

# УДАРНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ВОЛНЫ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

**Д. А. Власов, доктор технических наук, профессор. Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).**

**Г. В. Бушнев, кандидат технических наук, доцент;**

**О. А. Хорошилов, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Описан механизм образования облака топливно-воздушных смесей (ТВС), приведены расчётные соотношения для определения параметров его поражающего воздействия – температуры, диаметра и времени экспозиции. Приведены данные по температуре горения паров углеводородных материалов, находящихся при аварийном образовании в облаке ТВС.

*Ключевые слова:* топливно-воздушные смеси, ударная волна, избыточное давление взрыва, дефлаграция, объёмный взрыв, детонация, тротильный эквивалент, теплосветовое поражение, огненный шар

## SHOCK AND THERMAL WAVES AT THE DETONATION INDUSTRIAL FUEL-AIR MIXES

D. A. Vlasov. Saint-Petersburg state institute of technology (The technical university).

G.V. Bushnev; O. A. Khoroshilov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

The mechanism of formation of cloud by fuel-air mixes is described, settlement parities for definition of parameters of its amazing influence – temperatures, diameter and time of an exposition are resulted. Data on temperature of burning паров the hydrocarbonic materials which are being at emergency formation in cloud by fuel-air mixes are cited.

*Key words:* fuel-air mixes, a shock wave, superfluous pressure of explosion, deflagration, volumetric explosion, a detonation, a trotyl equivalent, defeat by light and heat, a fiery sphere

Промышленное получение жидких углеводородов (бензина, керосина, дизельного топлива и многих других нефтепродуктов) базируется, как правило, на крупных многотоннажных производствах. Концентрация на небольших площадях пожаровзрывоопасных материалов всегда создаёт опасность техногенных катастроф. В большинстве случаев такие предприятия опасны возникновением пожаров с непредсказуемыми масштабами материальных и людских потерь. Ниже будут рассмотрены варианты пожаровзрывоопасных ситуаций и особенности воздействия поражающих факторов на личный состав караулов пожарной части, защищающих материальные ценности предприятий и их инфраструктуру. Приведённые данные по методике оценки поражающего действия при детонации топливно-воздушных смесей накапливались авторами в течение длительного времени. Кроме того, в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (в специальных условия полигона) проводились прямые натурные эксперименты.

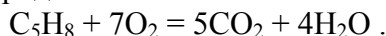
### **Некоторые особенности образования взрывоопасных облаков ТВС и их поражающие факторы**

Крупнотоннажные производства нефтеперерабатывающих производств и предприятий химической промышленности при возникновении аварий формируют в зонах аварий облако из ТВС больших размеров либо облака ТВС, которые могут созреть до стехиометрических соотношений относительно кислорода воздуха, и, таким образом, они фактически готовы к детонационному превращению при наличии источника воспламенения.

Например, при детонации стехиометрического облака пропилена ( $C_3H_6$ , теплота сгорания 40 000 КДж/кг) для окисления углерода С требуется три молекулы кислорода –  
 $3C + 3O_2 = 3CO_2$ , а для окисления шесть атомов водорода до  $H_2O$  также требуется три молекулы кислорода:



а, например, для детонации стехиометрического облака пиперилена (изопрена)  $C_5H_8$  потребуются семь молекул кислорода:



Теплота сгорания (взрыва) облака пиперилена  $C_5H_8$  составляет 44 000 КДж/кг.

Известно, что детонация облака ТВС происходит за счёт кислорода воздуха, содержание которого в атмосфере Земли равно примерно 21 % об.

Технологические регламенты определяют размещение оборудования либо внутри помещений, либо на открытых площадках предприятия, если его производительность измеряется десятками и сотнями тонн. Различия в дислокации оборудования определяют и меры безопасности в случае возникновения аварийных ситуаций. Если это реакторное отделение предприятия, то сами реакторы располагаются в первую очередь в соответствии с задачами техпроцесса, но с учётом других особенностей производства и необходимых мер безопасности. Реакторы иногда защищены друг от друга экранами различной конструкции для гашения ударно-волнового воздействия на соседние реакторы. Если за окном здания расположены важные коммуникации предприятия или дороги, то окна могут быть изолированы стальными или бетонными двориками, предотвращающими осколочное или ударно-волновое поражение при внутреннем взрыве облака ТВС. Конечно, взрыв облака ТВС в закрытом помещении почти всегда оказывает меньшее разрушительное действие в тех случаях, если окружающее реакторы пространство имеет высокую степень концентрации вспомогательного оборудования, приборов контроля, трубопроводов отражающих поверхностей и т.п. Как показывает практика, распространение ударной волны (УВ) в таких условиях (в зависимости от скопления оборудования) будет более слабым. Ослабление общего действия УВ в таких случаях будет колебаться от 5 до 40 % от максимального значения УВ.

Например, при технологических операциях с окисью этилена  $CH_2-O-CH_2$  в случае аварийной ситуации и образования паровоздушного облака и его возможного воспламенения и последующего взрыва можно определить избыточное давление по формуле (1):

$$\Delta P = 0,18 \cdot 10^{-4} \cdot \rho \cdot \sqrt[3]{Q} \cdot \sqrt[6]{M}; \quad (2)$$

при  $\rho = 887 \text{ кг/м}^3$ ,  $Q = 27\,000 \text{ кДж/кг}$  и массе облака  $M = 3000 \text{ кг}$

$$\Delta P = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 887 \cdot \sqrt[3]{27000} \cdot \sqrt[6]{3000} = 18 \text{ бар} .$$

Однако при разных степенях загруженности пространства вокруг аварийного реактора падение давления составит от 5 до 40 % от  $\Delta P$  и составит 17 и 11 бар соответственно. Конечно, расположение оборудования в технологической схеме того или иного производства устанавливается определёнными правилами и инструкциями. Тем не менее, после реконструкции, ремонта или модернизации производства заполняемость помещения технологическим оборудованием почти всегда превышает установленные нормы.

Рассмотрим реальный пример аварии на одном из производств по получению пропиленоксида  $C_3H_6O_2$ . Плотность его  $860 \text{ кг/м}^3$ , теплотворная способность  $Q = 30\,000 \text{ кДж/кг}$ .

При аварийной разгерметизации аппарата, например, срыв крышки и выход наружу пропиленоксида мгновенно образуется облако ТВС над аппаратом. В зависимости от объёма аппарата размер облака будет различным. Облако ТВС может заполнить всё производственное помещение, то есть может касаться не только соседних аппаратов, но и стен и окон здания. В таких случаях с наружной стороны здания предусматриваются защитные стальные или железобетонные дворики, прикрывающие вышибные окна. Рассмотрим два возможных случая поведения такого облака, способного к дефлаграции и детонации.

При загрузке аппарата пропиленоксидом в количестве 5 т размер образовавшегося облака (его диаметр) составит:

$$D = K \cdot \sqrt[3]{M},$$

где  $K=2$  – зависит от плотности материала ТВС;  $M$  – масса облака ТВС, кг.

Диаметр облака при этих условиях аварии составит  $D = 17,1$  м, а избыточное давление, рассчитанное по формуле (2) будет равно  $\Delta P = 18$  бар.

Очевидно, такое облако коснётся краем соседнего аппарата и при его детонации такое давление в состоянии разрушить это оборудование. Но, если облако ТВС не стало стехиометрическим и произошло его воспламенение, то эмпирический коэффициент  $1,8 \cdot 10^{-4}$  в уравнении (2) будет изменяться в пределах от 0,12 до 0,18.

Примем этот коэффициент в уравнении (2) равным 0,13, тогда избыточное давление при воспламенении такого облака может быть равно:

$$\Delta P = 0,13 \cdot 800 \cdot \sqrt[3]{30000} \cdot \sqrt[6]{5000} = 1,05 \text{ бар}.$$

При таком давлении будет разрушено остекление, обслуживающий персонал получит контузии различной тяжести, внутри помещения будут повреждены противопожарные средства, различные деревянные конструкции и т.п., а при детонации этого облака может быть уничтожен обслуживающий персонал, разрушены кирпичные стены и остекление окон, повреждены другие аппараты, вспомогательные коммуникации, а также может произойти загорание горючих материалов внутри помещения.

При дефлаграции поражающим фактором в значительной мере является горение вещества, так как дефлаграция реализуется при нестехиометрическом состоянии облака ТВС. Избыток горючего в облаке приводит к тепловым воздействиям на окружающую среду, поэтому аварийная ситуация при дефлаграции усугубляется высокими температурами тепловых волн. В таблице приведены температуры горения паров углеводородов, полученные в реальных масштабных и климатических условиях [1].

Таблица. Температура горения паров углеводородов

Вещество	Температура горения, °С	Вещество	Температура горения, °С
Метан	1970	Пропилен	2240
Этан	1980	Бутилен	2050
Пропан	1988	Ацетилен	2325
Бутан	2005	Толуол	2070
Пентан	1982	Пиперилен	2040
Этилен	2100	Этиленоксид	2140
Ацетон	1300	Бензол	1250
Бензин	1200		

Поэтому в любом случае следует учитывать состояние облака ТВС и режим его горения: будет ли происходить дефлаграция или детонация. Во всех этих случаях тепловая экспозиция будет существенно различаться, ибо горение может протекать в течение нескольких минут, секунд – при дефлакации и в течение нескольких миллисекунд – при детонации. Оценить ударно-волновое воздействие детонирующего облака легче, чем его тепловое воздействие, так как оно фактически прекращается по завершении детонации в течение нескольких миллисекунд.

В некоторых литературных источниках приводятся высказывания [2] относительно невозможности реализовать детонационный режим облака ТВС в открытом пространстве даже с помощью инициирующего заряда. Конечно, это утверждение неверно, так как уже до 1991 г. в СССР и США были разработаны боеприпасы, реализующие этот принцип объёмного взрыва. Такие боеприпасы имели при одинаковой массе тротиловый эквивалент в 5–7 раз выше, чем у самого тротила. Поэтому аварийная ситуация на производствах углеводородных топлив почти всегда сопровождается формированием режимов горения с различными параметрами поражения – от обычного горения паров углеводородов до реализации режимов дефлакации и детонации.

Необходимо обратить внимание на оценку одного из состояний горения – дефлакацию. По принятым представлениям дефлакация – это такой режим химического превращения в облаке ТВС, при котором генерируемая в облаке ударная волна не может иметь скорость больше скорости звука, то есть по сути дефлакирующее облако не может излучать ударную волну. По отношению к горению конденсированных зарядов этот вопрос решается однозначно: дефлакация или взрывчатое превращение. Однако в отношении процессов горения в облаке из ТВС или в отношении газовых облаков такая оценка не столь однозначна.

При воспламенении облака с различной стехиометрией по отношению к кислороду воздуха в его объёме наблюдаются разные по величине и скорости протекания реакции материала облака. Такие искусственно создаваемые облака могут в таком состоянии существовать от долей секунды до 1,5–2 с, и конечный результат по температуре излучения и по ударноволновому эффекту оказываются разными. На наш взгляд, наличие слабой ударной волны не всегда означает, что во всём объёме облака ТВС произошла полноценная реакция взрыва.

### **Горение и детонация газов и ТВС. Возможность теплового поражения**

Газовые взрывы в бытовой практике знакомы многим. Большие разрушения зданий жилищно-бытового сектора и высокая пожарная опасность при этом не только хорошо известны, но и достаточно хорошо изучены. Тем не менее, это относится в основном к прогнозированию разрушающего и зажигательного действия газовых взрывов. Многолетние натурные эксперименты с воспламенением облаков газов и облаков ТВС, проводившиеся Санкт-Петербургским технологическим институтом в условиях полигона, дают возможность оценивать и прогнозировать тепловым поражением при дефлакации и детонации газовых и топливовоздушных облаков. Если газовые облака можно получать при использовании баллонов различной ёмкости (открытые облака), то изолированные газовые облака получались путём заполнения из баллонов геофизических шаров различной ёмкости. После поджигания газового облака температура внутри него и за его пределами определялась по изменению окраски металлических пластинок с нанесённым на их поверхность специальных составов. При этом разные составы изменяют свою цветность в зависимости от температуры. При оценке особенностей теплосветового воздействия на объект (живая сила, здания и технологическое оборудование) от облака или огненного шара, необходимо иметь в виду определённые различия в особенностях протекания в них процессов.

Облако – менее живучая субстанция, оно быстро достигает стехиометрии, и окислительные реакции идут более полно и эффективно. Теплосветовое воздействие

короткое и энергичное (обычно не более секунды). Эта энергичность или «энергетичность» объясняется реализацией энергии, затраченной на окисление вследствие более полной стехиометричности компонентов при горении или детонации облака. Однако менее стехиометричная основа образования огненного шара даёт возможность излучать теплосветовое воздействие в течение более длительного времени – в течение нескольких секунд.

Для оценки степени теплосветового поражения пользуются так называемой пороговой кривой, связывающей поток теплосветовой волны  $q$  (тепловой поток) и полную энергию  $Q$  падающих на единицу поверхности облучаемого объекта. При больших временах теплового воздействия, превышающих время возможного не повреждаемого существования объекта, порог поражения будет определяться исключительно теплосветовым потоком  $q$ .

При импульсных воздействиях короткой экспозиции будет определяться в основном полной энергией  $Q$ . Значения теплового потока  $q$  и полной энергии  $Q$ , превышающие пороговые будут вызывать безусловное поражение объекта. Если же либо  $q$ , либо  $Q$  меньше чем пороговые значения, то типичное поражение отсутствует и возможны лишь лёгкие некомфортные ощущения. Например, при увеличении времени действия излучения от 0,5 до 2 с тепловой поток  $q$  уменьшается от 120 до 30 единиц, то есть при незначительном росте полной энергии  $Q$  даже при увеличении времени экспозиции в 4 раза возникающие травмы либо незначительны, либо отсутствуют вовсе и человек ощущает лишь некоторое дискомфортное состояние (рис.1).

Текущее взаимодействие между величинами  $q$ ,  $Q$  и  $\tau$  приводит к различным воздействиям на человека. Например, при тепловом потоке  $q = 60$  ед. при различных экспозициях тепловая нагрузка на организм будет изменяться от умеренной (при  $\tau < 1$ ) до сильной (при  $\tau = 5-7$  с). При таких значениях времени экспозиции полная энергия  $Q$ , воздействующая на человека, будет высокой (в пределах  $30 \text{ кДж/м}^2$ ). Наряду с пониманием общих принципов теплового воздействия облака ТВС или огненного шара на окружающий мир, не меньший интерес представляют прямые методы возможного управления облаком ТВС или разработка приемлемых методов защиты от его поражающего действия.

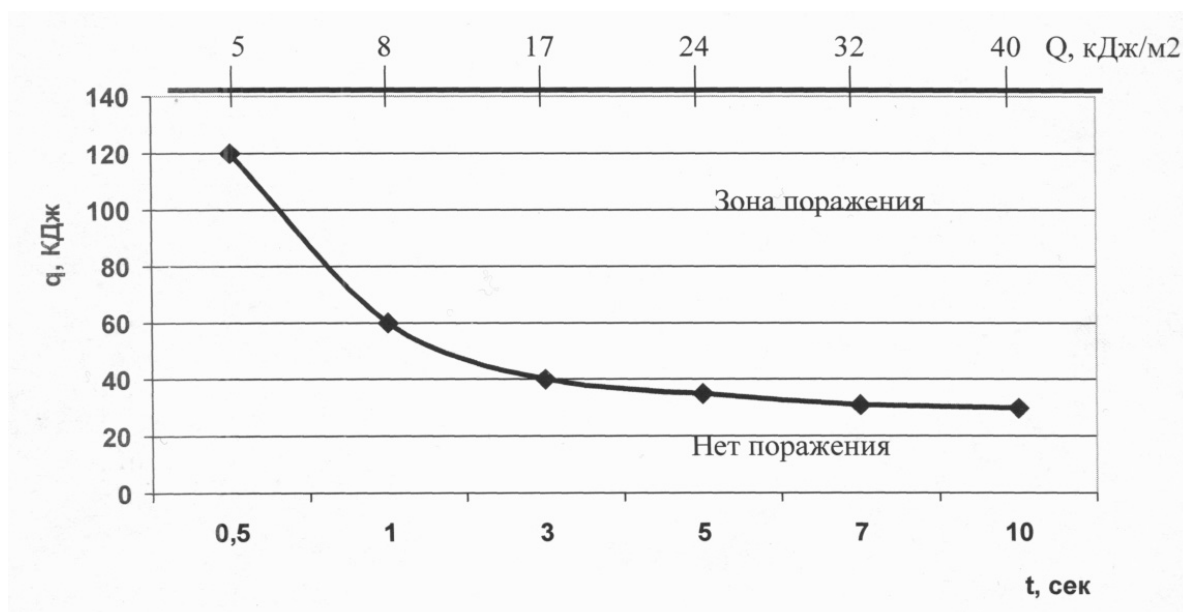


Рис.1. Формирование зоны поражения при наличии теплового потока  $q$  и полной энергии  $Q$

По своей кинетической природе облако газа или ТВС и огненный шар из газа или ТВС неадекватны. Горящее или детонирующее облако существенно отличаются по времени воздействия на поражаемый объект. Если время сгорания облака в зависимости от типа горючего и величины облака может составлять от 1 до 6 с и более, то детонирующего облака время сгорания составляет миллисекунды. В этом случае в сфере действия такого облака объект будет поражён не столько тепловым воздействием, сколько воздействием ударной волны. Покажем это на примерах. На одной из баз хранения окиси этилена из-за солнечного перегрева цистерны произошёл выброс окиси этилена в количестве 25 тонн. В течение нескольких секунд образовалось облако, которое быстро сформировалось до стехиометрического состояния, а раскалённые газы и искры от работающего двигателя автомобиля инициировали детонацию всего облака. Случайно обошлось без людских потерь, но пара запряжённых лошадей погибла, сгорело несколько деревянных построек и автомобиль.

Итак, в случае такой аварии формируются условия для образования огненного шара или облака ТВС. Почти всегда известна масса пролитого горючего  $M$  и температура горения  $T_r$  паров, тогда диаметр облака  $D$  будет равен:

$$D = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{M} \cdot \sqrt{T_r} = 0,045 \cdot \sqrt[3]{25000} \cdot \sqrt{1700} = 57 \text{ м.}$$

Тогда на расстоянии  $R = 150$  м от места аварии человек (при времени экспозиции  $\tau = 4-6$  с) получит тепловое воздействие, равное:

$$T_r = 2,7 \cdot \sqrt{D} \cdot \frac{T_r}{1+R} - 3 \cdot \sqrt{R} \text{ ,}$$

$$T_r = 2,7 \cdot \sqrt{57} \cdot \frac{1700}{1+150} - 3 \cdot \sqrt{150} = 190^\circ \text{ C .}$$

Такая температура для открытых участков тела является непереносимой и глубоко травмирующей. При аналогичной температуре детонирующего облака температурное травмирование будет заметно меньшим из-за миллисекундных экспозиций. В этом случае поражающим фактором будет воздействие ударной волны.

Сильные ожоги могут быть получены при естественном сгорании облака ТВС. Например, при массе облака ТВС  $M = 5000$  кг и температуре горения его паров  $T_r = 2200$  °С, время экспозиции будет равно:

$$\tau = 0,016 \cdot \sqrt[3]{M} \cdot \sqrt[3]{T_r}$$

$$\text{или } \tau = 0,016 \cdot \sqrt[3]{5000} \cdot \sqrt[3]{2200} = 3,55 \text{ с.}$$



**Рис. 2. Взрыв топливно-воздушного облака пиперилена. Диаметр облака 60 м.**

Такое время экспозиции на расстоянии от облака ТВС порядка 150–200 м незащищённые части тела аварийных, спасательных групп и пожарных могут получить сильные и непереносимые для живого организма ожоги

На рис. 2 показан общий вид взрыва облака топливно-воздушной смеси пиперилена  $C_5H_8$  на открытом пространстве в условиях полигонных испытаний.

#### **Выводы**

1. Описан механизм образования облака ТВС, приведены расчётные соотношения для определения параметров его поражающего воздействия – температуры, диаметра и времени экспозиции.

2. Приведены данные по температуре горения паров углеводородных материалов, находящихся при аварийном образовании в облаке ТВС.

#### **Литература**

1. Власов Д. А. Взрыв и его последствия. – СПб., 2003.

2. Водяник В. И. Взрывозащита технологического оборудования. – М.: Химия, 1991.