

Р. Ш. Еналеев, Э. Ш. Теляков, В. С. Гасилов,
О. А. Тучкова, Л. И. Хайруллина

МОДЕЛИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Ключевые слова: аварии, горение углеводородов, огненные шары, тепловое излучение, интегральные модели.

Выполнен анализ сценариев с аварийным выбросом сжатых и жидких углеводородных газов в открытое пространство. Представлены теоретические и инженерные математические модели распространения пламени. Предложен численный метод определения нормальной скорости горения стехиометрических газовых смесей. Разработан алгоритм определения кинетических параметров горения. Показана адекватность модели экспериментальным данным. Проведена сравнительная оценка применимости моделей в прогнозировании энергетических параметров теплового излучения.

Keywords: combustion of hydrocarbons, fireballs, thermal radiation, integrated models.

The analysis of scenarios with emergency emission of compressed and liquid hydrocarbonic gases in open space is carried out. Theoretical and engineering mathematical models of flame distribution are presented. The numerical method for determination of normal velocity of stoichiometric gas mixtures burning is offered. The algorithm of determination for kinetic parameters of burning is developed. Adequacy of model to experimental data is shown. The comparative assessment of models applicability for predicting of energy parameters of thermal radiation is conducted.

Введение

Одним из основных источников опасности на современных нефтехимических предприятиях является аварийный выброс пожаровзрывоопасных веществ в атмосферу. Наиболее вероятными причинами такого выброса может быть разгерметизация технологического оборудования, резервуаров, трубопроводов, средств транспортировки и хранения углеводородов.

Аварийные ситуации, связанные с разгерметизацией оборудования и возникновением пожаров, могут иметь катастрофические последствия для окружающей среды, обслуживающего персонала и населения рядом расположенных жилых территорий. Разработка мероприятий по обеспечению пожарной безопасности таких объектов в соответствии с действующим законодательством [1] должна базироваться на научно обоснованных методиках моделирования горения углеводородов.

Опасными факторами на пожароопасных объектах являются воздействие открытого пламени (пожар-вспышка), радиационно-конвективного нагрева, теплового излучения (огненные шары). Воздействие теплового излучения от высокотемпературных продуктов химических реакций на окружающие объекты может вызвать тепловое поражение человека, возгорание горючих материалов, потерю прочности и устойчивости конструкций.

При тепловом поражении людей возникает необходимость оказания безотлагательной помощи пострадавшим путем оперативного проведения организационно-технических мероприятий в условиях острого дефицита времени.

Такая информация может быть получена на основе компьютерного моделирования сложных физико-химических сопряженных процессов тепло- и массообмена в системе «тепловой источник – материал покровного слоя – пакет одежды – кожный покров биообъекта» [2, 3] с применением

программно-вычислительных комплексов в режиме online.

Таким образом, разработка научно обоснованных методов моделирования горения углеводородов при проектировании пожароопасных объектов и прогнозировании последствий опасных факторов пожара на окружающие объекты в аварийных ситуациях является актуальной социально-экономической проблемой.

Характеристика тепловых источников

Тепловые источники, образующиеся в результате аварийных выбросов углеводородов из объектов химической технологии, различаются по своему масштабу, типам объектов, фазовому составу и протекающим химическим процессам. После зажигания выброшенных в атмосферу топлив возникают трехмерные горящие объемы – шар, цилиндр, конус и др. Наибольшую опасность для человека и объектов окружающего пространства представляет тепловое излучение от поверхности этих объемов.

Образование, зажигание, горение, эволюция топливного облака при выбросе газов в атмосферу являются сложным процессом, включающим турбулентное смешение горючего с атмосферным воздухом, воспламенения от источника зажигания, диффузионное горение или горение предварительно перемешанных реагентов в ламинарном и турбулентном режимах, тепловое излучение высокотемпературных продуктов реакции.

При разгерметизации технологического оборудования условно рассматривается два предельных случая – непрерывное постоянное истечение из небольших повреждений в корпусе или мгновенное, залповое высвобождение всей массы газа при полном разрушении резервуара. Зажигание струи газа после выброса приводит к возникновению горящего факела. Мгновенный выброс газов и зажигание приводит к формированию огненного шара (ОШ). В технологии оценки пожарного риска ОШ рассматривается как

наиболее опасный сценарий развития аварии в связи с образованием высокоинтенсивного теплового источника.

Под ОШ понимается специфическая структура паровоздушной смеси, которая образуется при залповом выбросе значительного количества (от одной до нескольких сотен тонн) сжатого или сжиженного газа в нестесненное (открытое) пространство при неблагоприятных атмосферных условиях (отсутствие ветра) с последующим зажиганием ОШ от постороннего источника. Горение данного облака характеризуется возникновением над земной поверхностью на определенной высоте фронта пламени примерно сферической формы, сопровождающееся тепловым излучением, которое оказывает поражающее воздействие на людей и на объекты, находящихся в зоне поражения.

Понимание сложных механизмов горения газов в огненном шаре возможно в результате анализа физических моделей горения газовых смесей в различных газодинамических режимах, а количественное описание процесса распространения пламени – анализа и применения фундаментальных положений математической теории горения.

При резком сбросе давления после разгерметизации оболочки резервуара, когда происходит объемное вскипание жидкости и перехода ее в пар, который увлекает оставшуюся жидкость в виде мелкодисперсного аэрозоля. Это явление получило название BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). BLEVE считается наиболее опасным исходом аварии со сжиженными углеводородами, поэтому вызывает повышенный интерес специалистов. Для ОШ характерно наличие мощного, но кратковременного импульса излучения, энергия которого составляет одну треть от химической энергии топлива.

На основании анализа многочисленных реальных аварий с выбросом и зажиганием углеводородных топлив, описанных в известных монографиях Маршалла, Бейкера, Бесчастного, условия и допущения образования и горения ОШ представляет следующим образом:

- ОШ представляет собой большой объем (более 1 т) сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающегося с поверхности земли;

- появлению ОШ предшествует полное разрушение (разгерметизация) технологического оборудования химических производств со сжиженным газом, выброс паро-капельной смеси в открытое пространство, частичное смешение с окружающим воздухом за счет турбулентной энергии вскипающей жидкости, зажигание от постороннего источника;

- во всех эмпирических и теоретических моделях предполагается, что вся масса топлива сгорает с кислородом воздуха в стехиометрическом соотношении. При этом температура внутри ОШ поднимается от начальной до температуры продуктов горения. Распределение температуры по сечению ОШ принимается практически равномерным;

- воспламенение облака, содержащего горючий газ, в ряде случаев переходит во взрыв. Одна из основных причин – наличие ограниченного пространства (здания, сооружений и т.д.). Закономерности перехода горения во взрыв до конца не изучены;

Экспериментальное изучение огненных шаров началось в середине 60-х годов при авариях ракет и истечении топлива в окружающее пространство [4, 5]. Основными компонентами ракетного топлива являются керосин и кислород или водород и кислород. Основной опасностью горения ОШ является воздействие теплового излучения высокотемпературных продуктов горения на человека и окружающие объекты. Оценка опасности теплового излучения стимулировала дальнейшее изучение этого явления.

Диапазон экспериментального изучения ОШ начинается от нескольких граммов в лабораторных опытах до десятка тонн в крупномасштабных полигонных испытаниях. В качестве топлива обычно используются углеводороды – метан, пропан, бутан, пентан. В реальных аварийных ситуациях масса выброса углеводородных газов может измениться от 1 до 5 тыс. тонн, максимальный диаметр от 50 до 800 м, время горения от 10 до 40 сек.

Скорость турбулентного горения в объеме ОШ зависит от гидродинамической обстановки, кинетических параметров химических реакций, концентрации и температуры реагирующих компонентов и продуктов реакции, интенсивности теплового излучения.

Механизм кинетики химических реакций при турбулентном горении углеводородных газов в объеме ОШ остается до конца не выясненным. В большинстве экспериментальных и теоретических моделях горения газовых смесей оценивается увеличение скорости турбулентного горения по сравнению с нормальной скоростью ламинарного пламени, которая является стандартной характеристикой горючих газовых смесей. Поэтому анализ фундаментальных результатов исследования влияния различных физико-химических факторов на нормальную скорость распространения пламени необходимо для построения физических и математических моделей горения углеводородов.

Нормальная скорость распространения пламени

Движение пламени по газовой смеси называется распространением пламени. При распространении пламени химическая реакция идет в сравнительно тонком слое – зоне (фронте) горения. При этом газовая смесь делится на две области – сгоревший газ, через который пламя уже прошло, и несгоревший газ в непосредственной близости от зоны реакции, который нагревается за счет молекулярной теплопроводности от фронта реакции.

Нормальная скорость пламени определяет объем горючей смеси, который сгорает в единицу времени на единице поверхности пламени и имеет

размерность линейной скорости. При искривленном фронте пламени нормальная (или фундаментальная) скорость горения характеризует скорость перемещения фронта пламени относительно исходной смеси в направлении нормали к поверхности фронта. Величина нормальной скорости распространения пламени определяется кинетикой химической реакции и молекулярными процессами переноса тепла и вещества внутри пламени, где существуют большие градиенты температуры, концентрации компонентов, скорости, плотности. Расчет нормальной скорости пламени осложняется практическим отсутствием данных по кинетике химического превращения. Поэтому она определяется экспериментально [6].

Исследование влияния физико-химических параметров на нормальную скорость горения газовых смесей имеет важное теоретическое и практическое значение при решении двух проблем:

- проектирование технических устройств для сгорания топлив и камер сгорания летательных аппаратов;
- оценка пожарной опасности топлив при их аварийном выбросе и зажигании в окружающем пространстве.

В литературе приводятся многочисленные результаты фундаментальных экспериментальных исследований по влиянию начальной температуры, давления и концентраций горючего и окислителя на нормальную скорость горения, а также зависимости скорости горения от адиабатической температуры пламени. Результаты этих данных проанализированы и обобщены Полежаевым [7].

Простейшая теоретическая модель и приближенная формула для расчета скорости горения впервые предложены Зельдовичем и Франк-Каменецким [8]. Однако для ее практического использования необходимо знать значения энергии активации во всем диапазоне температур, предэкспонента и ряда других трудно определяемых параметров.

Одним из возможных методов расчета скорости стационарного горения является численное моделирование нестационарного процесса, включающего стадию зажигания и установления стационарного режима распространения волны горения [9].

Целью представленных исследований является идентификация физико-химических характеристик и кинетических параметров с использованием решения нестационарной задачи после установления стационарного режима и принципа расщепления по физико-химическим процессам. В предлагаемом подходе рассматриваются две последовательные стадии – молекулярный перенос с тепловыделением химического превращения и конвективный перенос. Такой режим условно можно назвать квазистационарным, модель которого приводится ниже.

Упрощенная модель для необратимой реакции первого порядка при равенстве коэффициентов теплопроводности и диффузии в

системе координат, связанной со стационарной волной горения, представляется в следующем виде:

$$c_p \rho \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + u_n \frac{\partial t}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + Q, \quad (1)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial x} = (1 - \eta) \cdot k \cdot \exp(-E/RT), \quad (2)$$

$$\tau = 0 : T = T_0, \eta = 0, u_n = 0, \quad (3)$$

$$x = 0 : q(\tau) = -\lambda \frac{dT}{dx}, u_n = 0 \text{ при } 0 < \tau \leq \tau^*, \quad (4)$$

$$q(\tau) = 0, T = T_a, \frac{d\eta}{d\tau} = 0 \text{ при } \tau > 0, \quad (5)$$

$$x = \pm \infty : T = T_0, \frac{d\eta}{d\tau} = 0, \quad (6)$$

Здесь η – глубина превращения; u_n – нормальная скорость горения; Q – тепловой эффект реакции на единицу массы смеси; λ – коэффициент теплопроводности; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность; k – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; w – скорость химической реакции; τ^* – время зажигания; T_a – адиабатическая температура.

Задача (1) – (6) строгого решения не имеет, т.к. при начальной температуре газовая смесь находится в неравновесном термодинамическом состоянии и в ней протекают химические реакции.

С целью получения приближенного решения применяются различные модификации поставленной задачи. Например, в [6] искусственно вводится «температура обрезки», при которой скорость реакции чрезвычайно мала.

В данной работе влияние начальной температуры на скорость реакции исследуется в диапазоне температур от 80 до 1200 К. Для максимального значения T_0 метод «температурной обрезки» не подходит. Поэтому принимается другая модификация, соответствующая реальному стандартному режиму, в которой время всего процесса включает три интервала. В первом интервале зажигание стехиометрической смеси газа осуществляется моделированием граничных условий I, II или III рода. При этом подбирается такой тепловой импульс зажигания, при котором время зажигания становится несущественным, а влияние реакции в исходной смеси еще не становится существенным. Второй, переходный интервал, измеряется от времени зажигания до времени выхода на стационарный режим, в котором по [9, 10] значение нестационарной скорости волны горения отличается от своего стационарного значения не более 10%. В третьем, квазистационарном интервале, максимальная частота чередований стадий подбирается таким образом, чтобы колебания адиабатической

температуры не превышали $1 \div 2$ К, а степень превращения – 0.001.

В первой стадии квазистационарного режима скорость распространения пламени приравнивается нулю и решается уравнение:

$$c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + Q_{pw}. \quad (7)$$

Во второй – нулю приравнивается правая часть уравнения (1). Полученное на первой стадии решение по распределению температуры и глубины превращения в волне горения «сдвигается» по координате x на величину, равную произведению скорости горения на шаг интегрирования по времени. При этом значения температур и глубины превращения уменьшаются, а на следующей стадии снова восстанавливаются. Эти изменения описываются уравнениями:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = -u_n \frac{\partial \eta}{\partial x}; \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = -u_n \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (8)$$

из которых рассчитывается скорость горения.

Численное моделирование волны горения в квазистационарном режиме позволяет идентифицировать как физические характеристики процесса – коэффициент теплопроводности λ и адиабатическую температуру горения T_a , так и кинетические параметры – значения предэкспонента K и энергию активации E , а обработка результатов вычислительного эксперимента – установить режим турбулентного горения, генерируемого пламенем.

Интегральные модели

При физическом и математическом моделировании ОШ в литературе предлагается множество подходов и моделей – экспериментальных, полуэмпирических, теоретических. Адекватность полуэмпирических и теоретических моделей устанавливается в сравнении расчетных данных с экспериментальными формулами, полученными в результате анализа сотен реальных аварийных ситуаций.

В литературе предлагаются различные подходы при построении теоретических моделей горения газов в ОШ. В одном из них сложная внутренняя структура ОШ изучается с привлечением моделей и методов, разработанных в гидродинамике конвективных течений [11, 12] и теории радиационного переноса [13]. Согласно этому подходу, скорость горения лимитируется процессом турбулентного смешения компонентов горючей смеси, тогда как сама химическая реакция считается бесконечно быстрой.

Главной проблемой математического моделирования пожаров является разработка способов и методов получения всех характеристик его физических полей – концентрации окислителя и горючего, скорости потоков, температуры и т.д. Такие теоретические модели пожаров называют полевыми (дифференциальными) моделями.

Теоретические модели основаны на численном решении системы трехмерных

нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого теплопроводного газа, уравнения теплопроводности Фурье, уравнений диффузии, радиационного переноса и т.д. Решение уравнений полевых моделей связано с большими трудностями, связанными с количественным описанием сложных физико-химических явлений – турбулентности, химической кинетики, радиационного переноса. Хотя полевые модели пожара позволяют получить изменение плотности, температуры, концентрации в каждой точке пространства, для прикладных пожарно-технических задач такая информация избыточна и для ее получения требуются большие затраты времени.

Поэтому во многих случаях на практике успешно используются более простые, например, интегральные модели, описывающие средние объемные параметры состояния газовой среды.

От обоснованного выбора модели горения топлива зависят закономерности процессов во всех остальных элементах системы. Решение поставленной задачи позволяет прогнозировать опасные зоны поражения и обосновывать управленческие решения по ликвидации последствий аварии.

В интегральных моделях углеводородных пожаров основное внимание уделяется изучению интегральных характеристик – максимального диаметра горящего облака – DS , максимальному времени горения – T_s , высоте подъема за время сгорания – H_s . Расчетные формулы строятся из условия равенства начальной полной энтальпии горючего газа и энтальпии продуктов горения [6]:

$$H_{исх}(T_0) = \int_0^{T_0} c_p dT + Q\alpha, \quad H_{прод}(T_f) = \int_0^{T_f} c_p dT, \quad (9)$$

где T_0 – начальная температура горючей смеси, c_p – теплоемкость при постоянном давлении, Q – теплотворная способность газа, α – безразмерная концентрация горючего вещества, к которому отнесен тепловой эффект реакции.

Зависимость перечисленных характеристик от массы топлива M_0 в ОШ представляется в виде степенных функций [14]:

$$D_s = a_1 M_0^{b_1}, \quad t_s = a_2 M_0^{b_2}, \quad H_s = a_3 M_0^{b_3}. \quad (10)$$

Сравнительный анализ моделей ОШ, разработанных различными авторами, показывает, что независимо от диапазона массы топлива, сорта горючего и условий проведения экспериментов, все зависимости максимального диаметра от массы топлива имеют один и тот же показатель b_1 , близкий к $1/3$. Объясняется это тем, что углеводородные газы имеют близкие теплоты сгорания, температуры горения и, следовательно, степени расширения при горении. Таким образом, объем ОШ определяется в основном полным количеством выделяющегося тепла, пропорционального массе топлива, а диаметр ОШ пропорционален кубическому корню объема.

Наибольшее распространение для крупномасштабного горения углеводородных топлив получили формулы [15]:

$$D_s = 5,33M_0^{0,372}, t_s = 0,923M_0^{0,303}; \quad (11)$$

$$D_s = 55\sqrt[3]{M}, t_s = 3,8\sqrt[3]{M}. \quad (12)$$

Здесь M_0 – масса топлива в кг, M – в тоннах.

Формулы (11) и (12) используется в ГОСТ Р 12.3.047-2012.

В [16] предложена инженерная модель горения углеводородных газов при аварийном разрушении технологического оборудования. Модель адекватно описывает динамику изменения размеров огненного шара за счет теплоты химических реакций и излучения высокотемпературных продуктов горения. Компьютерная модель горения газов может быть использована в качестве элемента системы «источник излучения – объекты окружающего пространства» для оценки и прогнозирования чрезвычайных ситуаций при крупномасштабных авариях.

Интегральные модели основываются на интегральных законах сохранения. В этом подходе не учитывается детальное распределение параметров в ядре паровоздушного облака, а отслеживается изменение интегральных характеристик объема – массы, энергии, импульса. В результате решения этих моделей определяются эффективные плотность, масса топлива и воздуха, температура в области облака [17, 18].

В связи с тем, что основным поражающим фактором ОШ является тепловое излучение, представляет практический интерес проанализировать литературные данные по интегральным характеристикам излучения продуктов горения. Как в углеводородных, так и в ракетных топливах основным излучающим продуктом горения являются пары воды. В [19] рассмотрена упрощенная полуэмпирическая модель динамики крупномасштабных излучающих ОШ, которые образуются при взрывах ракет на стартовой позиции или в полете. Модель предназначена для оценки плотностей интегральных радиационных тепловых потоков на небольших удалениях от места взрыва с целью разработки систем аварийного спасения космонавтов и средств тепловой защиты стартовых установок.

Для расчета температуры продуктов горения в центральной части ОШ используется уравнение теплового баланса, учитывающее объемные источники излучения и теплоты экзотермической реакции горения:

$$\rho_p c_p \frac{dT_{FB}}{dt} = -\frac{3}{R} \varepsilon \sigma T_{FB}^4 + q \frac{3\rho_c V_n}{R}. \quad (13)$$

где ρ_p , c_p – плотность и удельная теплоемкость продуктов реакции при постоянном давлении, ε – полусферическая степень черноты ОШ, σ –

постоянная Стефана-Больцмана, q – теплота реакции горения, T_{FB} – температура ОШ.

$$\varepsilon = W(\sigma T_{FB}^4)^{-1}, \quad (14)$$

где W – плотность интегрального радиационного потока на границе ОШ при $r=R$, определяемая экспериментально.

Для углеводородных топлив, в продуктах горения которых присутствует углекислота, $\varepsilon \approx 0,6$ [20].

В результате обобщения экспериментальных данных отечественных и зарубежных исследований установлено: основная доля излучения ОШ приходится на приповерхностную область распределение температуры в объеме ОШ близко к равномерному, эффективная температура излучения составляет $1650 \div 1700$ К.

Таким образом, анализ теоретических и инженерных моделей горения углеводородных и ракетных топлив позволяет более достоверно обосновывать методики прогнозирования последствий пожаров в аварийных ситуациях на пожароопасных объектах.

Литература

1. Федеральный закон РФ от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Принят ГД ФС РФ от 04.07.2008 г.
2. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Закиров Г.М., Чистов Ю.С., Габидуллин А.Ф. Системный анализ пожарной опасности на химических предприятиях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров, Ю.С. Чистов, А.Ф. Габидуллин // Вестник Казанского технологического университета. - 2011. - №21. – С. 185 ÷ 193.
3. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С., Тучкова О.А. Системный подход в прогнозировании последствий опасных факторов пожара / Р.Ш. Еналеев, Теляков Э.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С., Тучкова О.А. // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - Т. 16. - № 8. - С. 322 ÷ 332.
4. Highs R.W. The Saturn fireball / R.W. High // Annals of New York Academy of Sciences. – 1968. - V. 152. - Pp. 441 ÷ 451.
5. Bader D.E., Donaldson A.B., Hardec H.C. Liquid-propellant rocket abort fire model / D.E. Bader, A.B. Donaldson, H.C. Hardec // J. Spacecraft. - 1997. - № 12 [v.8]. - Pp. 1216 ÷ 1219.
6. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович. - М.: Наука, 1980. - 478 с.
7. Законы горения. Под ред. Ю.В. Полежаева. - М.: УНПЦ «Энергомаш». - 2006. 351 с.
8. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А. / Я.Б. Зельдович, Д.А. Франк-Каменецкий // Ж. физ. химии. - 1938. - 12. - С. 100.
9. D.B. Spalding. Aircraft Engineering. - 1953. - Vol. 25. – Pp. 264 ÷ 276.
10. Зельдович Я.Б. Ж. физ. химии. - 1948. - Т. 22. - С. 27.
11. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж.П., Якуш С.Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива. Структура и динамика подъема / Г.М. Махвиладзе, Дж.П. Робертс, С.Е. Якуш // Физика горения и взрыва. - 1999. - № 3 [Т.35]. - С. 17 ÷ 19.

12. Махвиладзе Г.М., Робертс Дж.П., Якуш С.Е. Огненный шар при горении выбросов углеводородного топлива. Структура и динамика подъема. Тепловое излучение / Г.М. Махвиладзе, Дж.П. Робертс, С.Е. Якуш // Физика горения и взрыва. - 1999. - №4 [Т. 35]. - С. 12 ÷ 23.
13. Суржиков С.Т. Тепловое излучение крупномасштабных кислородно-водородных шаров. Исследование вычислительных моделей / С.Т. Суржиков // ТВТ. - 1997. - № 4 [Т. 35]. - С. 584 ÷ 593.
14. Moorhouse J., Pritchard M.J. Thermal radiation hazards from large pool fires and fireballs – a literature review / J. Moorhouse, M.J. Pritchard // Chem.Symp.Series. - 1982. - № 71. - Pp. 397 ÷ 428.
15. Маршалл В. Основные опасности химических производств / В. Маршалл. - М.: Мир, 1989. - 671 с.
16. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Хайруллин И.Р., Качалкин В.А., Закиров А.М., Закиров Г.М. Моделирование крупномасштабного горения углеводородных газов / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин, А.М. Закиров, Г.М. Закиров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. - 2008. - № 11–12. - С. 26 ÷ 36.
17. Шаталов А.А., Пчельников А.В. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанные на модели рассеяния тяжелого газа / А.А. Шаталов, А.В. Пчельников // Безопасность труда в промышленности. - 2004. - № 9. - С. 46 ÷ 52.
18. Гельфанд Б.Е., Махвиладзе Г.М., Новожилов В.Б. и др. Об оценке характеристик аварийного взрыва приповерхностного паровоздушного облака / Б.Е. Гельфанд, Г.М. Махвиладзе, В.Б. Новожилов и др. // Доклады АН СССР. - 1991. - № 5 [Т. 321]. - С. 978 ÷ 983.
19. Суржиков С.Т. Полуэмпирическая модель динамики и излучения крупномасштабных огневых шаров, образующихся при авариях ракет / С.Т. Суржиков // ТВТ. - 1997. - № 6 [Т. 35]. - С. 932 ÷ 939.
20. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. - 2-е изд. - М.: Мир, 1968. - 592 с.

© **Р. Ш. Еналеев** - к.т.н., доцент, старший научный сотрудник кафедры плазмохимии и нанотехнологии высокомолекулярных соединений КНИТУ, firepredict@yandex.ru; **Э. Ш. Теляков** - д.т.н., профессор кафедры машин и аппаратов химических производств КНИТУ, tesh1939@mail.ru; **В. С. Гасилов** - к.т.н., доцент кафедры промышленной безопасности КНИТУ; **О. А. Тучкова** - к.т.н., старший преподаватель кафедры промышленной безопасности КНИТУ, touchkova-o-a@mail.ru; **Л. И. Хайруллина** - к.с.н., доцент кафедры промышленной безопасности КНИТУ, lhda79@mail.ru.

© **R. S. Enalejev** - Ph.D., associate Professor, senior researcher of the Department of plasma chemistry and nanotechnology macromolecular compounds KNRTU; **E. Sh. Telyakov** - doctor of technical Sciences, Professor of the Department of machines and equipment of chemical plants KNRTU; **V. S. Gasilov** - Ph.D., associate Professor of industrial safety KNRTU; **O. A. Tuchkova** - Ph.D., senior lecturer of the Department of industrial safety of KNRTU; **L. I. Khayrullina** - CSN, associate Professor of industrial safety of KNRTU.