

## О некоторых различиях в методических подходах при моделировании параметров волн давления от сгорания и детонации облаков топливно-воздушных смесей



**А.А. Агапов,**  
канд. техн. наук, директор  
расчетно-аналитического центра,  
inform@safety.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия



**В.С. Сафонов,**  
д-р техн. наук, гл.  
науч. сотрудник

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,  
Москва, Россия



**С.И. Сумской,**  
канд. техн. наук, вед. науч.  
сотрудник

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия



**А.А. Швыряев,**  
канд. техн. наук, вед. науч.  
сотрудник

МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

Обсуждаются особенности математической модели взрыва топливно-воздушной смеси, приведенной в Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, которые приводят к завышению как размеров зон действия опасных факторов, так и показателей риска.

**Ключевые слова:** взрыв облака, топливно-воздушная смесь, пожарный риск, риск аварий, дефлаграция, детонация, методика.

**Для цитирования:** Агапов А.А., Сафонов В.С., Сумской С.И., Швыряев А.А. О некоторых различиях в методических подходах при моделировании параметров волн давления от сгорания и детонации облаков топливно-воздушных смесей // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-36-42

### Некоторые физические аспекты горения и детонации облаков топливно-воздушных смесей

При авариях с выбросом углеводородов в окружающую среду в воздухе возможно образование топливно-воздушных смесей (ТВС), которые при наличии источника зажигания способны к воспламенению и последующему выделению энергии. Такое энерговыделение возможно в двух режимах: в дозвуковом (горение или дефлаграция) и в сверхзвуковом (детонация). При этом горение может проходить в турбулентном режиме, тогда видимая скорость горения может наблюдаться в довольно широком диапазоне (до нескольких сотен метров в секунду).

В обоих случаях (и при горении, и при детонации) в воздухе формируются волны давления. Однако характеристики этих волн существенно отличаются. При детонации в воздухе возникает воздушная ударная волна (ВУВ), т.е. волна с резким скачком давления на фронте. При горении же в воздухе формируется волна сжатия, характеризующаяся не

скачкообразным, а постепенным нарастанием давления. Такое различие обусловлено тем, что ВУВ формируется в воздухе в момент выхода детонации на границу облака ТВС (в этот момент внутри облака ТВС имеется высокое давление, а продукты детонации движутся с высокой скоростью), поэтому ВУВ распространяется уже после окончания энерговыделения. Воздушная волна сжатия формируется в процессе распространения фронта горения, поэтому к моменту окончания горения облака в воздухе уже идет волна сжатия с постепенно нарастающим давлением.

Для детонации любой ТВС существует единственный стационарный режим распространения с высокой скоростью (около 1,8 км/с) и с высоким давлением на фронте (примерно 18 атм) [1, 2]. Для горения же такая уникальность режима распространения существует только при ламинарном горении, когда фронт остается гладким (плоским, сферическим). В этом случае скорость горения определяется «медленными» процессами тепло- и массопередачи

на молекулярном уровне. Скорость же распространения пламени при этом крайне невысока и составляет около нескольких десятков сантиметров в секунду. Однако из-за внешних причин фронт пламени при горении может сильно искривляться, в результате площадь его поверхности может существенно возрастать, что ведет к увеличению объемной скорости выгорания ТВС, а значит, к более быстрому перемещению зоны энерговыделения в пространстве. Такое горение в существенно искривленном фронте называется турбулентным. В отличие от ламинарного горения турбулентное может протекать с различными скоростями распространения зоны энерговыделения (вплоть до отмеченных выше нескольких сотен метров в секунду). Скорость турбулентного горения в этом случае будет зависеть от степени деформированности (турбулизованности) пламени. Более турбулизованное пламя распространяется с большей скоростью. В свою очередь большая турбулизация достигается в пространствах, где существуют большие условия для увеличения поверхности пламени вследствие его деформации (искривления, «сморщивания», образование складок). Одним из факторов, способствующих деформации пламени (и, как следствие, возрастанию площади его поверхности), является наличие препятствий на его пути (загромождения): пламя, в своем движении огибая препятствия, растягивается и увеличивает поверхность. Пример действия загромождения — так называемая спираль Шелкина, размещение которой на пути пламени приводит к существенному ускорению пламени [3]. Таким образом, как правило, чем сильнее загромождение, тем выше скорость турбулентного горения.

Как отмечалось, детонационная волна изначально характеризуется высоким давлением горячих сжатых продуктов, и это высокое давление приводит к возникновению ВУВ. На фронте же горения (в том числе турбулентного) давление не повышается [4]. Соответственно, формирование волны давления перед фронтом обусловлено другим механизмом. Волна давления перед фронтом горения образуется вследствие невозможности оттока нагретых продуктов от фронта горения. Хорошо известен следующий факт: при зажигании пламени в трубе от открытого торца барические волны в трубе практически не возникают, и лишь при зажигании от закрытого торца перед фронтом формируется волна сжатия. Именно невозможность оттока нагретых низкоплотных продуктов от фронта пламени заставляет их расширяться в направлении движения зоны горения, тем самым «навязывая» фронту горения роль своеобразного поршня, расталкивающего газ перед зоной горения и формирующего волны сжатия перед ней. Именно увеличение объема вещества при горении (в силу незначительного изменения давления и существенного роста температуры) и вызывает расширение продуктов горения уже в процессе го-

рения, что и приводит к появлению волн сжатия перед фронтом [4].

При сферическом пламени, которое обычно и реализуется с теми или иными допущениями на практике, условия для свободного оттока продуктов отсутствуют, что и приводит к формированию волн сжатия перед фронтом.

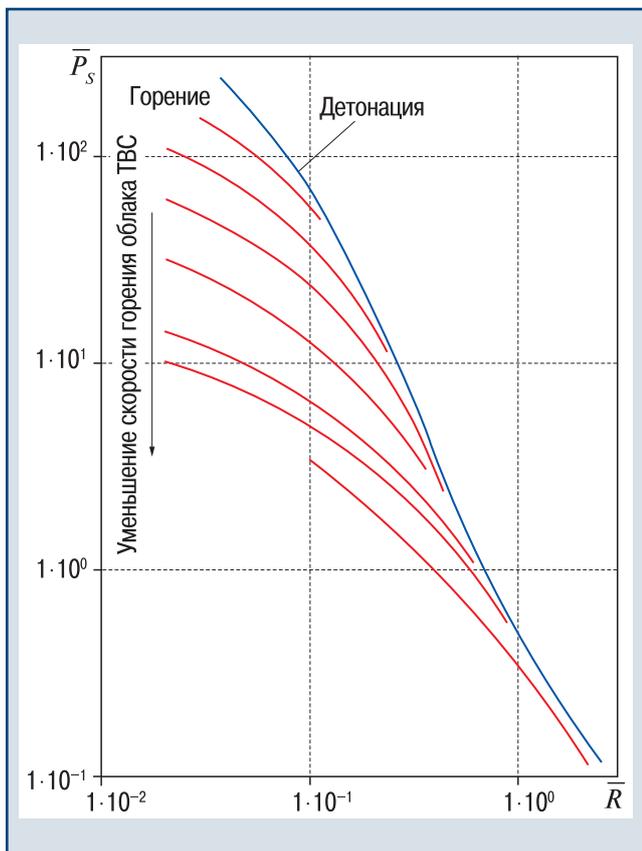
В связи со столь разными механизмами формирования волн давления при горении и детонации возникают вопросы: насколько могут быть опасны дефлаграционные режимы горения по сравнению с детонацией, могут ли при дефлаграции возникать более интенсивные волны давления, чем при детонации?

По нашему мнению, ответ на этот вопрос однозначен: на одинаковых расстояниях в случае одной и той же ТВС последствия барического воздействия от детонации гораздо более опасны, чем последствия от дефлаграционного режима сгорания опасного вещества. Это суждение базируется на основных положениях газодинамики процессов горения и подтверждается опытами, например [5], и непосредственным прямым численным газодинамическим расчетом [6].

Действительно, при выделении одного и того же количества энергии волна давления тем мощнее, чем быстрее происходит энерговыделение. То есть чем быстрее распространяется фронт энерговыделения, тем мощнее волна на одинаковом удалении от места энерговыделения. Это объясняется тем, что при медленных скоростях энерговыделения выделившееся за большее время заданное количество энергии успеет распределиться на большей области пространства, поскольку за большее время волны давления убегают дальше от места горения (детонации). Соответственно, при детонации, как самом быстром способе выделить энергию, получаются самые мощные волны давления. С другой стороны, чем мощнее распространяющаяся волна давления в воздухе, тем сильнее с расстоянием будет эта волна затухать.

Наконец, на больших расстояниях, где время энерговыделения заметно меньше времени прихода волны, разница между давлениями в волнах, возникающими при разных скоростях горения, будет уменьшаться.

Исходя из этих соображений, можно ожидать, что зависимости избыточного давления в волнах от расстояния качественно будут иметь вид, аналогичный приведенному на рис. 1 (здесь  $\bar{P}_s$  — безразмерное давление на фронте волны давления;  $R$  — безразмерное расстояние). Кривые зависимости давления от расстояния будут соответствовать тем большей скорости энерговыделения, чем выше они лежат на рис. 1. Наклон этих зависимостей тем меньше, чем меньше скорость горения. То есть чем медленнее идет горение, тем меньше давление в волне, но больше протяженность фазы сжатия, что и способствует более медленному затуханию таких волн. Самой



▲ Рис. 1. Качественный вид зависимостей безразмерного давления от безразмерного расстояния при различных скоростях энерговыделения (горение или детонация сферического облака топливно-воздушных смесей)

▲ Fig. 1. Qualitative view of the dependences of dimensionless pressure on dimensionless distance at various energy release rates (combustion or detonation of the fuel-air mixtures cloud)

верхней зависимостью на рис. 1 является кривая для детонации, а все лежащие под ней линии будут стремиться к ней на больших расстояниях. Причем, чем выше скорость горения, тем быстрее происходит асимптотическое сближение.

Именно такие закономерности традиционно лежат в основе методических подходов к оценке последствий при воспламенении облаков ТВС. Сами же эти подходы могут основываться как на экспериментальных данных, так и на данных расчетов. Последние могут выполняться либо по детальным численным моделям (двух- или трехмерным), либо по упрощенным параметрическим зависимостям. Параметрические зависимости широко распространены в силу простоты и быстроты получения результатов. В качестве примеров реализации таких подходов можно привести параметрические зависимости для оценки волн давления [7–16]. Во всех случаях рассматриваются одномерные задачи о горении (детонации) сферического облака из центра. Конечно, это упрощенная постановка, однако она позволяет получить определенное представление

о реальной картине параметров ударной волны и, главное, провести сравнение различных ситуаций, исходя из пусть упрощенных, но единых принципов.

Очевидно, что в математических моделях распространения ударных волн должны реализовываться все общепризнанные принципы теории горения и взрыва, в том числе упомянутые выше.

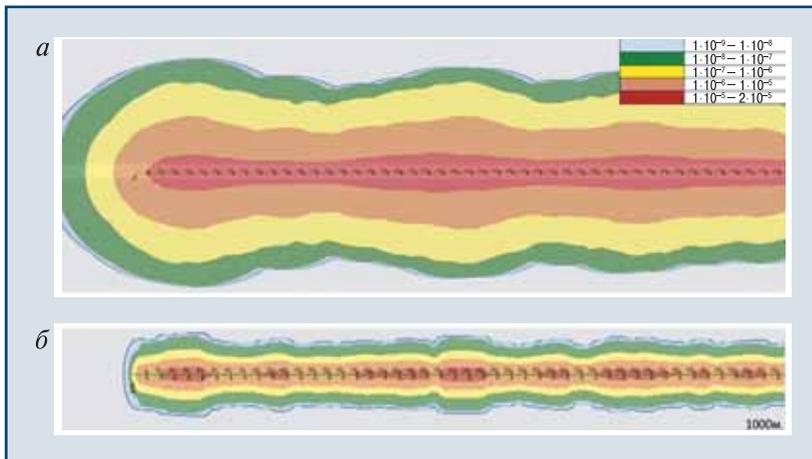
#### Сравнение подходов к оценке параметров ударных волн и волн сжатия в методиках МЧС России и Ростехнадзора

В России для оценки пожарного риска и риска аварий в части учета последствий взрыва облаков ТВС в настоящее время используются две основные методики — [7] и [9], реализующие подходы МЧС России и Ростехнадзора соответственно. Отметим, что методика [9] является развитием документа РД 03-409—01 [8], утвержденного Ростехнадзором еще в 2001 г. В основе [7] и [9] лежат общие методические подходы, разработанные д-ром физ.-мат. наук Б.Е. Гельфандом [1, 2], и одни и те же соотношения, поэтому, казалось бы, результаты расчета по ним должны хорошо согласовываться. Однако это согласование не всегда достигается.

Рассмотрим следующий пример. При расчете по методике [7] для волны давления, возникающей, например, при взрыве облака пропановоздушной смеси с взрывоопасной массой 3 т (при стехиометрической концентрации), образующейся при выбросе из трубопровода, транспортирующего нестабильную смесь сжиженных легких углеводородов (так называемую широкую фракцию легких углеводородов (ШФЛУ)), на 613 м ( $R_x = 4,38$ ) от центра взрыва, давление на фронте волны для класса II по степени загроможденности окружающего пространства (сильнозагроможденное, режим дефлаграции) составит 33,7 кПа, а для класса I по степени загроможденности, при котором, согласно [7], реализуется детонация, — всего 5 кПа. Для обратной задачи определения расстояния, на котором достигается давление 5 кПа ( $P_x = 0,049$ ), расчетные значения расстояний для режима дефлаграции и детонации составят 4,28 км ( $R_x = 31$ ) и 613 м ( $R_x = 4,38$ ) соответственно. В результате получаем ситуацию, когда при расчетах по методике [7] последствия от реализации режима детонации зоны поражения оказываются в 7 раз менее опасными по протяженности и почти в 50 раз по площади, чем для режима дефлаграционного горения.

Если воспользоваться такими результатами расчета для оценки показателей риска, то возникают anomalously большие площади с неправдоподобно завышенными показателями риска. На рис. 2 приведены результаты расчета поля потенциального риска на начальном участке трубопровода с ШФЛУ для двух вариантов сгорания облаков: высокоскоростной дефлаграции (рис. 2, а) и детонации (рис. 2, б). Разница реализуется в чрезвычайно больших диспропорциях. Для режима дефлаграции (рис. 2, а) расстояние, на котором потенциальный пожарный риск достигает

значения  $1 \cdot 10^{-6}$  год<sup>-1</sup>, составляет более 4 км, а для режима детонации (см. рис. 2, б) — около 1 км.



▲ Рис. 2. Результаты расчета поля потенциального риска для участка трубопровода DN400 с широкой фракцией легких углеводородов  
 ▲ Fig. 2. The results of calculating the field of potential risk for DN400 pipeline section with a wide fraction of light hydrocarbons

Такие результаты позволяют появляться различным оценкам размеров зон повышенной опасности. Например, в случае прогнозирования на объекте возникновения дефлаграционных режимов горения (в процессе развития аварийной ситуации) можно для «сокращения» размеров зон действия опасных факторов в качестве исходных данных просто «консервативно» указать максимальный (наиболее опасный) уровень загроможденности окружающего пространства для формально возможной<sup>1</sup> реализации условий детонации. И тогда по методике [7] повышение консервативности в оценке последствий аварийной ситуации (рассмотрение детонации вместо дефлаграции) даст существенное уменьшение размеров зон поражения<sup>2</sup>.

#### Причины расхождения результатов расчетов по методикам МЧС России и Ростехнадзора

Причина таких существенных расхождений результатов связана прежде всего с особенностями алгоритма расчета параметров волны давления при взрыве облака ТВС, приведенного в методике [7].

В методику [7] в том виде, в котором она опубликована в настоящее время, по сравнению с [9] внесен ряд изменений. В частности, при описании процесса дефлаграционного горения исключен абзац, который в документе Ростехнадзора [9] изложен так:

<sup>1</sup> Отметим, что реализация сценария с детонацией облака ТВС применительно к типовым производственным объектам (а тем более на объектах магистрального трубопроводного транспорта), согласно многочисленным исследованиям и статистике аварийности, крайне маловероятна.

<sup>2</sup> При этом полученные зоны будут более корректны с точки зрения физики моделируемого процесса и коррелироваться с результатами расчетов по [9].

«25. Далее вычисляются величины  $P_{x2}$  и  $I_{x2}$ , которые соответствуют режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (6), (7). Окончательные значения  $P_x$  и  $I_x$  выбираются из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2});$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}).»$$

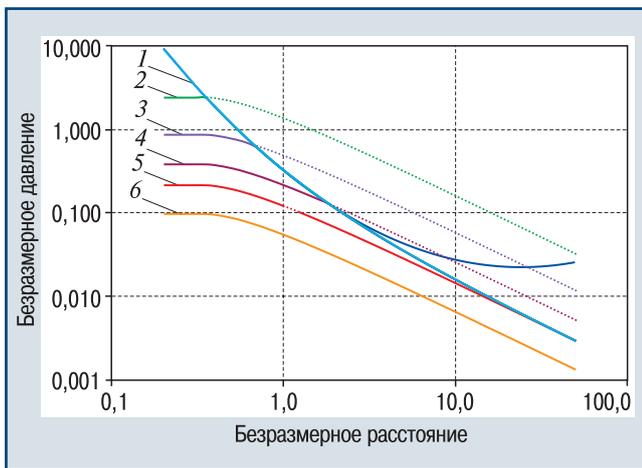
Смысл абзаца в том, что если рассчитанные для соответствующих значений безразмерного расстояния  $R_x$  значения безразмерного давления  $P_{x1}$  и импульса  $I_{x1}$  на фронте волны давления для дефлаграционного режима горения оказываются больше, чем эти же значения для режима детонации, то в качестве расчетных значений давления  $P_x$  и импульса  $I_x$  нужно принимать давление и импульс для режима детонации ( $P_{x2}$  и  $I_{x2}$ ).

Появление этого требования в [9] обусловлено тем, что, как отмечено выше, каждой скорости горения соответствует своя кривая зависимости давления от времени (со своим наклоном), и этот наклон варьируется от крутого (детонация затухает быстро) до плоского (низкие скорости горения дают волны с медленным затуханием) при общей асимптотике на больших расстояниях (см. рис. 1).

Но при аппроксимации этих зависимостей давления от расстояния в целях упрощения записи обычно выбирают кривую аппроксимации с одним наклоном, а разность в скорости горения учитывают путем смещения по вертикали. Это иллюстрируется на рис. 3 (здесь 1 — детонация; 2, 3, 4, 5, 6 — дефлаграция со скоростью фронта пламени соответственно 500; 300; 200; 150; 100 м/с), где приведены общие для [7] и [9] зависимости давления от расстояния. Такой подход реализуется не только в [7–9], но и в упомянутых выше зарубежных методиках.

Но при аппроксимации этих зависимостей давления от расстояния в целях упрощения записи обычно выбирают кривую аппроксимации с одним наклоном, а разность в скорости горения учитывают путем смещения по вертикали. Это иллюстрируется на рис. 3 (здесь 1 — детонация; 2, 3, 4, 5, 6 — дефлаграция со скоростью фронта пламени соответственно 500; 300; 200; 150; 100 м/с), где приведены общие для [7] и [9] зависимости давления от расстояния. Такой подход реализуется не только в [7–9], но и в упомянутых выше зарубежных методиках.

На рис. 3 также представлена зависимость давления от расстояния для детонации. Пунктиром показаны участки этих кривых для режима дефлаграции, лежащие выше кривой детонации, которые исключаются процитированным выше и непопавшим в методику [7] абзацем методики [9], а ранее [8]. Понятно, что при более точной (хотя и более громоздкой) аппроксимации, например по типу качественно показанных на рис. 1 зависимостей, кривые горения на рис. 3 не должны были бы подниматься выше линии для детонации, а сам характер спада давления по ним был бы больше, чем это показано на рис. 3. Это означает, что более точные кривые (по типу рис. 1), аппроксимирующие давление для различных скоростей горения, всегда лежали бы ниже и кривой для соответству-



**▲ Рис. 3. Зависимости безразмерного давления от безразмерного расстояния для различных режимов сгорания облака топливно-воздушных смесей**  
**▲ Fig. 3. Dependences of dimensionless pressure on dimensionless distance for various modes of combustion of the fuel-air mixtures cloud**

ющей скорости горения (по типу аппроксимации, отображенному на рис. 3), и кривой для детонации. Именно для соблюдения этого и вводится в [9] ограничение детонационной кривой части зависимостей для горения. Фактически этот своеобразный математический прием позволяет учесть разный наклон зависимостей давления от расстояния при разных скоростях горения, неучтенный в аппроксимационных кривых для давления при горении. При этом учитывается тот факт, что на больших расстояниях энерговыделение при разных режимах и скоростях дает одно и то же избыточное давление, зависящее только от количества выделившейся энергии и все меньше зависящее от времени выделения этой энергии, т.е. скорости горения.

В результате получается простой двухкусочный спад давления, выраженный приведенными выше соотношениями: часть — по кривой для горения, часть — по кривой для детонации. Понятно, что такой подход несколько завышает истинные давления, возникающие при горении, но вполне приемлем для целей использования методики.

Следует отметить, что и в остальных методиках [12–16] так же как и в [9] самые интенсивные волны давления наблюдаются при детонации, а при любом ином режиме энерговыделения волны давления получаются слабее.

Как отмечалось, документ [7] построен на основе научных работ д-ра физ.-мат. наук Б.Е. Гельфанда [1, 2]. Эти материалы и материалы [8, 9] использовались ФГБУ ВНИИПО МЧС России — разработчиком методики [7]. Например, в документе [10], подготовленном ФГБУ ВНИИПО МЧС России в 2006 г., математическая модель излагается абсолютно корректно и полностью совпадает с подходом, отраженным в настоящее время в [9], а вот уже в

«пожарном» ГОСТ Р 12.3.047—2012 [11] в описании модели взрыва облаков ТВС появляются те же проблемы, что и в [7].

### Границы применимости существующих подходов

Приведенное выше замечание по документу [7] является не единственным. Так, в [7], равно как и в [8, 9], для аппроксимации давлений в ВУВ используется формула:

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66\ln(R_x) + 0,26\ln(P_x)^2,$$

где  $P_x$  — безразмерное давление в ВУВ для режима детонации облака ТВС;  $R_x$  — безразмерное расстояние от центра взрыва.

Эта формула описывает кривую, изображенную на рис. 3 темно-синим цветом. Как видно из рис. 3, при расчетах по вышеприведенной формуле величина давления не является монотонно убывающей, а имеет минимум давления при безразмерном расстоянии, равном примерно 24 единицам, и последующий рост («загиб»), хотя общепринятой является ситуация, когда большим расстояниям соответствуют меньшие давления в волне давления. Такой «загиб» является нефизичным, и приведенная аппроксимация в этом диапазоне параметров использоваться не может. В [9] для этого имеется указание на ограничение диапазона применимости рассматриваемой формулы, а в [7] такое ограничение отсутствует. Соответственно, при расчетах по [7] может возникнуть ситуация, при которой становится возможным искаженный расчет размеров зон достижения заданного давления.

Отметим, что на рис. 3, наряду с аппроксимацией, используемой в [7] и [9], представлена более корректная монотонно убывающая аппроксимация для давления в ударной волне, возникающей при сферической детонации облака ТВС (кривая 1). Кривая 1 получена как результат высокоточного численного моделирования, она хорошо коррелируется с имеющимися экспериментальными данными, которые, однако, существуют только для области высоких (десятки кПа) избыточных давлений; тем не менее данная кривая справедлива и для областей более низких давлений (несколько кПа), поскольку принципы расчета и использованная модель являются универсальными для всего диапазона давлений.

### Заключение

В настоящее время существует высокий уровень согласованности методологий оценки последствий взрывов облаков топливно-воздушных смесей в методических подходах МЧС России и Ростехнадзора. В обоих ведомствах используются физически обоснованные модели для оценки параметров ударных волн и волн сжатия, образующихся как при детонации, так и при дефлаграционном горении с различной скоростью. В то же время имеются некоторые

различия в этих методиках. Они касаются главным образом ограничений, которые накладываются на используемые математические модели. Во-первых, в методике МЧС России [7] отсутствует ограничение по уровню достигаемых давлений в ударных волнах и волнах сжатия. Во-вторых, для области низких давлений (несколько кПа) в методике [7] не установлено ограничение на область использования соответствующих зависимостей давления в волне от расстояния.

Эти различия определенным образом влияют как на расчетные размеры зон поражения, так и на показатели риска. Учитывая, что методика [7] определена единственным документом, на основе которого рассчитываются показатели пожарного риска, которые в свою очередь являются одним из основных критериев для принятия управленческих решений при проектировании и строительстве производственных и социальных объектов, рассмотренные особенности численной модели взрыва облака топливно-воздушных смесей приводят к не всегда оправданному увеличению консерватизма получаемых результатов, что определяет необходимость корректировки рассматриваемой методики [7] для гармонизации подходов различных ведомств к решению важных научно-практических задач.

*Работа поддержана Программой повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.*

### Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Баротермическое действие взрыва. — СПб: Астерион, 2006. — 657 с.
2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Газовые взрывы. — СПб: Астерион, 2007. — 238 с.
3. Шелкин К.И. Влияние шероховатости трубы на возникновение и распространение детонации в газах// Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1940. — Т. 10. — С. 823–832.
4. Бартльме Ф. Газодинамика горения. — М.: Энергоиздат, 1981. — 280 с.
5. Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фортвов В.Е. Энергетические характеристики взрыва и параметры ударных волн в воздухе при детонации водородосодержащих облаков в свободной атмосфере (препринт). — Черноголовка, 1995. — 85 с.
6. Гостинцев Ю.А., Губин С.А., Шаргатов В.А. Численное моделирование процессов при горении открытых объемов перемешанных газовых смесей (препринт). — Черноголовка, 1986. — 33 с.
7. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах// Декларирование пожарной безопасности и оценка пожарного риска: сб. В 4 ч. Ч. 4. Нормативные правовые документы по оценке пожарного риска, методики и примеры. — Сер. 19. — Вып. 2. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 192 с.
8. РД 03-409—01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изменениями и дополнениями)// Методики оценки последствий аварий на

опасных производственных объектах: сб. док. — Сер. 27. — Вып. 2. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 210 с.

9. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности. — Сер. 27. — Вып. 15. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 44 с.

10. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. URL: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo\\_po\\_otsenke\\_pozharnogo\\_riska\\_dlya\\_promyshlennykh\\_predpriyatii.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo_po_otsenke_pozharnogo_riska_dlya_promyshlennykh_predpriyatii.pdf) (дата обращения: 10.01.2020).

11. ГОСТ Р 12.3.047—2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения: 10.01.2020).

12. Van Den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P. Methods for Calculation of physical effects — due to releases of hazardous materials (liquids and gases) — «Yellow Book». URL: <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffen.nl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (дата обращения: 10.01.2020).

13. Tang M.J., Baker Q.A. A new set of blast curves from vapor cloud explosion// Process Safety Progress. — 1999. — Vol. 18. — № 3. — P. 235–240.

14. Взрывные явления. Оценка и последствия. В 2 кн. Кн. 1/ У. Бейкер, П. Кокс, П.М. Уэстайн и др. — М.: Мир, 1986. — 319 с.

15. Review of Methods for Estimating the Overpressure and Impulse Resulting from a Hydrogen Explosion in a Confined-Obstructed Volume/ L Melani, I. Sochet, X. Rocourt, S. Jallais. URL: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2009/images/stories/papers/254.pdf> (дата обращения: 10.01.2020).

16. РБ Г-05-039—96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200061429> (дата обращения: 10.01.2020).

**inform@safety.ru**

*Материал поступил в редакцию*

*14 января 2020 г.*

*Доработанная версия — 2 марта 2020 г.*

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 36–42.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-36-42

**On Some Differences in the Methodological Approaches when Modeling the Parameters of Pressure Waves from Combustion and Detonation of Fuel-Air Mixtures Clouds**

A.A. Agapov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Computational Analysis Center, [inform@safety.ru](mailto:inform@safety.ru)

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

V.S. Safonov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate

Gazprom VNIIGAZ, Moscow, Russia

S.I. Sumskoy, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher

NRNU MEPhI, Moscow, Russia

A.A. Shvyryaev, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## Abstract

The main regularities of the formation of shock air waves and air compression waves during combustion or detonation of fuel-air clouds are briefly considered in the article. Specific features are discussed related to the mathematical model of fuel-air mixture explosion, which is used in the Methodology for determining the calculated values of fire risk at the production facilities. The considered Methodology uses the same mathematical model as the corresponding Safety Guide on the assessment of the emergency explosion consequences approved by Rostekhnadzor with some differences that are discussed in the article.

The approach of the Methodology is based on the consideration of one-dimensional pressure waves that are formed in the atmosphere during detonation or turbulent combustion of spherical uniformly mixed clouds. For such processes the approximate dependences of pressure on the distance are built. The validity, accuracy, as well as the field of application of such dependencies are considered in the work.

The conclusion is made about sufficient accuracy of the used dependencies and their good compliance to the current analogues and experiments, the provisions establishing the field of application of the extrapolation formulas for deflagration combustion are missing in the Methodology text. Due to this reason when calculating the situations are possible that at the same distance from the place of explosion of the clouds of fuel-air mixtures the pressure on the front of the detonation wave is significantly less (up to 7 times) than at the front of the deflagration waves. For deflagration combustion rates considered in the Methodology (up to 500 m/s), this result is incorrect.

The reasons for this discrepancy are shown in the article.

In Russia the Methodology is approved as the only document on which basis the fire risk indices are calculated, which in turn are one of the main criteria for making managerial decisions in the design and construction of industrial and social objects. It is shown that considered in the article specific features of the numerical explosion models of fuel - air mixtures cloud lead not always to the justified increase of the conservatism of the obtained results. It is noted that the indicated conservatism can be deleted by introducing appropriate limitations on the field of application of the corresponding approximations.

**Key words:** cloud explosion, fuel-air mixture, fire risk, emergency risk, deflagration, detonation, Methods.

## References

1. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Barothermic effect of the explosion. Saint-Petersburg: Asterion, 2006. 657 p. (In Russ.).
2. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Gas explosions. Saint-Petersburg: Asterion, 2007. 238 p. (In Russ.).
3. Shchelkin K.I. The effect of pipe roughness on the occurrence and propagation of detonation in gases. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1940. Vol. 10. pp. 823–832. (In Russ.).
4. Bartlme F. Gas dynamics of combustion. Moscow: Energoizdat, 1981. 280 p. (In Russ.).
5. Adushkin V.V., Gostintsev Yu.A., Fortov V.E. Energy characteristics of the explosion and the parameters of the shock waves

in the air during detonation of hydrogen-containing clouds in the free atmosphere (preprint). Chernogolovka, 1995. 85 p. (In Russ.).

6. Gostintsev Yu.A., Gubin S.A., Shargatov V.A. Numerical modeling of processes during burning of open volumes of the mixed gas mixtures (preprint). Chernogolovka, 1986. 33 p. (In Russ.).

7. Methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities. *Deklarirovanie pozharnoy bezopasnosti i otsenka pozharnogo riska: sb. V 4 ch. Ch. 4. Normativnyye pravovyye dokumenty po otsenke pozharnogo riska, metodiki i primery* (Declaration of fire safety and fire risk assessment: Digest in 4 parts. Part 4. Regulatory legal documents for fire risk assessment, methods and examples). Ser. 19. Iss. 2. Moscow: ZAO NTTs PB, 2019. 192 p. (In Russ.).

8. RD 03-409—01. Methodology for assessing the consequences of emergency explosions of fuel-air mixtures (with amendments and additions). *Metodiki otsenki posledstviy avariyy na opasnykh proizvodstvennykh obektakh: sb. dok.* (Methods for assessing the consequences of accidents at hazardous production facilities: book of reports). Ser. 27. Iss. 2. Moscow: ZAO NTTs PB, 2015. 210 p. (In Russ.).

9. Methodology for assessing the consequences of emergency explosions of fuel-air mixtures: Safety Guide. Ser. 27. Iss. 15. Moscow: ZAO NTTs PB, 2019. 44 p. (In Russ.).

10. Fire risk assessment guide for industrial enterprises. Available at: [http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo\\_po\\_otsenke\\_pozharnogo\\_riska\\_dlya\\_promyshlennykh\\_predpriyatii.pdf](http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo_po_otsenke_pozharnogo_riska_dlya_promyshlennykh_predpriyatii.pdf) (accessed: January 10, 2020). (In Russ.).

11. GOST R 12.3.047—2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (accessed: January 10, 2020). (In Russ.).

12. Van Den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P. Methods for Calculation of physical effects — due to releases of hazardous materials (liquids and gases) — «Yellow Book». Available at: <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoff.nl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (accessed: January 10, 2020).

13. Tang M.J., Baker Q.A. A new set of blast curves from vapor cloud explosion. *Process Safety Progress*. 1999. Vol. 18. № 3. pp. 235–240.

14. Beyker U., Koks P., Uestayn P., Kulesh Dz., Strehlou R. Explosive phenomena. Assessment and consequences. In 2 books. Book 1. Moscow: Mir, 1986. 319 p. (In Russ.).

15. Melani L., Sochet I., Rocourt X., Jallais S. Review of Methods for Estimating the Overpressure and Impulse Resulting from a Hydrogen Explosion in a Confined-Obstructed Volume. Available at: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2009/images/stories/papers/254.pdf> (accessed: January 10, 2020).

16. RB G-05-039—96. Guidance on hazard analysis of emergency explosions and determination of the parameters of their mechanical action. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200061429> (accessed: January 10, 2020). (In Russ.).

Received January 14, 2020  
In final form — March 2, 2020