

DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-15-22

УДК 533.6.07

© Коллектив авторов, 2023

# Моделирование волн давления при дефлаграционном горении облаков топливно-воздушных смесей



**С.И. Сумской**,  
канд. техн. наук, доцент,  
sumskoi@mail.ru



**С.Х. Зайнетдинов**,  
науч. сотрудник



**А.С. Софьин**,  
канд. техн. наук, зав.  
отделом



**М.В. Лисанов**,  
д-р техн. наук, директор  
центра анализа риска



**А.А. Агапов**,  
канд. техн. наук,  
директор расчетно-  
аналитического центра

НИЯУ МИФИ, Москва,  
Россия

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

Статья посвящена рассмотрению процессов дефлаграционного сгорания сферических облаков. С использованием высокоточного численного моделирования анализируются допущения и результаты расчетов параметров волн давления согласно Руководству по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Рассмотрено влияние на параметры течения таких процессов, как расширение облака топливно-воздушной смеси при горении, распространение волн разрежения после сгорания облака и отклонение от акустического приближения, задействованного в данном руководстве. Показано, что в целом сделанные в этом документе для упрощения расчетов допущения не снижают точность прогнозов.

**Ключевые слова:** горение облаков, волны давления, дефлаграция, численное моделирование, топливно-воздушные смеси, фронт горения.

**Для цитирования:** Сумской С.И., Зайнетдинов С.Х., Софьин А.С., Лисанов М.В., Агапов А.А. Моделирование волн давления при дефлаграционном горении облаков топливно-воздушных смесей// Безопасность труда в промышленности. 2023. № 1. С. 15–22. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-15-22

## Simulation of Pressure Waves During Deflagration Combustion of the Clouds of Fuel-Air Mixtures

S.I. Sumskoy, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., sumskoi@mail.ru (National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia), S.Kh. Zaynetdinov, Research Associate, A.S. Sofyin, Cand. Sci. (Eng.), Department Head, M.V. Lisanov, Dr. Sci. (Eng.), Director of Risk Analysis Center, A.A. Agapov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Computational Analysis Center (STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia)

**Abstract.** The paper examines the assumptions underlying a whole group of methods for estimating the parameters of shock waves (pressure waves) during the combustion of spherical fuel-air clouds - the so-called parametric formulas. The formulas allow to determine the parameters of pressure waves from the given energy release and combustion rate. To do this, a complete system of gas-dynamic equations is solved using high-precision numerical simulation. In this case, the combustion front is explicitly distinguished in the form of an infinitely thin discontinuity, on which the laws of conservation of mass, momentum, and energy are satisfied. The results of such a numerical calculation are compared with calculations using the corresponding parametric formulas. Clouds of a stoichiometric mixture hydrogen-air are considered. It is shown that the parametric formulas describe the expansion of clouds of hot products with a good degree of accuracy. Here, there is complete agreement with the direct numerical simulation. It is also shown that the parameters of pressure waves are satisfactorily described both in the calculation by parametric formulas and in direct numerical simulation. In this case, within the cloud, there is a greater increase in pressure than the parametric formulas predict. This is explained by the fact that the assumptions used in the formulas regarding the behavior of the flame front as an impenetrable piston do not fully reflect the physical processes: the combustion front is a semipermeable piston, and some of the mass of the initial mixture still penetrates through it. The third factor considered, which determines the achieved pressures, is the rarefaction wave that occurs in the air after the cloud burns out. This wave propagates in combination with the leading pressure front formed during combustion initiation. The extent of this complex remains practically constant, and its attenuation during spherical propagation is adequately described by the parametric formulas.

**Keywords:** cloud combustion, pressure waves, deflagration, numerical simulation, fuel-air mixtures, combustion front.

**For citation:** Sums koy S.I., Zaynetdinov S.Kh., Sofyin A.S., Lisanov M.V., Agapov A.A. Simulation of Pressure Waves During Deflagration Combustion of the Clouds of Fuel-Air Mixtures. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2023. № 1. pp. 15–22. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-15-22

### Введение

При авариях на опасных производственных объектах в результате выброса горючих сред в атмосфере могут образовываться облака топливно-воздушных смесей (ТВС). Эти облака при их взрывном превращении могут генерировать в окружающей среде волны давления, способные поражать людей, здания, сооружения. Волны давления (ударные волны и волны сжатия с фазами разрежения) могут генерироваться в широком диапазоне избыточных давлений: от нескольких атмосфер до нескольких килопаскалей. Амплитуда волны зависит от скорости энерговыделения в облаке. С физической точки зрения возможны два режима распространения волн энерговыделения: детонация и дефлаграция [1]. Условия реализации того или иного режима для типовых условий инициирования определяются прежде всего степенью ограничения и загроможденности пространства. Детонация, как правило, реализуется в загроможденных и ограниченных пространствах. На открытых свободных пространствах реализуются дефлаграционные режимы с различной скоростью горения, зависящей от уровня турбулентности в исходной смеси.

Предсказание последствий детонации и дефлаграции облаков ТВС с точки зрения опасности сгенерированных волн давления является важной проблемой. Однако в общем случае моделирование распространения и действия волн давления связано с определенными трудностями, поскольку при описании процессов необходимо рассматривать многомерные нестационарные течения со взаимодействием волн с окружающими препятствиями, учитывая при этом неоднородность исходного облака, динамику облака продуктов, в частности его пульсацию и догорание [2, 3].

В общем случае расчеты течений при детонационном и особенно дефлаграционном сгорании облаков — задача достаточно сложная, и не всегда эти расчеты реализуемы на практике (например, при проведении анализа риска).

В связи с этим в практике оценки параметров волн давления широко распространились подходы, базирующиеся на одномерном рассмотрении процесса взрыва [1, 4–7]. В этом случае рассматривается горение или детонация сферического или полусферического облака, а само решение имеет автомодельный характер: безразмерные давления и импульс являются функциями безразмерного расстояния. Для детонации и дефлаграции используются различные зависимости, причем для дефлаграции одним из определяющих параметров является видимая скорость горения.

### Проблемы использования параметрических формул

Используемые в [1, 4–7] зависимости избыточного давления в ударной волне от детонирующего облака хорошо совпадают с экспериментальными и достоверными расчетными данными. С дефлаграционными зависимостями ситуация несколько другая. Приведенные в [1, 4–7] зависимости получены на основе аналитических или упрощенных численных решений задачи о расширении сферы, которое рассматривается как модельное приближение сферического горения [8]. Эта задача решается в акустическом приближении либо при допущении зависимости решения от единственного параметра: отношения расстояния ко времени (вместо зависимости от двух параметров: от времени  $t$  и отдельно — от расстояния). При использовании акустического приближения для этого выписывается уравнение для потенциала  $\varphi$  и ищется решение в виде бегущей волны:

$$r^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = a_0^2 \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \right],$$

где  $a_0$  — скорость звука;  $r$  — радиус; производная от потенциала по  $r$  дает скорость потока  $u = \frac{\partial \varphi}{\partial r}$ ; производная по  $t$  — давление:  $p - p_0 = -\rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}$ ;  $p_0$  и  $\rho_0$  — соответственно начальные давление и плотность.

Таким образом, получаются аналитические соотношения для давления в волне, генерируемой расширяющейся сферой. К достоинствам такого подхода можно отнести простоту и физическую обоснованность в рамках сделанных допущений. Однако эти рамки накладывают и ряд ограничений на полученные аналитические решения.

Прежде всего следует понимать, что акустическое приближение (линеаризованное приближение уравнений сохранения) предполагает малое изменение скорости и плотности. В частности, скорость потока в звуковых волнах предполагается много меньше скорости звука. Однако в Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (далее — Руководство по безопасности) [7] рассматриваются и режимы горения со скоростями в десятки и сотни метров в секунду. Ответ на вопрос, насколько обоснованно и точно использовать акустический подход при описании высокоскоростных дефлаграций, нигде не рассматривался.

Кроме того, акустическое приближение используется для решения задачи о расширении сферы,

рассматриваемой либо как полностью непроницаемый поршень, либо в упрощенной трактовке в виде полупроницаемого поршня, в то время как реальный фронт горения является полупроницаемым поршнем, на котором часть вещества проходит через фронт в зависимости от характеристик потока перед фронтом. Влияние этого фактора модельного приближения также ранее не рассматривалось.

В данной работе предпринята попытка проанализировать точность акустического приближения в приложении к расчету параметров волн давления [7]. Для этого предлагается провести высокоточные детальные расчеты процессов сгорания сферических облаков и сравнить решения, полученные при этом, с зависимостями [7], которые, как отмечено ранее, являются акустическим приближением задачи о движении сферического непроницаемого поршня.

При этом есть еще два вопроса, которые необходимо прояснить. Первый касается размеров области, где наблюдается горение. В Руководстве по безопасности [7] принято, что область горения составляет 0,34 безразмерного радиуса. Эта область примерно соответствует радиусу покоящихся продуктов, определенному по степени расширения 7. Этот радиус одинаков для всех режимов горения. И он больше начального размера облака, поскольку в сферическом облаке при горении из центра продукты горения, имея меньшую плотность, должны занимать больший объем, что приводит к расширению в процессе горения исходного облака. Но при разных скоростях горения скорость расширения облака различна, поэтому на момент завершения горения область, где распространялось пламя, может изменяться в размере. Вопрос количественных характеристик этого процесса и конечного размера облака исходной смеси пока не рассматривался. В данной работе он исследуется впервые.

Наконец, есть еще один вопрос, касающийся степени консерватизма соотношений, приведенных в Руководстве по безопасности, и аналогичных подходов. Как уже отмечалось, они получены из аналитического решения задачи о распространении сферического пламени, однако из представленных в литературе решений [6, 8–10] не ясно, учитывалось ли влияние волны разрежения, формирующейся в воздухе после окончания горения облака. Постановка задач в упомянутых работах не предполагает рассмотрение этого фактора, поэтому в данной работе рассматривается и влияние на величину избыточного давления волн разрежения.

#### Постановка задачи и математическая модель процесса

Рассматривается горение находящихся в атмосфере сферических облаков смеси водорода с воздухом в стехиометрическом соотношении. Рассмотрено два размера облака: 10 и 100 м. Видимая скорость горения была принята в трех вариантах: 40, 100 и 240 м/с, на практике различная скорость горения

может быть обусловлена различным уровнем турбулентности, в частности уровнем загромождения. Температура воздуха и исходной смеси полагалась равной  $T_0 = 298,15$  К, давление воздуха в исходной смеси  $P_0 = 101\,325$  Па.

Для инициирования процесса горения в начальный момент времени в центре сферического облака размещался сферический объем радиусом 1 см с поверхностью, представляющей собой фронт горения. Внутри этой области задавались продукты горения водородно-воздушной смеси.

В этом случае для описания течения процесса используется система одномерных уравнений в сферической геометрии. Система записана в нестационарном виде в лагранжевых массовых координатах и выражает законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$V = r^2 \frac{\partial r}{\partial m}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -r^2 \frac{\partial p}{\partial m}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial (i + u^2/2)}{\partial t} = \frac{\partial (r^2 p u)}{\partial m}, \quad (3)$$

а в качестве уравнения состояния исходной водородно-воздушной смеси, продуктов горения и воздуха использовалось уравнение состояния идеального газа:

$$p = i(\gamma - 1)/V, \quad (4)$$

где  $V$  — удельный объем;  $m$  — лагранжева массовая координата;  $u$  — скорость;  $t$  — время;  $p$  — давление;  $i$  — удельная внутренняя энергия;  $\gamma$  — показатель адиабаты ( $\gamma = 1,4$  для воздуха,  $\gamma = 1,197$  для продуктов горения водородно-воздушной смеси).

Для расчета процесса горения использовалась модель бесконечно тонкой зоны реакции, распространяющейся с нормальной скоростью, такой, чтобы в сумме со скоростью потока перед фронтом пламени составить определенную видимую скорость горения, которая в рассматриваемом случае равна — 40, 100 или 240 м/с. На поверхности фронта пламени выполняются законы сохранения массы, импульса и энергии с учетом дополнительного энерговыделения на фронте. Такая модель явного выделения фронта пламени подробно описана в [11–13]. На внешней границе расчетной области (на большом удалении от облака) рассматривается покоящаяся среда воздуха при давлении 1 атм. В центре облака задается нулевая скорость потока.

Параметры исходной смеси и продуктов определялись на основе термодинамического расчета (НР-задача) согласно [14]. Результаты решения термодинамической НР-задачи для стехиометрической смеси «водород — воздух» приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Исходная смесь «водород – воздух»	Продукты горения
Давление, Па	101325,000000	101325,00000
Температура, К	298,150000	2279,98000
Молярный вес, кг/кмоль	21,434100	24,67090
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0,876117	0,131870
Показатель адиабаты	1,400000	1,19655
Скорость звука, м/с	402,414000	957,70700

На основе данных термодинамических расчетов рассчитана теплота сгорания стехиометрической смеси «водород – воздух» – 4,27 МДж/кг.

Система уравнений (1)–(4) с соответствующими начальными условиями решалась численно с использованием разностных методов [12, 13].

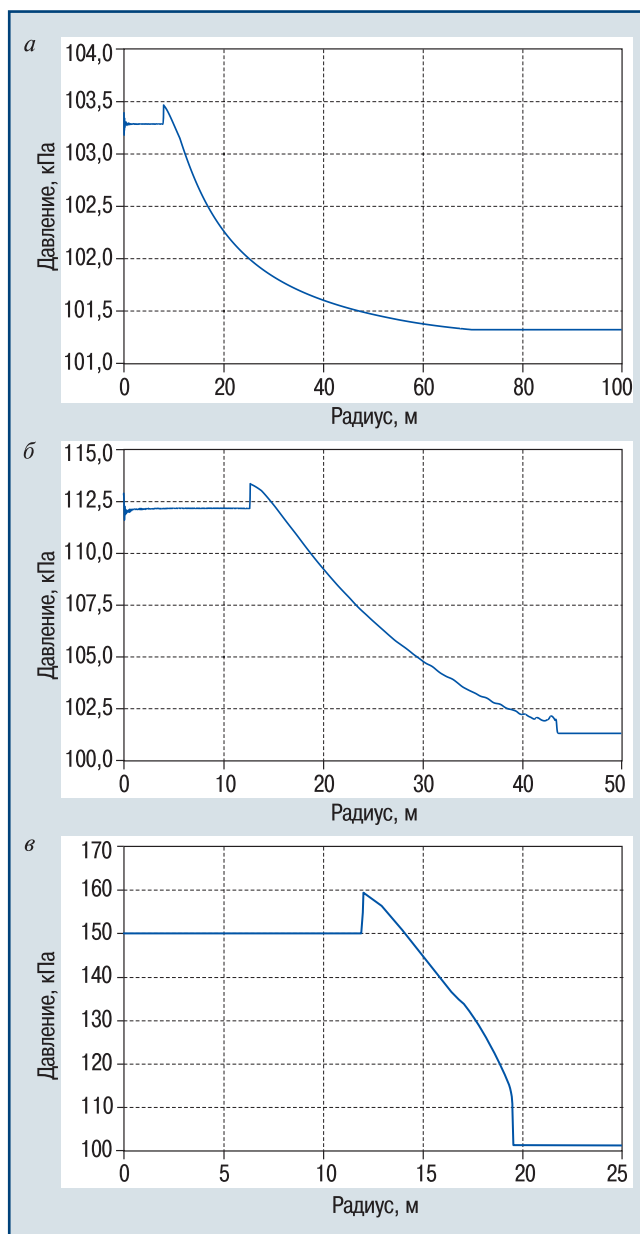
**Расчеты размеров области горения**

Примеры расчета течения при дефлаграционном горении сферических облаков с начальным радиусом 10 м для трех видимых скоростей горения приведены на рис. 1 (здесь *a* –  $v = 40$  м/с,  $t = 0,2$  с; *b* –  $v = 100$  м/с,  $t = 0,12$  с; *в* –  $v = 240$  м/с,  $t = 0,05$  мс) (на стадии горения) и на рис. 2 (здесь *a* –  $v = 40$  м/с,  $t = 0,5$  с; *b* –  $v = 100$  м/с,  $t = 0,3$  с; *в* –  $v = 240$  м/с,  $t = 0,2$  мс) (после завершения горения).

На рис. 1 показаны характерные распределения давления при сгорании сферического облака с видимыми скоростями 40, 100 и 240 м/с для времен, когда фронт горения еще распространяется по облаку (положение фронта горения определяется по скачку понижающего давления, что соответствует известному факту падения давления на фронте горения). Из рисунка хорошо видно, что при отсутствии оттока продуктов из центральной части облака перед фронтом горения формируется волна сжатия. Она приводит в движение исходную смесь, которая расширяется, за счет чего радиус возможной зоны горения увеличивается: на рис. 1 фронт горения уже расположен на радиусах больше начального радиуса облака  $R_0 = 10$  м.

Собственно волна давления, генерируемая расширяющимися продуктами, в общем случае представляет собой комплекс скачка давления, формирующегося при мгновенном ускорении пламени в начальный момент времени, и волны сжатия, формирующейся уже при движении пламени и характеризующейся плавным нарастанием давления. Скачок давления на фронте и повышение давления в волне сжатия тем больше, чем выше скорость горения. Форма профиля давления при невысокой скорости горения (см. рис. 1, *a*) качественно хорошо совпадает с аналитическим решением задачи о движении сферического поршня в акустическом приближении [8].

После прекращения горения действие фронта пламени как «поршня», «толкающего» исходную смесь, прекращается и, как это бывает после оста-



▲ Рис. 1. Распределение давления в зависимости от расстояния для облака с начальным радиусом 10 м при различных видимых скоростях горения на стадии горения

▲ Fig. 1. Pressure distribution depending on the distance for a cloud with an initial radius of 10 m at different apparent combustion rates at the combustion stage

новки «поршня», формируется волна разрежения (бегущая в воздухе за волной сжатия), которая идет вслед за волной давления, постепенно ослабляя ее. Одновременно по облаку к его центру распространяется другая волна разрежения. Поскольку скорость звука в продуктах высока (см. табл. 1), то эта волна быстро достигает центра облака, отражается от него и начинает циркулировать от центра к границе и обратно, внося определенный вклад в профиль волны разрежения, распространяющейся в воздухе. Картина течения процесса на этой стадии представлена на рис. 2. Здесь хорошо видны вторичные удар-

ные волны от повторного расширения продуктов горения — это второй пик давления после его пика в первой волне. Также хорошо видно, что при низких скоростях горения формируются воздушные волны сжатия, волны с выраженным постепенным нарастанием профиля давления (см. рис. 2, а, б) для видимых скоростей горения 40 и 100 м/с. При высоких же скоростях горения наблюдаются воздушные ударные волны (см. рис. 2, в).

В табл. 2 приведены радиусы, которых достигает исходная смесь на конечный момент горения, — они показывают зону существования в пространстве открытого пламени (в ней достигаются наибольшие давления). На данной стадии в этой зоне нет волны разрежения, движущейся по радиусу и разгружающей среду. Результаты расчета радиуса зоны существования открытого пламени представлены в табл. 2.

Как видно из данного расчета, используемый в Руководстве по безопасности критерий для определения зоны горения в виде равенства безразмерного радиуса  $R_x$  значению 0,34 (см. табл. 2, 4-й столбец) по сути соответствует допущению о размере облака исходной смеси, равном размеру образующихся продуктов (см. табл. 2, 3-й столбец). Эти значения практически совпадают: 18,8 и 18,25 м при начальном радиусе 10 м; 188 и 182,5 м при начальном радиусе 100 м. Детальный численный расчет показывает значения радиусов 19,16; 19,45 и 19,5 м для десятиметрового облака при различных скоростях горения (см. табл. 2, 5-й столбец).

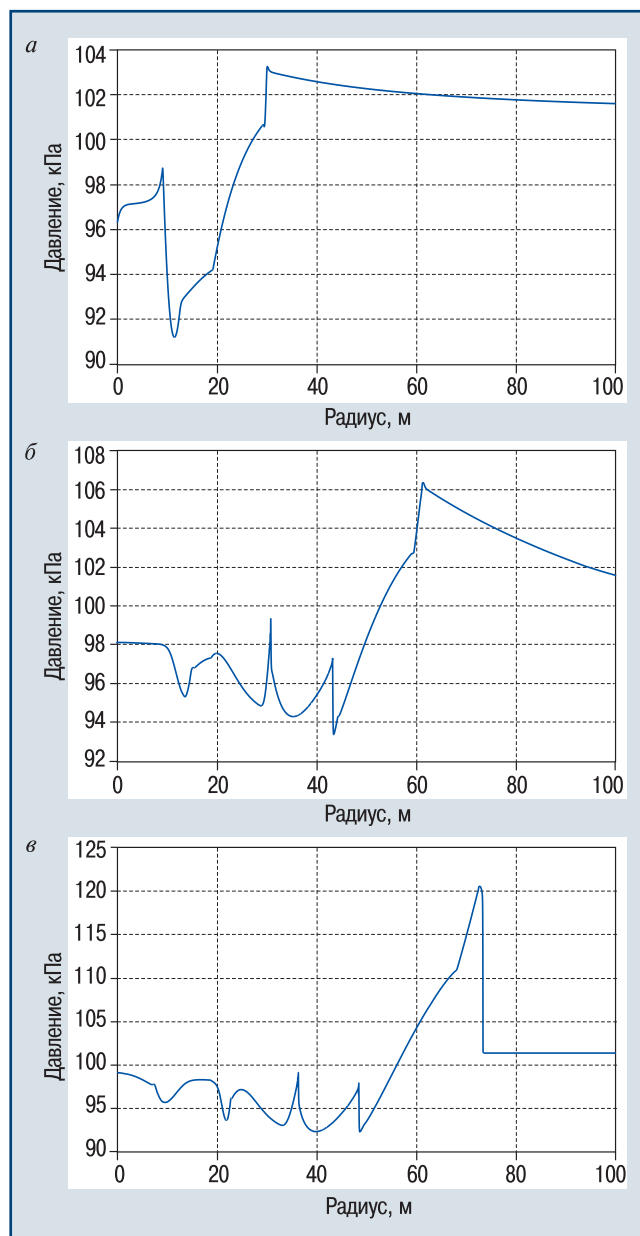
При этом масштабирование процесса (облако 100 м) приводит практически к пропорциональному увеличению радиуса наблюдения пламени до 191,73; 194,75 и 194,82 м.

Таким образом, размер области пространства, где может распространяться горение, воспроизводится при различных подходах (и что особенно важно, в действующем Руководстве по безопасности) вполне адекватно.

#### Расчеты параметров волн давления

Результаты расчета давлений, достигаемых в волнах давления при горении облака радиусом 10 м при разных видимых скоростях горения, представлены на рис. 3 (здесь а — 40 м/с; б — 100 м/с; в — 240 м/с; 1 — расчеты по Руководству по безопасности; 2 — расчеты по модели (1)–(4)).

Для обоих подходов на удалении от облака наблюдается хорошее совпадение достигаемых давлений, что достаточно ожидаемо, поскольку выделенное количество энергии одинаково. В ближней зоне в целом также имеем совпадение данных Руководства по безопасности с более точными расчетами, но при этом давления, рассчитанные численно, несколько выше. Возможно, это связано с тем, что

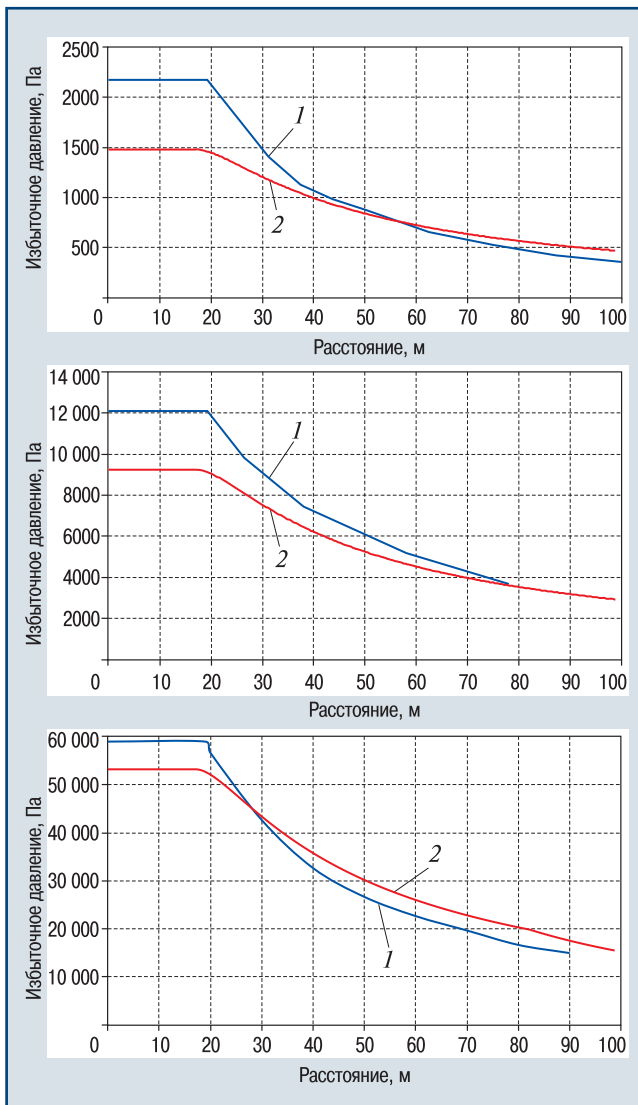


▲ Рис. 2. Распределение давления в зависимости от расстояния для облака с начальным радиусом 10 м при различных видимых скоростях горения после завершения горения

▲ Fig. 2. Pressure distribution depending on the distance for a cloud with an initial radius of 10 m at different apparent combustion rates after combustion completion

Таблица 2

Начальный радиус облака, м	Видимая скорость горения, м/с	Радиус области, где возможно горение, м		
		Определен по расширению продуктов	Расчет ТВС по Руководству по безопасности	Расчет по модели (1)–(4)
10	40	18,8	18,25	19,16
	100	18,8	18,25	19,45
	240	18,8	18,25	19,50
100	40	188	182,50	191,73
	100	188	182,50	194,75
	240	188	182,50	194,82



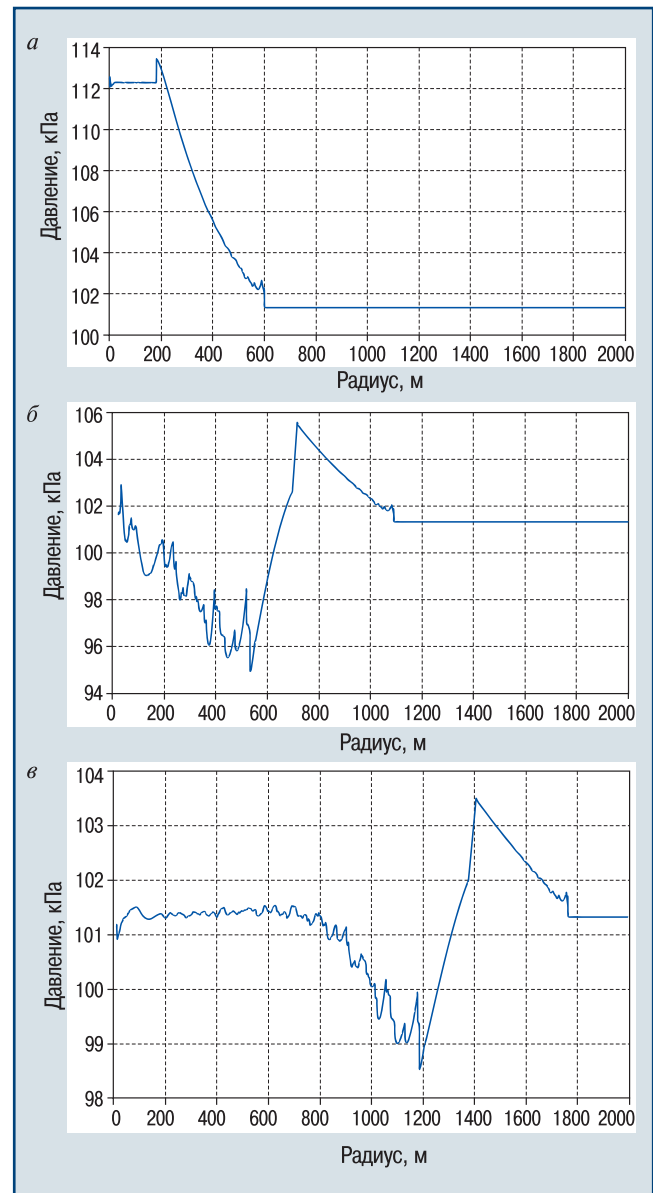
▲ Рис. 3. Распределение достигаемых давлений в зависимости от расстояния при различных видимых скоростях горения для облака с начальным радиусом 10 м  
▲ Fig. 3. Distribution of the achieved pressures depending on the distance at different visible combustion rates for a cloud with an initial radius of 10 m

в численных расчетах более точно (без упрощений) учитывается движение газа перед фронтом пламени, равно как и переход части исходной смеси в различные продукты при горении.

В целом же можно считать, что аппроксимационные зависимости Руководства по безопасности, полученные в определенных допущениях, с хорошей степенью точности воспроизводят результаты математического моделирования. При этом расхождение (в относительной величине) между результатами численного расчета и расчета по Руководству по безопасности тем меньше, чем больше скорость горения. А наибольшая ошибка наблюдается непосредственно в зоне горения. Таким образом, основной функционал Руководства по безопасности — предсказывать сильные волны в воздухе — реализуется с достаточной точностью.

**Расчеты максимально допустимых давлений с учетом действия волн разрежения**

Наконец, существует еще один фактор, определяющий достижение максимальных давлений. Это взаимодействие волны сжатия, сгенерированной при горении облака, с волной разрежения, которая формируется по завершении горения. Картина этого процесса в различные моменты времени представлена на рис. 4 (здесь *a* — 1,65 с; *б* — 3,09 с; *в* — 5,07 с). Волна сжатия, в данном случае представляющая собой пологую «горку», фактически перемещается со скоростью звука, постепенно затухая в силу сферической геометрии. Волна разрежения (она видна в след



▲ Рис. 4. Динамика комплекса волн «сжатия — разрежения» при сгорании облака радиусом 100 м с видимой скоростью 100 м/с в различные моменты времени  
▲ Fig. 4. Dynamics of the complex of compression-rarefaction waves during the combustion of a cloud with a radius of 100 m with an apparent speed of 100 m/s at different times

за пиком давления на рис. 4, б, в) также распространяется в воздухе со скоростью звука. В результате от головы волны давления до ее пика формируется зона фазы сжатия, которая почти сохраняет свою протяженность, равную в данном случае (см. рис. 4) примерно 400 м. Таким образом, за счет расхождения потока пик просто постепенно уменьшается в амплитуде на перемещающемся (и слегка затухающем) профиле давления в волне сжатия. Эти два фактора (расхождение потока и действие волны разрежения) совместно обуславливают уменьшение давления с увеличением расстояния. В случае численного решения оба эти фактора учитываются автоматически. А полнота учета их в аналитических зависимостях Руководства по безопасности неясна, судя по более медленному спаду давления с увеличением расстояния, в результатах расчетов по Руководству по безопасности затухание учитывается не в полном объеме (см. рис. 3), поэтому такие расчеты в данной части обладают некоторым консерватизмом. В целом же учет степени влияния данного фактора Руководством по безопасности можно считать приемлемым.

#### Заключение

С помощью численного моделирования, выполненного с использованием метода явного выделения фронтов горения, проведено исследование процесса распространения волн давления при дефлаграционном горении сферических облаков.

Показано, что размер области пространства, где может распространяться горение, можно хорошо оценить по размеру зоны, занимаемой продуктами горения при расширении до 1 атм (именно такой подход заложен в действующем Руководстве по безопасности). Это подтверждено с помощью численного решения полной системы уравнений газодинамики: размеры этой зоны, полученные при численном расчете, отличаются от результатов их расчетов по Руководству по безопасности на 7 %. Различие же в расчете избыточного давления в волне составляет менее 15 % для безразмерных радиусов более 0,5. При меньших расстояниях давления, рассчитанные по Руководству по безопасности и численно, отличаются значительно. При слабых волнах (избыточное давление до 10 кПа) это различие может достигать 30 %, Руководство по безопасности дает меньшие значения. Но поскольку эта разница наблюдается при малых давлениях, кроме того, в зоне действия другого поражающего фактора — открытого пламени, выявленное занижение не будет сказываться на оценке поражающего воздействия и риска.

Таким образом, подходы к оценке последствий от сгорания облаков с постоянной скоростью, изложенные в Руководстве по безопасности, подтверждаются более точными численными расчетами и могут использоваться в практике работ в сфере промышленной безопасности, в частности, при оценке риска.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министратва науки и высшего образования Российской*

*Федерации (соглашение с ОИВТ РАН от 23 сентября 2020 г. № 075–15-2020-785).*

#### Список литературы

1. *О некоторых различиях в методических подходах при моделировании параметров волн давления от сгорания и детонации облаков топливно-воздушных смесей/ А.А. Агапов, В.С. Сафонов, С.И. Сумской, А.А. Швыряев// Безопасность труда в промышленности. 2020. № 5. С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-36-42*
2. *Modeling of shock wave propagation over the obstacles using supercomputers/ V.A. Shargatov, A.S. Pecherkin, A.S. Sofin et al. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1099/1/012014/pdf> (дата обращения: 01.12.2022).*
3. *Detonation of fuel-air mixtures above the surface of the earth/ A.A. Borisov, B.E. Gel'fand, S.A. Gubin et al.// Combustion, Explosion, and Shock Waves. 1988. Vol. 24. Iss. 2. P. 238–240.*
4. *Van den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P.M. Methods for the calculations of physical effects. Due to releases of hazardous materials (liquids and gases). «Yellow Book». CPR 14E. URL: <https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (дата обращения: 01.12.2022).*
5. *Van den Berg A.C. The multi-energy method: A framework for vapour cloud explosion blast prediction// Journal of Hazardous Materials. 1985. Vol. 12. Iss. 1. P. 1–10.*
6. *The blast wave generated by spherical flames/ R.A. Strehlow, R.T. Luckritz, A.A. Adamczyk, S.A. Shimpi// Combustion and Flame. 1979. Vol. 35. P. 297–310. DOI: 10.1016/0010-2180(79)90035-X*
7. *Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности. Сер. 27. Вып. 15. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. 44 с.*
8. *Taylor G.I. The air wave surrounding an expanding sphere// Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1946. Vol. 186. Iss. 1006. P. 273–292. DOI: 10.1098/rspa.1946.0044*
9. *Kuhl A.L., Kamel M.M., Oppenheim A.K. Pressure waves generated by steady flames// Symposium (International) on Combustion. 1973. Vol. 14. P. 1201–1215. DOI: 10.1016/S0082-0784(73)80108-0*
10. *Williams F.A. Estimation of pressure fields in combustion of vapour clouds// Journal of Fluid Mechanics. 1983. Vol. 127. P. 429–442.*
11. *Gubin S.A., Shargatov V.A. Parameters of air shock waves when combustion is transformed into detonation// Combustion, Explosion and Shock Waves. 1989. Vol. 25. Iss. 5. P. 621–625.*
12. *Параметры воздушных ударных волн при разных режимах взрывного превращения горючих газовых смесей/ А.А. Борисов, Б.Е. Гельфанд, С.А. Губин и др.// Химическая физика. 1986. Т. 5. № 5. С. 670–679.*
13. *Параметры ударных волн в воздухе при быстром выгорании водородно-воздушного термика/ Ю.А. Гостинцев, С.А. Губин, И.В. Ковтун, В.А. Шаргатов// Химическая физика. 1987. Т. 6. № 3. С. 398–402.*
14. *Прогнозирование детонационных характеристик безводородных взрывчатых веществ/ С.Б. Викторова, С.А. Гу-*

бин, И.В. Маклашова, В.И. Пепекин// Химическая физика. 2005. Т. 24. № 12. С. 22–45.

References

1. Agapov A.A., Safonov V.S., Sumskoy S.I., Shvyryaev A.A. On Some Differences in the Methodological Approaches when Modeling the Parameters of Pressure Waves from Combustion and Detonation of Fuel-Air Mixtures Clouds. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2020. № 5. pp. 36–42. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-36-42
2. Shargatov V.A., Pecherkin A.S., Sofin A.S., Agapov A.A., Gorkunov S.V., Sumskoi S.I., Bogdanova Yu.A., Karabulin A.V. Modeling of shock wave propagation over the obstacles using supercomputers. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1099/1/012014/pdf> (accessed: December 1, 2022). (In Russ.).
3. Borisov A.A., Gel'fand B.E., Gubin S.A., Sumskoi S.I., Shargatov V.A. Detonation of fuel-air mixtures above the surface of the earth. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1988. Vol. 24. Iss. 2. pp. 238–240.
4. Van den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P.M. Methods for the calculations of physical effects. Due to releases of hazardous materials (liquids and gases). «Yellow Book». CPR 14E. Available at: <https://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (accessed: December 1, 2022).
5. Van den Berg A.C. The multi-energy method: A framework for vapour cloud explosion blast prediction. *Journal of Hazardous Materials*. 1985. Vol. 12. Iss. 1. pp. 1–10.
6. Strehlow R.A., Luckritz R.T., Adamczyk A.A., Shimpi S.A. The blast wave generated by spherical flames. *Combustion and Flame*. 1979. Vol. 35. pp. 297–310. DOI: 10.1016/0010-2180(79)90035-X

7. 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.).
8. Taylor G.I. The air wave surrounding an expanding sphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1946. Vol. 186. Iss. 1006. pp. 273–292. DOI: 10.1098/rspa.1946.0044
9. Kuhl A.L., Kamel M.M., Oppenheim A.K. Pressure waves generated by steady flames. Symposium (International) on Combustion. 1973. Vol. 14. pp. 1201–1215. DOI: 10.1016/S0082-0784(73)80108-0
10. Williams F.A. Estimation of pressure fields in combustion of vapour clouds. *Journal of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 127. pp. 429–442.
11. Gubin S.A., Shargatov V.A. Parameters of air shock waves when combustion is transformed into detonation. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1989. Vol. 25. Iss. 5. pp. 621–625.
12. Borisov A.A., Gelfand B.E., Gubin S.A., Odintsov V.V., Shargatov V.A. Parameters of air blast waves for various modes of explosive conversion of combustible gas mixtures. *Khimicheskaya fizika = Chemical physics*. 1986. Vol. 5. № 5. pp. 670–679. (In Russ.).
13. Gostintsev Yu.A., Gubin S.A., Kovtun I.V., Shargatov V.A. Parameters of air blast waves generated by fast burning of hydrogen-air thermal. *Khimicheskaya fizika = Chemical physics*. 1987. Vol. 6. № 3. pp. 398–402. (In Russ.).
14. Victorov S.B., Gubin S.A., Maklashova I.V. Pепekin V.I. Predicting the detonation characteristics of hydrogen-free HES. *Khimicheskaya fizika = Chemical physics*. 2005. Vol. 24. № 12. pp. 22–45. (In Russ.).

E-mail: sumskoi@mail.ru

Материал поступил в редакцию/ Received 06.12.2022

После рецензирования/ Revised 25.12.2022

Принят к публикации/ Accepted 06.01.2023

По страницам научно-технических журналов

январь 2023 г.

Проблемы управления рисками в техносфере  
(научно-аналитический журнал)

Королева Л.А., Хайдаров А.Г. Оценка пожарной опасности в системе учета твердых коммунальных отходов при их накоплении и перевозке. — 2021. — № 2 (58). — С. 53–60.

Рассматривается вывоз мусора из крупных городов на железнодорожном транспорте. Проведен сбор и анализ данных по морфологическому составу отходов, начиная с 1920-х годов. Произведен расчет значений химической эксергии и теплоты сгорания твердых коммунальных отходов и их отдельных фракций. Определены общие тенденции изменения эксергии отходов. Проведен анализ и установлены закономерности изменения эксергии и теплоты сгорания твердых коммунальных отходов в зависимости от компонентного состава, зольности, содержания летучих веществ

и фиксированного углерода. Приведена классификация горючих компонентов отходов по эксергетическому показателю. Определены перспективы построения системы учета твердых коммунальных отходов применительно к железнодорожному транспорту.

Природные и техногенные риски  
(научно-аналитический журнал)

Шупнев Д.С., Семенов А.Н., Бычков А.В. Актуальные вопросы пожарной безопасности объектов с массовым пребыванием людей. — 2021. — № 4. — С. 37–39.

Рассмотрены проблемные вопросы современного состояния инфраструктурной безопасности торговых центров, приведены новейшие методы улучшения их пожарной безопасности. Выбраны различные подходы для экономически обоснованных вариантов модернизации пожарной безопасности торгово-развлекательных центров.