

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СОЦИАЛЬНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ»

УДК 551.511+533

УТВЕРЖДАЮ

Ректор,
д. ф.-м. н., профессор
_____ Усманов С.М.
« ____ » _____ 2007 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВАРИЙНОГО
ВЫБРОСА ПРОПАНА, СОПРОВОЖДАЕМОГО ГОРЕНИЕМ,
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ»

Государственный контракт № 02.517.11.9011
в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-
технологического комплекса России на 2007-2012 годы

Научный руководитель

_____ Хамидуллин И.Р.
подпись, дата

Бирск 2007

СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель	_____	Хамидуллин И.Р.
	подпись, дата	(раздел(ы) <u>1 – 4</u>)

Исполнители темы

к. ф.-м. н., доцент	_____	Баянов И.М.
	подпись, дата	(раздел(ы) <u>1 – 4</u>)

_____	Хамидуллин И.Р.
подпись, дата	(раздел(ы) <u>1 – 4</u>)

РЕФЕРАТ

Отчет 18 с., 4 ч., 5 рис., 0 табл., 15 источников, 0 прил.

ГОРЕНИЕ, МОДЕЛЬ, ГОРЮЧИЕ СМЕСИ, ВЫБРОСЫ, УГЛЕВОДОРОДЫ

В данной работе рассмотрен процесс горения газообразной смеси углеводородов с воздухом на основе двух предельных схем горения углеводородов в открытой атмосфере – диффузионного горения и упрощенной модели диссоциации продуктов горения. На основе уравнений физико-химической гидродинамики представлена модель распространения облака смеси углеводорода и воздуха, сопровождаемого реакцией горения. Распространение примесей в атмосфере сопровождается турбулентным переносом (диффузия, вязкость, теплопроводность), фазовыми переходами (конденсация, испарение, кристаллизация), химических превращениями.

Физико-химические свойства выбрасываемых в атмосферу соединений определяют их дальнейшее поведение в атмосфере. Легко испаряющиеся вещества (например, ацетон, бензин и т.п.) интенсивно перемешиваются с атмосферным воздухом и образуют взрывоопасные облака, простирающиеся на большие территории. Соединения тяжелее воздуха движутся вдоль земной поверхности и накапливаются в углублениях пересеченной местности, также образуя облако с взрывоопасным составом. В данной работе в качестве горючего газа рассматривается пропан.

Получены поля температуры и давления при горении пропана в открытой местности и наличии наземных объектов. Рассчитаны зоны разрушений и теплового воздействия продуктов горения на местности. Показано, что наличие наземных объектов существенно усиливает разрушительное действие горения облака выбросов. Это обусловлено, во-первых, затягиванием 1.2-1.5 раза процесса рассеяния облака – концентрация горючего газа дольше находится в диапазоне воспламенения смеси, во-вторых, усилением в 1.5-2 раза избыточного давления в ограниченных объемах между объектами.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Основные уравнения	8
2. Начальные и граничные условия.....	11
3. Численная схема	12
4. Результаты расчетов	13
Заключение.....	17
Список использованных источников.....	18

ВВЕДЕНИЕ

В ближайшие десятилетия объемы потребления легких углеводородных соединений, как одного из главных источников энергии, будет только возрастать. В частности это связано с большими запасами природного газа в виде газогидратов. Природный газ обладает такими достоинствами, как достаточно высокая экологическая чистота продуктов сгорания, сравнительно дешевая добыча и транспортировка. Однако при нормальных условиях природный газ имеет большой удельный объем, поэтому хранение и транспорт осуществляется при высоких давлениях. Все это значительно повышает вероятность аварийных ситуаций из-за нарушений герметичности емкостей и трубопроводов. Кроме того, природный газ используется как топливо в различных видах транспорта, что повышает риск их применения в качестве взрывных устройств экстремистскими группировками. Все это требует глубокого изучения закономерностей распространения выбросов углеводородных соединений и последующего возгорания образовавшейся смеси в открытой атмосфере в городских каньонах, сложной пересеченной местности и т.д.

Моделирование таких процессов и их последствий путем натурных физических экспериментов была и является основным способом исследований, но требует больших материальных ресурсов. В настоящее время, благодаря успехам в развитии компьютерной техники, наиболее рациональным и распространенным методом является численное моделирование динамики выбросов в атмосфере, которое позволяет проводить прогнозирование последствий, оценку ущерба и разработку мер защиты. Последствия аварий, сопровождаемых горением газовоздушных облаков, оцениваются по размерам зоны разрушений и зоны, подвергшейся тепловому воздействию продуктов горения. Большинство промышленных зданий разрушается от избыточных давлений 25 - 30 кПа при внешних и 20 - 25 кПа при внутренних взрывах [1]. Зона теплового воздействия определяется безопасным для живых организмов расстоянием от центра взрыва, которое по оценкам [2] должно в 3-4 раза превышать радиус образующегося огненного шара продуктов горения ($R_{EV} \approx 3.6R_{FB}$). Таким образом, основной задачей численного моделирования горения облака углеводорода на местности является оценка зон разрушения и теплового воздействия продуктов горения на основе рассчитанных полей давления и температуры.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов горения горючих смесей углеводородных соединений с воздухом показывают, что эти процессы проходят через несколько десятков стадий с образованием множества промежуточных продуктов горения [3]. Теоретические модели, учитывающие все эти стадии, требуют привлечения больших ресурсов вычислительной

техники. Ситуация еще более усложняется, если учесть образование твердых частиц сажи и связанные с этим радиационные потери энергии пламени [4,5].

Но часто при аварийных выбросах горючие вещества в результате достаточно длительного процесса накопления и перемешивания с окружающим воздухом успевают выровняться по температуре с окружающей атмосферой, превратиться в разбавленную гомогенную смесь с избытком кислорода. Такие обедненные смеси будут гореть без образования сажи, и теоретическое описание несколько упрощается.

В то же время при горении больших объемов горючих смесей в открытой местности процессы переноса (диффузия и теплопроводность) не успевают рассеять из очага активного горения выделяющуюся энергию, и процесс идет практически в адиабатическом режиме. Элементарные оценки показывают, что температура в очаге горения должна достигать нескольких тысяч градусов. В действительности, однако, такие высокие температуры не могут быть достигнуты вследствие затрат тепла на диссоциацию составляющих горючей смеси и продуктов сгорания. При высокой температуре образуются большие количества CO , H_2 , OH , O и NO .

Вклад процесса диссоциации в тепловой баланс становится более значительным с повышением температуры пламени. В частности, при горении кислородно-углеводородных стехиометрических смесей этот вклад настолько велик, что температура пламени из-за этих эффектов оказывается практически в два раза ниже рассчитанной без учета диссоциации [6]. В углеводородно-воздушных смесях при наличии большого количества нереагирующего балласта (азота) температура намного ниже и степень диссоциации значительно уменьшается. Это также позволяет в ряде случаев пренебречь процессами диссоциации и тем самым значительно упростить теоретическую модель.

При описании сложных химических реакций, к которым относится горение углеводородов, из-за недостатка точных знаний кинетических механизмов и констант скорости отдельных стадий обычно используются кинетические уравнения для суммарной скорости брутто-реакции превращения исходных веществ в конечные продукты. При определении интенсивности этих брутто-реакций используются различные гипотезы и соответствующие эмпирические зависимости. При этом константы химических реакций подбираются путем обработки экспериментальных данных. В частности, для процессов горения углеводородов в справочниках [7] приведены эмпирические зависимости скорости реакции от температуры, концентраций топлива и окислителя в соответствии со стехиометрической брутто-формулой. Они могут быть использованы в простых моделях для расчетов конечного состава и состояния смеси веществ после реакции, но не позволяют с достаточной точностью описать эволюцию гидро- и термодинамических параметров смеси в ходе самой реакции. Наряду с этим существуют также

достаточно громоздкие модели, в которых учитываются сотни промежуточных стадий горения углеводородов, требующие для расчетов большие вычислительные ресурсы.

В ряде случаев можно обойтись более простыми моделями, учитывающими сравнительно небольшое количество промежуточных стадий, оказывающих доминирующее влияние на интенсивность и тепловой баланс суммарной реакции [3,5,8]. Эти достаточно простые теоретические постановки обладают большим предсказательным ресурсом для ряда явлений в плане предсказания избыточных давлений и температур, представляющих наибольший практический интерес.

В данной работе рассмотрен процесс горения газообразной смеси углеводородов с воздухом на основе двух предельных схем горения углеводородов в открытой атмосфере – диффузионного горения и упрощенной модели диссоциации продуктов горения. На основе уравнений физико-химической гидродинамики представлена модель распространения облака смеси углеводорода и воздуха, сопровождаемого реакцией горения. Распространение примесей в атмосфере сопровождается турбулентным переносом (диффузия, вязкость, теплопроводность), фазовыми переходами (конденсация, испарение, кристаллизация), химических превращениями.

Физико-химические свойства выбрасываемых в атмосферу соединений определяют их дальнейшее поведение в атмосфере. Легко испаряющиеся вещества (например, ацетон, бензин и т.п.) интенсивно перемешиваются с атмосферным воздухом и образуют взрывоопасные облака, простирающиеся на большие территории. Соединения тяжелее воздуха движутся вдоль земной поверхности и накапливаются в углублениях пересеченной местности, также образуя облако с взрывоопасным составом. В данной работе в качестве горючего газа рассматривается пропан.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим облако как смесь газов, которая принимается за гомогенную среду с плотностью ρ , температурой T , давлением p . Пусть $\mathbf{\bar{v}} = \mathbf{\bar{v}}(x, y, z, t)$ скорость этой среды, определяемая как среднемассовая скорость составляющих

$$r\mathbf{\bar{v}} = \sum_i r_i \mathbf{\bar{v}}_i. \quad (1)$$

Введем среднемассовые концентрации каждой компоненты смеси $k_i = r_i / r$. Здесь и в дальнейшем индексы $i = 1, \dots, 6$ будут соответствовать углеводороду, кислороду, углекислому газу, водяному пару, окиси углерода и азоту (C_nH_m , O_2 , CO_2 , H_2O , CO , N_2). Эти значения концентраций удовлетворяют условию

$$\sum_i k_i = 1. \quad (2)$$

Для смеси газов выполняется закон Дальтона, и для определения давления смеси используем уравнение Менделеева-Клапейрона

$$p = rR_g T, R_g = R \sum_i \frac{k_i}{m_i} \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, m_i – молярные массы газов.

На основе принятых предположений можем записать систему, описывающую динамику облака газов, в которую входят уравнения неразрывности, диффузии, импульсов для всей смеси и уравнение теплового баланса.

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \nabla^k r v^k = 0, \quad (4)$$

$$r \frac{dk_i}{dt} = -\nabla^k \left(r \frac{n_t}{s_d} \nabla^k k_i \right) + R_i, \quad (5)$$

$$r \frac{dv^k}{dt} = -\nabla^k p + r g^k + \nabla^n t^{kn}, \quad (6)$$

$$r c \frac{dT}{dt} = \nabla^k \left(r \frac{n_t}{s_t} \nabla^k T \right) + q_1 R_1 + q_6 R_6 - Q_r, \quad (7)$$

где k_i – массовые концентрации компонент смеси, R_i – скорости изменения концентраций в результате химической реакции, q_1, q_6 – удельные теплоты сгорания углеводорода и окиси углерода, Q_r – тепловой вклад диссоциации продуктов сгорания. Удельная теплоемкость смеси определяется через удельные теплоемкости компонент

$$c_p = \sum_i c_{pi} k_i. \quad (8)$$

Для более полного описания процессов тепломассопереноса к данной системе уравнений (3)-(7) добавляются дополнительные уравнения $k-e$ -модели для определения энергии турбулентных пульсаций K , диссипации e и для коэффициента кинетической турбулентной вязкости n_t

$$r \frac{dK}{dt} = \nabla^k \left(r \frac{n_t}{s_K} \nabla^k K \right) + t^{kn} \nabla^k v^n - re, \quad (9)$$

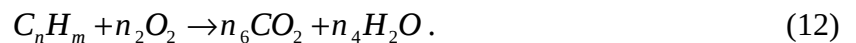
$$r \frac{de}{dt} = \nabla^k \left(r \frac{n_t}{s_e} \nabla^k e \right) + \frac{e}{K} (C_{1e} t^{kn} \nabla^k v^n - C_{1e} re), \quad (10)$$

$$n_t = C_m K^2 / e. \quad (11)$$

Здесь $t^{kn} = rn_t \left(\nabla^n v^k + \nabla^k v^n - \frac{2}{3} \nabla^i v^j d_{kn}^i \right) - \frac{2}{3} r K d_{kn}$ – турбулентная составляющая тензора касательных напряжений, $C_m = 0.09$, $C_{e1} = 1.43$, $C_{e2} = 1.92$, $s_K = 1$, $s_e = 1.3$ – эмпирические константы.

Для описания химических реакций рассмотрим два предельные схемы горения смеси углеводорода с воздухом в открытой атмосфере. В первой схеме скорость реакции лимитируется скоростью перемешивания смеси, а химические реакции считаются бесконечно быстрыми. Во второй схеме, скорость реакции определяется температурой смеси (через соотношения Аррениуса) и считается, что перемешивание смеси, следовательно, и доставка окислителя к топливу происходят мгновенно.

Согласно первой схеме изменение химического состава смеси происходит по брутто-реакции, которая является необратимой [7]



По этой схеме [9], скорость химической реакции горения углеводорода определяется характерным временем турбулентного смешения компонент $t = K / e$:

$$R_1 = Ar \frac{e}{K} \min \left(k_1, \frac{k_2 m_1}{n_2 m_2}, \frac{k_4 m_1}{n_4 m_4}, \frac{k_6 m_1}{n_6 m_6} \right), \quad (13)$$

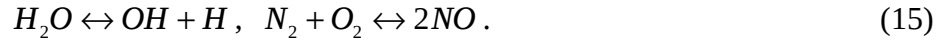
здесь $A = 4$ – эмпирическая константа. Такой подход характерен для моделирования процессов горения больших объемов смеси в открытой атмосфере, когда размеры расчетной ячейки относительно большие, и в ячейке реализуется диффузионный режим горения. Скорости изменения концентраций других компонент смеси через R_1 выражаются по формулам:

$$R_2 = -R_1 n_2 m_2 / m_1, \quad R_4 = R_1 n_4 m_4 / m_1, \quad R_6 = R_1 n_6 m_6 / m_1.$$

Согласно второй схеме учитываются процессы образования монооксида углерода [10]



Также учитывается диссоциация молекул воды и азота горения при высокой температуре согласно следующим схемам.



Как показывают оценки, концентрации окисей водорода и азота (OH и NO) при температурах ниже 2500 К, реализуемых для рассматриваемых смесей малы ($\sim 1\%$). Кроме того, характерные времена химических превращений с образованием и рекомбинацией этих компонент значительно меньше по сравнению с временами диффузионного перемешивания. Поэтому дополнительным диффузионным переносом этих составляющих смеси в общем балансе масс будем пренебрегать. В соответствии с этими допущениями уравнение масс для окисей водорода и азота имеет вид

$$r \frac{dk_{r,j}}{dt} = R_{r,j}, \quad (16)$$

где $k_{r,j}$, ($j=1,2$) – концентрации OH и NO , $R_{r,j}$ – скорости изменения концентраций в результате диссоциации.

В то же время образование и исчезновение OH и NO сопровождается значительными тепловыми эффектами, поэтому будем учитывать их вклад в теплоемкость (8) и в уравнение теплового баланса (7)

$$Q_r = q_{r1}(R_{r1}^+ - R_{r1}^-) + q_{r2}(R_{r2}^+ - R_{r2}^-).$$

Здесь q_{r1}, q_{r2} – удельные теплоты образования, $R_{r1}^+, R_{r1}^-, R_{r2}^+, R_{r2}^-$ – скорости реакции образования и рекомбинации OH и NO , соответственно.

Скорость реакции горения углеводорода определяется согласно соотношению Аррениуса

$$R_1 = \frac{rmk_1}{m_1} \frac{rmk_2}{m_2} A_1 \exp\left(-\frac{E_{a1}}{RT}\right). \quad (17)$$

Реакция горения окиси углерода обратима, поэтому скорости прямой и обратной реакции выражаются соотношениями [10]

$$R_2^+ = \frac{rmk_5}{m_5} \frac{rmk_2}{m_2} A_2 \exp\left(-\frac{E_{a2}}{RT}\right), \quad R_2^- = r^2 \frac{mk_3}{m_3} A_3 \exp\left(-\frac{E_{a3}}{RT}\right) \quad (18)$$

где A_1, A_2, A_3 – константы реакции, E_{a1}, E_{a2}, E_{a3} – энергии активации. Скорости изменения концентраций других компонент смеси через R_1, R_2^+ и R_2^- выражаются по формулам [10]:

$$R_2 = -R_1 n_2 m_2 - R_2^+ m_2, \quad R_3 = 2R_2^+ m_3 - 2R_2^- m_3, \quad R_4 = R_1 n_4 m_4, \quad R_5 = R_1 n_5 m_5 - 2R_2^+ m_5 + 2R_2^- m_5.$$

Константы реакций диссоциации и рекомбинации (15) имеют вид [7]

$$R_{r1}^+ = r^2 \frac{mk_4}{m_4} A_{r1}^+ \exp\left(-\frac{E_{ar1}}{RT}\right), \quad R_{r1}^- = r^2 \frac{mk_{r1}}{m_{r1}} A_{r1}^- T^{n_1},$$

$$R_{r2}^+ = r^2 \frac{mk_2}{m_2} A_{r2}^+ \exp\left(-\frac{E_{ar2}}{RT}\right), \quad R_{r2}^- = r^2 \frac{mk_{r2}}{m_{r2}} A_{r2}^- T^{n_2}. \quad (19)$$

2. НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

При залповых аварийных выбросах углеводородов образуется облако произвольной формы. Но в процессе горения облака в открытой атмосфере начальная форма практически не играет роли и облако горячих продуктов горения в большинстве случаев принимает форму шара. Поэтому в дальнейшем для удобства расчетов на прямоугольной сетке примем начальную форму облака в виде куба.

В начальный момент времени $t = 0$ с температура окружающего воздуха T_a однородна во всей расчетной области, давление определяется распределением Больцмана

$$p_a(x, y, z, 0) = p_{a0} \exp(-m_a g z / R T_a),$$

где p_{a0} – нормальное атмосферное давление.

Скорость движения в начальный момент времени равна нулю во всей расчетной области:

$$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, 0) = 0.$$

В облаке горючей смеси в начальный момент времени давление соответствует распределению давления в окружающей атмосфере и температура в облаке T_g однородна и равна температуре окружающего воздуха.

Расчетная область ограничена 6 плоскими границами. Верхняя и боковые границы являются открытыми, и на них для параметров задаются фоновые значения. Нижняя граница является закрытой, и на ней скорость равна нулю.

3. ЧИСЛЕННАЯ СХЕМА

Численная схема решения системы уравнений (3)-(11), (16) основана на методе крупных частиц. К преимуществам данного метода относится устойчивость в широком диапазоне скорости движения среды. Трехмерная постановка задачи позволяет моделировать динамику облака углеводорода при произвольной конфигурации наземных объектов (зданий, лесных насаждений) и с учетом рельефа местности.

Описание работы данной численной схемы применительно к процессам распространения атмосферных выбросов приводится в работе [11]. В настоящей работе к этой схеме добавлена часть, моделирующая процесс горения углеводородов.

При построении алгоритма расчета методом крупных частиц особенно важно выбрать оптимальную последовательность расщепления по физическим процессам. Численный алгоритм решения системы уравнений (3)-(11), (16) на каждом шаге по времени состоит из трех этапов, стандартных для метода крупных частиц, в которых последовательно учитываются сначала (I этап) турбулентный перенос субстанций (массы, импульса и тепла), затем конвективный перенос (II и III этапы). Далее производится расчет процесса горения образовавшейся смеси согласно скоростям реакций (17)-(19), в результате которого происходит изменение масс соответствующих компонент смеси, а также выделение или поглощение тепла в каждой ячейке расчетной сетки. При этом количество участвующих в реакциях компонент смеси должно быть достаточно, чтобы реакции происходили согласно стехиометрическим соотношениям. Если в данной ячейке наблюдается недостаток данного вещества, то соответствующая реакция происходит до полного его израсходования и затем прекращается. Например, по такому сценарию происходит реакция горения углеводорода, которая прекращается при израсходовании, как углеводорода, так и кислорода в смеси в данной ячейке.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В процессе горения смеси углеводорода и воздуха в открытой атмосфере образуется облако раскаленных газов – продуктов горения. При температуре газов выше 1000 К излучение облака находится в видимой области спектра. Такое облако из-за круглой формы часто называют огненным шаром. Основными параметрами огненного шара являются максимальный диаметр D_{FB} и время жизни t_{FB} . В результате многочисленных полевых экспериментов [12-15] в открытой местности было показано, что эти параметры определяются начальной массой топлива M_0 и для значений $M_0 = 1-10^3$ кг получены эмпирические зависимости в виде

$$D_{FB} = (5.8 - 6.25)M_0^{1/3} \text{ и } t_{FB} = (0.30 - 0.45)M_0^{1/3}.$$

Здесь D_{FB} , t_{FB} , M_0 измеряются в м, с и кг, соответственно.

Проведено сравнение результатов расчетов по двум вариантам схемы горения с этими эмпирическими кривыми. Начальное значение массы топлива в облаке горючей газовой смеси варьировалось путем изменения начальных значений объема облака и концентрации углеводорода. В расчетах максимальный диаметр D_{FB} и время жизни t_{FB} огненного шара определялись по уровню температуры 1000 К. Сравнение показывает (рис.1), что расчетные точки D_{FB} и t_{FB} лежат в коридоре, указанном в эмпирической зависимости. Таким образом, результаты расчетов находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. Здесь следует отметить, что в открытой местности легко найти радиус зоны (R_{EV}) теплового поражения по рассчитанному значению максимального диаметра огненного шара D_{FB}

$$R_{EV} \approx 3.6R_{FB} = 1.8D_{FB}.$$

На основе представленных схем горения возможно рассчитать динамику горения облака углеводородно-воздушной смеси, образовавшейся в результате аварийного выброса на местности. Этот процесс можно разделить на 2 этапа – образование облака в результате перемешивания углеводорода с окружающим воздухом и горение этого облака. При этом чаще всего происходит выброс чистого углеводорода, и первоначально его концентрация в облаке близка к единице. Поэтому этап перемешивания с окружающим воздухом должен быть достаточно длительным, чтобы объемное содержание углеводорода в

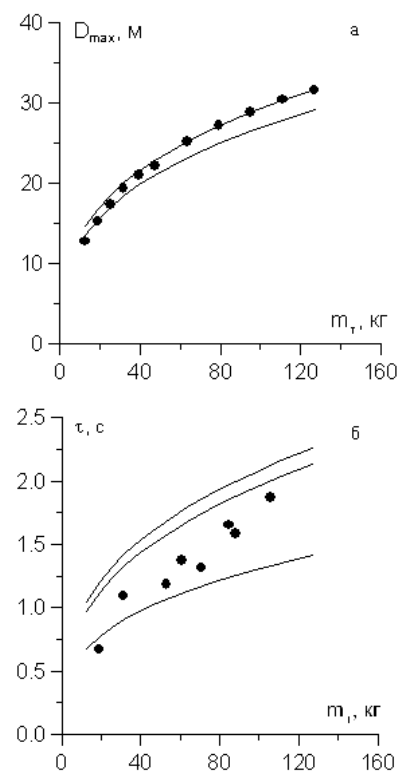


Рис.1. Сравнение результатов расчета с результатами физических экспериментов: а – максимальный диаметр огненного шара, б – время жизни огненного шара.

смеси снизилось до значений, входящих в диапазон воспламенения (н-р, для пропана $a = 2.3-9.5\%$). Многие углеводородные соединения тяжелее воздуха, и наряду с перемешиванием происходит также их оседание и накопление у подстилающей поверхности, что наиболее опасно с точки зрения ущерба, наносимого в результате горения образовавшегося облака. Такая ситуация часто возникает на промышленных площадках и жилых массивах при утечке бытового газа. Сложная конфигурация объектов приводит к локализации горючей смеси в отдельных участках. Как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования [12] наиболее интересным с практической точки зрения является возгорание облаков с начальной массой топлива $M_0 = 10^1 - 10^3$ кг. Такие процессы протекают в течение 1-10 с, за которые теплота, выделяемая в процессе горения, не успевает рассредоточиться в пространстве в результате теплопереноса, и температура в облаке достигает высоких значений, соответствующих адиабатическому процессу.

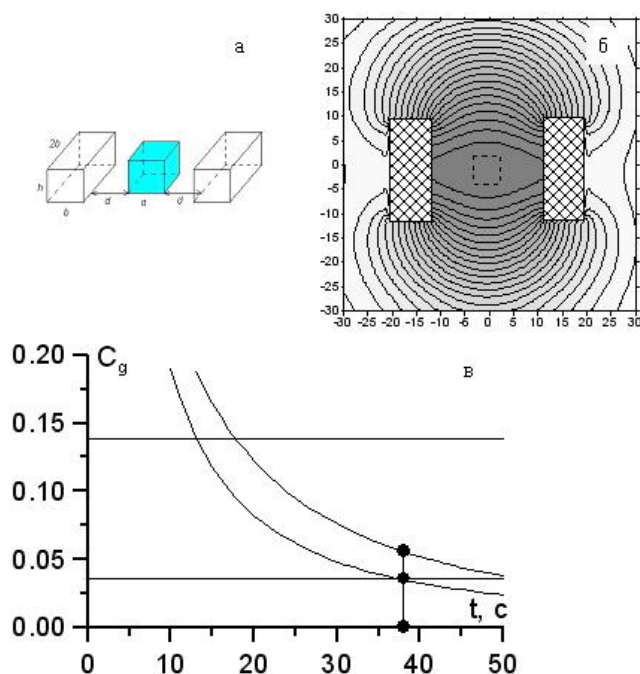


Рис.2. Перемешивание залпового выброса пропана с окружающим воздухом. а – конфигурация строений и начального положения облака (размеры: $a=8$ м, $d=12$ м, $b=h=10$ м), б - форма облака в момент зажигания (вид сверху), в – максимальное значение концентрации пропана в облаке при наличии и отсутствии строений.

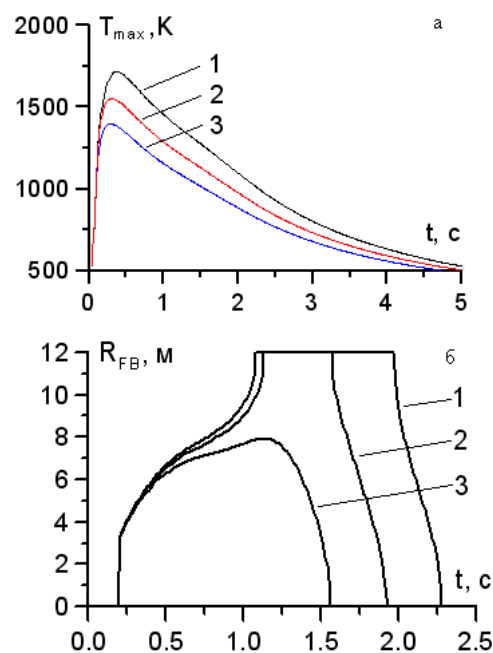


Рис.3. Эволюция максимальной температуры и фронта огненного шара в облаке пропана при различных моментах времени зажигания $t_s = 30, 35, 40$ с (кривые 1,2,3, соответственно).

Рассмотрим случай залпового выброса пропана в простейшей конфигурации строений – в городском каньоне, образованном двумя зданиями, расположенными симметрично относительно центра выброса. Когда начальные размеры выброса сопоставимы с размерами строений (рис.2а), форма облака определяется преимущественно конфигурацией этих строений [11]. Примем, что в начальный момент времени залповый выброс чистого пропана в виде облака кубической формы

объемом $V=512 \text{ м}^3$ ($M_0=904 \text{ кг}$) находится на горизонтальной подстилающей поверхности в центре расчетной области на удалении от зданий, равном размеру облака. Температура в облаке равна температуре окружающего воздуха и составляет $T=300 \text{ К}$. В процессе перемешивания с окружающим воздухом значение концентрации горючего газа в центре облака в этом случае снижается со временем значительно медленнее по сравнению с выбросом в отсутствие зданий (рис.2б). Это отличие наблюдается с момента времени ($t=8 \text{ с}$), когда фронт облака достигает строений. Отрезок времени с момента выброса до момента, когда смесь в облаке становится негорючей (т.е. бедной) назовем периодом взрывоопасности $t_{\text{вз}}$. Наличие зданий приводит к значительному затягиванию этого периода ($t_{\text{вз1}} \approx 50 \text{ с}$ по сравнению с $t_{\text{вз2}} \approx 38 \text{ с}$ при отсутствии зданий), т.е. здания препятствуют рассеянию облака. Выберем момент зажигания ($t_{\text{з}} = 35 \text{ с}$) для облака в отсутствие зданий, когда концентрация пропана близка к нижнему пределу. При наличии зданий в этот же момент времени концентрация пропана в 1.6 раза выше ($C_{\text{г1}} = 0.062$ и 0.039 , соответственно). Казалось бы, незначительное в абсолютном выражении отличие концентраций топлива в смеси приводит к существенному (на 30%) отличию температуры пламени при горении ($T_{\text{max}} \approx 1700 \text{ К}$ и 1300 К , соответственно).

Таким образом, несмотря на сравнительно медленное изменение концентрации пропана в облаке ($\sim 1\%$ за 10 с) в ходе перемешивания с окружающим воздухом, момент зажигания $t_{\text{з}}$ сильно влияет на максимальное значение температуры, достигаемое в облаке в процессе горения, а значит и степень ущерба (рис.3а). Рассмотрим движение фронта огненного шара, за который примем поверхность с температурой 1000 К . При достаточно раннем зажигании ($t_{\text{з}}=30 \text{ с}$ и 35 с) фронт достигает стен здания, при позднем ($t_{\text{з}}=40 \text{ с}$) – нет (рис.3б). При этом стены подвергаются тепловому воздействию за счет излучения в течение всего времени жизни огненного шара, т.е. в течение 2-3 с. Также следует подчеркнуть, что здание находится в опасной для живых организмов зоне (ближе, чем 3.6 радиуса огненного шара). Результаты расчетов зоны теплового воздействия получились практически одинаковыми для обеих схем горения.

Рассмотрим далее результаты расчетов зоны разрушений. При использовании первой схемы горения (диффузионный режим) избыточное давление в облаке незначительное (не превышает 0.1 атм). Это связано, по-видимому, с тем, что процесс переноса тепла в этой схеме происходит быстрее, чем энерговыделение. При использовании в расчетах второй схемы в процессе горения наблюдается значительное избыточное давление. В дальнейшем представлены результаты расчетов на основе этой схемы, которые можно считать верхней оценкой избыточного давления.

В открытой местности у подстилающей поверхности амплитуда волны давления быстро убывает (рис.4а и 4б) по мере удаления от очага возгорания. При наличии наземных объектов

происходит многократное отражение волн и их взаимное усиление. При сложной конфигурации объектов простая оценка максимального значения избыточного давления становится затруднительной и приходится обращаться к результатам численных расчетов.

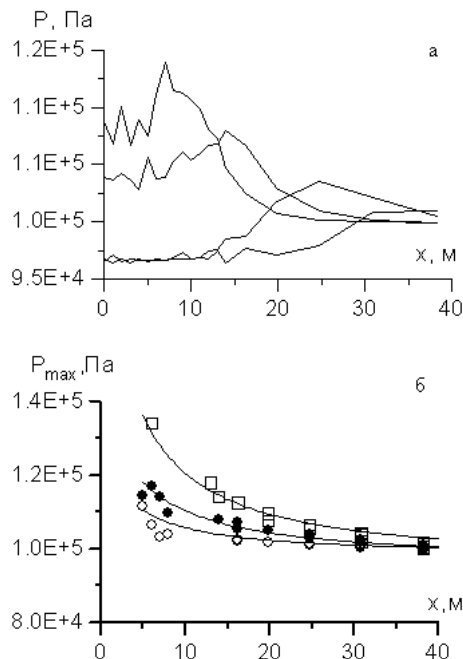


Рис.4. Эволюция волны давления (а) и ее амплитуды (б) при горении облака смеси пропана и воздуха в открытой местности. В (а) представлены профили давления в разрезе облака на высоте 1 м в моменты времени $t=10, 15, 20, 25$ мс. В (б) представлены амплитуды волны давления для трех случаев горения облака с начальным объемным содержанием пропана $a=0.03, 0.04, 0.05$.

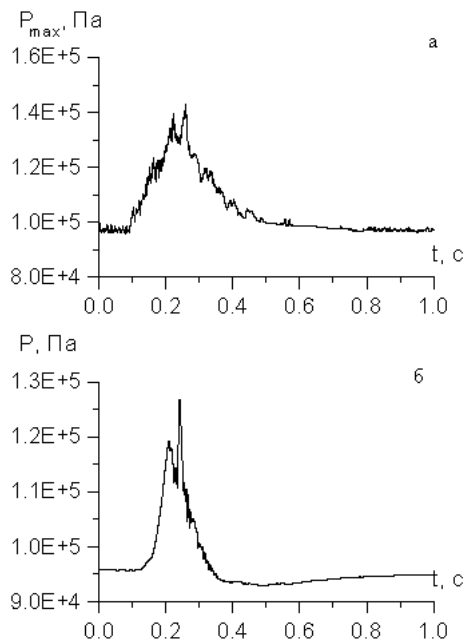


Рис. 5. Эволюция максимального значения давления (а) и давления на стене (б) здания в процессе горения облака пропана между двумя зданиями при зажигании в момент времени $t=35$ с после выброса.

Рассмотрим волны давления в случае двух зданий, рассмотренном выше. В облаке горючей смеси, образовавшемся в результате перемешивания пропана с воздухом в течение $t_z=35$ с, максимальное значение объемной доли пропана составляет $a_g \approx 4\%$ (массовая концентрация $C_g=0.062$). Волна давления за 0.2 с момента зажигания доходит до стены здания (рис.5а), и его амплитуда составляет 0.25 атм, что является достаточным для разрушения здания. Максимальное давление в расчетной области достигает 0.4 атм (рис.5б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты численных расчетов горения облака пропана в атмосфере на основе двух предельных схем горения. Получены поля температуры и давления при горении пропана в открытой местности и наличии наземных объектов. Рассчитаны зоны разрушений и теплового воздействия продуктов горения на местности. Показано, что наличие наземных объектов существенно усиливает разрушительное действие горения облака выбросов. Это обусловлено, во-первых, затягиванием 1.2-1.5 раза процесса рассеяния облака - концентрация горючего газа дольше находится в диапазоне воспламенения смеси, во-вторых, усилением в 1.5-2 раза избыточного давления в ограниченных объемах между объектами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. 432 с.
2. Маршалл В. Основные опасности химических производств. Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 672 с.
3. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. 740 с.
4. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж.П., Якуш С.Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива: I. Структура и динамика подъема. // Физика горения и взрыва, 1999, Т. 35, №. 3. С. 7–19.
5. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж.П., Якуш С.Е.. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива: II. Тепловое излучение. // Физика горения и взрыва, 1999, Т. 35, №. 4. С. 12–23.
6. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура. – М.: Металлургиздат, 1959. 333 с.
7. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник в 3-х томах. Т.2: Физико-химическая кинетика и термодинамика. / Под ред. Г.Г.Черного и С.А.Лосева. – М.: Изд. МГУ, 2002. 368 с.
8. Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф. Исследования перехода горения в детонацию в газах. // Успехи механики. 2005, Т.3, N1. С. 3-30.
9. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On the mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. // Sixteenth Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1976. P. 711-729.
10. Smirnov N.N., Nikitin V.F., Legros J.C. Ignition and combustion of turbulent dust-air mixtures. // Combustion and Flame. 2000, V.123. P. 46-67.
11. Баянов И.М., Гильмуллин М.З., Шагапов В.Ш. Расчет растекания тяжелого газа вдоль земной поверхности по трехмерной модели // Прикладная механика и техническая физика. 2003, Т.44, №6. С. 130-139.
12. Johnson D.M., Pritchard M.J. Large-scale experimental study of boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs). // 14th Int. LNG/LPG Conference & Exhibition, Gastech, 1990. P. 1–30.
13. Gayle J.B., Bransford J.W. Size and duration of fireballs from propellant explosions. Tech.Rep.NASA TM X 53314, George C.Marshall Space Center, Huntsville, Alabama, 1965.
14. High R.W. The Saturn fireball. // Annals of New York Academy of Sciences, 1968, v.152. P.441–451.
15. Roberts A.F. Thermal radiation from releases of LPG from pressurised storage. // Fire Safety Journal, 1981/82, No.4. P.197–212.