

Введение Проблема количественной оценки массового поражения людей тепловым излучением впервые возникла после первых испытаний атомного оружия. Начиная с сороковых годов прошлого столетия и до настоящего времени, в ведущих научно-исследовательских Центрах NASA накоплен огромный объем расчетно-экспериментальных данных. Для оценки последствий воздействия теплового излучения в техногенных авариях, аномальных природных явлениях, природных катастрофах, локальных военных конфликтах, террористических актах применяются различные методы, представляющие зависимости между термодинамическими и медицинскими критериями теплового поражения. Опасность поражения человека тепловым излучением в соответствии с федеральным законом №123-РФ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» проводится только для открытых участков кожного покрова при постоянной плотности теплового потока. В зарубежном стандартном методе TPP (Thermal Protective Performance) оценка ожогов II степени с вероятностью 0,5 проводится по пороговому импульсу, воздействующему как на открытые, так и защищенные участки кожного покрова. В связи с интеграцией России в Европейское сообщество (ЕС) возникает необходимость гармонизации нормативных документов в различных сферах, в том числе и в области пожарной безопасности. В данной работе сопоставление отечественных и зарубежных методов оценки теплового поражения проводится для системы «тепловой источник – пакет одежды – кожный покров». Таким образом, создание гармонизированных методов прогнозирования термических ожогов как открытых, так и защищенных участков кожного покрова для различных сценариев аварийного выброса и горения углеводородов является важной актуальной проблемой и имеет теоретическое и прикладное значение. Состояние проблемы мотивировало выбор цели исследования – научное обоснование термодинамических критериев и расчетных методов по оценке последствий радиационно-конвективного воздействия на биообъекты в аварийных ситуациях на предприятиях нефтехимической промышленности. Результаты исследований выделенной проблемы могут представлять теоретическое и прикладное значение при создании программно-вычислительных комплексов прогнозирования и моделирования чрезвычайных ситуаций на критически важных объектах. Тепловые источники Европейская система нормирования представляет собой набор европейских стандартов (EN) для проектирования пожароопасных объектов. Тепловые воздействия в EN 1999 задаются результирующим удельным тепловым потоком на обогреваемую поверхность конвекцией и излучением по законам Ньютона и Стефана-Больцмана соответственно. Для углеводородных пожаров основным поражающим фактором является тепловое излучение. В реальных ЧС изменение плотности теплового потока излучения от пламени пожаров носит, как правило, импульсный характер. На рис.1 показаны зависимости безразмерной

облученности от безразмерного времени для стандартных отечественных и зарубежных методик (1), светового излучения ядерных взрывов пожара-вспышки, взрыва тротила (2), огненного шара, факельного горения (3). В литературе предлагается два различных подхода при моделировании процессов горения газов в структуре ОШ. В одном применяется предельно упрощенная схема, основанная на эмпирических зависимостях интегральных характеристик – эффективного диаметра ОШ, времени его горения от массы аварийного выброса топлива. Расчетные формулы для постоянной плотности теплового потока используются в [1]. В другом подходе сложная внутренняя структура ОШ изучается с привлечением К-ε моделей и методов, разработанных в гидродинамике конвективных течений [2] и теории радиационного переноса [3]. В отличие от эмпирических формул для расчета постоянного эффективного диаметра ОШ, использование CFD-технологий (вычислительная газодинамика) позволяет получить распределение всех газодинамических и термодинамических параметров в процессе эволюции ОШ. Однако для оперативного анализа аварийных ситуаций в режиме on-line CFD-технологии требуют значительных затрат машинного времени.

Рис. 1 - Зависимость безразмерной облученности от безразмерного времени: 1 – стандартные методики; 2 – световое излучение ядерных взрывов, пожара-вспышки, взрыва тротила; 3 – горение углеводородов в структуре «огненного шара» (ОШ) и факельного горения. Очевидно, что необходимо развивать подходы по созданию полуэмпирических моделей динамики и излучения ОШ, которые были бы адекватны экспериментальным и реальным данным и позволяли оперативно оценивать опасные зоны воздействия поражающих факторов ОШ. При построении подобных моделей необходимо учитывать теоретические и экспериментальные результаты фундаментальных исследований. Так, в [4] теоретически обосновано, что кроме прямого влияния турбулентности на горение, имеется обратное влияние горения на турбулентность. В [5,6] экспериментально установлено, что интенсивность турбулентности, генерируемой процессом горения, превышает интенсивность турбулентности, инициируемой внешним источником. Одна из таких полуэмпирических моделей предложена в [7]. Математическая постановка задачи включает уравнение энергии в сферической системе координат, (1) где ρ , c_p , T – теплоемкость при постоянном давлении, плотность, температура газовой смеси, состоящей из горючего (углеводороды), окислителя (кислорода воздуха) и продуктов горения (углекислого газа и паров воды); r – сферическая координата; t – время; Q – теплота химической реакции; k – константа химической реакции; λ – эквивалентный коэффициент теплопроводности, определяемый из критериальных уравнений теплообмена в ограниченном пространстве, V – объемный источник излучения, C – концентрация топлива, T_b – температура горения. Уравнения неразрывности, движения и состояния в общепринятых переменных по направлению эйлеровой

координаты r для расчета скорости расширения газа имеет вид: $v = v_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^2$, (2) где v_0 – нормальная скорость горения; v – линейная скорость расширения газа. Модель (1-2) позволяет рассчитывать динамику нагрева объектов переменным потоком теплового излучения. Сравнение результатов расчета характеристик горения метано-воздушной смеси при аварийном выбросе топлива в диапазоне массы от 1 до 5 000 тонн с экспериментальными данными подтверждает адекватность разработанной вычислительной модели, реальным данным с точностью $\pm 20\%$.

Критерии поражения Основными характеристиками теплового поражения человека в техногенных авариях являются время возникновения термического ожога, количество поглощенной кожным покровом тепловой энергии, степень тяжести ожога, критическая температура основных структурных слоев кожного покрова. Для прогнозирования теплового поражения человека могут быть использованы различные характеристики термического ожога и их комбинация. В настоящее время для оценки теплового поражения биообъектов применяются четыре термодинамических критерия: пороговый импульс [8], критическая температура основного слоя кожи [9], инвариантная ко времени экспозиции критическая температура на глубине 0,36 мм от поверхности кожи [10], инвариантный ко времени экспозиции индекс поражения Ейзенберга [11].

Пороговый импульс. Впервые зависимость порогового импульса от времени облучения получена А. Stoll. В зарубежных стандартах данная зависимость используется как при статическом, так и динамическом нагреве кожи, но только при ожогах II степени с вероятностью 0,5. Для других вероятностей такие зависимости отсутствуют.

Критическая температура. Использование в качестве критерия возникновения ожогов температуры кожного покрова на различных расстояниях от поверхности впервые предложено Хенриком и Морицом. В зарубежных методиках возникновение поверхностных ожогов I и II степени определяется по изменению температуры основного слоя кожи (граница эпидермиса – дерма). Авторами по модели, учитывающей влияние кровотока и объемное поглощение теплового излучения впервые предложен инвариантный ко времени воздействия критерий критической температуры дермы на расстояниях 0,36 от поверхности кожи.

Индекс поражения Ейзенберга. На основании обработки поражающего теплового излучения ядерных взрывов Ейзенберг предложил выражение для индекса поражения $I = \frac{Q}{t}$, (3) где Q [кВт/м²] – плотность теплового потока излучения, t – время экспозиции, сек. Применение индекса поражения Ейзенберга имеет два практически важных аспекта. Во – первых, он инвариантен ко времени воздействия при заданной вероятности ожога. Во – вторых, его значение используется при прогнозировании тепловых поражений с помощью пробит-функций не только для вероятности 0,5, но и во всем диапазоне вероятностей.

Модели поражения Кинетическая модель. В зарубежных методиках за критерий теплового поражения принимается интеграл от скорости поражения кожи: $\int v dt$, (4) где v – время воздействия теплового источника

до появления ожога, – скорость поражения, – предэкспонента, – энергия активации, – газовая постоянная, – температура основного слоя кожи. В зависимости от критического значения температуры основного слоя кожи различают следующие границы возникновения термических ожогов. При значениях $P \leq 0,5$ основной слой остается без повреждений; при $0,5 < P < 1$ возникают ожоги I степени; при $P \geq 1$ – возникают ожоги II степени. Значения кинетических констант подбираются опытным путем. Аррениусовская зависимость скорости поражения от температуры позволяет критерий теплового поражения (4) условно назвать кинетической моделью для идентификации ожогов I и II степеней по критической температуре основного. Тепловая модель. В [12] для определения нестационарного профиля температуры в каждом покрове предложен метод математического моделирования процесса теплопередачи в многослойной структуре кожного покрова с учетом теплофизических свойств слоев. Экспериментальное воспроизведение ожогов осуществлялось контактом с инертным блоком с заданной постоянной температурой. Результаты моделирования показали, что ожог возникает при достижении температуры сосочкового слоя дермы критического значения 51 °C. По данным физиологов именно на этой глубине располагаются тепловые рецепторы, гибель которых приводит к возникновению ожоговой болезни. В дальнейших исследованиях [13] авторами разработана математическая модель процесса теплопередачи в структурных слоях кожного покрова, которая для постоянного и нестационарного тепловых потоков на поверхности кожи позволяет рассчитать время достижения критической температуры, скоррелированной с появлением ожога II степени. Разработанную авторами модель условно можно назвать тепловой, так как используется закон сохранения энергии: (5), где – теплоемкость, – плотность, – коэффициент теплопроводности структурных слоев кожного покрова, 1 – эпидермис, 2 – дерма, 3 – подкожная ткань; – источник генерации тепла за счет поглощения и рассеяния энергии фотонов, – съем тепла за счет кровотока. Модель (5) позволяет рассчитывать нестационарное температурное поле во всех структурных слоях кожи, в том числе и в основном слое. Вероятностная модель. В многочисленных опытах с биообъектами [11,14,15] установлено, что вероятность «эффекта» возникновения поражения приближается к нормальному закону распределения, если в качестве критерия «дозы» взят логарифм индекса облучения. Вероятность возникновения «эффекта» можно определить по таблицам или рассчитать интегрированием нормированной плотности нормального распределения стандартной случайной величины. В первом приближении за стандартную случайную величину можно принять нормированное значение логарифма индекса облучения t_0 (6) где – оценка математического ожидания индекса облучения, – оценка среднеквадратического отклонения от . Экспериментальное определение

требует большого количества параллельных опытов с биообъектами в широком диапазоне изменения индекса облучения. Поэтому специалистами используется другой подход, основанный на определении зависимости, получившей название пробит-функции (probability unit) или уравнения регрессии «доза-эффект» (7) где a и b – коэффициенты, идентифицируемые в экспериментах по воспроизведению ожогов. Очевидно, для каждой степени термического поражения значения этих коэффициентов будут отличаться. Так как пробит-функция является линейной, то для её построения требуется не менее двух экспериментальных точек с координатами «доза – эффект». Методы прогнозирования Инструментальные методы. Достоверность и большой объем экспериментальных исследований по воспроизведению ожогов II степени послужили основой создания стандартного инструментального метода оценки теплозащитных свойств материалов TPP (Thermal Protective Performance) [16,17]. Благодаря простоте аппаратного оформления, воспроизводимости результатов, реализации различных механизмов нагрева кожного покрова метод TPP получил широкое распространение не только в промышленных стандартах США для оценки теплозащитных свойств материалов специальной одежды, но и в международных стандартах, например, в [5].

Схема установки метода TPP приведена на рис. 2. Для регулирования интенсивности тепловой энергии, передаваемой излучением, используется блок из девяти кварцевых трубок с нагревательными элементами и переменным напряжением электрического питания. Для создания конвективного теплового потока используются две горелки с регулируемым расходом газа. Рис. 2 - Схема метода TPP

Источники радиационно-конвективного нагрева изолированы от образца материала водоохлаждаемой заслонкой, которая используется для точного регулирования времени экспозиции. Имитатор кожного покрова – калориметр с зачерненной поверхностью, используется для определения интенсивности излучения и измерения количества тепловой энергии, проходящей через образец ткани. Оценка теплозащитных свойств образцов ткани на установке TPP происходит следующим образом. Испытуемый образец подвергается воздействию теплового потока интенсивностью $2 \text{ кал/см}^2/\text{с}$, имитирующего излучение реального пламени, и с помощью калориметра регистрируется суммарное количество тепла, проходящее через образец ткани за период теплового воздействия, как показано на рис.2. В точке пересечения графиков критического значения тепловой энергии и энергии, вызывающей ожог II степени с вероятностью 0,5, ордината соответствует критическому значению тепловой энергии, а абсцисса – времени защитного действия, как это показано на рис. 3. Рис. 3 - Зависимость порогового импульса от времени экспозиции

Расчетные методы. Прогнозирование вероятностей как поверхностных, так и глубоких поражений основывается на причинно-следственной связи между термодинамическими и медицинскими критериями поражения. Пробит-функции позволяют нормировать

случайную величину дозы поражения в единицах стандартного отклонения для нормального закона распределения вероятностей. Известные пробит-функции для различных степеней теплового поражения приведены в табл. 1. Таблица 1 - Пробит-функции для различных степеней поражения Мед. критерий

Вероятностный критерий Pr Источник данных Болевой порог $-8,93 + 2,99 \ln I$ [8, 18] Ожоги I ст. $-9,34 + 2,99 \ln I$ II $-11,58 + 2,99 \ln I$ III $-16 + 2,99 \ln I$ [19,20]

Летальный исход $-14,9 + 2,56 \ln I$ [11] $-12,8 + 2,56 \ln I$ [21] Функции 1-4 в табл. 1 обоснованы авторами с использованием зарубежных экспериментальных данных. Функция 5 предложена Ейзенбергом [11] для оценки летального исхода и включена в ГОСТ МЧС [22], а функция 6 [21] – в Руководство МЧС [16].

Прогнозирование санитарных и безвозвратных потерь основывается на теореме теории вероятности, согласно которой сумма вероятностей несовместных событий, образующих полную группу, равна единице. В качестве полной группы принимаются отсутствие ожогов, болевой порог, ожоги I – III степеней, летальный исход. Такая информация необходима для медиков при обосновании объема и тактики лечения пострадавших. Результатом работы прогнозирующей программы является визуальное, графическое или табличное представление сопряженных полей логарифма индекса облучения на различных расстояниях от источника пожара, дающих спектр теплового поражения различной вероятности. Под спектром поражения понимается распределение вероятностей поражения каждой степени санитарных потерь в зависимости от расстояния до источника облучения. Общее количество потерь рассчитывается суммированием санитарных потерь каждой степени поражения по всем пространственным зонам. Расчет производится на основании теорем теории вероятности для несовместных событий. Из анализа результатов моделирования теплового поражения человека можно сделать три практически важных вывода: · четкая граница разделения пространства вокруг аварийного источника пожара по различным степеням теплового поражения человека, как это часто представляется в литературе и нормативных документах, – отсутствует; · прогнозирование только общего количества безвозвратных и санитарных потерь, используемое в основных нормативных документах не представляет полную информацию о количестве санитарных потерь различной степени тяжести, необходимую для оказания безотлагательной помощи пострадавшим; · число интервалов зон поражения должно быть достаточным для обеспечения заданной точности изменений вероятностей возникновения каждой степени термического ожога. Для подтверждения возможности применения разработанного автоматизированного метода прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь в практике оценки пожарного риска на предприятиях химической и нефтехимической отраслей промышленности приведено сравнение полученных результатов с данными последствий воздействия теплового излучения реальных пожаров в техногенных авариях [1]. Результаты

сопоставления показывают, что для массы пропана 250 тонн расхождение данных В.Маршалла с данными авторов составляет приблизительно 20%, что следует признать удовлетворительным. Расчетно-экспериментальные методы. Авторами предлагается дальнейшее развитие метода TPR в части использования датчика теплового потока (ДТП), как правило, это медный калориметр для измерения среднего индекса поражения под одеждой или в открытом пространстве. Методика прогнозирования основывается на компьютерной программе обработки результатов лабораторного, реального или вычислительного эксперимента по воздействию на кожу человека поражающих факторов пожара в аварийных ситуациях на промышленных объектах. В отличие от стандартного международного метода TPR применение среднего индекса поражения в пробит-функциях позволяет прогнозировать не только ожоги II степени с вероятностью 0,5, но и другие степени поражения во всем диапазоне вероятностей. Полученные результаты исследований могут использоваться в модификации общепринятых пробит-функций для постоянной плотности теплового потока в части корреляции индекса облучения при динамических условиях нагрева. Алгоритм прогнозирования включает пять этапов (8-12). (8) (9) (10) (11) (12) (13) В формулах (8)–(13) – толщина калориметра, м; – удельная теплоемкость медного калориметра; – плотность меди; – приращение тепловой энергии; – интервал времени аппроксимации температуры; – интервальный индекс; – интегральный индекс; – эмпирические коэффициенты; – пробит-функция; – вероятность. Имитатор кожи фиксирует количество облучения по экспериментальной зависимости температуры имитатора во времени (8). Индекс облучения, как показано на рис.4, рассчитывается суммированием индексов линейных участков с постоянной плотностью теплового потока. Рис. 4 - Динамика нагрева калориметра под пакетом одежды: 1-Q=10 кал/см², 2-Q=15 кал/см² Далее проводится линейная интервальная аппроксимация экспериментальной зависимости, определяется интервальная постоянная плотность теплового потока (9), интервальный динамический индекс (10) и суммарное его значение за время экспозиции (11) и пробит для расчета вероятности (12). Далее по интегралу вероятностей (13) рассчитывается вероятность возникновения ожога. Практическая значимость полученного результата состоит в возможности прогнозирования термических поражений различных степеней тяжести как открытой, так и защищенной одеждой кожи в аварийных ситуациях. Расчет вероятностей ожогов для двух уровней количества облучения трехслойного пакета 10 и 15 кал/см² составил соответственно 0,01 и 0,1. Опыты с биообъектами показали хорошую сходимость с расчетным методом [25]. Предлагаемый расчетно-экспериментальный метод прогнозирования теплового поражения человека, защищенного одеждой, при интенсивном нагреве имеет важное практическое значение в оценке зон поражения человека в чрезвычайных ситуациях.