

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

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА

Ключевые слова: системный подход, пожар, моделирование, зажигание, ожоги, прогнозирование.

Применен системный подход к оценке пожарной опасности теплового поражения человека. Проведен сравнительный анализ отечественных и зарубежных данных по моделированию процессов в системе «тепловой источник – текстильный материал – воздушный зазор – кожный покров». Представлены результаты моделирования физико-химических и биологических процессов в элементах системы.

Keywords: system approach, fire, fire modeling, ignition, burns, prediction.

Systematic approach to the evaluation of fire protection for objects with different physical and biological nature are used. A comparative analysis of domestic and foreign data modeling processes are performed in the system "heat source - fabric - air gap - skin." The simulation results of physics-chemical and biological processes in the stages of the system are represented..

1. Введение

В природных и техногенных катастрофах наибольшую опасность для объектов различной физико-химической и биологической природы представляют опасные факторы пожара – ударная волна, тепловое излучение, конвективные потоки от открытого пламени.

В аварийных ситуациях в аэрокосмической технике, атомной энергетике, нефтегазовом комплексе, химической технологии, специальной технической химии, а также при применении элементов оружия массового поражения происходит неконтролируемая трансформация химической или ядерной энергии в энтальпию продуктов превращения.

Процесс трансформации отличается высокой скоростью и температурой. Наиболее опасным механизмом теплообмена между высокотемпературными продуктами и окружающим пространством является оптическое излучение. Доля теплового излучения доходит до 35% от химической [1] или ядерной энергии [2] энергоемких систем.

Анализ и прогнозирование последствий воздействия опасных факторов пожара с массовым поражением людей и разрушением материальных ценностей является актуальной социально-экономической проблемой.

В выделенной проблеме особое место занимает прогнозирование последствий воздействия пожаров на человека. Сложность процессов взаимодействия теплового излучения с элементами системы «тепловой источник – материалы одежды – воздушные зазоры – кожный покров человека» мотивирует применение современных методов в решении различных аспектов проблемы. Наиболее перспективным является применение метода математического моделирования и системного подхода к анализу сложных процессов взаимодействия опасных факторов пожаров с физико-химическими и биологическими объектами.

В создании теоретических основ системного подхода для исследования сложных систем большой вклад внесли исследования под руководством Кафарова [3]. Реализация системного подхода возможна в результате интеграции знаний в области химической кибернетики, вычислительной теплопередачи, теории подобия, светотехники, электроники, информатики, управления и медицины.

В данной работе структура пожароопасной системы, предложенная в [4], получила дальнейшее развитие применительно к системе «тепловой источник – одежда с зазорами – кожный покров». В последующих публикациях планируется представление новых результатов исследований, проводимых в КНИТУ по нормированию критических значений опасных поражающих факторов пожаров.

2. Базовые модели и критерии

Базовыми считаются модели и критерии, которые признаны мировым научным сообществом и используются в теоретических и экспериментальных исследованиях в течение нескольких десятилетий.

В качестве базовых моделей и критериев рассматриваются физико-математические модели процессов в структурных элементах системы и критические значения термодинамических параметров, вызывающие предельно опасное состояние системы.

2.1. Термические ожоги

Проблема количественной оценки массового поражения людей тепловым излучением впервые возникла после первых испытаний 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 (Центр медицинских аэрокосмических исследований), University of Rochester (Университете Рочестера), NASA-George Marshall Space Flight Center (Центр 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.

Причиной возникновения ожоговой болезни является тепловая энергия, поглощаемая структурными слоями кожного покрова человека.

В медицине поражающее действие физических, химических и биологических факторов количественно оценивается произведением интенсивности фактора на время его воздействия, называемое «дозой». Доза является случайной величиной, так как последствия ее действия («эффект») зависят от индивидуальности биообъекта.

В медицинской статистике [5] принимается срединная эффективная доза D_{50} , имеющая минимальный доверительный интервал и вызывающая эффект у 50% подверженных испытанию биообъектов. Если эффект выражается гибелью биообъектов, эта доза называется летальной DL_{50} . Процентное содержание чисел выживших (санитарные потери) и погибших (безвозвратные потери) дополняют друг друга до 100%.

Основная задача математической статистики в медицине состоит в установлении количественных соотношений между дозой и эффектом. Установление критической (пороговой) дозы, вызывающей эффект определенной тяжести с заданной вероятностью, проводится в экспериментах с варьированием количества дозы.

В качестве критериев теплового поражения применяются термодинамические параметры, которые условно можно разделить на энергетические и температурные.

При тепловом поражении человека за критическое значение тепловой энергии принимается количество облучения, рассчитываемое умножением плотности постоянного теплового потока q , поглощенной кожей, на время экспозиции τ

$$Q = q\tau, \quad (1)$$

где Q – количество облучения, Дж/м².

Известно, что критическое значение критерия (1) зависит от времени нагрева кожи $\tau_{кр}$, при котором возникают термические ожоги. Зависимость $Q_{кр} = f(\tau_{кр})$ впервые была получена в экспериментах с биообъектами в [6]. В дальнейшем эта зависимость подтверждена данными других специалистов [7,8].

Другим энергетическим критерием, впервые предложенным Ейзенбергом [9], является индекс облучения

$$I = q^{4/3} \cdot \tau \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

Практически важным свойством критерия (2) является его инвариантность ко времени воздействия постоянного теплового потока в диапазоне от 1 до 60 секунд. Поэтому его можно назвать инвариантным энергетическим критерием.

В [5] установлено, что вероятность эффекта теплового поражения приближается к нормальному закону распределения, если в качестве критерия дозы взят логарифм индекса поражающего облучения

$$D = \ln I, \quad (3)$$

Кроме критериев критической тепловой энергии, измеряемых экспериментально, применяются расчетные критерии, скоррелированные с температурой структурных слоев кожи при возникновении ожогов II степени. В зарубежных стандартах используется температурный критерий, впервые обоснованный в работах [10,11], в котором кожа рассматривается как трехслойная система из эпидермиса (0,8 мм), дермы (2 мм) и подкожной ткани. Интеграл от скорости поражения кожи принимается за критерий теплового поражения

$$P = \int_0^{\tau_{кр}} \frac{d\Omega}{dt} dt = \int_0^{\tau_{кр}} A \exp\left(-E/RT\right) dt, \quad (4)$$

где $\frac{d\Omega}{dt}$ – скорость поражения, 1/сек; T –

температура кожи на границе «эпидермис – дерма» или на другой глубине от поверхности, К, A – предэкспонент (частотный фактор), 1/сек; E – энергия активации, Дж/моль; R – газовая постоянная, $\tau_{кр}$ – 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.

Динамика изменения температуры основного слоя кожи (граница эпидермиса и дермы) в экспериментах измеряется с помощью имитатора кожного покрова [12].

Результаты обработки экспериментальных исследований с применением энергетических и температурных критериев послужили основой для создания стандартных методов оценки поражения биообъекта тепловым излучением [13,14].

В стандартных методах возникновения ожогов II степени с вероятностью 0,5 оценивается с помощью инструментального метода оценки теплозащитных свойств материалов TPR (Thermal Protective Performance). Метод TPR измеряет количество облучения (импульс облучения), которое поступает к незащищенной или защищенной одеждой поверхности кожи.

Благодаря простоте аппаратного оформления, воспроизводимости результатов, реализации различных механизмов нагрева кожного покрова метод TPR получил широкое распространение при разработке специальной одежды для пожарных [15]. Схема установки метода TPR приведена на рис.1.

Для моделирования заданного количества тепловой энергии, передаваемого излучением, используется блок из девяти кварцевых трубок с

нагревательными элементами и переменным напряжением электрического питания для регулирования интенсивности излучения. Для создания конвективного теплового потока используются две горелки с регулируемым расходом газа.

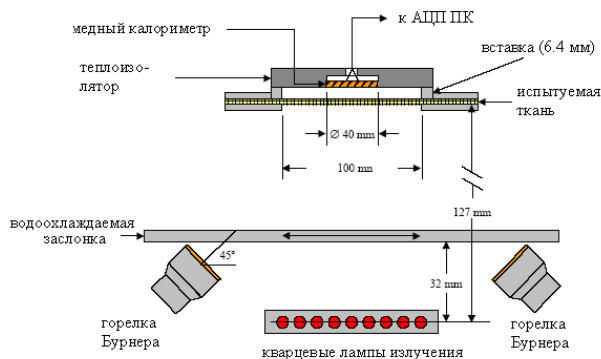


Рис. 1 - Схема методу ТРР

Эти источники 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, проходящего через образец ткани.

Оценка теплозащитных свойств образцов ткани на установке ТРП происходит следующим образом. Испытуемый образец подвергается воздействию теплового потока интенсивностью 2 кал/(см²с), имитирующей излучение реального пламени, и с помощью калориметра регистрируется суммарное количество тепла, проходящее через образец ткани за период теплового воздействия.

В точке пересечения графика прошедшего тепла с графиком тепловой энергии, вызывающей ожог II степени с вероятностью 0,5, ордината соответствует критическому значению тепловой энергии, а абсцисса – времени защитного действия.

В методах порогового импульса и критической температуры прогнозирование теплозащитных свойств проводится на основании экспериментов на биообъектах. Из теоретических моделей, с помощью которых можно рассчитывать температурное поле в структурных слоях биообъектов, необходимо выделить базовую модель Пеннеса [16]. Она была создана более полувека назад и до настоящего времени успешно используется специалистами, занимающимися в области термических поражений человека.

Для расчета температурного профиля во всех структурных солях кожи Пеннес впервые предложил модель на основе классического закона Фурье:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T - (c_p)_b W_a (T - T_0) + q_{met} + q_{ext}, \quad (5)$$

где c , ρ , λ – теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности структурных слоев кожи; $(c\rho)_b$ – объемная теплоемкость крови; W_a – скорость кровотока в артериях.

В правой части закона сохранения энергии для дифференциального объема кожного покрова первое слагаемое представляет собой перенос энергии теплопроводностью, второе – конвекцией потоком крови через артерии, капилляры и вены, третье – генерацию тепла метаболизмом, четвертое – объемный источник энергии от внешнего электромагнитного излучения.

Детерминированные модели прогнозируют возникновения термических ожогов при заданных критических условиях по степени и вероятности ожога, определяемых экспериментально.

Для оценки зон теплового поражения вокруг теплового источника, возникающего в аварийных ситуациях, и расчета санитарных и безвозвратных потерь по всему спектру степеней поражения и их вероятностей используется вероятностная модель, называемая пробит-функцией (probability function).

Пробит-функция обоснована в медицинской статистике в многолетних и многочисленных опытах с биообъектами по воздействию различных факторов (отравляющих и вредных веществ, термических агентов, лекарственных препаратов и т.д.). Пробит-функция является линейной зависимостью между единицами стандартного отклонения дозы t_0 (нормированное значение) от логарифма доза:

$$t_0 = a + b \cdot D, \quad (6)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты.

В термических поражениях от воздействия теплового излучения в качестве дозы используется логарифм индекса облучения:

При обработке экспериментальных данных иногда возникает необходимость использовать логарифм от t_0 . Чтобы он был положительным, вводят понятие пробита (probability unit), который определяется как $Pr = t_0 + 5$. Зависимость вероятности от пробитов представляется в специальных таблицах.

Эмпирические коэффициенты в пробит-функции для каждой степени тяжести ожога являются постоянными. Процедура их определения заключается в следующем. В двух сериях экспериментов задается два значения дозы. После проведения параллельных опытов на биообъектах для каждой дозы идентифицируют вероятность возникновения ожога клиническими методами. Далее по вероятности из табличных данных определяют два значения пробита. Затем решают систему двух алгебраических уравнений (6) с неизвестными коэффициентами a и b .

Кроме того, практическое значение пробит-функции (6) состоит в том, что с ее помощью авторы провели гармонизацию отечественных и зарубежных методов по прогнозированию не только ожогов II степени с вероятностью 0,5, но и для других степеней тяжести и вероятностей ожогов [4].

2.2. Тепловая теория зажигания

Явления воспламенения и зажигания конденсированных систем (КС) возникают в системе в результате нарушения теплового равновесия между теплоприходом за счет экзотермических реакций и теплоотводом в окружающую среду. Впервые количественно теория воспламенения для простейших режимов выделения и отвода тепла была сформулирована Семеновым, Зельдовичем и Тодесом, а затем развита в работах Райса и Франк-Каменецкого для описания поведения газовых систем.

Тепловому воспламенению конденсированных систем и разработке методов расчета характеристик процесса посвящены монографии Зельдовича [17], Виллюнова [18], Мержанова с сотрудниками [19, 20]. Сильно экзотермические реакции обнаруживают заметное самоускорение, в результате чего медленно протекающий в начальный момент времени процесс достигает больших «взрывных» скоростей. Самоускорение реакции лежит в основе явления воспламенения.

Для расчета характеристик зажигания и анализа их зависимости от исходных параметров в тепловой теории зажигания Мержанова и Аверсона [20] рассматривается базовая модель из системы уравнений нестационарной теплопроводности (7) и гомогенной экзотермической реакции (8) без учета возможных физических и химических факторов.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Qk(T, \eta) + f(x, \tau), \quad (7)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = k(T, \eta) = k_0 \cdot (1 - \eta)^n \exp(-E/RT) \quad (8)$$

При нагреве твердого горючего материала можно выделить стадию его инертного нагрева за счет внешнего теплоподвода и стадию его разогрева за счет ускоряющейся химической реакции, а зажигание наступает тогда, когда скорости теплоподвода и тепловыделения сравниваются. Впервые это условие обосновал академик Семёнов.

Все разновидности приближенных методов определения момента зажигания связаны с различными выражениями для критического условия зажигания, которое получается в результате или физических соображений, или численного решения конкретной задачи.

Момент перехода от стадии инертного нагрева до ускоряющейся химической реакции является асимптотическим процессом. Поэтому все разновидности методов критического условия являются приближенными.

Согласно приближенному методу [21], зажигание наступает тогда, когда скорость теплоприхода от внешнего источника и тепловыделения от химической реакции становятся равными:

$$q(\tau_*) = Qk_0 \int_0^\infty \exp(-E/RT(x, \tau_*)) dx, \quad (9)$$

где $q(\tau_*)$ – значение потока тепла в момент зажигания, Дж/(м²·с).

В монографии Ассовского [22] математически критическое условие формулируется в другой постановке:

$$\left(2\lambda\rho Qk_0 \int_T^{\tau_*} \exp(-E/RT) dT \right)^{1/2} \geq -\lambda(\partial T / \partial x)_{x=x_R}, \quad (10)$$

где x_R , м – характерная ширина зоны реакции, определяемая расстоянием, на котором скорость тепловыделения уменьшается в e раз по сравнению с максимальной на поверхности. Условие (10) означает, что суммарное тепловыделение в зоне реакции в момент τ_* превышает теплоотвод из зоны реакции вглубь топлива.

Для сравнения характеристик зажигания при различных механизмах нагрева в тепловой теории зажигания используется полулогарифмическое представление результатов.

Теоретически и экспериментально установлено, что независимо от механизма нагрева зависимость времени зажигания от обратной температуры имеет линейный характер с небольшим доверительным интервалом. Однако для объемного нагрева излучением линейные зависимости между временем воспламенения и обратной температуры поверхности в тепловой теории зажигания с использованием критериев (9) и (10) не установлены.

3. Моделирование тепловых источников

Чрезвычайные ситуации с образованием высокоинтенсивных источников теплового излучения могут отличаться видом топлива и окислителя, их массами, интенсивностью и степенью смешения. Комбинация этих параметров определяет горение сжиженных углеводородных газов в виде огненного шара и пожаров разлива нефтепродуктов [1], факельного горения сжатых углеводородных газов при разгерметизации трубопроводов [23], горения ракетного топлива при аварийном выбросе [24], световое излучение ядерных взрывов [2]. Из двух режимов горения сжиженных и сжатых углеводородных газовых горючих смесей наибольшую опасность представляют крупномасштабные огненные шары.

3.1. Объемные источники крупномасштабного горения углеводородов

Огненные шары образуются при аварийном разрушении оболочек технологического оборудования со сжиженным газом. Резкий сброс давления приводит к резкому (взрывному) вскипанию жидкости с образованием парожидкостного облака, смешению его с окружающим воздухом и образованию горючей смеси. Это явление получило название BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). BLEVE относят к наиболее опасным авариям со сжиженными углеводородами. Для огненных шаров характерно наличие мощного, но

кратковременного импульса излучения. Энергия излучения составляет одну треть от химической энергии топлива.

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 D_s , времени его горения t_s и излучающей способности от массы аварийного выброса топлива. Наибольшее распространение получили формулы [25]

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

и [1]

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

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

Формула (1) используется в ГОСТ [26].

Обобщение экспериментальных данных в [1] показывает, что излучение происходит при эффективной температуре ОШ порядка 1670 °К. В другом подходе сложная внутренняя структура ОШ изучается с привлечением К-ε моделей и методов, разработанных в гидродинамике конвективных течений [27] и теории радиационного переноса [28].

Во многих исследованиях установлено:

- основная доля излучения приходится на приповерхностную область ОШ [1],
- распределение температуры в объеме ОШ близко к равномерному,
- температура излучения составляет 1650-1700К [1, 27],
- степень черноты ОШ изменяется в пределах 0,6-0,8 [27,28].

На основании оценки массы прореагировавшего горючего, образовавшегося при аварии трубопровода в Башкирии (июнь 1989г.) [29], в расчетах также принимается равномерное распределение температуры внутри ОШ.

В [30] для описания турбулентного горения углеводородных газов в ОШ используется модель бесконечно большой скорости химической реакции, согласно которой скорость горения лимитируется скоростью подвода реагентов к фронту пламени за счет турбулентного смешения. В [23] для описания турбулентного диффузионного горения факела, образующегося при разрушении магистральных трубопроводов, применяется известный лицензионный программно-вычислительный комплекс Star-CD (Великобритания) с учетом одностадийной необратимой экзотермической реакции с аррениусовской зависимостью от температуры.

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. Эти преимущества сделали численное моделирование основным инструментом в исследовании сложных,

нелинейных и нестационарных процессов газовой динамики и химической кинетики.

Однако для оперативного анализа аварийных ситуаций в режиме on-line CFD-технологии требуют значительных затрат машинного времени. Кроме того, отсутствует единый подход в разработке универсальных программ для различных сценариев образования и горения ОШ в реальном диапазоне масс аварийного выброса топлива.

Очевидно, что необходимо развивать подходы по созданию полуэмпирических и инженерных моделей динамики и излучения ОШ, которые были бы адекватны экспериментальным и реальным данным и позволяли оперативно оценивать опасные зоны воздействия поражающих факторов ОШ. Одна из таких полуэмпирических моделей предложена в [31].

3.2. Огненные шары при аварийном горении жидких ракетных топлив

Разработка моделей динамики и излучения ОШ, образующихся при авариях ракет, также предназначена для спасения человека (космонавтов, технического персонала) и тепловой защиты технологических конструкций стартовых площадок от воздействия импульсного теплового излучения. Как и в случае ОШ при горении углеводородных топлив, основное внимание уделяется оценке опасности теплового поражения объектов окружающего пространства оптическим излучением при «наихудшем стечении обстоятельств», когда в ОШ сгорает вся масса аварийного выброса топлива.

В модели ОШ [32] рассматривается горение ракетного топлива в структуре сферического пламени при зажигании в эпицентре и нормальном распространении пламени по смеси непрореагировавших компонентов топлива. Нормальная скорость горения выбрана в качестве основного подгоночного параметра для соответствия расчетных и экспериментальных данных. В литературе по горению газовых смесей имеются многочисленные экспериментальные данные по влиянию различных физико-химических параметров на нормальную скорость распространения пламени - давления, весового соотношения компонентов горючей смеси, концентрации примесей, начальной температуры горения, турбулентности. Обобщение результатов исследований приведено в [33, 34].

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, V_n – нормальная

скорость распространения пламени на поверхности ОШ, ρ_c - концентрация топлива.

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

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

По динамике изменения температуры ОШ из (11) и (12) можно рассчитать плотность теплового потока на заданном расстоянии от эпицентра ОШ.

3.3. Огненные шары ядерных взрывов

После применения ядерного оружия в японских городах Хиросима и Нагасаки человечество осознало опасность появления нового оружия массового поражения, одним из основных поражающих факторов которого является тепловое излучение.

В отличие от теплового излучения техногенных катастроф, световое излучение ядерного взрыва (СИЯВ) носит явно выраженный импульсный характер - резкое возрастание плотности теплового потока до максимального значения и плавное асимптотическое снижение до нулевого значения.

Результаты испытаний ядерного оружия показали подобие временной зависимости облученности неподвижных тел от ОШ различных тротильных эквивалентов ядерных зарядов [2]. Это позволяет использовать единую для всех ядерных взрывов временную зависимость в безразмерной или полубезразмерной форме, где масштабами безразмерных преобразований являются максимальное значение облученности и соответствующее ей время. Впервые аппроксимация этой зависимости выполнена в [35] и представляет собой непрерывное сопряжение экспоненциально-степенной функции:

$$q(\tau)(\tau \leq 1,8\tau_m) = 22,2q_m \Theta^3 \exp(-3,1\Theta), \quad (15)$$

с экспонентой

$$q(\tau)(\tau \geq 1,8\tau_m) = 1,72q_m \exp(-0,7\Theta), \quad (16)$$

$$\Theta = \frac{\tau}{\tau_m}, \quad q_m = 0,5371 \frac{Q}{\tau_m}, \quad \tau_m = 0,032W^{0,5} \quad (17)$$

где q_τ , q_m - текущая и максимальная облученность соответственно, τ_m - время достижения q_m , W - мощность ядерного взрыва в кт тротильного эквивалента, Q - количество облучения на заданной поверхности.

В [36] обобщены данные отечественных и зарубежных исследований по излучателям, способным к импульсному лучистому нагреву тел, основным оптико-геометрическим, энергетическим и временным характеристикам импульсного облучения.

В [37-39] приводятся оценки экологических и климатических последствий сильных пожаров, вызванных высотными источниками лучистой

энергии ядерных взрывов. Моделирование лесных пожаров позволяет определить время и размеры зоны зажигания и механизм протекающих при этом физико-химических процессов.

4. Зажигание полимерных материалов

4.1 Явления воспламенения и зажигания

Исследование закономерностей воспламенения и горения природных и синтетических полимеров и композиционных материалов на их основе имеет важное теоретическое значение для понимания сложных механизмов физико-химических процессов термической деструкции, а также практическое значение при создании пожаробезопасных материалов.

Наиболее распространенным природным полимером является целлюлоза. Очевидно, целлюлозные материалы (ЦМ) условно можно назвать натуральным твердым топливом в отличие от «искусственных» топлив - порохов, твердых ракетных топлив и конденсированных взрывчатых веществ. Целлюлоза может служить сырьем для получения синтетических топлив. Например, нитроцеллюлоза образуется при обработке натуральной целлюлозы (высокополимерного спирта) азотной кислотой [40].

Принципиальное отличие нитроцеллюлозы (нитроклетчатка, нитроглицериновый порох и др.) от целлюлозы состоит в том, что при горении этих веществ окислитель (кислород) в нитроцеллюлозе образуется в процессе термического разложения, а в целлюлозе - поступает из окружающего воздуха через пористую поверхность. Но в момент зажигания, при незначительном выгорании целлюлозы и образовании углеродистого остатка, адсорбированный кислород присутствует не только на поверхности, но и во всем микропористом объеме углерода [41] и зажигание проходит в кинетической области.

Хлопковая целлюлоза и её производные и модификации представляют наиболее важные материалы для производства бумаги, волокон, тканей для одежды, обивочных и защитных материалов и т.д.

Целлюлоза находит также практическое применение в аэрокосмической технике для абляционных покрытий, системах испарительного охлаждения теплонапряженных элементов летательных аппаратов многоразового использования [42] и как связующее в твердом ракетном топливе.

Теоретической основой процессов зажигания и горения целлюлозных материалов являются закономерности химического превращения полимера в конечные продукты. Без понимания механизмов таких превращений невозможно решать практические задачи, связанные с проблемой пожароопасности полимеров [43].

Подавляющее число публикаций посвящено термическому разложению целлюлозы в древесине. Текстильные материалы, содержащие целлюлозные и синтетические волокна, являются двухфазными пористыми системами и по своей структуре и

свойствам значительно сложнее, чем древесина. В литературе практически отсутствует информация по закономерностям пиролиза текстильных материалов на основе целлюлозы. Поэтому в качестве объектов исследования выбраны текстильные материалы и древесина.

Материалы на основе целлюлозы являются гетерогенными системами, при зажигании и горении которых образуются конденсированные продукты. Отличительной особенностью таких систем является сложность взаимодействия между горючим и окислителем [44].

В теории теплового взрыва начало формироваться, но еще не получило должного развития направление по зажиганию гетерогенных пористых систем с конденсированными продуктами реакций, к которым относятся целлюлозные материалы.

Обращается внимание, что в процессе взаимодействия окислителя и горючего образуется нарастающий во времени слой продуктов, оказывающий сильное влияние на процесс воспламенения. В целлюлозных материалах таким слоем является пористый коксовый остаток.

4.2 Построение математической модели

Оценка опасности возгорания горючих материалов в нормативных документах [45,46], представляется в виде экспериментальной зависимости времени воспламенения от плотности теплового потока облучения. Эти данные представляют несомненный практический интерес, т.к. получены в испытаниях различных полимерных материалов как на стандартных лабораторных установках, так и в натурных условиях при горении углеводородных топлив при плотности теплового потока до 250 кВт/м². Однако в техногенных пожарах упомянутое значение может превышать данное значение почти на порядок

Для реальной оценки и прогнозирования последствий воздействия поражающих факторов природных и техногенных пожаров на объекты окружающего пространства, содержащие целлюлозные материалы, необходимо с позиции современных научных представлений познать закономерности сложных физико-химических процессов взаимодействия высокоинтенсивного тепловых потоков с капиллярно-пористыми полимерными материалами.

В [47] отмечается, что в последнее время особое внимание уделяется моделированию пиролиза полимерных материалов при горении с учетом физических и химических процессов. В [48] приводится упрощенная модель с поверхностной гетерогенной реакцией при воспламенении от теплового потока излучения q_{rad}

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial T}{\partial x^2} \quad (18)$$

При граничных условиях

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{rad} + kQ \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (19)$$

Постановка (18), (19) применима для непрозрачных тел. Аналогичная постановка гетерогенного зажигания приводится для воспламенения ракетных топлив в кинетической области при воздействии постоянного теплового потока [20].

Очевидно, для полупрозрачных целлюлозных материалов объемный источник теплового излучения, распределяемый по координате по закону Бугера, должен войти в уравнение (18).

Зажигание полимерных целлюлозных материалов представляет собой сложный нестационарный физико-химический процесс. Практически наиболее важными для пожарной безопасности и наименее изученными процессами интенсивного термического разложения являются объемное испарение, пиролиз и воспламенение продуктов разложения как в газовой, так и в конденсированной фазах.

В [49] впервые предлагается математическая постановка зажигания гетерогенных систем с физико-химическими превращениями для целлюлозных материалов, в которой для каждой стадии термического разложения – испарения, пиролиза, химической реакции вводится одинаковая структура объемных источников со своими кинетическими параметрами и термическими характеристиками. Для полупрозрачных материалов учитывается объемный нагрев тепловым излучением.

Существует две основные трудности в реализации численного моделирования процессов зажигания по предлагаемой математической постановке задачи. Современные численные методы и компьютерные технологии позволяют решать уравнения модели в самой сложной постановке.

Вторая трудность заключается в том, что модель включает в себя большое количество коэффициентов, которые могут быть определены только на основании экспериментальных данных [50].

5. Тепло- и массообмен в пакете

5.1. Техника эксперимента

Для упрощения задачи в данной работе рассматривается элемент пакета из фронтального слоя одежды и воздушного зазора. В качестве имитатора кожного покрова используется медный calorimeter.

При несомненных преимуществах (простота конструкции и техническое обслуживание, воспроизводимость результатов) технические возможности установки ограничены. Максимальная плотность теплового потока составляет 85 кВт/м² при статическом нагреве

Для построения физико-математической модели используются результаты экспериментов, полученные на установке ЕНОЛ (Еналеев, Осипов, Лемазин, КазХимНИИ). В [51] впервые обоснована схема включения трубчатых ксеноновых ламп в режиме кратковременной перегрузки. Источник теплового нагрева позволяет получать высокоинтенсивные тепловые потоки с постоянной и

переменной плотностью [52] до максимального значения 2000 кВт/ (рис.2).

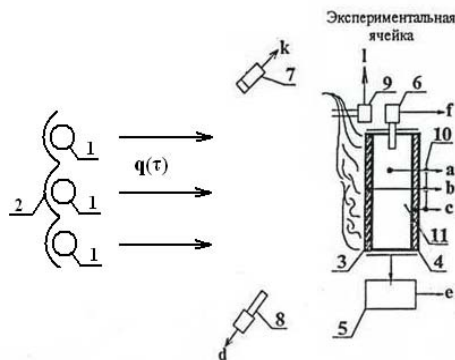


Рис. 2 - Техника эксперимента: 1 – ксеноновый источник излучения, 300 кВт; 2 – концентратор; 3 – испытуемый образец; 4 – калориметр; 5 – электронные весы; 6 – датчик давления; 7 – фотоэлектрический датчик; 8 – тепловизор; 9 – детектор воспламенения; 10 – микротермопары; 11 – воздушный зазор

Прогнозирование теплового поражения в лабораторных условиях проводится на установках интенсивного облучения пакета материалов со среднестатистическими воздушными зазорами. Экспериментально измеренное температурное поле в пакете одежды представлено на рис.3.

5.2. Экспериментальные результаты

Механизм тепловой защиты зависит от характеристик процессов тепломассообмена прежде всего во фронтальном слое защиты, а также во внутренних слоях, воздушных зазорах пакета и имитаторе кожи. В экспериментах в качестве наружного (фронтального) слоя используется хлопкополиэфирная костюмная ткань для военных с азот-фосфорсодержащим антипиреном. Результаты моделирования процессов во фронтальном слое приведены в [53,54], а в пакете на рис. 3.

Как видно из рис.3а, при достижении температуры поверхности 85-90°C происходит вскипание влаги и молярный перенос пара в окружающее пространство и воздушный зазор. Начинается вскипание влаги и появляется подвижная область фазового перехода. По мере продвижения области испарения вглубь материала увеличивается сопротивление выхода 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 поверхности материала. Давление и температура в воздушном зазоре в промежутке 2 увеличивается, в промежутке 3 пар становится насыщенным при температуре 100°C и начинается интенсивная капельная конденсация на поверхности биообъекта или его имитатора (рис. 3м). При этом давление пара в воздушном зазоре уменьшается, а температура имитатора – увеличивается. При дальнейшем нагревании температура достигает 240°C и начинается термическое разложение (пиролиз) материала.

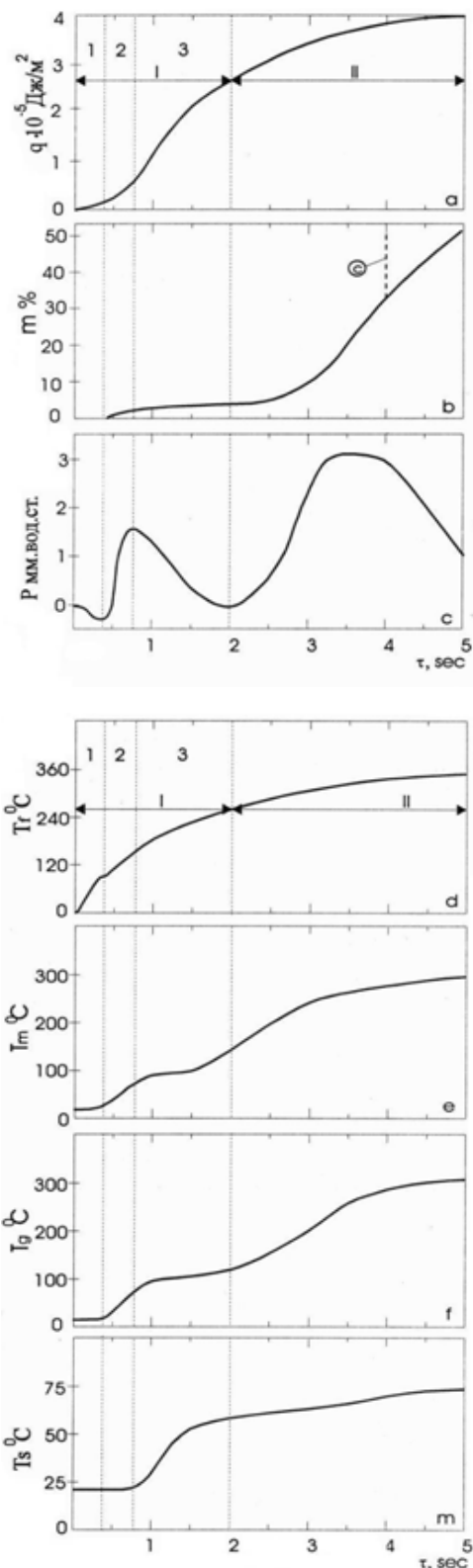


Рис. 3 - Динамика изменения температурного поля в системе «тепловой источник – защитный материал – биообъект или имитатор»: а – поглощенная энергия; б – потеря массы; в – давление в зазоре; д – температура поверхности материала Tf; е – температура середины образца материала Tm; ф – температура в воздушном зазоре Tg; м – температура имитатора кожи Ts; © – воспламенение материала; 1,2,3 – стадии термического разложения

Давление в зазоре увеличивается уже за счет молярного переноса продуктов пиролиза первого слоя. При 300°C – начинается экзотермическая химическая реакция в твердой фазе. Дальнейшее нагревание до 360°C приводит к воспламенению фронтального слоя.

Закономерности зажигания полимерных материалов, в том числе и композиционных на основе целлюлозы, в техногенных пожарах основаны на теории зажигания гетерогенных систем лучистой энергией. Гетерогенное зажигание происходит на поверхности раздела окислителя (кислород воздуха) и горючего (твердых продуктов термического разложения).

Температура слоев и воздушных зазоров измеряется микротермопарами, а температура поверхности фронтального слоя – оптическими методами.

Аналогичная техника эксперимента применяется и в зарубежных исследованиях, как показано на рис. 4 [55].

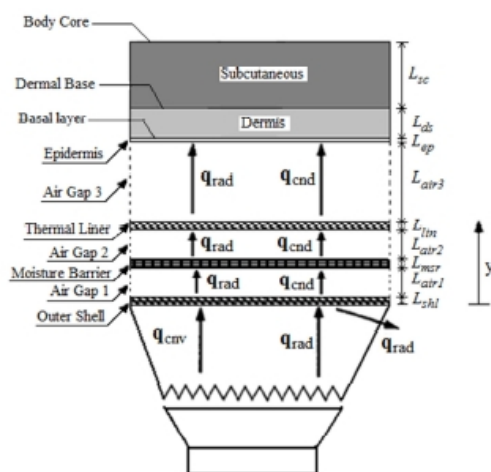


Рис. 4 - Схема теплопередачи в пакете

На рис.4 схематично показана трехслойный пакет с указанием толщины материалов и воздушных зазоров, а также структурные слои кожного покрова или его имитатора. Теплопередача между зазорами учитывается плотностью тепловых потоков за счет теплопроводности q_{cod} и излучения q_{rad} . При относительно незначительном уровне плотности теплового потока излучения от панели, нагреваемой газом (до 80 кВт/м²), конвективная теплопередача в зазоре не учитывается. При этом приводятся результаты расчетов и экспериментов по линейному распределению температуры в зазорах. Тепловой поток в зазорах рассчитывается суммированием коэффициентов молекулярной теплопроводности и излучения.

Однако при высокоинтенсивном нагреве от реальных техногенных пожаров, как видно из данных рис. 3, преобладающим механизмом теплопередачи в пакете материалов с воздушными зазорами является конвективный теплообмен.

Для расчета теплопередачи в таких системах известен другой подход в определении

эквивалентного коэффициента [56]. В нем рассматривается теплообмен в ограниченном пространстве, закономерности которого описываются критериальными уравнениями теории подобия. Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{экв}$ определяется из соотношения:

$$\frac{\lambda_{экв}}{\lambda} = \epsilon_k, \quad (20)$$

где λ – нормальный коэффициент теплопроводности воздуха, ϵ_k – коэффициент конвекции.

Так как циркуляция воздуха в воздушном зазоре обусловлена разностями температур и, соответственно, плотностей материалов пакета и определяется критерием $(Gr \cdot Pr)$, то и ϵ_k должно быть функцией того же аргумента:

$$\epsilon_k = f(Gr \cdot Pr)_f, \quad (21)$$

где $(Gr \cdot Pr)$ – произведение критериев Грасгоффа и Прандтля.

Зависимость (21) получена в результате многочисленных экспериментальных данных.

6. Тепловое поражение кожного покрова

Одной из стадий оценки пожарного риска является определение зон поражения от воздействия опасных факторов пожара. Оценка зон поражения от воздействия теплового излучения проводится по распределению индекса облучения вокруг опасного источника. Значения плотности теплового потока излучения и времени горения углеводородного топлива, входящих в индекс облучения, рассчитываются по различным методикам. Сравнительный анализ таких методик проведен, например, в [57].

Для оценки теплового поражения во всем диапазоне вероятностей для различных степеней тяжести термического ожога в [58] предлагается математическое моделирование процесса теплопередачи в структурных слоях кожного покрова и расчет температурного поля при различных плотностях теплового потока излучения и времени его воздействия. Тепловая модель представляет собой уравнение нестационарной теплопроводности Фурье с объемными источниками.

$$c_i \rho_i \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) \pm \sum_{j=1}^3 Q_j; \quad i = \overline{1, 3} \quad (22)$$

где i – количество слоев, c_i , ρ_i , λ_i – теплофизические свойства структурных слоев кожи, Q_1 – источник генерации тепла за счет поглощения и рассеяния энергии фотонов, Q_2 – сьем тепла за счет кровотока, Q_3 – сьем тепла на разложение кожи.

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 5, из которого видно, что независимо от скорости нагрева ожог наступает при достижении температуры на глубине 0,36 мм от

поверхности кожи. Поэтому значение этой температуры предложено в качестве инвариантного критерия критической температуры [59].

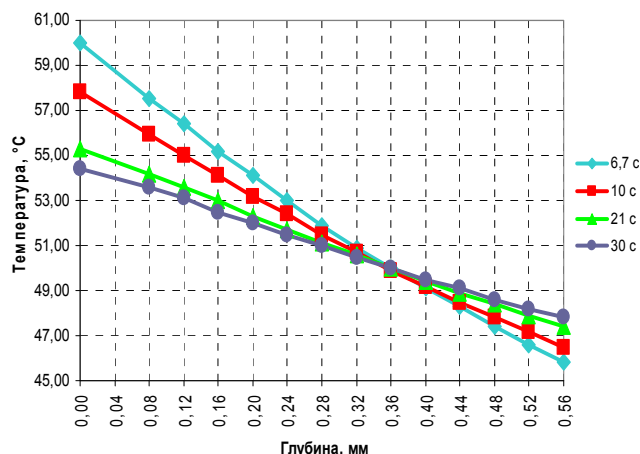


Рис. 5 - Температурное поле в кожном покрове при воспроизведении ожогов II степени с вероятностью 0,5

Модель (22) позволяет рассчитывать нестационарное температурное поле во всех структурных слоях кожи, в том числе и в основном слое. Сравнение с зарубежными данными приведено в табл. 1

Таблица 1 - Сравнение температуры основного слоя кожи по базовой модели (4) и тепловой модели (22)

Плотность облучения, кал/(см ² сек)	Время нагрева, сек	Максимальная температура основного слоя кожи, °C	
		A. Stoll [6]	Модель (22)
0,305	6,7	57,7	57,5
0,226	10	55,7	55,9
0,13	21	54,2	54,1
0,1	30	53,6	53,5

Как видно из табличных данных, результаты модельных расчетов коррелируются с зарубежными экспериментальными результатами с точностью $\pm 0,2$ °C.

7. Пример практического применения

Известно, что поражающее действие теплового излучения на объекты различной физико-химической и биологической природы в большинстве практически важных случаях описывается степенной функцией с отрицательным показателем степени. В зарубежной литературе [60] произведение времени экспозиции на плотность теплового потока с рациональным показателем степени предлагается называть индексом облучения. Инвариантный индекс

поражения и его логарифм используются авторами при построении зон теплового поражения.

На рис.6 приведен расчетный спектр поражения для практического примера, приводимого в ГОСТ 12.3.047-98 для поражающего действия огненного шара при аварийном выбросе пропана массой 254 т. В этом спектре пунктирной линией отмечена граница индекса зажигания.

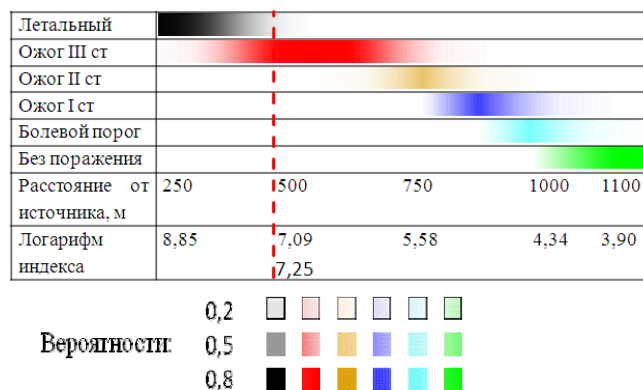


Рис. 6 - Совмещение спектра теплового поражения биообъектов и границы зажигания

Как видно из данных рис.6, граница вероятностей санитарных потерь с учетом зоны зажигания сдвигается с расстояния 250 метров на расстояние 500 метров.

Литература

1. В. Маршалл. *Основные опасности химических производств*. Мир, Москва, 1989. 671 с.
2. Пер. с англ. *Действие ядерного оружия*. Военное издательство МО СССР, Москва, 1960. 586 с.
3. В.В. Кафаров. *Системный анализ процессов тепло- и массообмена*. ИФЖ, **39**, 3, 397 – 415 (1980).
4. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров, Ю.С. Чистов, А.Ф. Габидуллин. *Вестник Казанского технологического университета*, **21**, 185 – 193 (2011).
5. Б.С. Бессмертный. *Математическая статистика в клинической профилактической и экспериментальной медицине*. Медицина, Москва, 1967. 303 с.
6. A.M. Stoll, L.C. Greene. *Relationship between pain and tissue damage due to thermal radiation*, 14, 373. (1959).
7. W.P. Behnke. *Fire and materials*, 8, 53 – 63 (1984).
8. R.Sh. Enalejev, W.A. Kachalkin. *Annals of the New York Academy of Science*, 858, 30 – 35 (1998).
9. N.A. Eisenberg. *A Simulation for Assessing Resulting from Marine Spills*. NTIS ADA-105-245, 1975.
10. F.C. Henriques, A.R. Moritz. *A theoretical and experimental investigation*, 23, 531 – 549 (1947).
11. A.R. Moritz, F.C. Henriques. *Study of thermal injury*, vol. 23. p. 695 – 720 (1947).
12. Fanglong Zhu, Weiyuang. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (IOSE)*, **12**, 1, 43 – 51 (2006).
13. ASTM Standard D 4108. American society for testing and materials, Philadelphia, PA, 1994.
14. International Organization for standardization. ISO Standard 17492, Geneva, Switzerland, 2003.
15. S. Kukuck, K. Prasad. *National Institute of Standards and Technology*, 2003, NISTIR 6993, 11 p.

16. H.H. Pennes: *Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm*. J. Appl. Physiol. 1, 93 – 122 (1948).
17. Я.Б. Зельдович. *Математическая теория горения и взрыва*. Наука, Москва, 1980. 478 с.
18. В.И. Виллюнов. *Теория зажигания конденсированных веществ*. Наука, Новосибирск, 1984. 189 с.
19. А.Э. Аверсон. В сб. *Тепломассообмен в процессах горения*. АН СССР, Черноговка, 1979. С. 16 – 36.
20. A.J. Merzhanov, A.E. Averson. *Combustion and Flame*, vol. 16, P. 89 – 124 (1971).
21. А.Э. Аверсон, В.В. Барзыкин, А.Г. Мержанов. *Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания*. ДАН ССР, 1968, 178, 1, 131 – 134.
22. И.Г. Ассовский *Физика горения и внутренняя баллистика*. Наука, Москва, 2005. 367 с.
23. В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, Г.С. Клишин, С.В. Фотин. *Численный анализ пожарной опасности магистральных газопроводов*. УРСС, Москва, 2004. 328 с.
24. J.B.Yable, J.W. Branford *Size and duration of fireballs from propellant explosions*. Tech. Rep. NASA TM X-53314, George C. Marshall Space Center Huntsville. Alabama, 1965.
25. J. Moorhouse, M.J. Pritchard. *Chem.Symp.Series*, 71, 397-428 (1982).
26. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
27. Г.М. Махвиладзе, Дж.П. Робертс, С.Е. Якуш. *Физика горения и взрыва*, 35, 3, 17 – 19 (1999).
28. С.Т. Суржиков. *ТВТ*, 35, 4, 584 – 593 (1997).
29. Б.Е. Гельфанд, Г.М. Махвиладзе, В.Б. Новожилов. *Доклады АН СССР*, 321, 5, 978 – 983 (1991).
30. Г.М. Махвиладзе, Дж.П. Робертс, С.Е. Якуш. *Физика горения и взрыва*, 35, 4, 12 – 23 (1999).
31. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.Р. Хайруллин, В.А. Качалкин, А.М. Закиров, Г.М. Закиров. *Известия ВУЗов. Проблемы энергетики*, 11-12, 26 – 31 (2008).
32. С.Т. Суржиков. *ТВТ*, 35, 6, 932 – 939 (1997).
33. Ю.В. Полежаев, И.Л. Мостинский. *ТВТ*, 43, 6, 933 – 942 (2005).
34. *Законы горения*. Под ред. Полежаева Ю.В. УНЦП «Энергомаш», Москва, 2006. 351 с.
35. Б.А. Григорьев. *Некоторые задачи нагрева неограниченной пластины нестационарными лучистыми потоками*. Изв. АН СССР, ОТН, 31, 1958.
36. Б.А. Григорьев. *Импульсный нагрев излучениями. Т.1. Характеристики импульсного облучения и лучистого нагрева*. Наука, Москва, 1974. 319 с.
37. Ю.А. Гостинцев, Г.М. Махвиладзе, В.Б. Новожилов. *Формирование большого пожара, вызванного излучением*. Изв. РАН МЖГ, 1, 17 – 25 (1992).
38. А.М. Гришин, А.М. Перминов. *Физика горения и взрыва*, 32, 5, 107 – 115 (1996).
39. В.С. Пинаев, В.А. Щербаков. *Физика горения и взрыва*, 32, 5, 116 – 121 (1996).
40. А.П. Законщиков. *Нитроцеллюлоза*. Москва, 1950. 370 с.
41. Д.А. Франк-Каменецкий. Наука, Москва, 1966. 491 с.
42. А.П. Курячий. *Механика жидкости и газа*, 1, 24 – 36 (1995).
43. Р.М. Асеева, Г.Е. Заиков. *Горение полимерных материалов*. Наука, Москва, 1981. 280 с.
44. В.П. Стовбун, В.В. Барзыкин, К.Г. Шкадинский. *Физика горения и взрыва*, 13, 2, 147 – 155 (1977).
45. 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.
46. А.В. Самотаев. В кн. *Пожаро-техническая тактика и автоматические установки пожаротушения*. Москва, 1989. С. 137 – 147.
47. Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков. *Пожаровзрывобезопасность*, 21, 1, 19 – 33 (2012).
48. V. Babrauskas, Ignition of Wood: A Review of the State of the Art, pp. 71-88 in Interflam 2001, Interscience Communications Ltd., London (2001).
49. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Ю.С. Чистов, А.Ф. Габидуллин. *Пожаровзрывобезопасность*, 21, 8, 36 – 41 (2012).
50. В.К. Булгаков, В.И. Кодолов, А.М. Липанов. *Моделирование горения полимерных материалов*. Химия, Москва, 1990. 240 с.
51. Р.Ш. Гайнутдинов, Р.Ш. Еналеев, В.И. Аверко-Антонович. *Горение и взрыв*. Наука, Москва, 1972. 530 с.
52. Р.Ш. Еналеев, В.А. Матеосов, К.И. Синаев, Б.Д. Диновецкий, Р.Ш. Гайнутдинов. В сб. тр. *Физика горения и методы ее исследования*. Чебоксары, 1973. С. 80 – 86.
53. Р.Ш. Еналеев. *Тепломассообмен*, МИФ-96, VII, 218 – 224 (1996).
54. R.Sh. Enalejev, W.A. Kachalkin. Int. Symp. On Radiation Transfer. Kushadasi. Turkey, July 21 – 25, 1997.
55. A. Torvi David, J. Dale Douglas. *Effects of variations in thermal properties on the performance of flame resistant fabrics for flash fires*. Textile Res. J. 68(11), 787 – 796 (1998).
56. М.А. Михеев. *Основы теплопередачи*. Госэнергоиздат, Москва, 1956. 302 с.
57. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Г.М. Закиров и др. *Безопасность жизнедеятельности*, 1, 36 – 44 (2011).
58. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, Ю.С. Чистов, Г.М. Закиров, Ю.С. Чистов, А.М. Закиров. *Безопасность жизнедеятельности*, 1, 36 – 41 (2011).
59. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, А.М. Закиров, Г.М. Закиров. *Вестник Казанского технологического университета*, 3, ч. 1, 73 – 83 (2009).
60. F.P. Lees. *Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Third Edition. Dr. Sam Mannan, PE, CSP, Department of Chemical Engineering. Texas University, 2004.

© Р. Ш. Еналеев – к.т.н., старший научный сотрудник кафедры плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов КНИТУ, firepredict@yandex.ru; Э. Ш. Теляков – д.т.н., профессор кафедры машин и аппаратов химических производств КНИТУ, tesh1939@mail.ru; И. В. Красина – д.т.н., заведующий кафедры технологии химических, натуральных волокон и изделий КНИТУ, irina_krasina@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.