

УДК 533.6.07

## ВЛИЯНИЕ ЗАГРОМОЖДЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВА НА ПАРАМЕТРЫ ВЗРЫВНЫХ ВОЛН ПРИ СГОРАНИИ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ ОБАКОВ

© 2023 г. С. И. Сумской<sup>1\*</sup>, А. С. Софьин<sup>2</sup>, С. Х. Зайнетдинов<sup>2</sup>, М. В. Лисанов<sup>2</sup>, А. А. Агапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>ЗАО «Научно-технический центр «Промышленная безопасность», Москва, России

\*E-mail: sumskoi@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022;

после доработки 14.07.2022;

принята в печать 20.07.2022

Статья посвящена рассмотрению генерации волн давления при сгорании водородно-воздушных облаков в различных режимах. Рассматривалась задача о сгорании сферических облаков, в которых внутренний сферический объем сгорал с видимой скоростью в 240 м/с, а оставшийся внешний слой – с видимой скоростью в 100 м/с. Также для сравнения были рассмотрены два предельных случая: сгорание всего облака с постоянными скоростями в 100 и 240 м/с. Задача решалась численно в одномерной постановке, при этом фронт горения выделялся явно. В результате с помощью высокоточного численного моделирования показано, что догорание объемов водородно-воздушных смесей на открытом пространстве с невысокой скоростью (до 100 м/с) не приводит к увеличению давления в волнах, сгенерированных до этого при сгорании объема с высокой скоростью, соответствующей горению в загроможденном пространстве. Такая картина наблюдается для внутренней области различных размеров (доли облака, сгорающей с высокой скоростью).

*Ключевые слова:* горение облаков, волны давления, численное моделирование, взрывобезопасность, выделение фронта горения.

DOI: 10.31857/S0207401X23030159, EDN: NCVPEY

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области оценки последствий взрывов газовых топливно-воздушных, и в том числе водородно-воздушных, облаков ведутся последние десятилетия достаточно интенсивно. В самых ранних подходах для оценки последствий взрывных превращений в газовых облаках использовался метод тротилового эквивалента [1–3]. В этом случае параметры воздушной ударной волны (ВУВ) полагались эквивалентными параметрам ВУВ от взрыва эквивалентного по энергии заряда тротила. Такой подход недостаточно точно описывает параметры ВУВ [1, 4, 5], поскольку помимо количества выделившейся энергии большую роль играют такие факторы, существенно отличающие взрывные превращения газовых топливно-воздушных облаков от взрывов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ – high explosive (HE)), как скорость энерговыделения и пространственное распределение изначального заряда.

Соответственно, можно отметить следующие отличия газовых взрывов от взрывов конденсированных зарядов:

– большой объем, занимаемый газовой топливно-воздушной смесью (ТВС), и вследствие этого большие времена собственно реагирования и разгрузки уже прореагировавших продуктов;

– существенно меньшие давления, достигаемые при газовых взрывах, и вследствие этого меньшая доля энергии взрыва, передающаяся в ВУВ, и меньшая диссипация энергии в ВУВ;

– при детонации газовых облаков наблюдаются волны давления с большей длительностью фазы сжатия, чем при сопоставимых взрывах зарядов конденсированного ВВ;

– в газовых облаках возможна не только детонация, но и низкоскоростные дефлаграционные режимы горения; при таких режимах могут образовываться волны сжатия с профилем давления, отличным от профиля давления в ВУВ: в волнах сжатия имеет место плавное нарастание давления.

Для того чтобы учесть все эти особенности газовых взрывов и более точно описывать парамет-

ры возникающей при этом ВУВ, в 80-х годах XX века были предложены параметрические формулы. Эти формулы в зависимости от расстояния описывают величины избыточного давления, импульса и длительности фазы сжатия, аналогичные параметры для фазы разрежения ВУВ и отраженных волн. Например, в работах [6] такие соотношения приводятся для случая детонации сферических газовых облаков.

Однако оценка параметров ВУВ для детонирующих облаков является очень консервативной (завышенной) для большинства взрывов газовых облаков при аварийных выбросах, так как в большинстве ситуаций облака сгорают в дефлаграционном режиме, а не детонируют, поскольку энергия источников зажигания мала. С точки зрения оценки последствий газовых взрывов это принципиальный момент, поскольку возникающие при детонации и дефлаграции взрывные нагрузки (в частности, избыточные давления) отличаются в разы.

Поэтому важно уметь оценивать параметры ВУВ, возникающих не только при детонации, но и при сгорании в дефлаграционных режимах облаков. Для такой оценки обычно используется аналитическое решение задачи о сферической звуковой волне от того или иного источника. В разных работах рассматриваются различные варианты решения этой задачи [7–11]. Такой подход реализован и в практических руководствах [1, 12, 13]. Во всех этих работах используются аналитические зависимости, полученные в акустическом приближении, для давления либо в ВУВ, либо в волне сжатия при различных скоростях дефлаграции в случае сгорания определенного количества ТВС. На протяжении последних десятилетий эти зависимости широко использовались на практике и были закреплены в ряде нормативных документов различного уровня [12, 14].

Следует, однако, отметить, что и такие зависимости несут в себе определенный консерватизм, т.е. параметры ВУВ в них могут быть завышены. Это возможно при переменной скорости горения. Модели из работ [7–14] базируются на предположении о том, что все облако сгорает с постоянной скоростью, которая прежде всего зависит от загроможденности пространства и вызываемой этой загроможденностью турбулизации пламени.

Однако разные части больших облаков ТВС могут сгорать с различной скоростью. Особый интерес представляет режим, когда внутренняя часть облака сгорает с высокой скоростью, а внешняя — с низкой. Такая ситуация интересна с практической точки зрения, когда облако частично расположено в загроможденном пространстве, где горение происходит с высокой скоростью, а

частично — на открытых незагроможденных пространствах, где горение происходит с существенно меньшей скоростью. В этом случае возникает ряд вопросов: каков вклад низкоскоростного горения в параметры генерируемых волн давления и можно ли пренебречь энерговыделением в областях сгорания смесей на открытых пространствах при оценке поражающего действия волн давления?

Авторы экспериментальных работ [15–18] наблюдали, что скорость горения резко падала при его выходе из загроможденного пространства в свободный объем. Соответственно, можно ожидать, что в этом случае ВУВ будет слабее по сравнению с ситуацией, когда все облако целиком сгорает с высокой скоростью, характерной для облака с загромождением. Такой процесс сгорания облака с переменной скоростью и генерацией ВУВ теоретически до сих пор не исследовался.

Вопросы о том, в какой степени при горении с переменной скоростью за генерацию ударных волн “отвечает” дефлаграционное горение с наибольшей скоростью и какой вклад в генерацию ВУВ вносит последующее сгорание облака с более низкой скоростью, остаются открытыми. Исходя из этого пробела в существующих представлениях, в данной работе предлагается рассмотреть задачу о горении в облаке, где существует область с высокой скоростью горения (в силу высокой загроможденности пространства) и граничащая с ней область с невысокой скоростью горения. Предполагается, что процесс развивается следующим образом: при сгорании части облака с высокой скоростью формируется волна давления, а после перехода горения в слабо загроможденную область пространства и сброса скорости горения генерация волны давления продолжается, но с меньшей интенсивностью. Основная цель работы — определение вклада процесса низкоскоростного горения в генерацию ВУВ.

Данная задача имеет большое практическое значение. При оценке последствий взрывных превращений в качестве основных входных параметров используется масса сгорающей ТВС и скорость горения. В случае аварийного выброса формируются протяженные облака ТВС, различные части которых могут находиться в различных условиях с точки зрения скорости распространения пламени. В части облака могут существовать высокоскоростные режимы (обычно это области с высокой плотностью размещения технологического оборудования), а остальная часть облака выходит на открытое пространство, где горение возможно в низкоскоростном режиме. Соответственно, возникают различные варианты сочетаний массы сгорающей ТВС и скорости горения,

необходимые для оценки параметров ВУВ по тем или иным методикам. Понятно, что наиболее консервативную оценку параметров ВУВ дает рассмотрение случая со сгоранием всего объема с максимальной скоростью. Однако на практике такое завышение параметров ВУВ не всегда приемлемо. Данная работа позволяет уточнить долю эффективного энерговыделения в случае горения с максимальной по всему объему облака скоростью, которая соответствовала бы по параметрам ВУВ реальной картине сгорания всего облака с переменной скоростью.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Рассматривается горение сферического водородно-воздушного облака, изначально имевшего радиус  $R_0$  и находившегося в воздухе. Смесь водород-воздух бралась в стехиометрическом соотношении. Рассматриваются варианты сгорания всего облака как с постоянной видимой, так и с переменной скоростью. В последнем случае во внутренней сферической области с долей массы от всего облака ( $\alpha$ ) горение происходило с более высокой скоростью.

В данной работе рассматривались два случая со значениями видимой скорости горения 240 и 100 м/с. Скорость в 100 м/с согласно имеющимся экспериментальным данным может рассматриваться как верхняя оценка скорости горения водородсодержащих смесей в крупных облаках в свободном объеме [19]. Большая скорость в 240 м/с соответствует скорости горения в слабо/средне загроможденном пространстве [12–14]. Такое различие в скоростях объясняется более сильной турбулизацией потока и фронта горения при наличии препятствий (загромождения).

Таким образом, решаемая в описанной постановке задача о сгорании облака, частично лежащего в загроможденной области пространства (например, в области расположения технологических трубопроводов), а частично – на свободном (незагроможденном) пространстве, моделирует ситуацию с переменной скоростью горения.

Для описания течения используется система одномерных уравнений в сферической геометрии. Рассмотрение задачи проводится в одномерной постановке, поскольку именно одномерные модели используются, как правило, на практике для оценки последствий взрывных превращений облаков ТВС. Соответственно, для сопоставимости с результатами расчета по таким моделям и был выбран одномерный подход. Кроме того, одномерный расчет позволяет получить более высокую точность в описании течения, что делает бо-

лее обоснованными выводы по результатам моделирования.

Система уравнений записана в лагранжевых массовых координатах и выражает законы сохранения массы, импульса и энергии:

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

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

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

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

$$p = \frac{i(\gamma - 1)}{V}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4)  $t$  – время,  $r$  – радиус,  $m$  – лагранжева массовая координата,  $V$  – удельный объем,  $p$  – давление,  $u$  – скорость,  $i$  – удельная внутренняя энергия,  $\gamma$  – показатель адиабаты, равный 1.4 для воздуха и 1.197 для продуктов горения водородно-воздушной смеси.

Для расчета процесса горения использовалась модель бесконечно тонкой зоны реакции, распространяющейся с нормальной скоростью горения, которая в сумме со скоростью потока перед фронтом пламени составляла бы определенную видимую скорость горения: в рассматриваемом случае – 240 или 100 м/с. На поверхности фронта пламени выполняются законы сохранения массы, импульса и энергии с учетом дополнительно энерговыделения на фронте. При этом учитывается появление волн сжатия/разрежения перед фронтом горения и после него.

Такая модель явного выделения фронта пламени подробно описана в работах [20–23]. В этом подходе в отличие от подхода, предложенного в работе [24], не рассматривается структура фронта пламени, а полагается, что фронт пламени – бесконечно тонкая поверхность.

В качестве начальных условий рассматривается облако сферической формы объем исходной водородно-воздушной смеси с радиусом  $R_0$ , находящееся в воздухе. Температура воздуха и исходной смеси полагалась равной  $T_0 = 298.15$  К, давление в воздухе и в исходной смеси  $P_0 = 101325$  Па.

В начальный момент времени в центре сферы инициировался процесс горения. Это делалось путем задания сферической области радиусом 1 см с поверхностью, представляющей собой фронт горения. Внутри этой области задавались парамет-

Таблица 1. Результаты решения термодинамической НР-задачи для стехиометрической смеси водород–воздух

Параметр	Значение параметра	
	исходная смесь водород–воздух	продукты горения
Давление, кПа	101.325	101.325
Температура, К	298.15	2279.98
Молярный вес, кг/кмоль	21.4341	24.6709
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	0.876117	0.13187
Показатель адиабаты	1.4	1.19655
Скорость звука, м/с	402.414	957.707

ры продуктов горения водородно-воздушной смеси.

Параметры исходной и сгоревшей смеси определялись из решения термодинамической НР-задачи (постоянство энтальпии и давления). Для этого использовался подход, предложенный в работе [25]. Параметры исходной смеси и продуктов горения согласно термодинамическим расчетам приведены в табл. 1.

На основе данных термодинамических расчетов была определена и теплота сгорания смеси водород–воздух стехиометрического состава. Она составляет в расчетах 4.27 МДж/кг.

Предполагалось, что при расчетах с переменной скоростью горения облака внутренняя область (сфера радиусом  $R_0/\alpha^{1/3}$ ) сгорала с видимой скоростью в 240 м/с, а внешняя – со скоростью 100 м/с. Горение прекращалось при выходе фронта на границу водородно-воздушного облака.

Система уравнений (1)–(4) с соответствующими начальными условиями решалась численно с

использованием разностных методов [20–23, 26, 27]. Расчеты проводились на разностных сетках с начальным размером разностной ячейки в 0.01 м, что позволяло рассчитывать параметры течения с достаточной точностью.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сначала с помощью описанной математической модели было проведено моделирование сгорания облаков радиусом  $R_0 = 10$  м. На рис. 1 показаны характерные распределения давления при сгорании сферического облака с видимой скоростью 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 [28]. Выбранные моменты времени иллюстрируют также тот факт, что при горении без возможности оттока продуктов исходная смесь расширяется и радиус возможной зоны горения увеличивается: на обоих рисунках фронт расположен на расстояниях, больших 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.

Следует отметить, что форма профиля давления при невысокой скорости горения (рис. 1а) качественно хорошо совпадает с аналитическим решением задачи о движении сферического поршня в акустическом приближении [7]. Скачок давления перед волной сжатия, равно как и максимальное

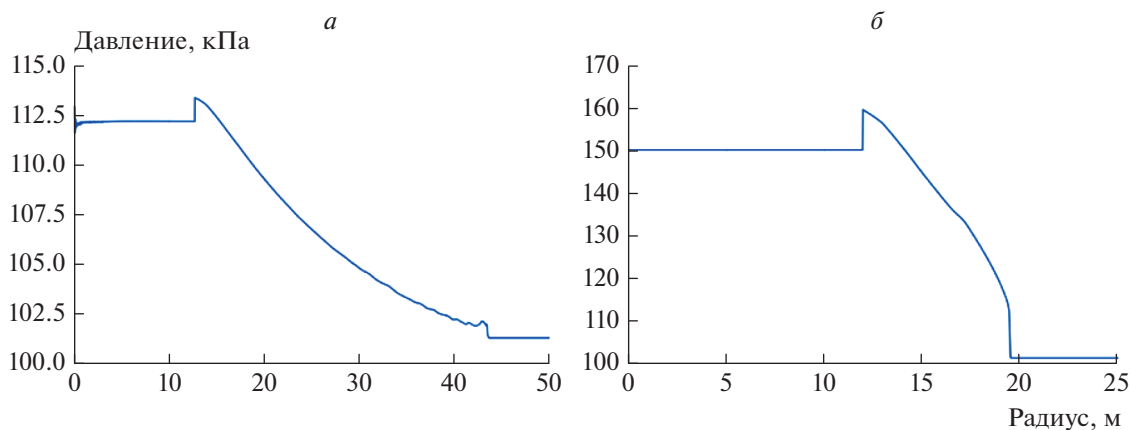


Рис. 1. Распределение давления в сферических облаках при видимой скорости горения 100 (а), и 240 м/с (б) при  $t = 120$  и 50 мс соответственно.

давление в собственно волне сжатия (оно достигается перед фронтом пламени), тем больше, чем выше скорость горения.

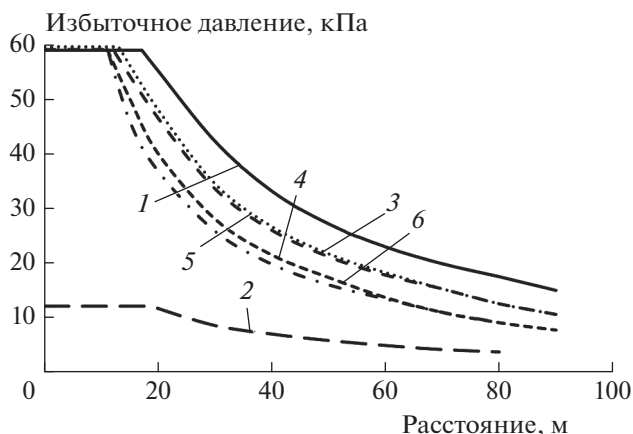
Как уже отмечалось выше, достигаемые в окружающей среде давления тем выше, чем выше скорость горения. На рис. 2 представлены зависимости максимального давления, достигаемого в пространстве при сгорании облаков с различными скоростью и объемом от расстояния. Как видно из этого рисунка, горение с меньшей скоростью в 100 м/с (линия 2) создает гораздо меньшие избыточные давления — до  $\approx 12$  кПа против 60 кПа при горении с большей скоростью в 240 м/с.

Горение с переменной скоростью дает максимальные избыточные давления на том же уровне — около 60 кПа (линии 3 и 4 на рис. 2), однако области достижения этого давления в центральном объеме облака уменьшаются с уменьшением доли облака, сгорающей с высокой скоростью: линия 3 соответствует сгоранию со скоростью 240 м/с половины облака, а линия 4 — четверти облака; внешний объем облака в обоих случаях догорает со скоростью 100 м/с.

Интересно сравнить зависимости 3 и 4 на рис. 2 с зависимостями давления от расстояния для случаев, когда имеет место сгорание облаков, по объему равных области высокоскоростного горения (со скоростью 240 м/с в рассматриваемой работе). Эти зависимости также представлены на рис. 2: линия 5 для облака радиусом  $R_0 = 7.94$  м (половина объема от облака радиусом 10 м) и линия 6 для облака радиусом  $R_0 = 6.30$  м (четверть объема от облака радиусом 10 м). Как видно из рис. 2, эти линии лежат чуть выше по сравнению с зависимостями для облаков, где имеет место еще и догорание во внешнем слое с низкой скоростью. В целом же зависимости 3 и 5, равно как 4 и 6, лежат достаточно близко друг к другу.

Таким образом, можно видеть, что в рассмотренных примерах генерация волн давления обусловлена в значительно большей степени высокоскоростным сгоранием, а сгорание оставшейся части с невысокой скоростью (в рассмотренном примере со скоростью 100 м/с) практически никак не влияет на величину максимального достигаемого давления. Такой результат дает основания для следующего вывода: при оценке максимального давления в волне сжатия, образующейся в результате сгорания облаков, частично расположенных в области загроможденного пространства, а частично — на открытом (незагроможденном) пространстве, в расчет можно принимать только массу ТВС в области загромождения.

Использование же подхода, когда рассматривается сгорание всего объема с высокой скоростью (а именно таким образом сегодня и оцениваются па-



**Рис. 2.** Зависимости максимально достигаемых избыточных давлений от расстояния при различных вариантах сгорания водородно-воздушных облаков: 1 — сгорание облака радиусом  $R_0 = 10$  м с видимой скоростью горения 240 м/с; 2 — сгорание облака радиусом  $R_0 = 10$  м с видимой скоростью горения 100 м/с; 3 — сгорание облака радиусом  $R_0 = 10$  м с видимой скоростью горения 240 м/с во внутренней половине объема и со скоростью 100 м/с во внешней; 4 — сгорание облака радиусом  $R_0 = 10$  м с видимой скоростью горения 240 м/с во внутренней четверти объема и со скоростью 100 м/с в оставшемся внешнем объеме; 5 — сгорание облака радиусом  $R_0 = 7.94$  м (половина объема от облака радиусом 10 м) с видимой скоростью горения 240 м/с; 6 — сгорание облака радиусом  $R_0 = 6.30$  м (четверть объема от облака радиусом 10 м) с видимой скоростью горения 240 м/с.

раметры волн [14]), ведет к существенному завышению значений избыточного давления. Это видно из рис. 2, где линия 1 идет заметно выше линий 3 и 4.

Следует отметить, что полученный результат, в части генерации волн давления, подтверждается и следующими соображениями. Если рассматривать в акустическом приближении задачу о расширении сферы, что можно считать неким приближением задачи о сферическом горении, то она имеет аналитическое решение [7]. Это аналитическое решение ищется в виде бегущей волны для потенциала. Соответственно, если рассмотреть абстрактную задачу об одновременном расширении двух сфер с различными скоростями, то ее можно считать неким приближением задачи о сгорании сферического облака по частям с двумя различными скоростями. Решением в акустическом приближении задачи о расширении двух сфер будет суперпозиция двух потенциалов. Соответственно, если вклад от одного потенциала заметно больше, чем от второго, то общие поля скорости и давления, рассчитываемые через производные потенциала, будут определяться в основном од-

ним, наиболее значимым процессом. Это, в более общем случае неакустического приближения, и было показано выше расчетным путем.

Таким образом, полученные результаты, будучи редуцированными до акустического приближения, имеют определенное теоретическое обоснование. Из сказанного следует, что рассмотренный подход, скорее всего, применим только в случае, когда сгорающая с меньшей скоростью часть облака генерирует относительно слабые волны, по сравнению с быстрогорящей частью облака. С практической точки зрения это означает, что не учитывать сгорание и генерацию волн давления можно только на открытых пространствах без загромождения, где скорость горения сравнительно невелика [29].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью численного моделирования, выполненного с использованием метода с явным выделением фронтов горения, проведено исследование параметров воздушных либо ударных волн, либо волн сжатия, генерируемых при сгорании водородно-воздушных облаков. В частности, было показано, что для облаков, различные части которых лежат в пространственных областях с различной степенью загромождения и, соответственно, с различной скоростью горения этих частей, давление ударной волны, либо волны сжатия определяется в основном энергией, выделяющейся при высокоскоростном горении. Этот факт позволяет обосновать подход, в котором для оценки действия волн давления при взрывных превращениях водородно-воздушных (а в общем случае и иных) смесей, формирующих облака, частично лежащие на открытых пространствах, а частично — в загроможденных, рассматривается сгорание только той части облака, которая расположена в загроможденном пространстве. Такой подход способствует более точной оценке параметров волн давления и снижению консерватизма в определении размеров зон возможного поражения.

Полученный результат интерпретирован в рамках акустического приближения, где общие решения, получаемые из суперпозиции нескольких решений, в конечном итоге определяются вкладом более значимых составляющих. Также полученные результаты позволяют рассматривать различные варианты реализации конкретных технологических объектов с точки зрения их взрывобезопасности, в частности за счет снижения плотности размещения оборудования, что напрямую определяет как степень загромождения, так и объем загроможденного пространства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *van den Berg A.C.* // J. Hazard. Mater. 1985. V. 12. № 1. P. 1.
2. *Brasie W.C., Simpson D.W.* // Loss Prevention. 1968. V. 2. P. 91.
3. *Садовский М.А.* Физика взрыва. Сб. № 1 научно-исследовательских работ в области физики взрыва. М.: Изд-во АН СССР, 1952.
4. *Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А.* // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 2. С. 90.
5. *Pasman H.J., Wagner H.G.* // Proc. 5th Intern. Sympos. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. V. 3. Paris: Societe de Chimie Industrielle, 1986. P. 176.
6. *Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А.* // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 1. С. 90.
7. *Taylor G.I.* // Proc. R. Soc. London, Ser. A. 1946. V. 186. P. 273.
8. *Strehlow R.A., Luckritz R.T., Adamczyk A.A., Shimpi S.A.* // Combust. and Flame. 1979. V. 35. P. 297.
9. *Kuhl A.L., Kamel M.M., Oppenheim A.K.* // Combustion. 1973. V. 14. P. 1201.
10. *Williams F.A.* // J. Fluid Mech. 1976. V. 127. P. 429.
11. *Wiekema B.J.* // J. Hazard. Mater. 1980. V. 3. № 3. P. 221.
12. Methods for the calculations of physical effects ("Yellow Book"). CPR 14E / Eds. van den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P.M. The Hague: Committee for the Prevention of Disasters, 2005.
13. *Аганов А.А., Сафонов В.С., Сумской С.И., Швыряев А.А.* // Безопасность труда в пром-сти. 2020. № 5. С. 36.
14. Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей". Серия 27. Выпуск 15. М.: Закрытое акционерное общество "Научно-технический центр проблем промышленной безопасности", 2019.
15. *Harris R.J., Wickens M.J.* Understanding vapour cloud explosions — an experimental study. Comm. 1408. London: Institution of Gas Engineers, 1989.
16. *Harrison A.J., Eyre J.A.* // Combust. Sci. Technol. 1987. V. 52. P. 121.
17. *van Wingerden C.J.M.* // Proc. 6th Intern. Sympos. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. Oslo, Norway: European Federation of Chemical Engineering, Norwegian Society of Chartered Engineers, 1989. P. 26-1.
18. *Zeeuwen J.P., van Wingerden C.J.M., Dauwe R.W.* // Proc. 4th Intern. Sympos. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. Chem. Eng. Symp. Series № 80. Great Britain: Institution of Chemical Engineers, 1983. P. D-20.

19. *Pfortner H., Schneider H.* ICT Projektforschung 1983. Forschungsprogramm "Prozeßgasfreisetzung – Explosion in der Gasfabrik und Auswirkungen von Druckwellen auf das Containment". Ballonversuche zur Untersuchung der Deflagration von Wasserstoff/ Luft-Gemischen (Abschlußbericht). Fraunhofer-institut für treib- und explosivstoffe, 1983.
20. *Губин С.А., Шаргатов В.А.* // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 5. С. 111.
21. *Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Одинцов В.В., Шаргатов В.А.* // Хим. физика. 1986. Т. 3. № 5. С. 435.
22. *Губин С.А., Шаргатов В.А.* // Хим. физика. 1989. Т. 8. № 2. С. 286.
23. *Sumskoi S.I., Sofyin A.S., Agapov A.A., Zainetdinov S.Kh.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. 012085.
24. *Яковенко И.С., Медведков И.С., Киверин А.Д.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 85.
25. *Викторов С.Б., Губин С.А., Маклашова И.В., Пенекин В.И.* // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 12. С. 22.
26. *Mader Ch.L.* Numerical modeling of detonation. Los Angeles: University of California Press, 1979.
27. *Бартльме Ф.* Газодинамика горения. М.: Энергоиздат, 1981.
28. *Сумской С.И., Софьин А.С., Зайнетдинов С.Х., Агапов А.А.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 28.
29. *Михалкин В.Н., Сумской С.И., Тереза А.М. и др.* // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 1.