

Р. Ш. Еналеев, А. М. Закиров, Г. М. Закиров,
Э. Ш.Теляков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОРАЖЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

Ключевые слова: пожар, тепловое поражение, имитатор кожи, динамический нагрев.

Проведен анализ сценариев теплового поражения человека при динамическом нагреве. Предложен алгоритм расчета индекса поражения с помощью имитатора кожи. Разработана методика прогнозирования термических ожогов различной степени тяжести методом пробит-анализа. Приведен практический пример прогнозирования последствий воздействия одного из опасных аварийных сценариев в виде пожара-вспышки.

Keywords: fire, modeling, burn injury, prediction.

The analysis of the human thermal injuries scenarios under dynamic heating was conducted. The algorithm for calculating of the injury index was suggested using skin simulator. The method for varying severity thermal burns predicting was developed by probit analysis. The practical example for predicting the effects of exposure was shown as one of the most dangerous accident scenarios of fire-flash.

Введение

В соответствии с федеральным законом №123-РФ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» оценка последствий воздействия поражающих факторов техногенных пожаров проводится при постоянной плотности теплового потока. В реальных аварийных ситуациях плотность теплового потока зависит от времени. Для такого динамического режима нагрева объектов окружающего пространства методы прогнозирования последствий воздействия опасных факторов пожара в отечественных нормативных документах отсутствуют.

Результаты таких исследований могут найти практическое применение при прогнозировании зон теплового поражения от зажигания горючих материалов и термических ожогов различной степени тяжести в различных чрезвычайных ситуациях.

Таким образом, анализ и прогнозирование чрезвычайных ситуаций (ЧС) с массовым поражением людей и разрушением материальных ценностей при динамическом нагреве является актуальной социально-экономической проблемой.

Тепломассообмен в пакете одежды при импульсном нагреве

В выделенной проблеме наиболее актуальной и практически важной задачей является разработка расчетных и инструментальных методов прогнозирования термических поражений при динамическом нагреве в техногенных авариях.

Основным механизмом передачи энергии от аварийных источников энергии является тепловое излучение. Для имитации теплового излучения в лабораторных условиях применяется установка с трубчатыми ксеноновыми лампами в режиме перегрузок с тиристорным безынерционным регулированием подводимой электрической мощности [1]. Одежда имитируется пакетом материалов с воздушными зазорами, как показано на рис. 1.

Температура внутри пакета измеряется микротермопарами толщиной 15 микрон, на поверхности – оптическими методами, давление – микроманометрами, потеря веса – торсионными

весами. Оптические свойства наружного слоя определяются спектрометром в области длин волн источника излучения с учетом изменения влагосодержания в процессе испарения. В качестве наружного (фронтального) слоя используется хлопкополиэфирная костюмная ткань с огнезащитной пропиткой.

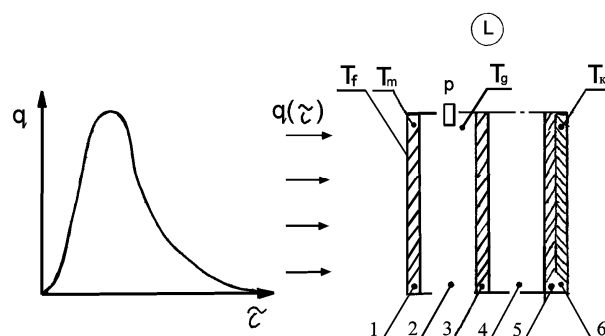


Рис. 1 - Схема эксперимента: 1, 3, 5 – материалы одежды; 2, 4 – воздушные зазоры; 6 – калориметр (имитатор кожи); T_f , T_m , T_g , T_k – температуры поверхности и середины наружного слоя, воздушного зазора, калориметра

Результаты эксперимента с одним из вариантов пакета одежды показаны на рис. 2. Можно выделить V периодов нагрева: I - инертный нагрев, II - испарение влаги из наружного слоя, III - термическое разложение материала, IV - нагрев калориметра после прекращения воздействия теплового излучения, V - выравнивание температуры во всех слоях пакета. Кроме того, в I - II периодах можно выделить три интервала - 1, 2, 3.

В начале II периода, когда температура поверхности достигает 100°C , начинается вскипание влаги и появляется подвижная граница фазового перехода. По мере продвижения границы вглубь материала увеличивается сопротивление выходу пара в окружающую среду, что приводит к повышению давления внутри материала.

Под действием этого давления возникают молярные потоки пара как с фронтальной, так и с

тыльной поверхностей материала. Давление и температура в зазоре в интервале 2 увеличивается. В интервале 3 пар становится насыщенным при температуре 100⁰С и начинается интенсивная капельная конденсация на внутренних солях пакета и калориметре. При этом давление пара в воздушных зазорах уменьшается, а температура калориметра увеличивается. В конце II периода процесс испарения влаги первого слоя заканчивается. При дальнейшем нагревании температура поверхности достигает 240⁰С и начинается термическое разложение материала и потеря массы образца m . Давление в зазорах увеличивается за счет молярного переноса уже продуктов пиролиза первого слоя. В III периоде продолжается конденсация пара и продуктов термического разложения. В IV периоде, представленном на рис.2, после прекращения нагрева пакета тепловым излучением термическое разложение первого слоя заканчивается, температура слоев достигает своих максимальных значений и нагрев калориметра осуществляется за счет излучения и конвекции между слоями. В V периоде происходит выравнивание температуры пакета и нагрев калориметра прекращается.

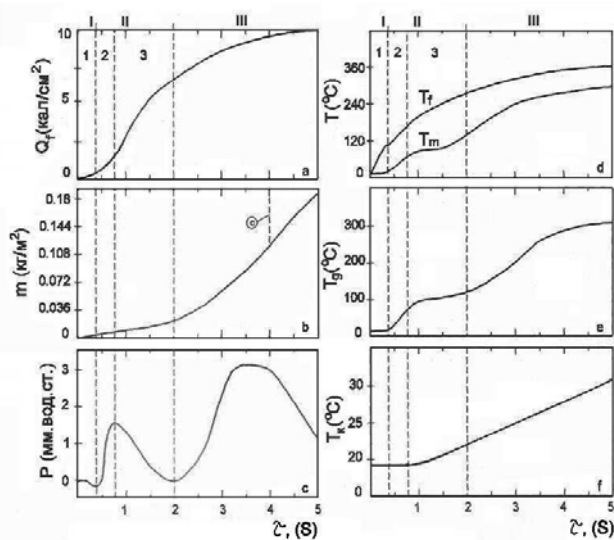


Рис. 2 - Результаты эксперимента: а - количество поглощенной тепловой энергии, б- потеря массы образца, с - изменение давления в зазоре, д - температура поверхности и середины образца наружного слоя, е - температура в первом воздушном зазоре, ф - температура калориметра, © -воспламенение материала

Динамический индекс облучения

Все методы количественной оценки поражающего действия теплового излучения на биообъекты основаны на причинно-следственной связи между термодинамическими и медицинскими критериями поражения. Такие регрессионные модели получили название пробит-функций, позволяющие нормировать случайную величину дозы поражения в единицах стандартного отклонения для нормального закона распределения вероятностей

Ейзенберг [2] впервые предложил в качестве дозы логарифм индекса облучения в

пробит-функциях для прогнозирования вероятности летального поражения человека при постоянной плотности теплового потока q_0 .

Очевидно, обоснование индекса облучения для пробит-функций при динамическом режиме нагрева возможно только на основании физического и математического моделирования процессов теплообмена в системе «динамический нагрев – кожный покров».

Для переменной плотности возможны два подхода. Применение теоремы математического анализа о среднем для определения среднего значения плотности по (1) и определении динамического среднего индекса I_{cp} по (2) или интегрировании индекса Ейзенберга по времени и определении динамического интегрального индекса $I_{инт}$ по (3).

$$q_{cp} = \int_0^{\tau_{экс}} \frac{q(\tau)d\tau}{\tau_{экс}} \quad (1)$$

$$I_{cp} = q_{cp}^{4/3} \cdot \tau_{экс}, \quad (2)$$

$$I_{инт} = \int_0^{\tau_{экс}} q(\tau)^{4/3} d\tau \quad (3)$$

Обоснованный выбор динамических индексов для пробит-функций предлагается проводить с использованием двух критериев возникновения термических ожогов: критерия критической температуры и критерия порогового импульса.

Таким образом, для оценки теплового поражения как открытых, так и защищенных одеждой участков кожного покрова при динамическом режиме нагрева может быть использован средний индекс поражения. Полученные результаты исследований позволяют проводить оценку вероятностей термических поражений, не прибегая к испытаниям на биообъектах. В отличие от стандартного международного метода TRP [3] применение динамического индекса в пробит-функции позволяет прогнозировать не только 50% вероятность ожога II степени, но и различные степени тяжести поражения во всем диапазоне вероятностей.

Из результатов вычислительного эксперимента по сравнительной оценке статического и динамического нагрева следует, что в пробит-функциях вместо индекса при постоянной плотности теплового потока можно использовать динамический индекс. При этом отличие от стандартных методов составит не более 15 %.

Одним из практических применений сделанного заключения является оценка поражающего действия пожара-вспышки.

В ГОСТ 12.3.047-98 [4] и Руководстве МЧС (2006) [5] радиус воздействия продуктов сгорания паровоздушного облака в случае пожара-вспышки R_F , зависящий от нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) для горючих газов (ГГ), определяется приближенным соотношением:

$$R_F = R_{нкпр} \sqrt[3]{E_i}, \quad (4)$$

где $R_{нкпр}$ – радиус паровоздушного облака, ограниченный НКПР; E_i – объемный коэффициент расширения продуктов сгорания $R_{нкпр}$ рассчитывается по формуле:

$$R_{нкпр} = 14,6 \cdot (m / \rho \cdot C_{нкпр}) \quad (5)$$

где m – масса ГГ, поступающего в открытое пространство при аварийной ситуации, кг; ρ – плотность ГГ при окружающей температуре и атмосферном давлении, кг; $C_{нкпр}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ, % (объемный.);

По обоим стандартам алгоритм расчета поражающего действия пожара-вспышки отсутствует. Поражающее действие пожара-вспышки оценивается определением радиуса зоны теплового поражения II степени с вероятностью 0,5. Оценка проводится по уравнению сохранения энергии теплового излучения без учета его поглощения атмосферой:

$$4\pi \cdot R_F^2 \cdot q_F = 4\pi \cdot R_{II}^2 \cdot q_s \quad (6)$$

где q_F и q_s – плотность теплового потока на поверхности пламени и радиусе зоны теплового поражения R_{II} с вероятностью 0,5 соответственно.

Значение q_s и время воздействия теплового источника принимается из результатов моделирования динамического нагрева:

$$q_s = 1,3 \text{ кал}/(\text{см}^2 \text{ сек}) = 55 \text{ кВт}/\text{м}^2 \quad (7)$$

В качестве практического примера на рис. 3. схематично представлены размеры горящего облака и зона поражения при сгорании 5 кг метана в режиме пожара-вспышки. Из результатов расчета видно, что на расстоянии 158 метров могут возникнуть ожоги II степени с вероятностью 50%. Полученные данные имитируют ситуацию, которая произошла в Ереване при неожиданном зажигании шаров, наполненных газом. В этих событиях 150 человек получили термические ожоги.

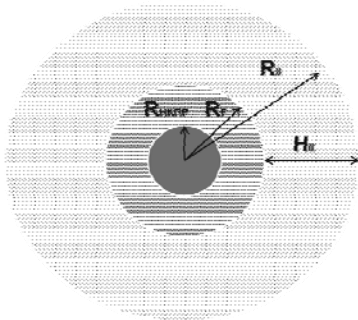


Рис. 3 - Схема горящего облака в режиме пожара-вспышки

Алгоритм расчета

Авторами предлагается дальнейшее развитие метода ТРР [3] в части использования датчика теплового потока (ДТП), как правило, это медный калориметр для измерения среднего

индекса поражения под одеждой или открытого участка кожи.

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 ТРР 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.

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.

По описанной процедуре может быть построен спектр теплового поражения как открытых участков кожного покрова, так и защищенных одеждой. Блок-схема алгоритма построения зон теплового поражения различной степени тяжести приведена на рис. 4.

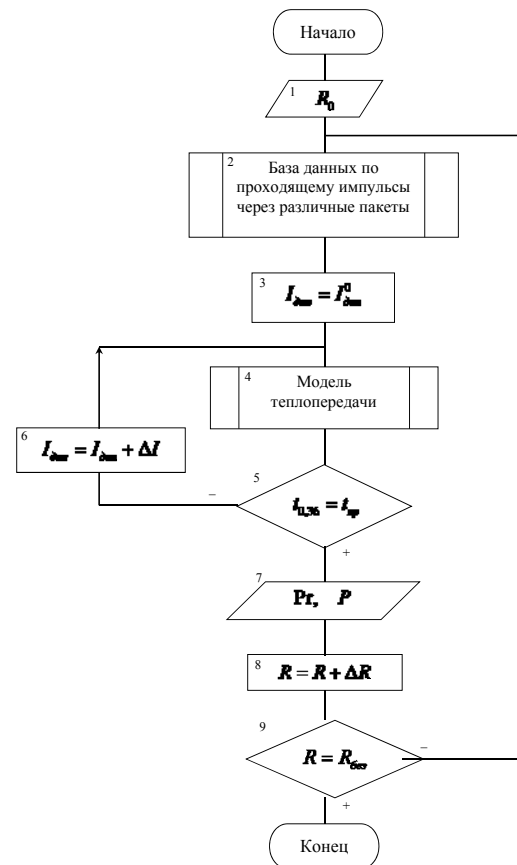


Рис. 4 - Блок-схема расчета зон теплового поражения

В блоке 1 задается начальное значение расстояния до опасного источника. В бл. 2 из базы данных выбираются результаты эксперимента по измерению динамики проходящего импульса. В бл. 3 задается начальное значение динамического индекса. В бл. 4 по модели теплопередачи в структурных слоях кожного покрова рассчитывается температура в сечении на расстоянии 0,36 мм от поверхности.

В бл. 5 рассчитанное значение температуры сравнивается с критическим значением. Если оно меньше критического, то падающий на поверхность одежды импульс увеличивается на заранее заданный шаг приращения индекса в бл. 6. Если больше, то управление передается в бл. 7.

В бл. 7 для текущего индекса поражения рассчитываются пробит и вероятность термического поражения. В бл. 8 увеличивается расстояние от источника излучения и вычислительная процедура в бл. 2 – 8 повторяется.

$$q_k = \frac{\Delta Q_{хим}}{\Delta \tau} \quad (8)$$

$$I_k = (q_k)^{4/3} \Delta \tau \quad (9)$$

$$I_{инт} = \sum_{k=1}^n I_k \quad (10)$$

$$Pr = a + b \cdot \ln I_{инт} \quad (11)$$

После совместного рассмотрения результаты термодинамических расчетов согласуются с медицинскими данными по влиянию площади термического поражения на вероятность глобального поражения.

Технология формирования базы данных включает следующие этапы. Имитатор кожи фиксирует количество облучения. Далее проводится линейная интервальная аппроксимация экспериментальной зависимости, определяется интервальная постоянная плотность теплового потока (8), интервальный динамический индекс (9) и суммарное его значение за время экспозиции (10) и пробит для расчета вероятности (11).

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.В37.21.2099.

Литература

1. Р.Ш. Еналеев, А.М. Осипов, В.А. Качалкин [и др.]. *Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену*. Изд. МЭИ, Москва, 1998. Т. 6. С. 282 – 285.
2. N.A. Eisenberg. *A Simulation for Assessing Resulting from Marine Spills*. NTIS ADA-105-245, 1975.
3. ASTM PS 58. Standard Method for Determining the Arc Thermal Performance of textile Materials for clothing by the Electric Arc Exposure Method Using Instrumented Sensor Panels, 1997.
4. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
5. *Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий*. ФГУ ВНИИПО, Москва, 2006. 36 с.
6. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров, Ю.С. Чистов, А.Ф. Габидуллин. *Вестник Казанского технологического университета*, 21, 185 – 193 (2011).
7. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров, Г.М. Закиров. *Вестник Казанского технологического университета*, 3, ч.1, 73 – 83 (2009).

© **Р. Ш. Еналеев** – канд. техн. наук, доц. каф. химической кибернетики КНИТУ, firepredict@yandex.ru; **А. М. Закиров** – канд. техн. наук, старший преподаватель Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», zakirovma50@mail.ru; **Г. М. Закиров** – главный механик завода «Этилен-1000» ОАО «Нижнекамскнефтехим», yulyazakirova@yandex.ru; **Э. Ш. Теляков** – д-р техн. наук, проф. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, tesh1939@mail.ru.