

На правах рукописи

Карпов Алексей Васильевич

Моделирование процессов тепло- и массопереноса в
припотолочной струе продуктов горения на начальной
стадии пожара в помещении

Специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника
05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Карпов

Москва-2002

Работа выполнена на кафедре низких температур Московского энергетического института (технического университета)

Научный руководитель: д.т.н., проф. Крюков А.П.

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Корольченко А.Я.

к. ф.-м. н., с.н.с. Артемов В.И.

Ведущая организация: ЗАО "Теплоогнезащита"

Защита состоится "26" ~~сентября~~ 2002 г. в 9³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 в Московском энергетическом институте (техническом университете) по адресу: Москва, Красноказарменная ул., д. 14, корп. И, Малый актовый зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ)

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Ученый совет МЭИ (ТУ)

Автореферат разослан "25" ~~сентября~~ 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.157.04 к.ф.-м.н., доцент

В.И. Мика

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Пожары являются вероятной причиной разрушения зданий, гибели находящихся в них людей. Так в 2000 году в Российской Федерации зарегистрировано 245866 пожаров, материальный ущерб от которых составил 32,08 млрд. руб. При пожарах погибло 16264 человека и 14019 человек получили травмы. Известно, что в основе предотвращения пожара лежит раннее обнаружение очага загорания. Поэтому одним из эффективных методов снижения ущерба от пожаров является применение противопожарной автоматики, которая использует устройства обнаружения загорания по незначительным выделениям в окружающую среду теплоты и дыма. Раннее обнаружение загорания зависит не только от технических характеристик этих устройств, но и от правильности их размещения на объекте. Нередко установленные устройства оказываются малоэффективными лишь потому, что были размещены в помещениях без учета принципов их работы. Более перспективным, чем жесткое размещение, является существующее в действующих нормах, является использование расчетных методов, учитывающих характер имеющейся в помещении горючей нагрузки и инерционность пожарных извещателей.

Однако имеющиеся в настоящее время полупирические соотношения для расчета параметров среды, влияющих на срабатывание пожарных извещателей, либо не учитывают развитие очага пожара во времени, либо имеют недостаточно широкую область применимости. Модели же, основанные на численном решении уравнений сохранения в каждой точке расчетной области, несмотря на свою универсальность, не могут быть использованы в этих целях, поскольку требуют больших вычислительных ресурсов и специальной подготовки расчетчика. Однако они являются незаменимым инструментом при проведении исследований, так как позволяют избежать проведения дорогостоящего натурного эксперимента. В связи с этим в рамках настоящей работы проведены численные эксперименты по исследованию процессов тепло- и массопереноса на начальной стадии пожара и взаимодействию приповерхностных струй продуктов горения с тепловыми пожарными извещателями.

Цели работы

1. Разработать математическую модель для описания процессов тепло- и массопереноса на начальной стадии пожара в помещении, основанную на уравнениях Навье-Стокса. Провести апробацию данной модели на основании сравнения с экспериментальными данными.

2. Провести с помощью такой математической модели численные эксперименты по расчету температур и скоростей припотолочной струи продуктов горения.
3. Проанализировать полученные результаты и сравнить их с существующими инженерными расчетными формулами.
4. Расширить пределы применимости полуэмпирических инженерных соотношений, при необходимости провести их модификацию.

Научная новизна

- разработана и апробирована на основе сравнения с экспериментальными данными математическая модель для описания процессов тепло- и массопереноса на начальной стадии пожара в помещении. Данная математическая модель может использоваться для проведения дальнейших исследований, а также при выборе оптимального варианта противопожарной защиты конкретных объектов;
- впервые область применимости полуэмпирических соотношений для расчета температур и скоростей в припотолочных струях продуктов горения была расширена на основании результатов моделирования, что позволило избежать проведения дорогостоящего натурного эксперимента;
- сделаны количественные оценки влияния расстояния от потолка до чувствительного элемента теплового пожарного извещателя на время его срабатывания;
- проведено количественное сравнение времен срабатывания тепловых пожарных извещателей в малых помещениях и в случае неограниченной припотолочной струи продуктов горения. Выявлены особенности распространения припотолочных струй в помещениях с небольшим удалением очага пожара от стен и проведен их анализ.

Достоверность полученных результатов обеспечена апробацией математической модели на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными и полуэмпирическими соотношениями в пределах области их применимости.

Практическая значимость результатов работы

- разработана и апробирована на основе сравнения с экспериментальными данными математическая модель для описания процессов тепло- и массопереноса на начальной стадии пожара в помещении. Данная математическая модель может использоваться для проведения дальнейших

исследований, а также при выборе оптимального варианта противопожарной защиты конкретных объектов;

- расширена область применимости полуэмпирических соотношений Кузнецова и Хескестада-Деличатиосоа для температур и скоростей припотолочных струй, что позволяет использовать данные соотношения при проектировании систем противопожарной защиты более широкого класса объектов.

- результаты диссертационной работы были использованы при оценке пожарной безопасности подземного гаража-автостоянки по адресу: г. Москва, Жулебино, кв. 3В, монолитный жилой дом к. 18., а также при выборе рационального варианта противопожарной защиты завода "Автофрамос".

Положения выносимые на защиту:

- разработанная и апробированная на основании сравнения с экспериментальными данными математическая модель для описания начальной стадии пожара в помещении;
- результаты исследования влияния точности моделирования переноса тепла излучением на значения скоростей и температур в области пламени и восходящей свободной струи; результаты оптимизации граничных условий для турбулентных параметров в очаге горения;
- результаты расчетов динамики температурного режима при горении метанола в помещении высотой 2,6,3 м и с размерами в плане 30x24 м;
- результаты исследования влияния расстояния от потолка до чувствительного элемента теплового пожарного извещателя на время его срабатывания;
- впервые область применимости полуэмпирических соотношений Кузнецова и Хескестада-Деличатиосоа для расчета скоростей и температур припотолочных струй была расширена с помощью численного моделирования, что позволило избежать проведения дорогостоящего натурного эксперимента.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- XV науч.-практ. конф. "Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков" - ВНИИПО., Москва, 1999;

- седьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике. Секция "Теплофизика". 27-28 февраля 2001 г. Московский энергетический институт;

- XVI науч.-практ. конф. "Крупные пожары: предупреждение и тушение." - ВНИИПО., Москва, 2001;

Публикации, структура и объем работы. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, включая 54 иллюстрации. Список литературы содержит 100 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируется предмет и методы исследования, приводится краткая классификация существующих методов моделирования пожаров.

В главе 1 представлен обзор инженерных соотношений для оценки скоростей и температур припотолочной струи продуктов горения (параметров, влияющих на срабатывание тепловых пожарных извещателей) и методик оценки времени срабатывания тепловых пожарных извещателей. Сделан вывод о том, что большинство существующих соотношений предназначено для случая, когда очаг пожара имеет стационарную мощность тепловыделения, и их использование может привести к погрешности при оценке времени срабатывания извещателей в условиях реального пожара, а существующие соотношения для нестационарных очагов пожара имеют недостаточно широкую область применимости. На основании данного вывода сформулированы цели диссертационной работы.

В главе 2 рассматриваются физические и математические модели, используемые при численном моделировании пожаров.

В главе 3 для того, чтобы оптимальным образом сформулировать математическую модель применительно к решаемой задаче и убедиться, что она адекватно описывает рассматриваемые процессы и явления, была проведена серия расчетов по апробации модели на основе сравнения с экспериментальными данными. Было рассмотрено три эксперимента. При моделировании первого проводилось сравнение температур и скоростей в области пламени и восходящей свободно-конвективной струи, поскольку термодинамические параметры в этой области

определяющим образом влияют на распространение продуктов горения в помещениях зданий. Во втором эксперименте был рассмотрен пожар в помещении большой высоты, поскольку задачей работы является расширение области применимости инженерных соотношений на помещения с большой высотой. В третьем эксперименте рассматривались непосредственно параметры припотолочной струи продуктов горения.

Для реализации математических моделей на ЭВМ был использован программный комплекс SOFIE, специально разработанный для моделирования пожаров международным консорциумом научных и исследовательских организаций.

В первом эксперименте очаг пожара представлял собой расположенную на открытом пространстве квадратную горелку со стороной 0,3 м. В качестве горючего использовался природный газ. Мощность тепловыделения была постоянной и равнялась 47 кВт. Расчеты проводились в стационарной осесимметричной постановке. При этом очаг пожара рассматривался как круг эквивалентной площади. Используемая математическая модель включала в себя уравнение неразрывности, два уравнения сохранения импульса вдоль осевой и радиальной координат, уравнение сохранения энергии, уравнений переноса для массы паров горючего и функции смещения, а также уравнений $k-\epsilon$ модели турбулентности с поправкой на влияние естественной конвекции.

Данные уравнения можно записать в форме обобщенного уравнения переноса, которое в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v \Phi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \Phi) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + S_{\Phi}$$

Консервативные величины Φ , коэффициенты переноса Γ_{Φ} и истинные члены S_{Φ} , соответствующие каждому уравнению, представлены в таблице.

Плотность смеси газов вычислялась из уравнения состояния идеального газа. Температурные зависимости теплофизических свойств веществ учитывались с помощью кусочно-полиномиальной аппроксимации. Давление определялось с использованием уравнения для поправки давления согласно итерационной схеме SIMPPEC, являющейся модификацией процедуры SIMPLE. Для дискретизации конвективных членов использовалась комбинированная разностная схема, для дискретизации производной по времени полностью неявная схема первого порядка.

Консервативные величины Φ , коэффициенты переноса Γ_Φ и источники члены S_Φ в основной системе уравнений

Φ	Γ_Φ	S_Φ
1	0	0
v	$\mu_{эфф}$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{эфф} \frac{\partial v}{\partial r} \right) - 2 \frac{\mu_{эфф} v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{эфф} \frac{\partial u}{\partial r} \right)$
u	$\mu_{эфф}$	$\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{эфф} \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{эфф} \frac{\partial u}{\partial x} \right)$
h	$\frac{\mu_{эфф}}{\rho \Gamma}$	$S_{h,rad}$
k	$\mu_{эфф} / \sigma_k$	$G_k + G_B - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu_{эфф} / \sigma_\epsilon$	$(C_1 \epsilon (G_k + G_B) - C_2 \rho \epsilon^2) / k$
Y_{fu}	$\frac{\mu_{эфф}}{Sc_{fu}}$	S_{fu}
f	$\frac{\mu_{эфф}}{Sc_f}$	0

где $\mu_1 = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$; $\mu_{эфф} = \mu_1 + \mu$;

$$G_k = \mu_1 \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]; G_B = -\beta g \frac{\mu_1}{\sigma_1} \frac{\partial T}{\partial x};$$

$C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$;

$Pr = Sc_\mu = Sc_f = 0,7$

Горение моделировалось с помощью диффузионно-вихревой модели Магнуссена-Хьертгера. На свободной границе расчетной области использовалось граничное условие $p = 0$. При этом для касательных составляющих скорости использовались условия $\partial v / \partial n = 0$, а нормальная составляющая определялась из уравнения Бернулли.

Процесс излучения рассматривался с помощью двух моделей. Первая, так называемая χ_R - модель, состоит в уменьшении значения теплоты сгорания на величину тепловых потерь с излучением. Второй, более точный метод дискретного радиационного переноса, заключается в решении уравнения радиационного переноса вдоль заранее выбранной среды направлений лучей. При этом радиационные свойства газовой среды рассчитывались с помощью модели взвешенной суммы серых газов с коэффициентами Гролава. Результаты, полученные с помощью двух различных методов, оказались близки друг к другу.

Однако эти результаты (представлены на рис. 1 верхними кривыми) отличаются от экспериментальных данных в 2 и более раза. Причина такого расхождения заключается в занижении значений турбулентной вязкости в области пламени. К решению данной проблемы существует два подхода. Первый состоит в изменении констант k - ϵ модели турбулентности, второй - в модификации граничных условий для турбулентных параметров в очаге горения. Второй подход и был использован в настоящей работе.

На рис. 1 представлены осевые профили скорости и температуры, полученные при различных граничных значениях k в очаге горения. Значение ϵ во всех расчетах сохранялось постоянным и равным $1 \cdot 10^{-6}$ м²/с². Видно, что наиболее хорошо результаты расчета согласуются с экспериментальными данными при значении $k=0,3$ м²/с².

Учитывая результаты моделирования данного эксперимента, дальнейшие расчеты проводились в приближении χ_R - модели с использованием граничных условий для турбулентных параметров $k=0,3$ м²/с² и $\epsilon=1 \cdot 10^{-6}$ м²/с². Во втором эксперименте моделировался пожар в помещении с размерами в плане 24x30 м и высотой 26,3 м. Очаг пожара, расположенный в центре помещения, представлял собой пятнадцать сдвинутых вместе квадратных противней с метанолом размером 0,45x0,45 м. Математическая модель была аналогична использованной для расчетов предыдущего эксперимента. Однако моделирование производилось в прямоугольной декартовой системе координат.

Расчетная динамика температурных полей представлена на рис. 2. На рис. 3 показан график опускания границы дымового слоя, а на рис. 4 вертикальный температурный профиль в момент времени 240 с. Таким образом, результаты расчетов показали, что данная математическая модель удовлетворительно описывает температурный режим в помещении большой высоты.

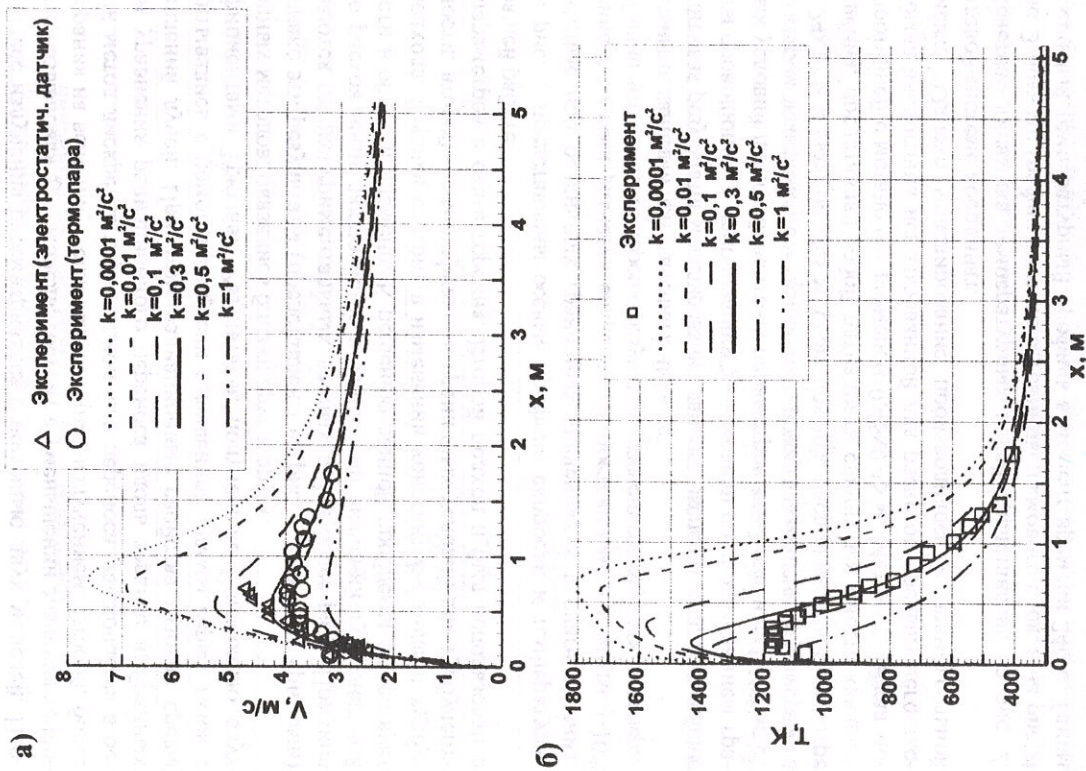


Рис. 1. Осевые профили скорости (а) и температуры (б) при расчетах с различными граничными условиями для турбулентных параметров в очаге горения

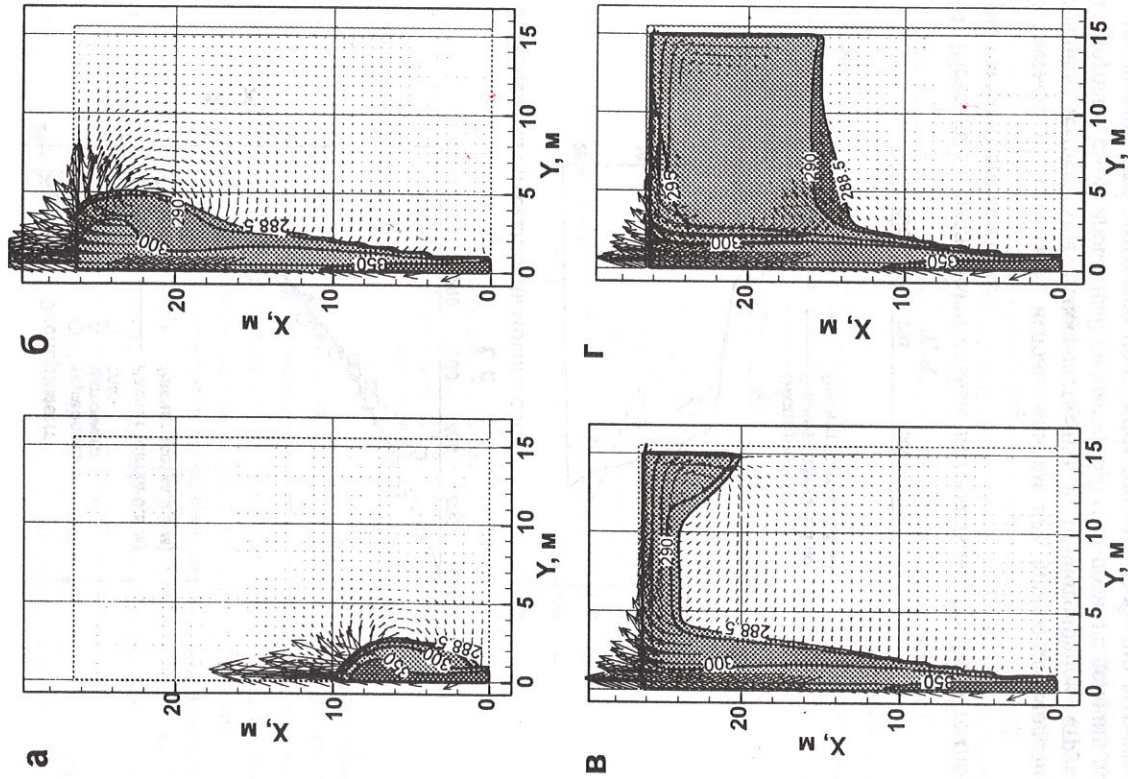


Рис. 2. Поля температур (К) в центральном вертикальном сечении помещения в моменты 10 с (а), 20 с (б), 40 с (в) и 90 с (г)

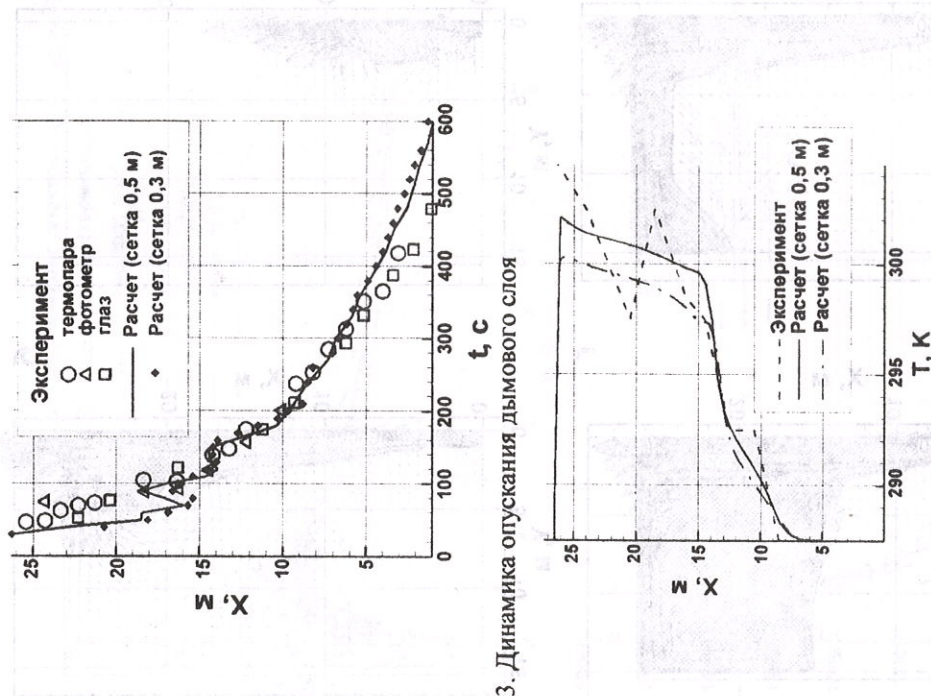
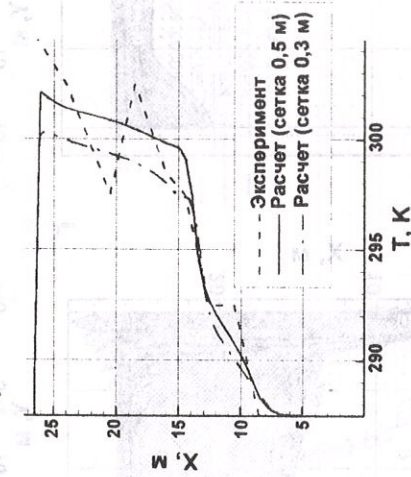


Рис. 3. Динамика опускания дымового слоя

Рис. 4. Расчетные и экспериментальные вертикальные профили температуры в момент времени 240 с

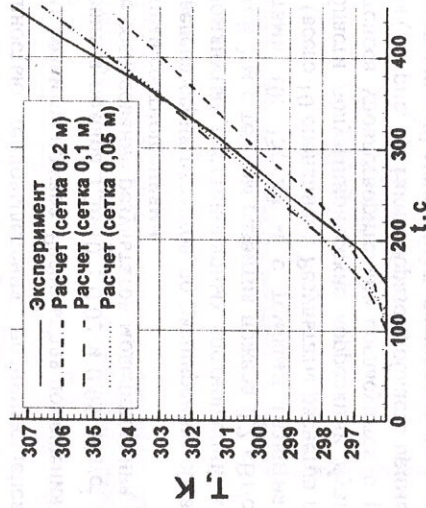
В третьем эксперименте, использованном для апробации модели, измерялись температуры непосредственно в припотолочной струе. Фальшпотолок, смонтированный на высоте 5,8 м от пола, не доходил до стен помещения, что позволяло продуктам горения свободно вытекать из-под него. В качестве очага пожара использовался штабель древеси-



ных брусков размером 0,8x0,8x0,114 м. Моделирование производилось в нестационарной осесимметричной постановке.

На рис. 5 представлены зависимости температуры от времени на радиальном расстоянии 7,2 м. Видно, что результаты расчета на сетках с размерами ячеек 0,1 и 0,05 м близки друг к другу и их расхождение с результатами эксперимента не превышает 15%.

Таким образом, на основании сравнения результатов расчета с данными трех экспериментов можно сделать вывод о том, что данная математическая модель адекватно описывает процессы тепло- и массопереноса на начальной стадии пожара и может использоваться для проведения численного эксперимента.

Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени на радиальном расстоянии $r=7,2$ м. Расстояние от поверхности потолка 0,05 м.

В главе 4 описаны результаты численных экспериментов по расчету температур и скоростей припотолочных струй продуктов горения и определению времен срабатывания тепловых пожарных извещателей.

Для дополнительного подтверждения адекватности используемой математической модели было проведено сравнение результатов моделирования с полуэмпирическими соотношениями для скоростей и температур припотолочных струй в пределах области их применимости.

Было рассмотрено три расчетных сценария с постоянной мощностью тепловыделения в очаге пожара (240 кВт). Высоты помещений при этом составляли 2,4 и 5,8 м. Показано, что результаты моделирования удовлетво-

рительно коррелируют с полуэмпирическими соотношениями. Кроме того, при рассмотрении данных сценариев были проведены сравнительные расчеты времени срабатывания тепловых извещателей, которые показали, что, несмотря на существенное отличие полной скорости припотолочной струи и ее радиальной составляющей вблизи лобовой точки, использование радиальной составляющей скорости при оценке времени срабатывания теплового пожарного извещателя не приводит к большой погрешности. При этом не происходит недооценки пожарной опасности в сторону увеличения. При этом время срабатывания извещателя изменяется в сторону увеличения.

Аналогичное сравнение было проведено с нестационарными полуэмпирическими корреляциями Кузнецова и Хескстада-Деличатиоса для очагов с мощностью тепловыделения, подчиняющейся закону $Q = \alpha t^2$, где α - темп развития пожара. Расчеты для помещения высотой 2 м при темпах развития пожара $1,36 \cdot 10^{-3}$; 0,02 и $0,05 \text{ кВт/с}^2$ показали удивительное согласование результатов моделирования с данными полуэмпирическими соотношениями.

Далее была проведена серия расчетов по расширению области прироста вышеупомянутых нестационарных соотношений, а именно: в помещении высотой 2 м с темпом развития пожара $0,2 \text{ кВт/с}^2$ и в помещениях с высотами 10; 15; 20 м с темпами развития пожара $0,02; 0,05; 0,2 \text{ кВт/с}^2$ (всего 10 сценариев). Результаты расчетов показали, что и в данной области полуэмпирические корреляции Кузнецова и Хескстада-Деличатиоса удовлетворительно согласуются с результатами моделирования (см. рис. 6). Таким образом, область применимости этих инженерных соотношений может быть расширена до высот помещения 20 м и темпов развития пожара $0,2 \text{ кВт/с}^2$.

Рассмотренные соотношения предназначены для расчета скоростей и температур в неограниченной струе. Для того, чтобы оценить влияние стен помещения на распространение припотолочной струи было проведено моделирование пожара в помещении с размерами 6×6 и 4×12 м высотой 4 м. Мощность тепловыделения при этом менялась по закону $Q = 0,011 t^2$.

На рис. 7 представлены изолинии температуры на расстоянии 0,1 м от потолка для помещения размером 4×12 м. Как и следовало ожидать, в первые моменты времени распространение припотолочной струи происходит равномерно по всем направлениям, и изолинии температуры имеют форму концентрических окружностей. Но, по мере развития пожара, геометрия помещения начинает влиять на течение продуктов горения, и к моменту времени 120 с, изолинии температуры приобретают форму показанную на рис. 7б.

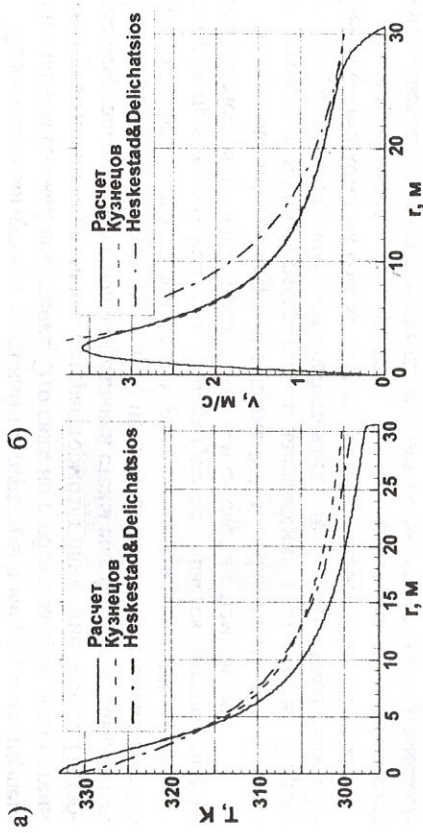


Рис. 6. Радиальные профили максимальных температур (а) и скоростей (б) в момент времени 300 с для сценария с $Q=0,02 \cdot t^2$; $H=15$ м;

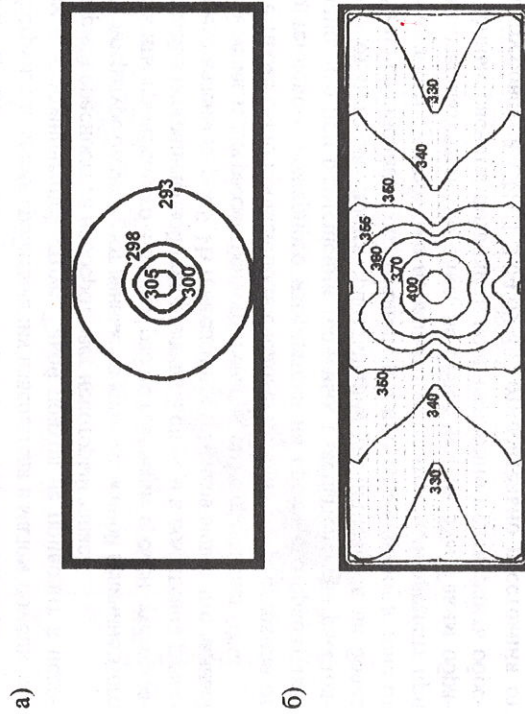


Рис. 7. Поля температуры (К) и скорости на расстоянии 0,1 м от потолка в моменты времени 25 с (а) и 120 с (б)

Здесь видна вогнутость изолиний температуры в направлении перпендикулярном ближайшей стенке. Это связано с образованием около стены зоны повышенного давления, которая тормозит движение потока. Подобное искривление в направлении дальней стены еще более ярко выражено, однако оно имеет иную природу. Упомянутая выше пристенная область повышенного давления приводит к ускорению течения вдоль стены, поэтому в пристенных областях температура повышается быстрее, чем на этом же расстоянии вдоль продольной оси симметрии помещения.

В помещении с размерами в плане 6х6 м наблюдается аналогичная вогнутость изолиний температуры в направлении стен. На рис. 8 представлены изолинии времени срабатывания теплового извещателя ИП-104-1, форма которых соответствует форме изолиний температуры.

В ограниченном пространстве время срабатывания извещателей уменьшается, т.к. из-за накопления под потолком горячих газов повышается температура в зоне размещения извещателей. Поскольку учет геометрической формы помещения в простых инженерных соотношениях связан с большими сложностями, при решении задачи оптимального размещения пожарных извещателей целесообразно использовать зависимость для неограниченной струи, т.к. время срабатывания извещателя в малом помещении меньше, чем в неограниченной струе. Такой подход не приводит к недооценке пожарной опасности, а наоборот дает некоторый запас.

Однако в литературе отсутствуют данные по количественной величине этого запаса. Результаты проведенного в данной работе сравнения времен срабатывания извещателей в неограниченной припотолочной струе и в помещении размером 6х6 м представлены на рис. 9. Из приведенных графиков видно, что данный запас не очень велик, и, для рассмотренного сценария, он не превышает 30%.

В работе также было проведено исследование влияния расстояния от потолка до теплового пожарного извещателя на время его срабатывания. Показано, что при размещении тепловых извещателей на расстоянии до 0,3 м от потолка время срабатывания увеличивается не более чем на 25% по сравнению с оптимальным, а при размещении в зоне от 0,02 до 0,1 м, в которую обычно попадает чувствительный элемент при размещении извещателя на потолке, не более чем на 5%. Таким образом, проведенные расчеты позволили количественно подтвердить обоснованность требований СНиП 2.04.09-84¹ относительно расстояния от потолка до чувствительного элемента теплового пожарного извещателя.

¹ Рассмотренные в работе требования СНиП 2.04.09-84 по размещению тепловых пожарных извещателей не претерпели изменений в НПБ 88-2001, введенных в действие с 1 января 2002 г.

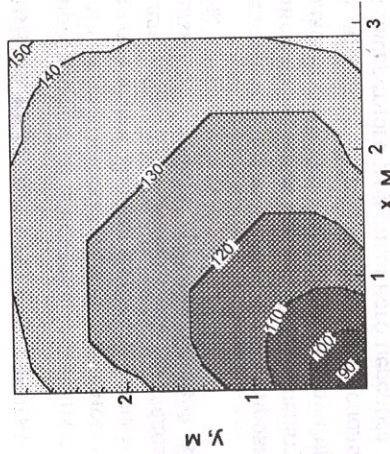


Рис. 8. Изолинии времени срабатывания (в секундах) извещателя ИП-104-1 при горении штабеля деревянных брусков высотой 0,5 м (на рисунке показана четверть помещения)

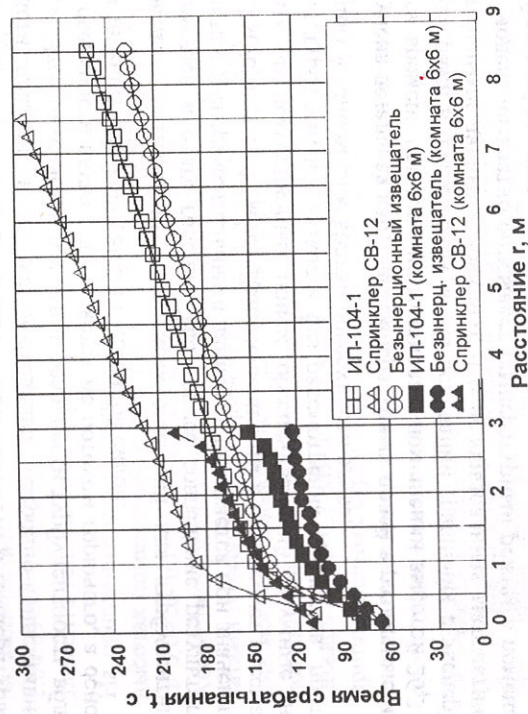


Рис. 9. Сравнение времен срабатывания извещателей в неограниченной припотолочной струе и в комнате размерами 6х6 м при центральном расположении очага.

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНЫ
В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

- 1) Карпов А.В., Мольков В.В., Рыжов А.М. Трехмерное моделирование структуры течения в припотоочном слое и ее влияние на время обнаружения пожара в помещении// Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков: Материалы XV науч.-практ. конф.-Ч1.-ВНИИПО.- Москва.-1999.-С. 8-10
- 2) Карпов А.В., Крюков А.П. Моделирование процессов тепло- и массопереноса в восходящей свободноконвективной струе// Седьмая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов по радиозлектронике, электротехнике и энергетике. Тезисы докладов. Секция "Теплофизика".- 27-28 февраля 2001.- Московский энергетический институт.- т.3.- С. 126-127
- 3) Карпов А.В., Крюков А.П., Рыжов А.М. Полевое моделирование процессов тепло- и массопереноса в пламени и восходящей свободноконвективной струе// Пожаровзрывобезопасность.- 2001.- т.10, №2.- с 35-41
- 4) Карпов А.В., Рыжов А.М. Полевое моделирование тепло- и массопереноса в припотоочной струе продуктов горения над нестационарными очагами пожара// Пожаровзрывобезопасность.- 2001.- т.10.- №3.- С. 17-24
- 5) Карпов А.В., Крюков А.П., Рыжов А.М. Полевое моделирование динамики температурных полей при горении метанола в помещении большой высоты// Пожаровзрывобезопасность.- 2001.- т.10.- №4.- С. 15-20
- 6) Карпов А.В., Рыжов А.М. Моделирование динамики припотоочных струй продуктов горения над нестационарными очагами пожара// "Крупные пожары: предупреждение и тушение": Материалы XVI науч.-практ. конф.-Ч1.-ВНИИПО.- Москва.- 2001.-С. 81-84;

Зак. 69 Гпр.100 П.д. 1,2,5
ИЦ МЭИ. Краснокаменная ул. д.13