

Особенности расчета параметров газодинамических потоков при аварийных взрывах

Александр Андреевич Комаров ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Настоящая статья посвящена вопросам, связанным с расчетами газодинамических потоков, возникающих при аварийных взрывах. Актуальность данной публикации связана со следующими обстоятельствами. Динамические параметры взрывных нагрузок обладают достаточно широким диапазоном, который варьируется по длительности и интенсивности от нескольких миллисекунд и сотен атмосфер до нескольких секунд и нескольких процентов от атмосферы, что определяется типом взрывного явления. В связи с этим общая картина разрушений или послеаварийная обстановка значительно различаются в зависимости от параметров взрывной нагрузки, которая зависит от типа аварийного взрыва. По общей картине разрушений можно определить тип аварийного взрыва, для которого расчетным путем могут быть определены параметры газодинамических потоков, сопровождавших аварийный взрыв. Это позволяет восстановить сценарий развития аварийного взрыва, а иногда и сценарий развития всей аварии.

В настоящей статье на примере анализа последствий аварии и выполненных расчетов газодинамических потоков, формирующихся при аварийном взрыве, восстанавливается сценарий развития аварийной ситуации, что позволяет говорить о причинах обрушения строительных конструкций, произошедших в результате аварии, и о степени вины свидетелей аварии.

Материалы и методы. Дается краткое описание расчетных методов, позволяющих проводить вычисления полей взрывного давления, формирующегося при аварийном взрыве, а также разработанных автором методов расчета газодинамических потоков, сопровождающих аварийный взрыв.

Результаты исследования. Рассматриваются и анализируются результаты физического моделирования локальных дефлаграционных взрывов в помещениях, выполненных в лаборатории строительного университета. Проводится анализ сравнения результатов расчета с экспериментальными данными. Приведены результаты расчета параметров взрывного давления и газодинамических потоков, сопровождавших реальную аварийную ситуацию. Результаты расчета позволили с достаточной точностью восстановить сценарий развития аварии, сопровождавшейся взрывом.

Выводы. Показано, что разработанные математические модели достаточно точно описывают поле взрывного давления и газодинамические потоки, создаваемые аварийными взрывами. Расчет газодинамических потоков, сопровождающих аварийный взрыв, позволяет восстановить сценарий его развития. Описаны основные особенности и трудности, возникающие при математическом моделировании и экспериментальных исследованиях взрывных нагрузок, которые формируются при аварийных взрывах.

Показано, что для правильного прогнозирования нагрузок, которые реализуются при аварийных взрывах, необходимо четко и корректно моделировать физические процессы и рассматривать сценарии развития аварийной ситуации, которые наиболее адекватно соответствуют рассматриваемому объекту и окружающей застройке.

Приведены результаты расчета параметров взрывного давления и газодинамических потоков, сопровождающих реальную аварийную ситуацию, а также пример восстановления сценария развития взрывной аварии.

Ключевые слова: дефлаграционный взрыв; газовоздушная смесь; взрывное горение; фронт пламени; взрывное давление; устойчивость зданий при взрывах; сценарий развития аварии

Для цитирования: Комаров А.А. Особенности расчета параметров газодинамических потоков при аварийных взрывах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 1. С. 15–23. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.15-23.

✉ Комаров Александр Андреевич, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Analysis of parameters of gas dynamic flows in case of emergency explosions

Alexander A. Komarov ✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This paper is devoted to the issues related to calculations of gas-dynamic flows arising during emergency explosions. The relevance of this publication is due to the following circumstances. The dynamic parameters of explosive loads have a rather wide range, which varies in duration and intensity from several milliseconds and hundreds of atmospheres to several seconds and several percent of the atmosphere, which is determined by the type of explosive phenomenon. In this regard, the overall picture of destruction or post-accident situation varies significantly depending on the parameters of the explosive load, which depends on the type of emergency explosion. Based on the general picture of destruction, it is possible to determine the type of emergency explosion, for which the parameters of the gas-dynamic flows that accompanied the emergency explosion can be determined by calculation. This makes it possible to reconstruct the scenario of the emergency explosion, and sometimes the scenario of the entire accident.

In the present paper using the example of an analysis of the accident consequences and the performed calculations of the gas-dynamic flows formed during the emergency explosion, the scenario of the emergency situation development is reconstructed, which allows to speak about the causes of the collapse of building structures that occurred as a result of the accident, and about the degree of guilt of the witnesses of the accident.

Materials and methods. A brief description of the calculation methods that makes it possible to calculate the explosive pressure fields formed during the emergency explosion is given. A brief description of the methods developed by the author for calculating gas-dynamic flows accompanying the emergency explosion is given.

Research results. The results of physical modelling of local deflagration explosions in premises, performed in the laboratory of the university of civil engineering, are reviewed and analyzed. An analysis comparing the calculation results with experimental data is carried out. The results of calculation of explosive pressure parameters and gas-dynamic flows accompanying a real emergency situation are presented. The calculation results made it possible to reconstruct with sufficient accuracy the scenario of the accident development accompanied by the explosion.

Conclusions. It is shown that the developed mathematical models quite accurately describe the field of explosive pressure and gas-dynamic flows created by emergency explosions. Calculation of gas-dynamic flows accompanying the emergency explosion makes it possible to reconstruct the scenario of its development. The main features and difficulties arising during mathematical modelling and experimental studies of explosive loads formed during emergency explosions are described.

It is shown that for the correct prediction of loads that are realized during emergency explosions, it is necessary to model physical processes clearly and correctly and to consider scenarios of development of an emergency situation that most adequately correspond to the considered object and the surrounding buildings.

The results of calculation of explosive pressure parameters and gas-dynamic flows accompanying a real emergency situation are presented. An example of reconstructing the development scenario of the explosive accident is given.

Keywords: deflagration explosion; gas-air mixture; explosive combustion; flame front; explosive pressure; stability of buildings during explosions; accident development scenario

For citation: Komarov A.A. Analysis of parameters of gas dynamic flows in case of emergency explosions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(1):15-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.01.15-23 (rus).

✉ Alexander Andreevich Komarov, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Введение

Формирующиеся при аварийных взрывах газодинамические потоки являются основными поражающими и разрушающими факторами, которые характеризуются следующими параметрами: избыточным давлением, скоростным напором, импульсом давления, спектром взрывного давления и т.д. Динамические параметры взрывных нагрузок обладают достаточно широким диапазоном, который варьируется по длительности и интенсивности от нескольких миллисекунд и сотен атмосфер, например, при взрывах конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) до нескольких секунд и нескольких процентов от атмосферы, например, при дефлаграционных аварийных взрывах [1–3]. В связи с этим общая картина разрушений или послеаварийная обстановка значительно различаются в зависимости от параметров взрывной нагрузки, которая, в свою очередь, зависит от типа аварийного взрыва.

Поэтому по общей картине разрушений можно определить тип аварийного взрыва, для которого расчетным путем могут быть определены параметры газодинамических потоков, сопровождавших аварийный взрыв [4–6]. Это позволяет определить или восстановить сценарий развития аварийного взрыва. Кроме этого, восстановление сценария развития аварийного взрыва часто позволяет восстановить и предысторию развития всей аварии.

В настоящей статье на примере анализа последствий аварии и выполненных расчетов газодинамических потоков, формирующихся при аварийном взрыве, восстанавливается сценарий развития аварийной ситуации, что позволяет говорить о причинах обрушения строительных конструкций, происшедших в результате аварии, и о степени вины свидетелей аварии.

Как указывалось ранее, взрывные явления характеризуются достаточно широким диапазоном дина-

мических параметров, что связано с различной природой их формирования. Напомним, что аварийные взрывы делятся на физические и химические взрывы [7–9]. При физических взрывах взрывные нагрузки создаются в результате высвобождения энергии сжатых газов или паров, находящихся под давлением в емкости. При химических взрывах происходит химическая реакция (например, окисление), в результате которой выделяется энергия, генерирующая взрывные волны. Химическая реакция может протекать в виде дефлаграции, при которой горение подготовленной к горению смеси происходит за счет теплопроводности, и в детонационном режиме, при котором химическая реакция в смеси происходит в результате ее нагрева при сжатии смеси ударной волной, формирующейся при детонации. При химических взрывах смесь должна находиться в определенных концентрационных пределах (между нижним концентрационным пределом и верхним концентрационным пределом воспламеняемости). При дефлаграционном режиме взрывного горения смеси видимая скорость пламени, как правило, дозвуковая, т.е. меньше, чем скорость звука в среде, а при детонации видимая скорость пламени сверхзвуковая [10]. Дефлаграционный режим взрывного горения может ускоряться и при определенных условиях перейти в детонацию [11–13].

Реализация определенного типа взрыва определяется сценарием развития аварии. При аварии может произойти несколько взрывов различной природы, имеющих разные параметры поражающих факторов, а преобладание того или иного поражающего фактора полностью зависит от начальных и граничных условий, а также от сценария развития аварии. Именно в этом и заключается сложность прогнозирования взрывных нагрузок, формирующихся в результате взрывной аварии. С другой стороны, тип аварийного взрыва полностью определяет сценарий развития аварии и общую картину происшедших разрушений. Поэтому послеаварийная обстановка и имеющиеся данные об аварийном взрыве часто позволяют восстановить сценарий развития взрывной аварии.

Следует выделить аварийные взрывы, происходящие на открытом пространстве (в атмосфере). Такие взрывы часто называют внешними взрывами. И аварийные взрывы, происходящие в помещениях — внутренние взрывы.

Проведение расчетов газодинамических потоков, сопровождающих аварийные взрывы, позволяет не только обосновывать проектные решения, обеспечивающие устойчивость объектов при аварийных взрывах, но и восстанавливать сценарии развития происшедших аварийных ситуаций, что невозможно

делать опираясь на нормативные документы и методики.

Материалы и методы

При дефлаграционных взрывах газопаровоздушных смесей в помещениях и при условии значительной загазованности помещения реализуется так называемый принцип квазистатичности избыточного давления [1]. Данный термин заимствован из термодинамики и может быть сформулирован следующим образом: темп притока или расход чего-либо (тепла, вещества и т.д.) в систему не должен приводить к существенному изменению распределения втекающего продукта по пространству системы. Применительно к газовой динамике это означает, что удельный объемный расход вещества (при взрывах это расход продуктов горения) должен быть значительно меньше, чем расход, создаваемый избыточным давлением, вызванным притоком данного вещества. Другими словами, видимая скорость пламени, характеризующая темп притока продуктов горения, должна быть значительно меньше скорости звука, с которой распространяется избыточное давление. В этом случае избыточное давление зависит от времени, но практически не зависит от пространственной координаты. Полная аналогия с опорожнением бака с водой, когда уровень воды в баке зависит только от времени и практически одинаков по всему зеркалу воды, что связано с относительно малым расходом воды через сливное отверстие. При данном типе взрывной нагрузки в ограждающих помещении конструкциях (стенах, полу, потолке) достаточно четко видны остаточные деформации, которые однозначно указывают на тип аварийного взрыва.

С учетом данной особенности формирования взрывной нагрузки в помещении строится вычислительная схема, которая представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих зависимости от времени параметров среды и процесса горения (избыточного давления, фронта пламени, видимой скорости пламени...) и параметров, характеризующих процесс разгерметизации объема помещения в результате внутреннего взрыва.

Результаты расчетов по указанной схеме достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, что указывает на возможность использования данной вычислительной схемы для прогнозирования последствий взрывной аварии или для восстановления сценария уже происшедшей взрывной аварии [1]. Сложности возникают при разработке сценариев развития аварии, которые потом используются при прогнозировании ее последствий. А при восстановлении сценария уже происшедшей взрывной аварии возникают проблемы с заданием исход-

ных и начальных данных, хотя в этом случае значительную помощь оказывает имеющаяся информация о последствиях аварии и информация о событиях, предшествующих аварии.

При математическом моделировании (прогнозировании) последствий аварийных дефлаграционных взрывов в атмосфере или при физическом моделировании (экспериментальных работах) исследователи сталкиваются с рядом трудностей как технического, так и теоретического плана. К проблемам технического характера следует отнести сложность создания облака взрывоопасной смеси с определенными, заранее заданными параметрами, к которым относятся размер и форма облака, а также распределение концентрации горючего вещества по смеси [2]. Из проблем теоретического характера следует выделить вопросы о параметрах взрывоопасного облака и о доли его участия в аварийном взрыве. Если перечисленные вопросы решены, то прогнозирование динамических параметров взрывного давления наиболее целесообразно проводить по соотношениям, описывающим поведение акустического монополя [1, 14]. Опыт показывает, что результаты расчета, выполненные по данной вычислительной схеме, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными [1, 3].

Описанные выше особенности, связанные с прогнозированием взрывного давления, наиболее ярко прослеживаются при аварийных взрывах локальных взрывоопасных облаков в больших объемах (помещениях).

Рассмотрение вопроса взрыва локального облака в больших помещениях актуально по следующим причинам. При возникновении пожара в большом помещении (например, в помещении склада) и при его задымлении взрыв формирующихся в результате нагрева локальных облаков паров горючих веществ часто не воспринимается свидетелями аварии за взрыв, а воспринимается ими в качестве ветровой нагрузки (порыва ветра). Связано это с особенностями человеческого уха, выполняющего роль датчика давления, которое не воспринимает инфразвуковые колебания, создаваемые аварийным взрывом. Локальная вспышка, создающая инфразвуковые колебания и газодинамические потоки, при этом часто не видна из-за сильного задымления. Вызванные указанным типом взрыва разрушения часто «списывают» на разрушения, вызванные пожаром, или на воздействие динамических нагрузок, сопровождающих обрушение строительных конструкций при аварии.

Результаты исследования

Прежде всего рассмотрим результаты экспериментальных исследований взрывов локальных облаков в большом помещении. Исследование дефла-

рационного взрывного горения локальных облаков проводилось на установке Института комплексной безопасности в строительстве (ИКБС), являющегося структурным подразделением Московского государственного строительного университета (МГСУ).

Основная суть методики создания локального взрывоопасного облака заключается в следующем. В кубе, который не имеет дна, но оборудован съемной крышкой, легко сдвигаемой в боковую сторону, мерным шприцем создается взрывоопасная смесь, имеющая заданную концентрацию. Куб, у которого предварительно сдвигается вбок верхняя крышка, быстро поднимается вверх. Это позволяет создать локальное взрывоопасное облако с заданными параметрами, так как обеспечивает минимальное движение подготовленной газовой смеси, находящейся внутри куба. После того как сформировано локальное взрывоопасное облако, осуществляется его воспламенение электрической искрой, находящейся в произвольном месте облака.

В ходе эксперимента проводилась регистрация взрывного давления и скоростная видеосъемка процесса взрыва. Видеозапись взрыва проводилась на скорости от 200 до 500 кадров в секунду. Это позволило получить достаточно подробные данные о кинематике фронта пламени, выполняющего роль проницаемого поршня,двигающего окружающий смесь воздух и создающего взрывное давление.

По имеющимся фотографиям, полученным в ходе высокоскоростной киносъемки (240 кадров в секунду), была получена кинематика видимой скорости пламени, на основании которой был выполнен расчет взрывного давления. Расчет был выполнен в соответствии с методикой, изложенной в [1, 6, 15], в основу которой положена математическая модель расширяющегося монополя (см., например, [14]).

Результаты расчета достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными [3, 7]. Следует подчеркнуть, что при расчетах нестационарных газодинамических процессов качество согласия или, проще говоря, совпадения между расчетом и экспериментом значительно отличается от качества результатов сравнения расчетов и экспериментов, принятых в стационарных приложениях механики сплошной среды [16–18].

Основной особенностью локальных взрывов в помещениях является возможность появления эффекта «эхо». Критерием возникновения звуковых колебаний при локальных взрывах в помещениях является соотношение между максимальным размером помещения L и общим временем реализации взрыва T . Локальный взрыв длительностью T создает взрывную волну с длиной, равной TC , где C — скорость звука. При условии, если $L > TC/2$, т.е. если взрывная волна «умещается» в помещении, то возни-

кает эффект «эхо». В противном случае происходит экспоненциальное затухание акустической волны. Эффект затухания акустической волны с длиной, которая превышает размер помещения, в акустике имеет специальное название — «отсечка» [1, 14].

Результаты экспериментальных исследований и сравнение их с расчетными данными позволяют восстанавливать сценарии развития взрывных аварий. В том числе и применительно к аварийным взрывам локальных взрывоопасных облаков в больших помещениях (складах, холодильных камерах, гаражах и т.д.), в которых взрывные явления, связанные с горением взрывоопасных локальных облаков, являются достаточно распространенным явлением [19–21]. Для решения указанных задач наиболее целесообразно привлекать разностные методы расчета, основанные на численном интегрировании законов сохранения в сплошной среде [1, 5, 15]. Наиболее целесообразно использовать метод Годунова, который применим к расчетам задач, содержащих разрывы в начальных и граничных условиях [1, 15]. Общая схема расчетов достаточно подробно изложена в источниках [1, 15].

Ниже приведены некоторые результаты расчетов, позволяющих восстановить сценарий развития взрывной аварии.

На рис. 1 приведены схема и фотография обрушения перекрытий складского здания, в результате которого погибло 8 человек.

Проведенные расчеты газодинамических потоков, сопровождавших аварийный «хлопок», который

вызвал обрушение ферм перекрытия, позволили восстановить сценарий развития аварии. Следует отметить, что при подобных задачах проводится серия расчетов, из которых выбираются расчеты, результаты которых наиболее полно соответствуют имевшим место разрушениям и показаниям свидетелей аварии. Результатом чего и является искомый сценарий развития взрывной аварии.

На рис. 2 приведена исходная расчетная область, а на рис. 3 показаны изолинии максимального взрывного давления, создаваемого «хлопком», приведшем к обрушению кровли склада. При проведении расчетов использовались материалы, изложенные в [1, 5, 7, 15].

В качестве расчетной области был принят фрагмент помещения разгрузочной склада между 15 и 18 фермами. Расчетная область, представляющая собой схематизацию фрагмента продольного сечения склада, приведена на рис. 2.

При расчетах принято, что в процессе аварии произошло накопление взрывоопасной смеси вблизи кровли здания. Зона скопления взрывоопасной смеси указана на рис. 2.

Исходным веществом для ее формирования могут служить как продукты разложения, возникающие в результате пожара, так и разного рода горючие вещества, которые могли находиться в прилегающих к месту возгорания складских помещениях. При расчетах параметров дефлаграционного взрыва было принято, что в газопаровоздушной смеси, прилегающей к кровле, находится 14 кг газа (пара)

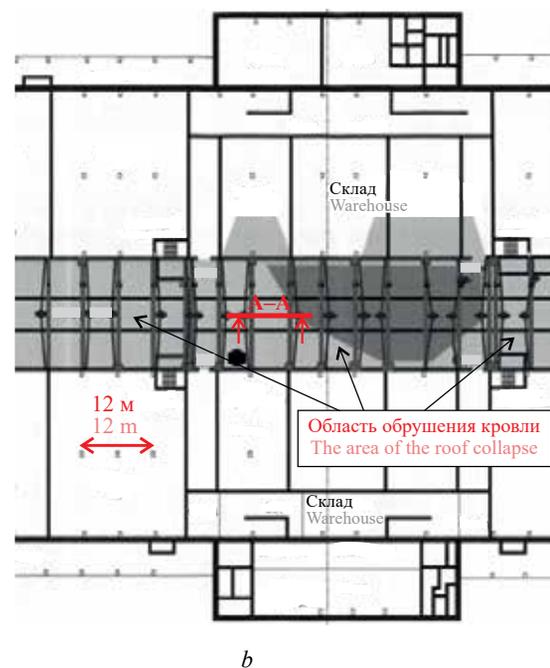
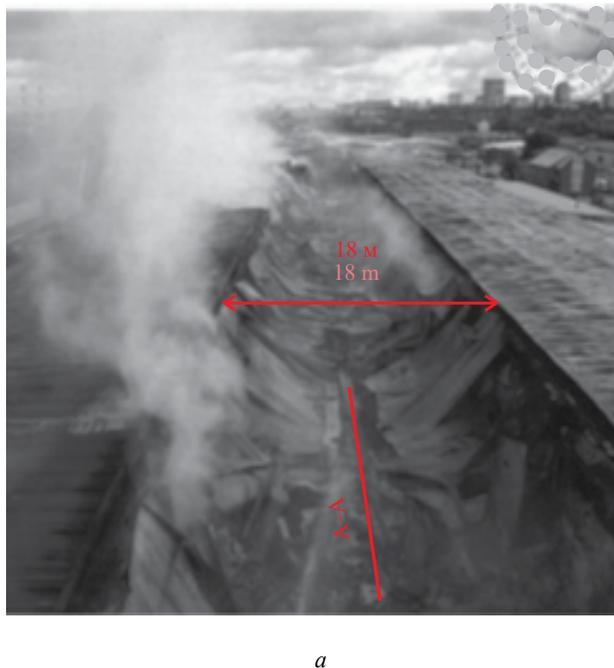


Рис. 1. Обрушение кровли склада при аварийном «хлопке», происшедшем при ликвидации пожара: *a* — фотография зоны обрушения кровли; *b* — план здания с указанием области обрушения кровли
Fig. 1. The collapse of the roof of the warehouse during an emergency “popping” that occurred during the liquidation of the fire: *a* — photo of the roof collapse zone; *b* — building plan indicating the area of roof collapse

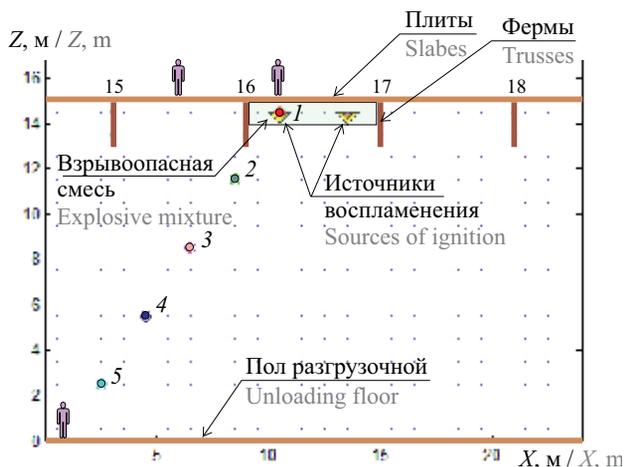


Рис. 2. Расчетная область с указанием начальных условий
Fig. 2. Calculated area with indication of initial conditions

взрывоопасного вещества. Данное количество паров соответствует 15–25 литрам легко воспламеняющейся жидкости (ЛВЖ). Например, для ацетона это соответствует 17,7 литрам, а для сжиженного пропана — 27,5 литрам. Указанные объемы ЛВЖ или газообразных взрывоопасных веществ с высокой вероятностью имеются на любом крупном складе.

Для лучшего понимания масштаба задачи на рис. 2 (в масштабе) приведены фигуры людей. При проведении расчетов принято, что смесь воспламеняется в двух местах, которые указаны на рис. 2. При аварийных ситуациях, связанных с пожарами, часто реализуется многоточечное воспламенение смеси. На рис. 2 указано 5 точек, для которых ниже будут приведены временные зависимости скорости потока и взрывного давления. Источником воспламенения могли быть раскаленные или горящие фрагменты предметов, поднимающиеся конвективными потоками, создаваемыми пожаром, или тлеющий рубероид кровли.

Изолинии равного максимального давления взрыва приведены на рис. 3. Численные значения изолиний приведены в кПа. Напомним, что давление в 10 кПа соответствует примерно давлению одной тонны веса на квадратный метр площади [1, 5, 7].

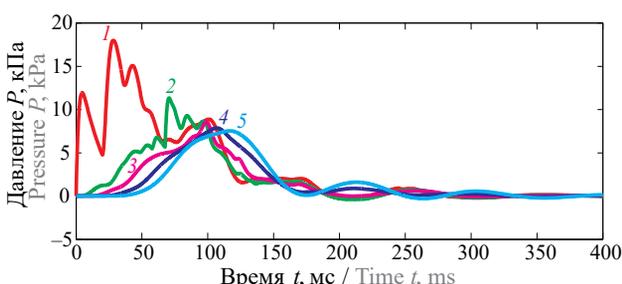


Рис. 4. Временные зависимости взрывного давления в пяти точках пространства
Fig. 4. Time dependences of explosive pressure at five points in space

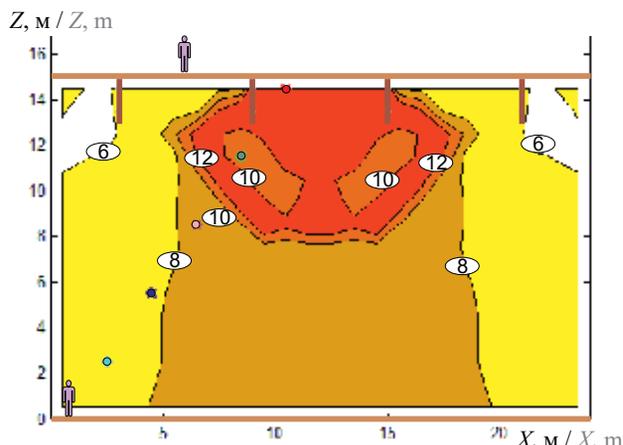


Рис. 3. Изолинии максимального взрывного давления
Fig. 3. Isolines of maximum explosive pressure

На рис. 4 приведены временные зависимости взрывного давления в пяти точках рассматриваемого пространства (положение точек указано на рис. 2).

На рис. 5 даны временные зависимости горизонтальной составляющей скорости потока, сопровождающего дефлаграционный взрыв, в пяти точках рассматриваемого пространства (положение точек указано на рис. 2).

Из приведенного рисунка следует, что на кровлю и ближайшие к месту взрыва фермы действует кратковременная взрывная нагрузка, превышающая 12 кПа (или более 1200 кг/м²). Данная нагрузка разрушила узлы крепления ферм, что привело к их падению и развороту верхних частей ферм.

Кроме этого, взрывная нагрузка сдвинула плиты покрытия. Все перечисленные смещения строительных конструкций привели к обрушению кровли и ферм на данном участке.

Аналогичным образом произошли обрушения других участков кровли и ферм.

Здесь следует отметить, что плавное и достаточно длительное во времени действие взрывного давления в точке 5, находящейся вблизи пола или на некотором удалении от места взрыва (см. рис. 4), не фиксируется человеческим ухом, воспринимающим

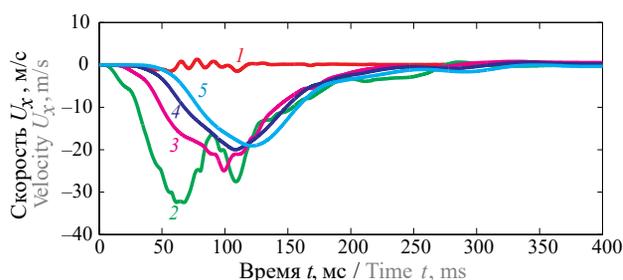


Рис. 5. Временные зависимости горизонтальной составляющей скорости потока в пяти точках пространства
Fig. 5. Time dependences of the horizontal component of the flow velocity at five points in space

динамическое давление только в диапазоне частот выше 10–15 Гц. При длительности взрывного воздействия 100–150 мс основная вибрационная энергия приходится на инфразвуковые частоты, которые человек не слышит, а воспринимает в виде сотрясения почвы или низкочастотного шипа. На данное явление, характерное для аварийных ситуаций в больших помещениях, указывалось ранее.

Приведенные расчеты позволили восстановить сценарий развития взрывной аварии.

Выводы

Описаны основные особенности и трудности, возникающие при математическом моделировании

(прогнозировании) и физическом моделировании (экспериментальных исследованиях) взрывных нагрузок, формирующихся при аварийных взрывах.

Показано, что для правильного прогнозирования нагрузок, которые реализуются при аварийных взрывах, необходимо четко и корректно моделировать физические процессы и рассматривать сценарии развития аварийной ситуации, которые наиболее адекватно соответствуют рассматриваемому объекту и окружающей застройке.

Приведены результаты расчета параметров взрывного давления, сопровождавшего реальную аварийную ситуацию. Приведен пример восстановления сценария развития взрывной аварии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Комаров А.А.* Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
2. *Макеев В.И.* Пожарная безопасность зданий, сооружений и объектов // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 1992. № 3. С. 34–45.
3. *Komarov A., Korolchenko D., Gromov N., Korolchenko A., Jafari M., Gravit M.* Specific Aspects of Modeling Gas Mixture Explosions in the Atmosphere // *Fire*. 2023. Vol. 6 (5). P. 201. DOI: 10.3390/fire6050201
4. *Комаров А.А.* Особенности ударных и взрывных воздействий на строительные объекты // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 9. С. 81–88. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-81-88
5. *Комаров А.А., Бажина Е.В.* Воздействие газодинамических потоков, сопровождающих аварийные взрывы, на здания и сооружения // *Природообустройство*. 2022. № 1. С. 84–92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92
6. *Комаров А.А.* Расчет газодинамических характеристик потоков при аварийных дефлаграционных взрывах на наружных установках // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2002. Т. 11. № 5. С. 15–18.
7. *Комаров А.А.* Основы обеспечения взрывобезопасности объектов и прилегающих к ним территорий. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 90 с.
8. *Комаров А.А., Тимохин В.В.* Экспериментальное исследование и моделирование процесса формирования взрывоопасных концентраций // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. № 1. С. 84–88. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-84-88
9. *Комаров А.А., Бажина Е.В.* Методы расчета дрейфа тяжелых облаков с учетом движения среды // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 7. С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-7-7-14
10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI. М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1986. 736 с.
11. *Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А.* Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 1. С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21
12. *Kashevarova G., Pepelyaev A.* Numerical simulation of domestic gas deflagration explosion and verification of computational techniques // *Advanced materials research*. 2013. Vol. 742. Pp. 3–7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.742.3
13. *Koshiha Y., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H.* Flammability limits, explosion pressures, and applicability of le Chatelier's rule to binary alkane-nitrous oxide mixtures // *Journal of loss prevention in the process industries*. 2017. Vol. 45. Pp. 11–19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
14. *Авиационная акустика / под ред. А.Г. Мунина.* М. : Машиностроение, 1973. 448 с.
15. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М. : Наука, 1976. 400 с.
16. *Xu Ying, Yimiao Huang, Guowei Ma.* A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures. *Underground space*, July. Elsevier BV. 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
17. *Cen Kang, Song Bin, Shen Ruiqing, Zhang Yidong, Yu Wuge, Wang Qingsheng.* Dynamic Characteristics of Gas Explosion and Its Mitigation Measures inside Residential Buildings // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. No. 5. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2019/2068958.

18. Remennikov A.M., Rose T.A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries // *Computers & Structures*. 2005. Vol. 83. No. 27. Pp. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
19. Bao Q., Fang Q., Zhang Y., Chen L., Yang S., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures // *Fuel*. 2016. Vol. 175. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084
20. Fakandu B.M. Vented gas explosions. University of Leeds. 2014. 358 p.
21. Wei Sh., Deng H., Dong J., Xu Zh., Yan M., Chen G. The experimental study on deflagration dynamics of premixed flame in T-type tube // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022. Vol. 44. Issue 3. Pp. 7347–7364. DOI: 10.1080/15567036.2022.2109777

REFERENCES

1. Komarov A.A. *Forecasting loads and estimating consequences of their impact on buildings and structures* : Doctoral Thesis. Moscow, MSCU, 2001; 460. (rus).
2. Makeev V.I. Fire safety of buildings, installations and facilities. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 1992; 3:34-45. (rus).
3. Komarov A., Korolchenko D., Gromov N., Korolchenko A., Jafari M., Gravit M. Specific aspects of modeling gas mixture explosions in the atmosphere. *Fire*. 2023; 6(5):201. DOI: 10.3390/fire6050201
4. Komarov A.A. The specific characteristics of shock and blast impacts on construction sites. *Occupational Safety in Industry*. 2021; 9:81-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-81-88 (rus).
5. Komarov A.A., Bazhina E.V. Impact of gas-dynamic flows accompanying emergency explosions on buildings and structures. *Environmental Engineering*. 2022; (1):84-92. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-84-92 (rus).
6. Komarov A.A. Calculation of gas-dynamic characteristics of flows at deflagration explosions at outdoor installations. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2002; 11(5):15-18. (rus).
7. Komarov A.A. *Fundamentals of ensuring explosion safety of objects and adjacent territories*. Moscow, AGPS. 2015; 90. (rus).
8. Komarov A.A., Timokhin V.V. Experimental investigation and modeling of the formation of explosive concentrations. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 1:84-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-84-88 (rus).
9. Komarov A.A., Bazhina E.V. Methods for calculating the drift of heavy clouds considering medium motion. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 7:7-14. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-7-7-14 (rus).
10. Landau L.D., Lifshits E.M. *Hydrodynamics. Theoretical physics*. T. VI. Moscow, Science. Gl. ed. phys.-mat. Lit, 1986; 736. (rus).
11. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21 (rus).
12. Kashevarova G., Pepelyaev A. Numerical simulation of domestic gas deflagration explosion and verification of computational techniques. *Advanced materials research*. 2013; 742:3-7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.742.3
13. Koshiba Y., Hasegawa T., Kim B., Ohtani H. Flammability limits, explosion pressures, and applicability of le Chatelier's rule to binary alkane- nitrous oxide mixtures. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2017; 45:11-19. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.007
14. *Aviation Acoustics*. Edited by Munin A.G. Moscow, Mashinostroenie, 1973; 448. (rus).
15. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Prokopov G.P. *Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1976; 400. (rus).
16. Xu Ying, Yimiao Huang, Guowei Ma. A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures. *Underground Space*. July. Elsevier BV. 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
17. Cen K., Bin Song, Ruiqing Shen, Yidong Zhang, Wuge Yu, Qingsheng Wang. Dynamic characteristics of gas explosion and its mitigation measures inside residential buildings. *Mathematical Problems in Engineering*. Hindawi Limited. 2019; 5:1-15. DOI: 10.1155/2019/2068958
18. Remennikov A.M., Rose T.A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Computers & Structures*. 2005; 83(27):2197-2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
19. Bao Q., Fang Q., Zhang Y., Chen L., Yang S., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures. *Fuel*. 2016; 175:40-48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084
20. Fakandu B.M. Vented gas explosions. *University of Leeds*. 2014; 358.
21. Wei Sh., Deng H., Dong J., Xu Zh., Yan M., Chen G. The experimental study on deflagration dynamics of premixed flame in T-type tube. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2022; 44(3):7347-7364. DOI: 10.1080/15567036.2022.2109777

Поступила 25.10.2023, после доработки 22.11.2023;
принята к публикации 04.12.2023

Received October 25, 2023; Received in revised form November 22, 2023;
Accepted December 4, 2023

Информация об авторе

КОМАРОВ Александр Андреевич, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, руководитель НИЦ «Взрывобезопасность» ИКБС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Information about the author

Alexander A. KOMAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of the Explosion Safety Research Center of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru