy i naruzhnykh ustanovok po vzryvopozharnoi i pozharnoi opasnosti [SP 12.13130.2009. Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard (with Amendment No. 1)]. 2009.
3. Sokolov I. P., Sharafutdinov R. B. (2019). Vvedenie v obespechenie vzryvobezopasnosti ob`ektov yadernogo toplivnogo tsikla. Spetsifika vzryvoopasnosti ob`ektov yadernogo toplivnogo tsikla [Introduction to explosion safety of nuclear fuel cycle facilities. Vol. 1. The specifics of explosion hazard of nuclear fuel cycle facilities]. Moscow: SEC NRS, SEC NRS Proceedings (Vols. 1–2), 200 p. [in Russian].
4. Kubashevskii O., Olkock K. B. (1982). Metallurgicheskaya termochimiya [Metallurgical thermochemistry]. Moscow: Metallurgy. [in Russian].

## Сведения об авторе

*Соколов Иван Павлович*, главный научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

## Author credentials

*Sokolov Ivan Pavlovich*, Chief Researcher of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8, bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: isokolov@secnrs.ru.

## Для цитирования

*Соколов И. П.* Расчетная оценка давления взрыва аэрозвеси нитрида урана // Ядерная и радиационная безопасность. 2024. № 2 (112). С. 43–49. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.004.

## For citation

*Sokolov I. P.* Calculated estimation of explosion pressure for uranium nitrogen aerosol. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2024, No. 2 (112), pp. 43–49. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.004.

