

0-786841

На правах рукописи

ЗАКИРОВ АНАС МАЗИТОВИЧ



**КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ
ЧЕЛОВЕКА ТЕПЛОВОМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ ПОЖАРАХ
НА ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(в химической отрасли промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Казань – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Казанский государственный технологический университет»

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Теляков Эдуард Шархиевич
- Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Ляпин Николай Михайлович;
кандидат физико-математических наук,
доцент Колесников Евгений Юрьевич
- Ведущая организация – ГУП «Казанский химический научно-исследовательский институт»

Защита состоится 13 апреля 2011 г. в 15³⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.080.02 при ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, КГТУ, корпус А, ауд. 330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Электронный вариант автореферата размещен на сайте Казанского государственного технологического университета (www.kstu.ru).

Автореферат разослан «11» марта 2011 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000584072

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.С. Сироткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На современных химических и нефтехимических предприятиях обращаются огромные количества энергонасыщенных веществ. 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 (Федеральный закон №123 ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», далее – «ФЗ-123»), должна базироваться на научно обоснованных методиках количественной оценки риска пожарной опасности, устанавливающих соответствие реальных рисков законодательно установленному предельному значению.

Задача оценки пожарных рисков является неотъемлемой частью процесса проектирования опасных производственных объектов, составления деклараций и паспортов безопасности, планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций, разработки инженерно-технических мероприятий по защите персонала и населения от возможных аварий и в ряде других случаев. В соответствии с регламентом РД 03-418-01 (2001), при анализе последствий аварий необходимо использовать модели протекания аварийных процессов, а также обоснованные критерии поражения людей и разрушения изучаемых объектов. Одним из основных опасных факторов на пожароопасных объектах является тепловое воздействие от пожаров-вспышек, огненных шаров, пожаров пролива горючих жидкостей, факельного горения истекающих из оборудования газов и паров. Основным механизмом теплопередачи от высокотемпературных источников к поражаемому объектам является при этом тепловое излучение.

При тепловом поражении людей возникает необходимость оказания безотлагательной догоспитальной помощи пострадавшим путем оперативного проведения организационно-технических мероприятий в условиях острого дефицита времени. Эффективность оказания помощи в конкретной чрезвычайной ситуации зависит от оперативности получения информации из Ситуационных Центров о количестве пострадавших и степени их поражения. Оперативность может быть достигнута за счет использования информационно-математических моделей. Создание таких моделей является сложной научно-технической проблемой, в решении которой необходима концентрация усилий специалистов в различных областях знаний: тепломассообмена, химической физики, светотехники, медицины, управления.

Однако, как отмечает главный редактор научного журнала «Проблемы анализа риска» А.А. Быков, *«...методический аппарат оценки риска весьма далёк от совершенства. Применение методических рекомендаций может приводить к результатам, искаженным на порядки величин в ту или иную сторону»*. В этом же сообщении отмечается необходимость *«...сопоставить принятые в нашей стране подходы с используемыми в мире»*.

Состояние анализируемой проблемы и мотивировало выбор цели и задач настоящего исследования.

Целью работы является научное обоснование и гармонизация отечественных и зарубежных расчетных методик по анализу пожарного риска в части количественной оценки последствий воздействия теплового излучения на биообъекты для прогнозирования последствий аварийных ситуаций на предприятиях химической и нефтехимической промышленности.

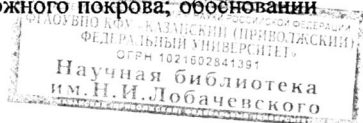
В задачи исследования входило:

1. Обоснование пробит-функций для прогнозирования термических ожогов различной степени тяжести.
2. Построение математической модели процесса теплопередачи в структурных слоях кожного покрова и разработка алгоритма идентификации модели по опытным данным.
3. На основе численного эксперимента обоснование нового температурного критерия вероятностного характера, определяющего условия возникновения термических ожогов.
4. Повышение достоверности результатов проектных работ за счет гармонизации отечественных и зарубежных методов оценки опасности поражения человека тепловым излучением.
5. Повышение эффективности выполнения проектных работ за счет применения автоматизированных вычислительных методов прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь.

Научная новизна проведенных исследований состоит в следующем:

1. Проведена гармонизация отечественных и зарубежных расчетных методов оценки поражающего воздействия теплового излучения с применением критериев порогового импульса и критической температуры.
2. Обоснованы новые пробит-функции для прогнозирования порога болевого ощущения, ожогов I и III степеней с использованием зарубежных данных по тепловому поражению человека излучением с вероятностью 0,5.
3. Разработана новая вычислительная модель процесса теплопередачи в структурных слоях кожного покрова человека, учитывающая оптические свойства кожи и скорость оттока тепла за счет кровообращения.
4. Обоснован новый инвариантный к скорости нагрева критерий критической температуры в слое кожного покрова, расположенном на глубине 0,36 мм от поверхности, определяющий условия возникновения ожогов II степени для различной вероятности поражения.
5. Предложен автоматизированный вычислительный метод прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь при воздействии теплового излучения пожаров на химических и нефтехимических предприятиях.

Личный вклад автора состоит в сравнительном анализе и гармонизации отечественных и зарубежных методов количественной оценки опасности поражения человека тепловым излучением; идентификации параметров вычислительной модели и проведении вычислительного эксперимента по определению глубины термического поражения кожного покрова; обосновании



пробит-функций для различных степеней термического поражения; разработке алгоритма автоматизированного расчета безвозвратных и санитарных потерь.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- результаты гармонизации отечественных и зарубежных методов количественной оценки последствий воздействия теплового излучения на человека;
- инвариантный к скорости нагрева критерий критической температуры кожи в слое, расположенном на глубине 0,36 мм от наружной поверхности кожи;
- пробит-функции для порога болевого ощущения, ожогов I и III степеней для расчета вероятности возникновения термических ожогов;
- автоматизированный метод прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь при воздействии теплового излучения пожаров.

Практическая значимость полученных результатов заключается:

- в применении программно-вычислительного комплекса прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь при различных сценариях аварийного выброса и горения углеводородного топлива,
- в повышении достоверности результатов проектных работ за счет применения гармонизированных отечественных и зарубежных методов прогнозирования санитарных потерь при поражении человека тепловым излучением;
- в повышении эффективности проектирования опасных производственных объектов в части анализа пожарного риска, разработки деклараций и паспортов промышленной безопасности, а также эффективности организационно-технических мероприятий по предотвращению и снижению тяжести последствий аварий в химической и нефтехимической отраслях промышленности.

Реализация и внедрение результатов работы. Программный продукт «Автоматизированный вычислительный комплекс по прогнозированию безвозвратных и санитарных потерь при воздействии теплового излучения пожаров», разработанный в диссертации, используется проектным институтом «Союзхимпромпроект» ГОУ ВПО КГТУ и ООО «Эксперт Бюро» при разработке Деклараций промышленной и пожарной безопасности и в расчетной части специальных разделов проектов ряда опасных производственных объектов, что подтверждено соответствующими документами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Современные проблемы специальной технической химии» (Казань, 2007); на 7-й Международной конференции «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф» (Томск, 2008); на XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Псков, 2009); на Международной конференции «Химическая и радиационная физика» (М.: Президиум РАН, 2009); на II конференции по фильтрационному горению (Черноголовка, Институт проблем химической физики РАН) и на ежегодных научных сессиях ГОУ ВПО

«Казанский государственный технологический университет» (Казань, 2008 – 2011 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 11 публикациях, в том числе в 5 статьях, опубликованных в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в тезисах материалов 6 Российских и международных научных конференций. В названных публикациях полностью отражены основные положения диссертации.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 105 страниц машинописного текста, включая 26 рисунков, 14 таблиц и список использованной литературы из 64 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выделена актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость работы, обоснованы основные результаты работы, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

Проблема количественной оценки массового поражения людей тепловым излучением впервые возникла после первого применения атомного оружия в городах Хиросима и Нагасаки. Начиная с сороковых годов прошлого столетия и до настоящего времени, в ведущих научно-исследовательских Центрах NASA – US Naval Air Department Development Center (Исследовательском центре морской авиации), Aerospace Medicine Research Center (Центре медицинских аэрокосмических исследований), University of Rochester (Университете Рочестера), NASA-George Marshall Space Flight Center (Центре космических полетов им. Г. Маршалла) накоплен огромный объем расчетно-экспериментальных данных по пороговым дозам облучения и критической температуре основного слоя кожного покрова биообъекта при воспроизведении термических ожогов различной степени тяжести.

Результаты обработки этих экспериментальных исследований послужили основой для создания стандартных методов оценки поражения биообъекта тепловым излучением. Так, в американском (ASTM Standart D4108) и международном (ISO Standart 17492) стандартах используется зависимость между количеством облучения и временем его воздействия при воспроизведении ожога II степени только для одного значения вероятности $P = 0,5$. В тех же стандартах в качестве качественного критерия возникновения термических ожогов различной степени тяжести используется интеграл от скорости поражения, зависящий от температуры на границе эпидермис – дерма. Однако в отечественных нормативных документах экспериментально обоснованным зарубежным разработкам не уделяется должного внимания.

В отечественном стандарте (ГОСТ Р 12.3.047–98, далее – «ГОСТ») в качестве зависимости доза – эффект применяется пробит-функция Эйзенберга, в которой в качестве дозы, вызывающей летальный исход с заданной вероятностью, используется логарифм индекса облучения. В отечественных

регламентирующих документах (Сборник методических документов, применяемых для независимой оценки рисков в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. – М., 2008, ч. I, далее – «Сборник») приводятся пробит-функции для прогнозирования ожогов I и II степеней с различной вероятностью. Но результаты расчетов по этим функциям существенно отличаются от экспериментальных и расчетных данных зарубежных стандартов.

В связи с изложенным, большое теоретическое и практическое значение приобретают задачи обоснования пробит-функций, гармонизированных с зарубежными стандартными методами оценки теплового поражения биообъектов, и разработки автоматизированных методов прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь.

ГЛАВА I. ГАРМОНИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПО КРИТЕРИЮ ПОРОГОВОГО ИМПУЛЬСА ОБЛУЧЕНИЯ

В отечественных стандартах общепринятым методом количественной оценки поражения человека от воздействия самых различных опасных факторов (ударная волна, отравляющие вещества, различные виды излучения и т.д.) является корреляционная связь между «дозой» и «эффектом». В качестве дозы используется интенсивность воздействия поражающего фактора воздействия или логарифм интенсивности, а в качестве эффекта – конкретная физиологическая реакция организма различной степени (отравление, шок, термический ожог, летальный исход).

В большинстве случаев наблюдается нормальный закон распределения вероятностей возникновения эффекта от случайной величины дозы. Обычно количественное выражение для дозы подбирается таким образом, чтобы получить линейную зависимость между единицами стандартного отклонения дозы t_0 (нормированное значение) и логарифмом дозы ($\ln D$):

$$t_0 = a + b \ln D, \quad (1)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты.

При обработке экспериментальных данных иногда возникает необходимость использовать логарифм от t_0 . Чтобы эта величина имела положительное значение, вводится понятие пробита (probability unit), который определен как $Pr = t_0 + 5$. Зависимость вероятности от пробитов представляется в специальных таблицах.

Впервые количественная зависимость между вероятностью возникновения ожогов различной тяжести и логарифмом индекса тепловой энергии для летального исхода была получена Эйзенбергом. В зарубежных стандартах, например, в инструментальном методе TPP (Thermal Protective Performance), в качестве критерия возникновения ожогов используется пороговый импульс облучения, вызывающий ожог II степени с вероятностью 0,5. Как видно из рис. 1, значение порогового импульса, вызывающего ожог II степени с вероятностью 0,5, зависит от времени облучения.

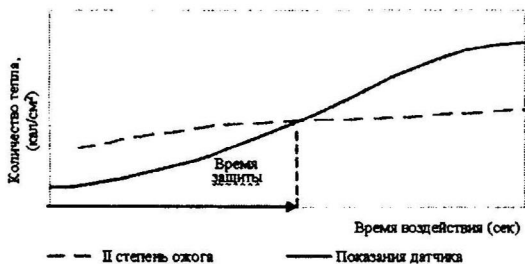


Рис. 1. Измерение критического значения тепловой энергии в методе ТРР

Результаты экспериментальных исследований ожогов методом ТРР зарубежными специалистами обрабатываются в виде линейных зависимостей $\ln \tau - \ln q$, как это показано на рис. 2.

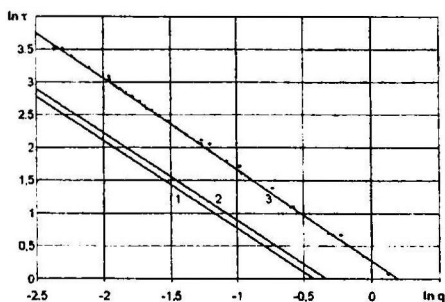


Рис. 2. Зоны теплового поражения кожи: 1 – порог болевого ощущения, 2 – ожог I степени, 3 – ожог II степени

Если для ожога II степени аппроксимировать линейную зависимость времени воздействия теплового потока от его постоянной плотности в логарифмических координатах формулой

$$\ln \tau = a + b \ln q, \quad (2)$$

то, минимизируя критерий адекватности методом наименьших квадратов, можно определить значения постоянных коэффициентов. Их значения равны соответственно:

$$a = 0,3189; b = -1,336 \approx 4/3. \quad (3)$$

Если обозначить $a = \ln I$, то из (2) следует:

$$I = q^{4/3} \tau, \quad (4)$$

где I – индекс облучения, впервые предложенный Эйзенбергом.

После логарифмирования (4) получается зависимость

$$\ln \tau = \ln I - 4/3 \ln q. \quad (5)$$

Зависимости (2) и (5) идентичны. Из их сравнения получается, что для появления ожога II степени с вероятностью 0,5 индекс облучения должен быть равен:

$$I = 1,3757 (\text{кал/см}^2)^{4/3} \cdot \text{с}, \text{ или } I = 200 (\text{кВт/м}^2)^{4/3} \cdot \text{с}. \quad (6)$$

Пробит-функция для ожога II степени для нормального распределения случайной величины логарифма индекса облучения обоснована в работах Еналеева, Телякова и Хайруллина

$$t_0 = -16,4 + 2,99 \ln I_0, \quad (7)$$

где t_0 – нормированное значение логарифма индекса облучения, I_0 – индекс облучения у поверхности биообъекта.

Для вероятности 0,5 ($Pr = 5$) получено

$$I_0 = 240 \text{ (кВт/м}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{с.} \quad (8)$$

Сравнивая (6) и (7), различие в I и I_0 можно объяснить тем, что в I входит значение поглощенной энергии теплового потока, а в I_0 – падающего потока, Очевидно:

$$I = \varepsilon I_0, \quad q = \varepsilon q_0, \quad (9)$$

где ε – степень черноты кожного покрова, которая зависит от спектра источника теплового излучения.

Степень черноты, отражательная и пропускательная способности особенно важны при определении степени и глубины прогрева кожи после воздействия энергии в интервале различных длин волн. Источниками энергии могут быть атомный взрыв, инфракрасные и вольфрамовые лампы накаливания, дуговые лампы с угольными электродами, газоразрядные лампы, открытый огонь при крупномасштабном горении углеводородного и ракетного топлива.

Очевидно, для каждого источника и биообъекта необходимо рассчитывать интегральную степень черноты кожи в диапазоне волн излучения источника. Экспериментально установлено, что степень черноты кожи человека в видимой части спектра равна 0,5, в инфракрасной – 0,99. Интегральная степень черноты кожи молочных поросят, наиболее близких по своим свойствам к коже человека, равна 0,61.

При расчете ε в формулах (9) необходимо учитывать, что значение I_0 , входящее в пробит-функции, получено при обработке данных атомных взрывов. Григорьевым (Импульсный нагрев излучением, М.: Наука, 1974) приводятся сравнительные спектры излучения абсолютно черного тела при температуре 6000 °С, светового излучения ядерных взрывов и газоразрядных ксеноновых ламп. Они практически идентичны и распределение энергии излучения в диапазоне длин волн УФ света составляет 9÷10%, видимой части спектра – 30÷40%, ИК области – 50÷60%. Оценка интегральной степени черноты кожи для этих источников лежит в диапазоне 0,8÷0,86.

Если принять среднее значение $\varepsilon = 0,83$, то индексы поглощенного кожей облучения для вероятности возникновения ожогов 0,5, полученные экспериментально методом ТРР (рис. 2) и расчетом по пробит-функции (7), совпадают. Тогда для поглощенной энергии теплового потока излучения

$$t_0 = -15,84 + \ln I, \quad \text{или} \quad Pr = -10,84 + \ln [(\varepsilon q_0)^{4/3} \tau]. \quad (10)$$

Следовательно, зарубежный экспериментальный метод ТРР и расчетный метод пробит-функции отечественных авторов дают одинаковую количественную оценку ожога II степени с вероятностью 0,5 для поглощенного потока теплового излучения.

Практическое значение пробит-функции (10) состоит в возможности проводить гармонизацию отечественных и зарубежных данных не только для воспроизведения ожогов с вероятностью 0,5, но и гармонизацию теоретических моделей и температурных критериев возникновения ожогов для различных вероятностей.

ГЛАВА II. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СТРУКТУРНЫХ СЛОЯХ КОЖНОГО ПОКРОВА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Первая теоретическая модель для оценки теплового поражения по критерию критической температуры на определенной глубине от поверхности кожи впервые была предложена Хенриком и Морицом (F.C. Henriques, A. R. Moritz, Studies of thermal injury // Am. J. Path. – 1947. – V.23). При этом кожа рассматривается как трехслойная система из эпидермиса (0,08 мм), дермы (2 мм) и подкожной ткани, а интеграл от скорости поражения кожи принимается за критерий теплового поражения

$$P = \int_0^{\tau_{\text{сп}}} \frac{d\Omega}{dt} dt = \int_0^{\tau_{\text{сп}}} A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dt, \quad (11)$$

где $\frac{d\Omega}{dt}$ – скорость поражения; T – температура кожи на границе «эпидермис – дерма» или на другой глубине от поверхности; A – предэкспонент (частотный фактор); E – энергия активации; R – газовая постоянная; $\tau_{\text{сп}}$ – время воздействия теплового источника до появления ожога. При значениях $P \leq 0,5$ основной слой остается без повреждений, при $0,5 \leq P \leq 1$ – возникают ожоги I степени. Если $P > 1$, возникают ожоги II степени. Значения констант зависят от механизма нагрева структурного слоя кожи и диапазона температур нагрева.

Аррениусовская зависимость скорости поражения от температуры позволяет критерий теплового поражения (11) назвать кинетической моделью для определения критической температуры на границе «эпидермис – дерма» при известной (заданной) вероятности появления ожога II степени.

Для расчета температурного профиля во всех структурных слоях кожи Пеннес (1946) впервые предложил модель на основе классического закона Фурье:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T - (c\rho)_b W_a (T - T_0) + q_{\text{met}} + q_{\text{ext}}, \quad (12)$$

где c , ρ , λ – соответственно теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности структурных слоев кожи; $(c\rho)_b$ – объемная теплоемкость крови; W_a – скорость кровотока в артериях; q_{met} – генерация тепла метаболизмом; q_{ext} – внешние источники нагрева.

С целью обоснования критерия критической температуры на определенной глубине в дерме авторами проведена модификация уравнения (12) с использованием согласованных расчетно-экспериментальных данных методов ТРР и пробит-функции для ожога II степени.

Из-за сложности количественного описания конвективного теплообмена между кровотоком и структурными слоями кожи предлагается подход, учитывающий отсутствие кровотока в эпидермисе и изменение коэффициента теплопроводности с повышением температуры подкожной ткани при импульсном нагреве.

Тогда, используя методы оптимизации, можно управлять значением коэффициента теплопроводности дермы таким образом, чтобы значения критической температуры на определенной глубине изменялось не более чем на $\pm 0,05$ °С при различных скоростях нагрева. При этом алгоритм управления базируется на логарифмической зависимости коэффициента теплопроводности от скорости нагрева.

Модифицированное уравнение (12) записывается в виде:

$$(c, \rho) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) + qke^{-kx}, \text{ где } i = \overline{1,3}; \quad (13)$$

$$i = 1 - \text{эпидермис, } i = 2 - \text{дерма, } i = 3 - \text{подкожная ткань;}$$

$$\lambda = \lambda_1, \quad c = c_1, \quad \rho = \rho_1, \quad i = 1;$$

$$\lambda = \lambda_2 - \lambda_{id}, \quad c = c_2, \quad \rho = \rho_2, \quad i = 2; \quad (14)$$

$$\lambda = \lambda_3, \quad c = c_3, \quad \rho = \rho_3, \quad i = 3.$$

Начальные и граничные условия:

$$\tau = 0, \quad T(x, 0) = T_0 = 32,5 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (15)$$

$$x = 0, \quad \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (16)$$

$$x = x_3, \quad \frac{\partial T(x_3, \tau)}{\partial x_3} = 0. \quad (17)$$

В (14) все теплофизические свойства структурных слоев кожи взяты из зарубежных литературных данных, кроме коэффициента теплопроводности λ_{id} , идентифицируемого в алгоритме управления.

При решении краевой задачи (13 – 17) возможны два подхода (Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Наука, 1967). В первом подходе решение ищется для однородного тела с переменными коэффициентами переноса. Во втором – рассматривается сопряженная задача для многослойной системы при граничных условиях IV рода. В данной работе для кожного покрова с условными границами и незначительными отличиями теплофизических свойств отдельных слоев используется первый подход.

Кроме того, известны два метода решения – аналитический и численный, которые при использовании современных вычислительных средств являются приближенными. Аналитическим методом решается относительно ограниченный класс нелинейных задач математической физики. Поэтому доминирующее распространение получили численные методы (Самарский А.А. Вычислительная теплопередача, 2009). В диссертационной работе нелинейная краевая задача (13 – 17) решается методом конечных разностей.

ГЛАВА III. ГАРМОНИЗАЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОРАЖЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЖНОГО ПОКРОВА

В третьей главе представлены результаты вычислительного эксперимента по расчету температурного поля в структурных слоях кожи при задании на поверхности пороговых значений плотности теплового потока излучения и времени его воздействия.

Гармонизация отечественных и зарубежных методов проводится по максимальной температуре и динамике её изменения в основном слое кожного покрова для ожогов II степени с вероятностью 0,5 при индексе поглощенного облучения $200 \text{ (кВт/м}^2 \cdot \text{с)}$.

Для других значений вероятностей наступления ожога II степени значения температуры основного слоя кожи в литературе отсутствуют. Поэтому авторами на основании пробит-функции для ожога II степени выбраны индексы облучения для различных вероятностей ожога в диапазоне от 0,05 до 0,95. Для этих индексов при различном времени облучения рассчитаны температурные поля в кожном покрове.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты вычислительного эксперимента по расчету температурного поля кожного покрова для трех значений вероятности: 0,05, 0,5 и 0,95.

На каждом рисунке представлены четыре графика при различных временах облучения, соответствующих данным зарубежных публикаций. Интенсивность облучения поверхности кожи рассчитывалась по известным времени и индексу облучения.

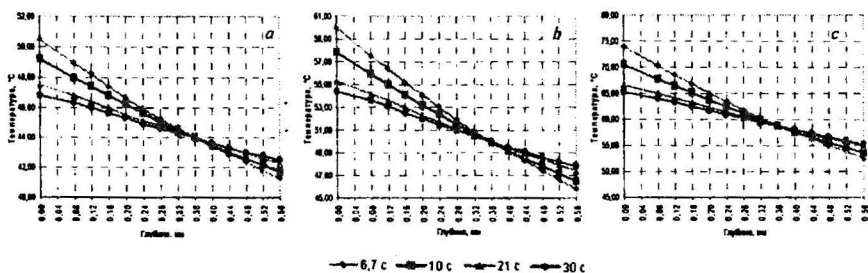


Рис. 3. Температурное поле кожи при ожоге II степени с вероятностью и индексом облучения: а – $P = 0,05$, $I = 115,5$; б – $P = 0,5$, $I = 200$; с – $P = 0,95$, $I = 346$

Как видно из рис. 3, независимо от времени нагрева на глубине кожи, отстоящей на 0,36 мм от поверхности, температура слоя принимает одинаковые значения с отклонением не более чем на $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$. Аналогичная картина наблюдается для вероятностей 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,6, 0,7, 0,8 и 0,9. Следовательно, при равных индексах облучения температуры слоя кожи на глубине 0,36 мм от поверхности также получаются одинаковыми при различных временах нагрева. Поэтому значения этой температуры может быть принято в качестве инвариантного к скорости нагрева температурного критерия возникновения ожогов различной вероятности (далее инвариантная критическая температура).

Сравнение результатов расчета по тепловой, кинетической моделям и методом ТРР по температуре основного слоя кожи (на границе «эпидермис – дерма») показано в табл. 1. Сравнительные данные приведены для различных пороговых значений плотности теплового потока и времени излучения на поверхности. Для условий облучения кожи, представленных в табл. 1, индекс облучения сохраняет постоянное значение.

Табл. 1. Сопоставление тепловой и кинетической моделей расчета

Интенсивность облучения, кал/(см ² ·с)	Время нагрева, с	Температура основного слоя, °С	
		Кинетическая модель	Тепловая модель
0,305	6,7	57,7	57,54
0,226	10	55,75	55,93
0,13	21	54,2	54,18
0,1	30	53,4	53,56

Как видно из табличных данных, значения температуры, рассчитанные по кинетической и тепловой моделям, практически совпадают. Это еще раз подтверждает идентичность результатов по воспроизведению термических ожогов II степени с вероятностью 0,5, полученных независимыми методами ТРР и пробит-функции.

Следует отметить, что рассчитанные по кинетическим моделям значения температуры совпадают с экспериментальными данными, полученными на биообъектах и имитаторе кожи. Значит, и рассчитанные по тепловой модели температуры также согласуются с экспериментом, что свидетельствует об адекватности разработанной модели реальным данным.

В зарубежных публикациях приводятся расчётные и экспериментально измеренные на имитаторах кожи значения температуры основного слоя в процессе её нагрева и охлаждения.

Для гармонизации отечественных и зарубежных данных по динамике изменения температуры кожи для ожогов II степени при вероятности 0,5 проведены расчеты по тепловой модели (рис. 4).

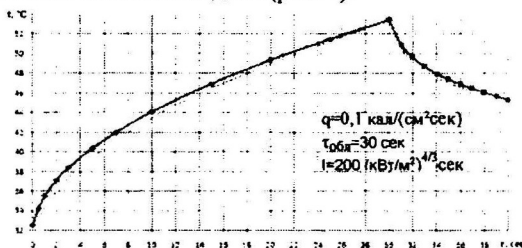


Рис. 4. Изменение температуры основного слоя кожи в процессе нагрева облучением и прекращением его воздействия:

———— тепловая модель; - - - - - экспериментальные (зарубежные) данные

Представляло теоретическое и прикладное значение использование предлагаемого инвариантного температурного критерия для прогнозирования ожогов различной вероятности. Для реализации этой возможности проводится сравнение интегральной функции распределения случайной величины (функции Лапласа $\Phi(Pr)$) и распределения инвариантной критической температуры. Сравнение представлено на рис. 5 и проводится при минимуме функционала качества J:

$$J = \int_{2,5}^7 [t(Pr) - \Phi(Pr)]^2 dPr, \quad (18)$$

где 2,5 и 7 – минимальное и максимальное значения пробитов, соответствующие нормированному отклонению случайной величины в пределах $\pm 2,5$ единиц стандартного отклонения; $t(Pr)$ – инвариантная критическая температура, определяемая из решения тепловой модели; $\Phi(Pr)$ – функция Лапласа.

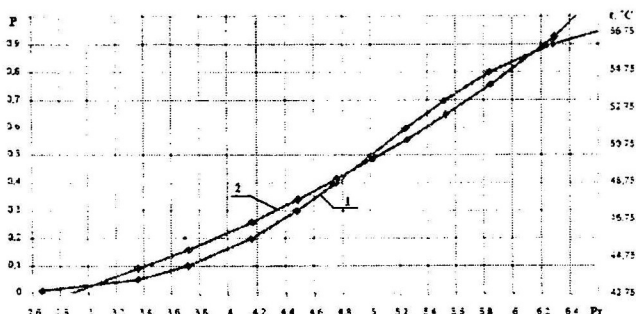


Рис. 5. Функции распределения вероятностей P (1) случайной величины индекса облучения и инвариантной критической температуры t (2) при воспроизведении термических ожогов II степени

Как видно из рис. 5, максимальная разница прогнозируемых вероятностей термических ожогов по пробит анализу и инвариантной критической температуре не превышает 6%.

Гармонизированные отечественные и зарубежные методы оценки теплового поражения с использованием пробит-функции для ожога II степени позволяют предложить новый подход для построения новых пробит-функций, определяющих и другие медицинские критерии возникновения ожогов. Коэффициенты пробит-функции определяются на основании гармонизированных данных для ожогов II степени при вероятности 0,5 и зарубежных экспериментальных данных (рис. 2). На основании предлагаемого подхода авторами в табл. 2 приведены пробит-функции для различных медицинских критериев возникновения ожогов. Практическое значение построенных пробит-функций заключается в возможности оценки не только безвозвратных потерь по методике ГОСТа, но и дифференцировать санитарные потери по степени их тяжести.

Табл. 2. Пробит-функции для различных степеней поражения

Степень поражения	Пробит-функции
III	$Pr = -12,6 + 2,99 \ln I$
II	$Pr = -11,4 + 2,99 \ln I$
I	$Pr = -9,16 + 2,99 \ln I$
Болевой порог	$Pr = -8,74 + 2,99 \ln I$

Реализация такой возможности с использованием информационных технологий позволяет разработать алгоритм автоматизированного вычислительного метода для прогнозирования санитарных потерь в аварийных ситуациях при пожарах на химических и нефтехимических предприятиях.

Таким образом, согласованные экспериментальные и теоретические данные, полученные различными отечественными и зарубежными методами, позволяют совершенствовать существующие и разрабатывать новые количественные методы оценки опасности теплового поражения человека тепловым излучением.

ГЛАВА IV. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗВОЗВРАТНЫХ И САНИТАРНЫХ ПОТЕРЬ ПРИ ПОЖАРАХ НА ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В соответствии с ФЗ-123, последовательность оценки пожарного риска на производственном объекте включает две процедуры: анализ пожарной опасности производственного объекта и оценку пожарного риска на этом объекте. Вторая процедура состоит из 4 основных этапов:

- анализ информации о состоянии производственного объекта, гидрометеорологической обстановке на объекте на момент аварии, географических особенностях местности;
- построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- оценка последствий воздействия опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- вычисление пожарного риска.

В данной работе для научной разработки в качестве основополагающего выбран второй этап оценки пожарного риска.

Как было установлено, пробит-функция для ожога II степени адекватна не только экспериментальным данным при вероятности 0,5, но и расчетным данным по кинетическим моделям зарубежных стандартов во всем диапазоне изменения критических температур и, самое главное, вероятностей возникновения ожога.

Тогда, как показано на рис. 6, для нормального закона распределения вероятностей и принятии единого механизма теплового поражения различных слоев кожного покрова в зависимости от температуры кожи все пробит-функции в полулогарифмической системе координат имеют одинаковый угловой коэффициент.

Определение границы области санитарных потерь из сравнительного соотношения с областью безвозвратных потерь является оценкой приближенной. Поэтому для количественной оценки границ областей потерь авторами предлагается применить принцип теории вероятностей (ТВ) о невозможности маловероятных событий. В инженерной практике этот принцип широко используется в виде «правила трех сигм (3σ)». Применительно к оценке границ теплового поражения это правило означает, например, что вероятность

проявления болевого ощущения от воздействия теплового излучения на внешней границе зоны санитарных потерь составляет 0,0013.

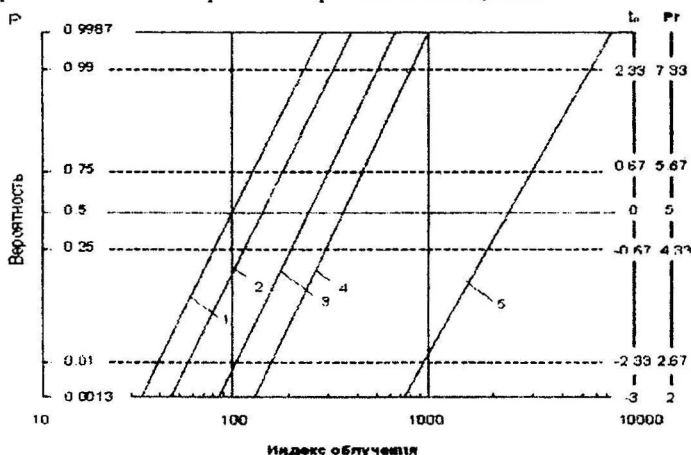


Рис. 6. Пробит-функции P_r и вероятности P для различных степеней поражения: 1 – болевой порог; 2 – ожог I степени; 3 – ожог II степени; 4 – ожог III степени; 5 – летальный исход

Для степени поражения «болевого порог» индекс при этой вероятности равен 36,5, что соответствует интенсивности излучения $0,93 \text{ кВт/м}^2$ при времени экспозиции 40 с. Другими словами при таких параметрах облучения непереносимую боль почувствуют менее 1% облучаемых. Данные параметры облучения предлагаются в данной работе за безопасную границу пространства воздействия теплового излучения.

Прогнозирование санитарных потерь основывается на теореме ТВ, 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.

Для количественной оценки безвозвратных и санитарных потерь можно воспользоваться интегральной теоремой Лапласа

$$P(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (20)$$

Здесь x_1 – отклонение в стандартных единицах или пробитах одного несовместного события, x_2 – другого. Если x_1 – летальный исход, а x_2 – болевой порог, то можно прогнозировать вероятность безвозвратных и санитарных потерь. Если x_1 – I степень поражения, а x_2 – болевой порог, то можно прогнозировать вероятность легких степеней поражения. Если x_1 – II степень поражения, а x_2 – I степень поражения, то можно прогнозировать вероятность средних степеней поражения. Если x_1 – III степень поражения, а x_2 – II степень поражения, то можно прогнозировать вероятность тяжелых степеней

поражения. 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 и спектра теплового поражения различной вероятности.

Под спектром поражения понимается распределение вероятностей поражения каждой степени санитарных потерь в зависимости от расстояния от 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.

На рис. 7 приведен расчетный спектр поражения для практического примера, приводимого в ГОСТ 12.3.047-98 для оценки поражающего воздействия огненного шара при аварийном выбросе пропана массой 254 т.

Например, для 100 человек с равномерной плотностью распределения вокруг опасного источника на расстоянии до 1000 м общие санитарные потери, для которых необходима безотлагательная оперативная помощь, составляют: ожог I степени – 16 чел.; ожог II степени – 12 чел.; ожог III степени – 28 чел., для остальных (44 человека) наступит летальный исход. Автоматизированный алгоритм расчета позволяет оценивать санитарные потери для любой плотности распределения обслуживающего персонала и населения вокруг опасного источника.

Летальный					
Ожог III степени					
Ожог II степени					
Ожог I степени					
Болевой порог					
Без поражения					
Расстояние от источника, м	250	500	750	1000	1100
Логарифм индекса	8,85	7,09	5,58	4,34	3,90

Рис. 7. Расчетный спектр теплового поражения.

Вероятности: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1.

Из анализа результатов моделирования теплового поражения человека можно сделать три практически важных вывода:

- четкая граница деления 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;

- количество задаваемых зон поражения должно быть достаточным для обеспечения заданных интервалов изменения вероятностей возникновения каждой степени термического ожога и учета неравномерности плотности распределения обслуживающего персонала на территории производственного объекта, а также и населения на территории, прилегающей к производственному объекту.

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, (В. Маршалл. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989). Результаты сопоставления показывают, что для массы пропана 250 тонн расхождение данных В.Маршалла с данными автора, представленными на рис. 5, составляет приблизительно 25%, что следует признать удовлетворительным.

ВЫВОДЫ

1. Проведена гармонизация методов оценки опасности теплового поражения человека по критерию порогового импульса облучения с применением зарубежных экспериментальных данных и отечественной пробит-функции при воспроизведении ожогов II степени с вероятностью 50%.
2. Для гармонизации расчетных методов прогнозирования опасности теплового поражения, основанных на использовании теоретических моделей и температурных критериев возникновения ожогов зарубежных стандартов, построена новая тепловая математическая модель процесса теплопередачи в структурных слоях кожного покрова человека, учитывающая объемное поглощение излучения и зависимость коэффициентов теплопроводности структурных слоев кожи от температуры.
3. В вычислительном эксперименте с применением разработанной тепловой модели обоснован новый, инвариантный к скорости нагрева, критерий критической температуры в слое кожи на глубине 0,36 мм от поверхности.
4. Осуществлена гармонизация функциональной зависимости скорости поражения от температуры на границе основного слоя кожного покрова, используемой в зарубежных стандартах, и зависимости вероятности теплового поражения от температуры в слое кожи на глубине 0,36 мм от поверхности с использованием отечественной пробит-функции для ожога II степени.
5. В дополнение к существующим ГОСТИрованным методам контроля пожарной безопасности в части количественной оценки последствий воздействия теплового излучения в различных сценариях развития аварийной ситуации, в данной работе предлагается применять новые критерии: гармонизированный с зарубежными стандартами температурный

критерий возникновения ожогов и пробит-функции для оценки вероятности возникновения порога болевого ощущения, ожогов I и III степеней.

- Предложен автоматизированный вычислительный алгоритм прогнозирования безвозвратных и санитарных потерь с использованием новых пробит-функций при воздействии теплового излучения пожаров на химических и нефтехимических предприятиях.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих материалах:

В научных журналах, рекомендованных ВАК:

- Еналеев, Р.Ш. Горение углеводородных газов в аварийных ситуациях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, А.М. Закиров, Г.М. Закиров // Бутлеровские сообщения. – 2007. – Т. 11, № 3. – С. 68 – 74.
- Еналеев, Р.Ш. 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.
- Еналеев, Р.Ш. Методы оценки теплового поражения людей в чрезвычайных ситуациях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров Г.М. Закиров // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 3, ч.1. – С. 73 – 83.
- Еналеев, Р.Ш. Методы оценки опасности теплового поражения людей в чрезвычайных ситуациях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров, В.А. Качалкин, Л.Э. Осипова // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 9. – С. 30 – 36.
- Еналеев, Р.Ш. Прогнозирование санитарных потерь от воздействия теплового излучения в чрезвычайных ситуациях / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, В.А. Качалкин, Ю.С. Чистов, А.М. Закиров // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – №1. – С. 36 – 41.

В других журналах и материалах конференций:

- Еналеев, Р.Ш. Нелинейный пиролиз полимерных материалов. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров, А.М. Закиров, В.А. Качалкин // Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Современные проблемы специальной технической химии». – Казань, 2007. – С. 233 – 239.
- Еналеев, Р.Ш. Моделирование крупномасштабного горения углеводородных газов в техногенных катастрофах. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров, А.М. Закиров // Материалы 7-й Международной конференции «Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф». – Томск, 2008. – С. 51 – 52.
- Еналеев, Р.Ш. Оценка теплового поражения людей в чрезвычайных ситуациях. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров, Л.Э. Осипова // Сборник трудов XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Псков, 2009. – Т. 4. – С. 96 – 99.
- Еналеев, Р.Ш. Математическая модель поражения человека тепловым излучением. / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров, В.А. Качалкин // Расши-

102

ренные тезисы докладов Международной конференции «Химическая и радиационная физика». – М.: Президиум РАН. 23 – 29 августа 2009.– С. 314 – 317.

10. Еналеев, Р.Ш. Прогнозирование термических поражений на пожаровзрывоопасных объектах / Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров, Ю.С. Чистов // Сборник докладов II конференции по фильтрационному горению. – Черноголовка, Институт проблем химической физики РАН. 11 – 15 октября 2010 г. – С. 53 – 56.

11. Закиров, А.М. Прогнозирование теплового поражения человека в техногенных авариях / А.М. Закиров, Э.Ш. Теляков, Р.Ш. Еналеев // ГОУ ВПО «Казанский государственный технологический университет», Аннотация сообщений научной сессии. – Казань, февраль 2011. – С. 116.

Соискатель



А.М. Закиров

Отпечатано в редакционно-издательском отделе
НХТИ (филиала) ГОУ ВПО КГТУ
Нижнекамск, пр. 30 лет Победы, 5а
Тираж 100 экз. Заказ №15