

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии»

В. В. Невдах

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Учебно-методическое пособие по дисциплине
«Физико-математическое моделирование систем охраны
и безопасности» для студентов специальности
1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2015

УДК 614.84:004.94(075.8)

ББК 38.96я7

Н40

Рецензенты:

Н. С. Лешенюк, В. М. Ясинский

Невдах, В. В

Н40 Моделирование пожара в помещении : учебно-методическое пособие по дисциплине «Физико-математическое моделирование систем охраны и безопасности» для студентов специальности 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» / В. В. Невдах. – Минск : БНТУ, 2015. – 65 с.

ISBN 978-985-550-593-9.

Предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения.

Излагаются методические указания по проведению компьютерного моделирования с помощью программы FDS начального этапа пожара в помещении при различных условиях. Рассматриваются примеры анализа влияния теплофизических параметров конструкционных материалов помещения, мощности и высоты расположения источника пожара над уровнем пола, наличия естественной вентиляции, высоты расположения отверстия естественной вентиляции на динамику начального этапа пожара в помещении.

УДК 614.84:004.94(075.8)

ББК 38.96я7

ISBN 978-985-550-593-9

© Невдах В. В., 2015

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

Введение

Дисциплина «Физико-математическое моделирование систем охраны и безопасности» является частью специальной подготовки студентов, обучающихся по специальности 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности».

Одной из основных целей дисциплины является изучение студентами методов физико-математического моделирования процессов горения и динамики развития пожара в ограждениях.

Учебной программой дисциплины предусмотрено выполнение студентами цикла лабораторных работ по компьютерному моделированию пожара в помещении для приобретения ими практических навыков работы с применением современных компьютерных программ FDS, PyroSim, SmokeView [1–3]; для моделирования процессов горения и использования результатов при проектировании систем пожарной сигнализации.

Существующая статистика пожаров показывает, что большая часть людей, погибших при пожарах, приходится на пожары в жилых помещениях. Также известно, что успешная эвакуация и другие действия по ликвидации опасности для людей в случае возникновения пожара, возможны только на начальном этапе его развития, пока не достигнуты условия, несовместимые с жизнью человека. Разнообразие архитектурно-планировочных особенностей жилых помещений, свойств материалов, используемых при строительстве и отделке помещений, их наполнение мебелью и бытовой техникой оказывает существенное влияние на развитие возможных пожаров и, как следствие, на эффективность используемых в жилых помещениях систем пожарной сигнализации, основной задачей которых является обнаружение пожаров в их начальной стадии.

Моделирование динамики пожаров в жилых помещениях на начальном этапе необходимо для правильного выбора типа пожарных извещателей и их расположения при разработке эффективных систем пожарной сигнализации.

Для проектирование пожаров разработано ряд специальных компьютерных программ, в которых используются различные модели пожаров. Одной из наиболее распространенных программ, реализующих полевою модель пожара, является FDS (Fire Dynamics Simulator), разработанная Национальным институтом стандартов и тех-

нологии (NIST) США совместно с научно-исследовательскими организациями других стран. В FDS реализуется вычислительная модель тепломассопереноса при горении. Программа считывает входные параметры из текстового файла, численно решает систему уравнений в частных производных, включающую уравнения сохранения массы, момента количества движения и энергии, по трехмерной регулярной прямоугольной сетке и записывает определенные пользователем выходные данные в соответствующие файлы, позволяя получить картину распространения дыма и теплопередачи при пожаре. Все создаваемые препятствия также должны быть прямоугольными, чтобы согласовываться с расчетной сеткой. В случае, когда рассчитываемый объем (домен) имеет неправильную форму и его сложно описать с помощью одной сетки, тогда можно использовать несколько сеток с разными, но согласованными размерами ячейками, и использовать составную сетку. Размеры ячеек расчетной сетки подбираются так, чтобы результаты моделирования менялись не сильно, а время моделирования было приемлемым.

Для любого расчета с помощью программы FDS нужен входной текстовый файл. Для подготовки такого файла (в котором задаются геометрия модели, параметры материалов и реакций, длительность моделируемого пожара) необходим специальный графический редактор-интерфейс PyroSim, который упрощает ввод и анализ исходных данных и облегчает процесс построения модели.

В соответствии с учебной программой дисциплины «Физико-математическое моделирование систем охраны и безопасности» динамика пожара в ограждениях изучается студентами по монографии Д.Д. Драйздейла «Введение в динамику пожаров» [4]. Для лучшего усвоения дисциплины, каждый студент, обучающийся на дневной форме по специальности 1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности», должен выполнить в компьютерном классе цикл из восьми работ по моделированию пожара в помещении. В настоящем методическом пособии для каждой работы сформулированы задания и приводятся примеры их выполнения. При работе с программами PyroSim, FDS, SmokeView студенты руководствуются методическими указаниями [5]. По каждой выполненной работе студенты оформляют письменный отчет в соответствии с требованиями.

1. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ ПО РАБОТЕ С КОМПЬЮТЕРНЫМИ ПРОГРАММАМИ PYROSIM, FDS И SMOKEVIEW И СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ЖИЛОЙ КОМНАТЫ В ПРОГРАММЕ PYROSIM

Цель работы: изучить методические указания по работе с компьютерными программами FDS, PyroSim и SmokeView на примерах их применения для редактирования стандартной модели (шаблона) комнаты; на базе шаблона создать модель своей жилой комнаты в программе PyroSim; получить входной текстовый файл для программы FDS и проверить правильность модели, путем проведения кратковременного (в течение 10 с) тестового расчета пожара.

Используя методические указания [5], каждый студент редактирует имеющийся шаблон помещения с помощью графического редактора-интерфейса PyroSim и создает в нем 3D-модель своей жилой комнаты. При этом используется подготовленный заранее эскиз, содержащий информацию о наружных и внутренних размерах комнаты; об её основных конструкционных материалах; о размерах, материалах и расположении крупной мебели в комнате; о наличии, размерах и расположении окон и дверей; о наличии естественной вентиляции. Завершив работу по созданию модели комнаты, студент получает от преподавателя задание разместить в ней источник пожара с определенными размерами и мощностью, детекторы температуры и задымленности воздуха, анимированные плоскости для визуализации пространственного распределения температуры. Пример такой модели комнаты с наружными размерами 4,3×4,7×3 м показан на рис. 1.1.

Для проверки правильности созданной модели осуществляется подготовка входного файла с расширением *.fds и проводится тестовый запуск расчетной программы FDS для моделирования короткого (5–10 с) пожара.

Если модель комнаты сделана правильно, программа FDS выполнит расчет. Если в создаваемой модели допущена ошибка, то при попытке запустить счет FDS укажет на эту ошибку. В этом случае нужно вернуться к модели в редакторе PyroSim, исправить ошибку и повторить запуск программы.

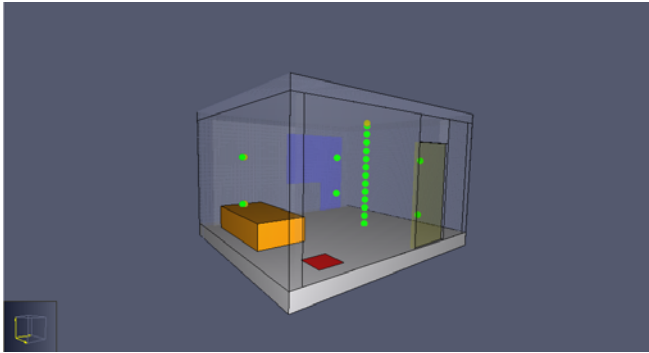


Рис. 1.1. Модель комнаты

После завершения работы программы FDS в папке появится ряд файлов, содержащих результаты расчетов. Среди них нужно выбрать и открыть файл с расширением *.smv для осуществления визуального контроля полученных результатов. Для наблюдения за динамикой пожара возможно в модели понадобится изменить цвет или степень прозрачности стен (потолка), мебели. В этом случае создается новая папка, в которую переносится созданная в редакторе PyroSim модель комнаты и после внесения необходимых корректировок повторяется тестовый расчет. Пример результатов визуализации расчетных данных на 10-й секунд пожара в закрытой комнате с источником мощностью 100 кВт, расположенным на полу, показан на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Картина на 10-й секунде пожара мощностью 100 кВт в закрытой комнате

Результаты отображения вертикального распределения температуры воздуха в комнате с помощью анимированной плоскости (Slice) представлены на рис. 1.3.

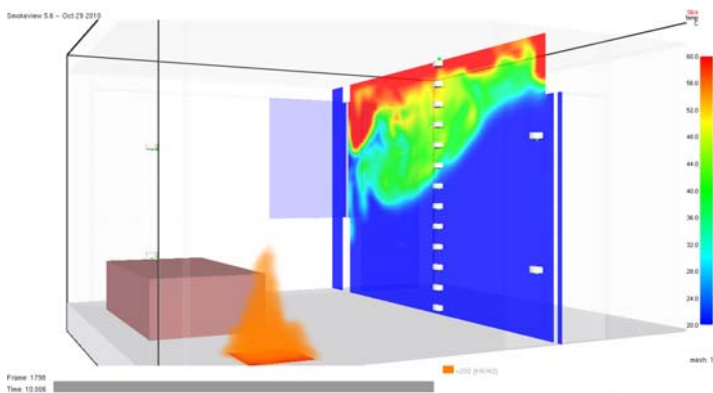


Рис. 1.3. Вертикальное распределение температуры воздуха в закрытой комнате на 10-й секунде пожара мощностью 100 кВт

На рис. 1.4 показана динамика тепловыделения (*heat release rate – hrr*) в течение пожара.

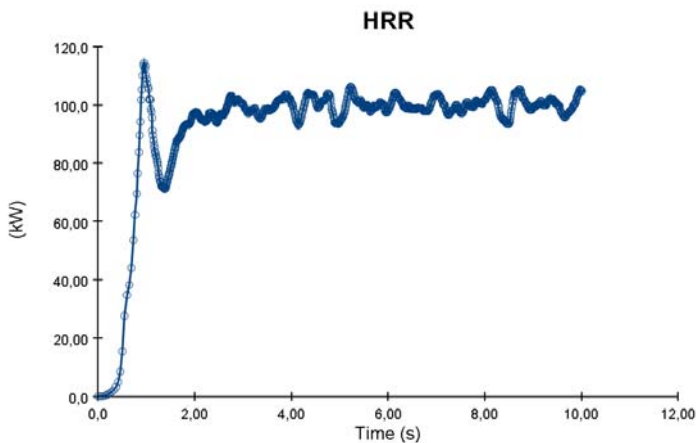


Рис. 1.4. Зависимость тепловыделения источника пожара от времени

Для проверки работы датчиков, с помощью которых контролируются опасные факторы пожара, строятся зависимости измеряемых этими датчиками величин от времени. Примеры зависимостей температуры воздуха, затемнения и изменения давления, измеряемых использованными в модели датчиками, расположенными под потолком комнаты на высоте 2,45 м от уровня пола, от времени представлены на рис. 1.5–1.7 соответственно.

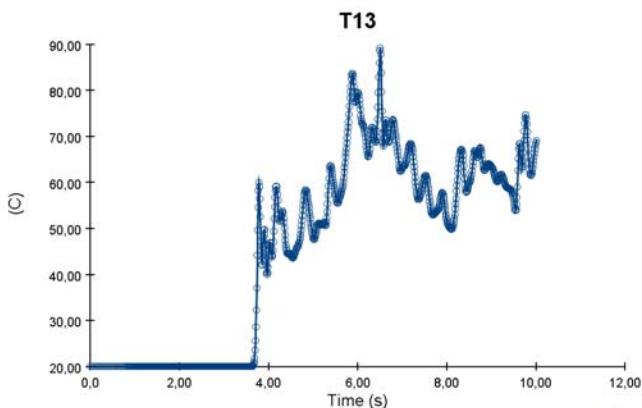


Рис. 1.5. Зависимость температуры воздуха в комнате от времени на высоте 2,45 м

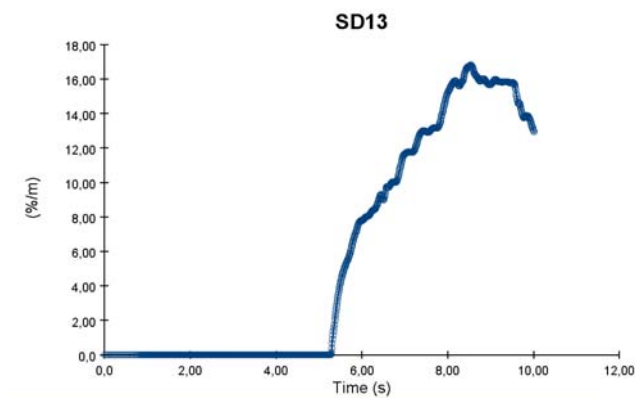


Рис. 1.6. Зависимость затемнения воздуха в комнате от времени на высоте 2,45 м

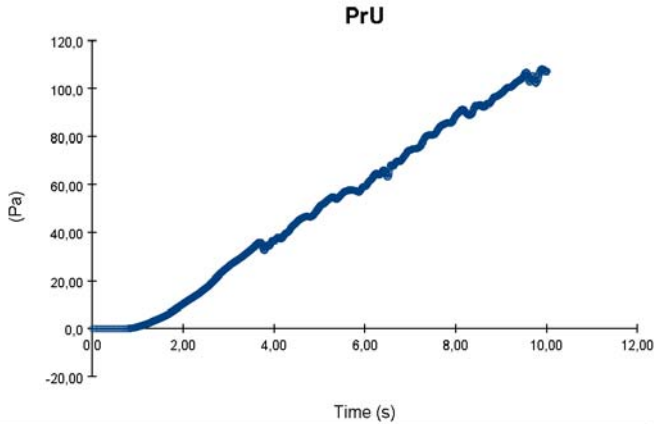


Рис. 1.7. Зависимость изменения давления воздуха в комнате от времени на высоте 2,45 м

Отчет по работе данного раздела должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты с приведением всех параметров, условий моделирования и рисунка с видом модели;
- результаты тестового моделирования пожара в виде рисунков с зависимостями тепловыделения пожара, температуры, изменения давления и затемнения воздуха от времени.

Все зависимости строятся по выходным данным результатов моделирования, представленным в виде численных таблиц в редакторе Microsoft Office Excel.

2. ДИНАМИКА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ЗАКРЫТОЙ КОМНАТЕ

Цель работы: промоделировать начальную стадию (первые 180 с) пожара в закрытой комнате с фиксированной мощностью источника, расположенного на полу; проанализировать динамику изменения опасных факторов пожара в комнате для спящего в ней человека и условия при его эвакуации.

Используется модель комнаты, описанная в предыдущем разделе. Проводится редактирование модели в редакторе PyroSim. Размеры ячеек расчетной сетки задаются по согласованию с преподавателем. Для стен и потолка комнаты выбирается один и тот же конструкционный материал, теплофизические параметры которого известны, например, бетон. В комнате должны быть предусмотрены две двери – выходная и дверь на балкон (лоджию), окно, а также балкон (лоджия) небольшой ширины. Обязательным элементом комнаты является наличие спального места – кровати или дивана. В созданной модели жилой комнаты размещаются четыре группы детекторов температуры и задымленности воздуха. Первая группа располагается над местом нахождения головы спящего студента, вторая группа – перед дверью на балкон (лоджию), третья – перед выходной дверью. Каждая из этих групп состоит из двух детекторов, расположенных на одной вертикали на уровне головы спящего студента и на высоте его роста. Детекторы температуры и дыма располагаются в точках пространства, имеющих одинаковые координаты. Задаются также две горизонтальные анимированные плоскости температуры на высотах расположения детекторов. Четвертая группа состоит из детекторов температуры и дыма, расположенных на одной вертикальной оси, проходящей примерно через геометрический центр комнаты. Нижние детекторы этой группы располагаются на высоте размера одной ячейки расчетной сетки над уровнем пола. В настоящей работе – это высота 5 см. В этой же точке дополнительно помещается и детектор, измеряющий давление воздуха. Верхние детекторы располагаются соответственно на одну ячейку (5 см) ниже уровня потолка, и они включают в себя также три детектора – температуры, дыма и давления. Расстояние между верхними и нижними детекторами разбивается на равные интервалы, например, по 15 см, через которые устанавливаются пары детекто-

ров температуры и дыма. Эта четвертая группа детекторов позволяет контролировать вертикальное распределение температуры и задымления воздуха в комнате при пожаре. В точках пересечения вертикальной оси четвертой группы детекторов с плоскостями пола и потолка помещаются другие детекторы температуры, которые контролируют температуру поверхностей пола и потолка (см. стр. 36 в [5]).

Источник пожара (Burner) располагается на полу. Площадь источника, его мощность и место расположения в комнате задаются преподавателем. В примере моделирования пожара, приводимом в настоящей работе, использовался источник размерами $0,5 \times 0,5$ м и мощностью 50 кВт.

После завершения редактирования модели нужно осуществить её проверку – провести тестовое моделирование пожара в течение 10 с. По результатам проверки внести необходимые корректировки в модели и после этого запускать основной расчет.

После окончания расчета, студент просматривает файл с расширением *.smv с целью получения качественного представления о характере промоделированного пожара, а также анализирует результаты расчетов, содержащиеся в численных таблицах в редакторе Excel с расширениями *.hgt и *.devc, используя их для построения соответствующих зависимостей.

Для анализа характера промоделированного пожара строится зависимость его тепловыделения от времени (см. рис. 2.1)

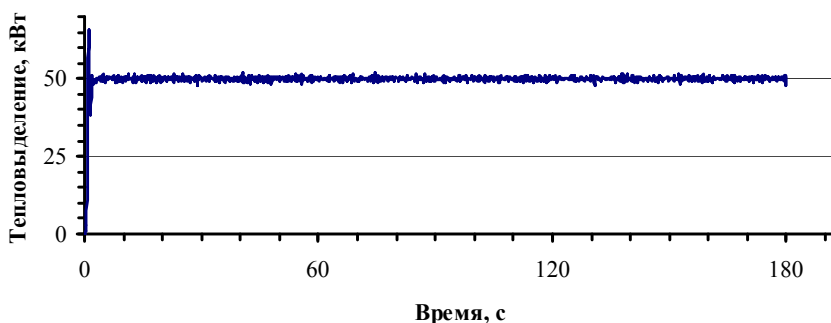


Рис. 2.1. Зависимость тепловыделения от времени при пожаре мощностью 50 кВт с источником на полу

Из рис. 2.1 видно, что по тепловыделению пожар мощностью 50 кВт носит квазистационарный характер. Небольшие колебания тепловыделения обусловлены неустойчивостью факела пламени над источником пожара.

На рис. 2.2 показано изменение с течением пожара пространственного распределения (по высоте) температуры воздуха в комнате. Видно, что при таком пожаре в комнате устанавливается распределение температуры с вертикальным градиентом, который практически не меняется с течением пожара. Значение температуры в каждый момент времени определяется соотношением между скоростью поступления тепла в комнату и скоростью тепловых потерь через ограждения. Перенос тепла от источника пожара в различные ограждения происходит через различные физические процессы, что видно из зависимостей, представленных на рис. 2.3.

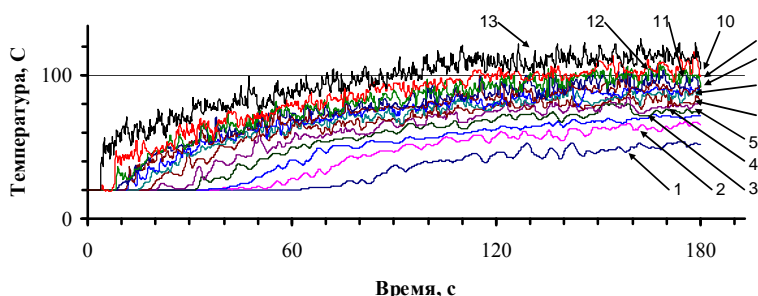


Рис. 2.2. Зависимости температуры воздуха на разных высотах от времени: высота 0,05 (кривая 1), 0,25 (2), 0,45 (3), 0,65 (4), 0,85 (5), 1,05 (6), 1,25 (7), 1,45 (8), 1,65 (9), 1,85 (10), 2,05 (11), 2,25 (12), 2,45 м (13)

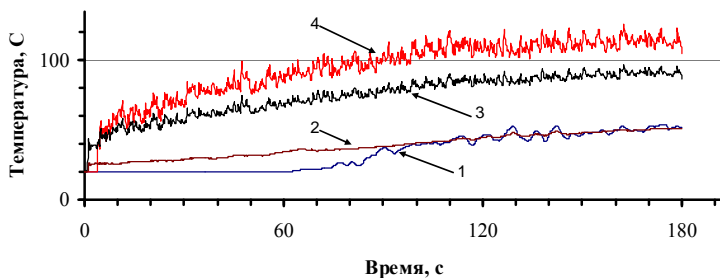


Рис. 2.3 Зависимости температуры воздуха над полом на высоте 0,05 м (кривая 1), поверхности пола (2), поверхности потолка (3) и температуры воздуха под потолком на высоте 2,45 м (4) от времени

Из рис. 2.2 и 2.3 видно, что воздух в комнате нагревается в основном только за счет процессов конвекции. Так как излучение пламени слабо поглощается чистым воздухом, то изменение его температуры на определенной высоте происходит при попадании на эту высоту нагретого источником пожара воздуха (вместе с дымом), который сначала поднимается вверх, заполняет верхнюю припотолочную зону помещения, а затем начинает опускаться вниз. К полу, на высоту 0,05 м, слой нагретого воздуха спускается примерно через 62 с после начала пожара. Также видно, что теплообмен между нагретым воздухом и ограждениями – потолком и стенами – приводит к тому, что скорость увеличения температуры воздуха уменьшается, несмотря на постоянное тепловыделение источника пожара, и практически насыщается, когда скорость поступления тепла от источника в закрытый объем уравнивается скоростью потерь тепла из этого объема за счет процессов теплопроводности ограждающих объем конструкций – стен, потолка, пола.

Из рис. 2.3 также видно, что потолок вначале нагревается за счет радиационного теплопереноса, а затем к нему прибавляется действие процесса конвективного переноса тепла воздухом и дымом. При этом температура поверхности потолка всегда меньше температуры воздуха под потолком, так как теплопроводность материала потолка выше теплопроводности воздуха и отток тепла из припотолочного слоя нагретого воздуха через материал потолка происходит быстрее, чем по воздуху.

Пол нагревается за счет только радиационного теплопереноса значительно дольше чем потолок. В первый момент времени после начала пожара это происходит за счет потока излучения от пламени источника, а затем к нему добавляется тепловое излучение от нагретого припотолочного слоя воздуха и дыма. Из-за большего поглощения излучения полом температура пола при этом выше, чем температура воздуха над полом. Из рис. 2.2 и 2.3 также видно, что через ~ 62 с после начала пожара, когда нижняя граница слоя теплого воздуха и дыма достигает пола, температура его поверхности становится примерно одинаковой с температурой прилегающего к нему слоя воздуха.

На рис. 2.4 показаны зависимости затемнения воздуха в комнате от времени пожара на различных высотах, характеризующие динамику заполнения закрытой комнаты дымом. Физический смысл ве-

личины затемнения – ослабление луча света на длине пути 1 м. Эта величина пропорциональна оптической плотности дыма. При затемнении 100 %/м оптическая плотность дыма такая, что излучение полностью теряется на длине пути 1 м. Величина затемнения растет с ростом мощности источника пожара.

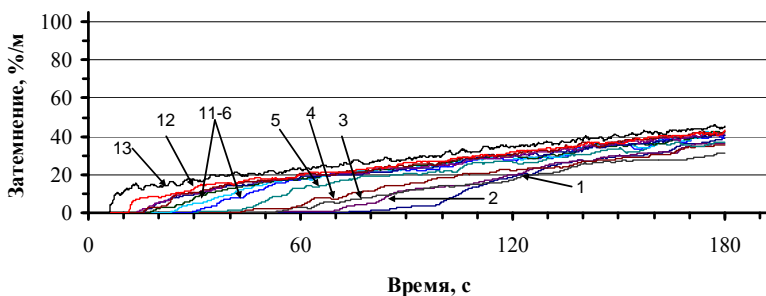


Рис. 2.4. Зависимости затемнения воздуха на разных высотах от времени: высота 0,05 (кривая 1), 0,25 (2), 0,45 (3), 0,65 (4), 0,85 (5), 1,05 (6), 1,25 (7), 1,45 (8), 1,65 (9), 1,85 (10), 2,05 (11), 2,25 (12), 2,45 м (13)

Из рис. 2.4 видно, что вначале дым поднимается вверх и образует припотолочный слой, нижняя граница которого опускается вниз с течением пожара. Также видно, что в слое дыма образуется вертикальный градиент затемнения, величина которого уменьшается с течением пожара, т. е. со временем оптическая плотность слоя дыма становится одинаковой по высоте.

Из рис. 2.2 и 2.4 видно, что в течение промоделированной начальной стадии (180 с) пожара мощностью 50 кВт, в комнате устанавливаются вертикальные распределения температуры и затемнения воздуха с почти постоянными градиентами.

Одна из особенностей пожара в закрытой комнате состоит в том, что повышение температуры воздуха в комнате приводит к повышению давления воздуха в ней. На рис. 2.5 представлены зависимости избыточного давления воздуха по отношению к начальному атмосферному давлению возле пола и под потолком от времени. Видно, что при пожаре в закрытой комнате давление воздуха в нижней части комнаты становится выше, чем в верхней, и оно растет примерно по такому же закону, что и температура воздуха.

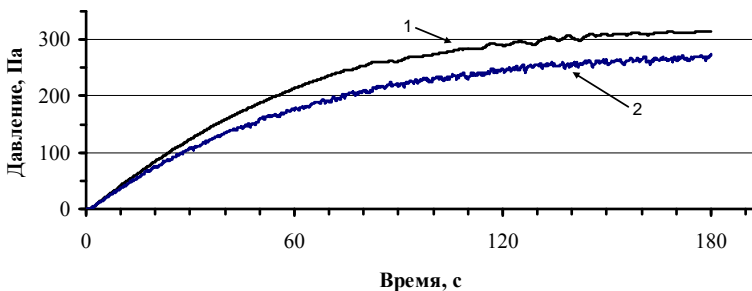


Рис. 2.5. Зависимости избыточного давления воздуха в комнате от времени на высоте 0,05 (кривая 1) и 2,45 м (2)

Различие давлений воздуха внизу иверху комнаты – это чисто газодинамический эффект, обусловленный работой источника пожара и создаваемым им локальным нагревом воздуха, приводящим его в движение в условиях действия земного тяготения. В замкнутом пространстве это приводит к неоднородному изменению давления.

Характер изменения со временем опасных факторов пожара в месте нахождения головы спящего человека и на возможных путях его эвакуации – перед дверью на лоджию и выходной дверью – показывают зависимости на рис. 2.6 и 2.7.

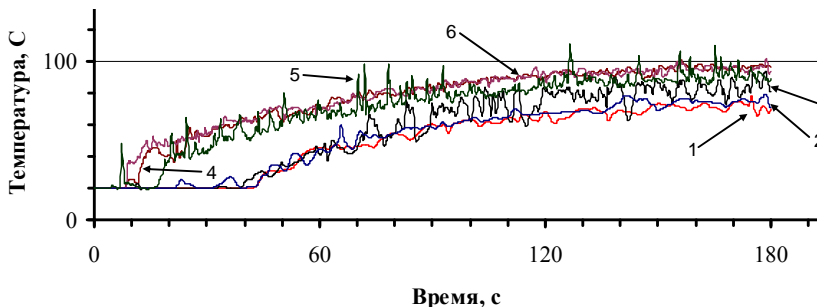


Рис. 2.6. Зависимости температуры воздуха от времени на высотах 0,55 (кривая 1–3) и 1,65 м (4–6) в различных местах комнаты: на месте головы спящего человека (кривая 1), над головой спящего человека (4), перед выходной дверью (2, 5), перед дверью на лоджию (3, 6)

Зададим для человека, спящего в комнате, величину опасной температуры воздуха, например, 65°C . Из зависимости 1 на рис. 2.6 видно, что на месте головы спящего человека такая температура воздуха достигается на 114-й секунде пожара. Качественную картину пожара в комнате в этот момент иллюстрируют рис. 2.8—2.10. Из этих рисунков видно, что если спавший в комнате человек встанет на 114-й секунде пожара на ноги, то он окажется в условиях значительно большей температуры и немного меньшей видимости, т. е. в более опасных условиях.

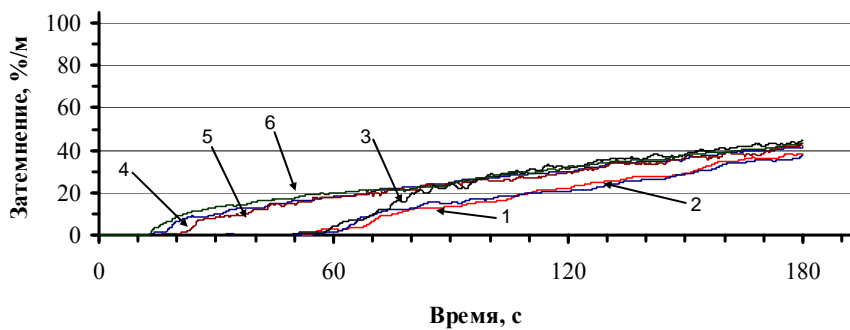


Рис. 2.7. Зависимости затемнения воздуха от времени на высотах 0,55 (кривая 1–3) и 1,65 м (3–6) в различных местах комнаты: на месте головы спящего человека (кривая 1), над головой спящего человека (4), перед выходной дверью (2, 5), перед дверью на лоджию (3, 6)

Также видно, что для смоделированного пожара ситуация в разных местах закрытой комнаты на одной и той же высоте примерно одинакова. Это означает, что условия на пути эвакуации через выходную дверь примерно такие же, как и через дверь на лоджию. С течением времени пожара эти условия только ухудшаются.



Рис. 2.8. Картина на 114-й секунде пожара мощностью 50 кВт в закрытой комнате, потолок и стены которой сделаны из бетона

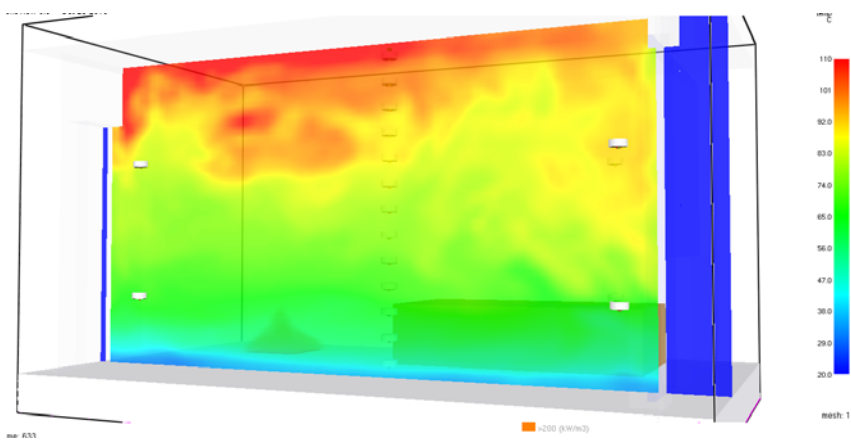


Рис. 2.9. Вертикальное распределение температуры воздуха в комнате на 114-й секунде пожара мощностью 50 кВт

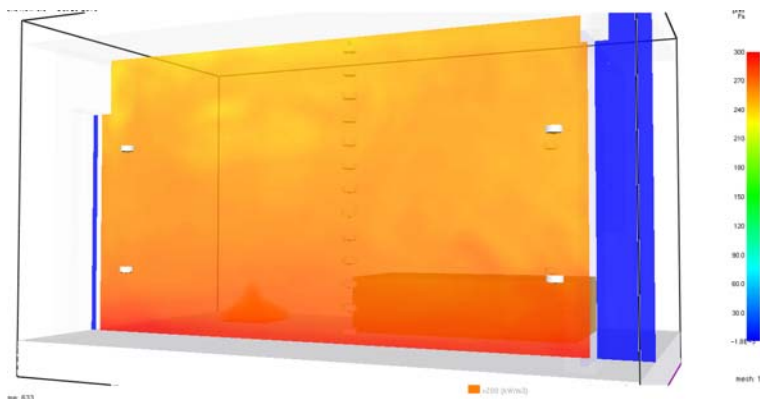


Рис. 2.10. Вертикальное распределение изменения давления воздуха в комнате на 114-й секунде пожара мощностью 50 кВт

Количественно, ситуация в комнате на 114-й секунде пожара характеризуется пространственными распределениями температуры и затемнения воздуха, представленными на рисунках 2.11–2.12. Для сравнения, на этих рисунках представлены также распределения этих величин через 60 секунд после начала пожара и в конце моделирования (на 180-й секунде).

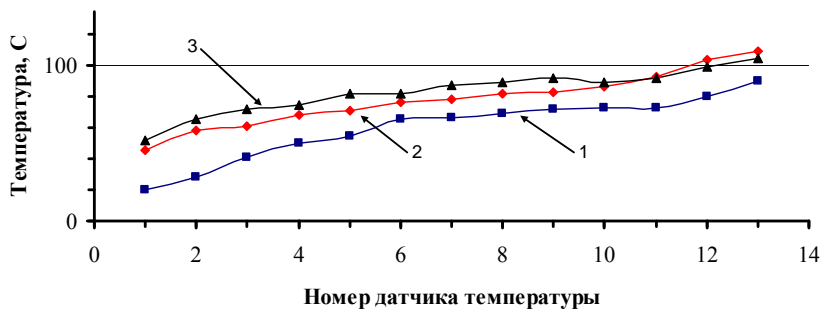


Рис. 2.11. Вертикальные распределения температуры воздуха в комнате на 60-й (кривая 1), 114-й (2) и 180-й секунде пожара

Из рис. 2.11 видно, что вертикальный градиент температуры воздуха в закрытой комнате при пожаре мощностью 50 кВт практически сохраняется в течение времени моделирования.

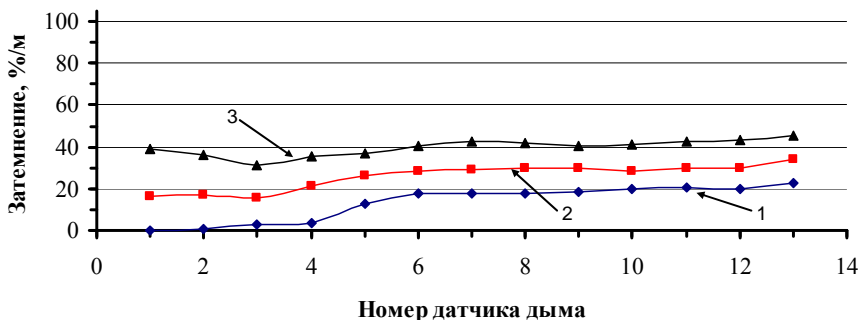


Рис. 2.12. Вертикальные распределения затемнения воздуха в комнате на 60-й (кривая 1), 114-й (2) и 180-й секунде пожара

Распределения, представленные на рис. 2.12 показывают, что на конец моделирования пожара (180 с) закрытая комната оказывается заполненной слоем дыма, практически однородным по оптической плотности.

Отчет по данной работе должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты с приведением всех параметров, условий моделирования и рисунка с видом модели;
- анализ результатов моделирования с приведением рисунков, построенных в редакторе Excel, с зависимостями, характеризующими динамику температуры, изменения давления и затемнения воздуха от времени и их пространственное распределение при пожаре;
- анализ условий на момент достижения критической температуры для спящего в комнате человека и возможностей его эвакуации из комнаты.

3. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОМЕЩЕНИЯ НА ДИНАМИКУ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ЗАКРЫТОЙ КОМНАТЕ

Цель работы: исследовать влияние теплофизических параметров конструкционных материалов помещения на динамику начальной стадии стационарного пожара в закрытой комнате; проанализировать изменение опасных факторов пожара для спящего в комнате человека и условий эвакуации.

Используется модель комнаты, описанная в разделе 2. По согласованию с преподавателем в этой модели заменяются конструкционные материалы, из которых сделаны стены и потолок, на другие со значительно отличающимися плотностью, теплоемкостью и коэффициентами теплопроводности, например, как в настоящей работе, стены и потолок из бетона заменяется на деревянные. Все остальные параметры модели и источник пожара остаются без изменений. Проводится моделирование такого же пожара, как и в предыдущей лабораторной работе. Полученные результаты сравниваются с результатами предыдущего раздела и анализируется, как внесенные в модель изменения повлияли на изменение динамики опасных факторов пожара для спящего в комнате человека.

Картина пожара в комнате из дерева в момент времени достижения критической температуры при пожаре в комнате из бетона показана на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Картина на 114-й секунде пожара мощностью 50 кВт в закрытой комнате, потолок и стены которой сделаны из дерева

Из сравнения рис. 3.1 с рис. 2.8 видно, что картина пожара в комнате из дерева качественно похожа на картину такого же пожара в комнате из бетона.

Результаты количественного сравнения параметров пожара приведены на рис. 3.2–3.5.

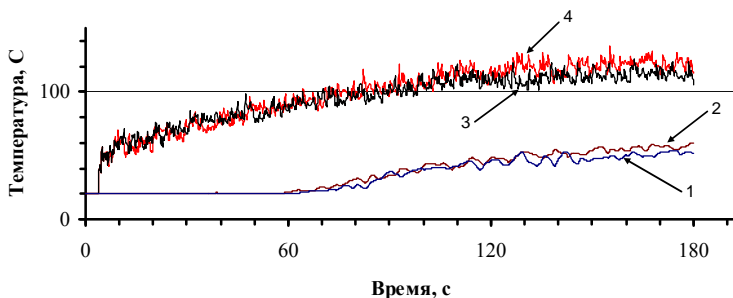


Рис. 3.2. Зависимости температуры воздуха от времени в комнате из бетона (кривая 1, 3) и дерева (2, 4): на высоте 0,05 м (1, 2), 2,45 м (3, 4) от уровня пола

Из рис. 3.2 видно, что температура воздуха в комнате из дерева немного выше, чем в комнате из бетона, так как теплопроводность стен и потолка из дерева меньше, чем из бетона, и в комнате остается большее количество тепла, выделенного при горении.

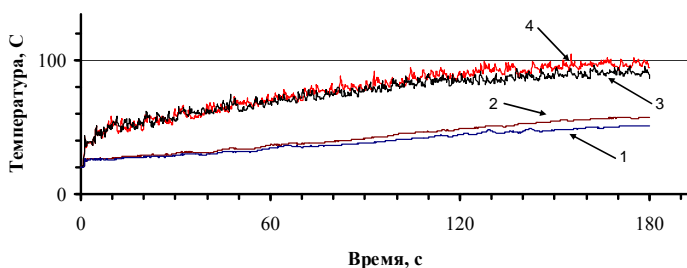


Рис. 3.3. Зависимости температуры поверхностей пола (кривая 1, 2) и потолка (3, 4) от времени: комната из бетона (1, 3) и дерева (2, 4)

Из рис. 3.3 следует, что температура поверхности пола, нагреваемого за счет радиационного переноса тепла (до ~ 62 с) примерно одинакова в обеих комнатах, а в последующие моменты времени,

при конвекционном нагреве, температура поверхности пола в комнате из дерева становится немного выше, так как выше температура воздуха, осуществляющего конвекционный перенос тепла.

Также видно, что, начиная с определенного момента времени, температура поверхности деревянного потолка становится выше поверхности бетонного, так как теплопроводность дерева хуже, чем бетона, а температура воздуха выше.

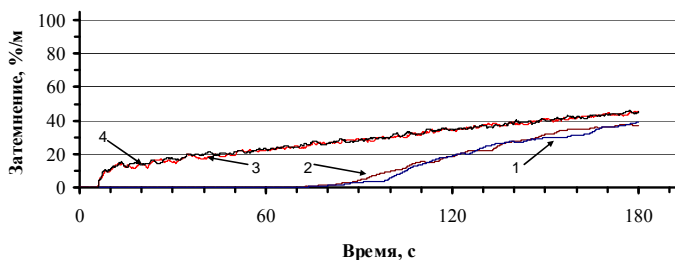


Рис. 3.4. Зависимости затемнения воздуха от времени на высотах 0,05 (кривая 1, 2) и 2,45 м (3, 4) в комнате из бетона (1, 3) и дерева (2, 4),

Рисунок 3.4 показывает, что динамика изменения затемнения в обеих комнатах практически одинакова, так как величина затемнения определяется источником, мощность которого одна и та же в обоих случаях.

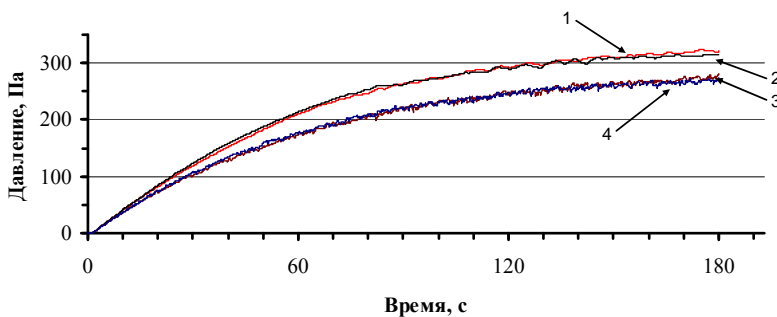


Рис. 3.5. Зависимости избыточного давления воздуха на высотах 0,05 (кривая 1, 2) и 2,45 м (3, 4) от времени: в комнате из дерева (1, 3) и бетона (2, 4)

Из этого рисунка видно, что избыточное давление воздуха в комнате из дерева немного выше, чем в комнате из бетона, так как различие в температурах воздуха также небольшое.

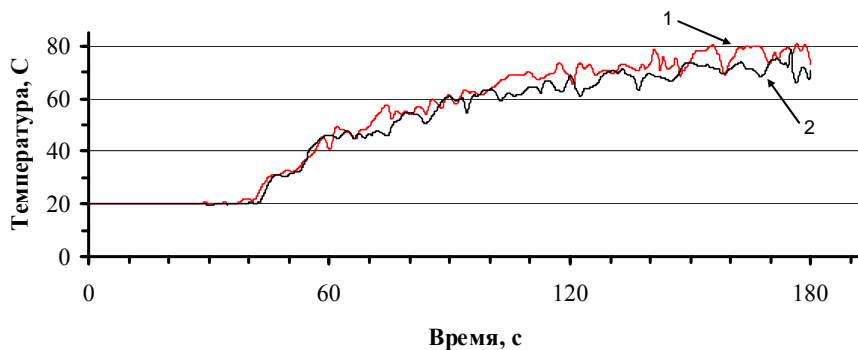


Рис. 3.6. Зависимости температуры воздуха от времени на месте головы спящего человека в комнате из бетона (кривая 1) и дерева (2)

Так как температура воздуха в комнате из дерева немного выше, то и критическая температура воздуха 65 °С достигается немного раньше – примерно на 102-й секунде пожара.

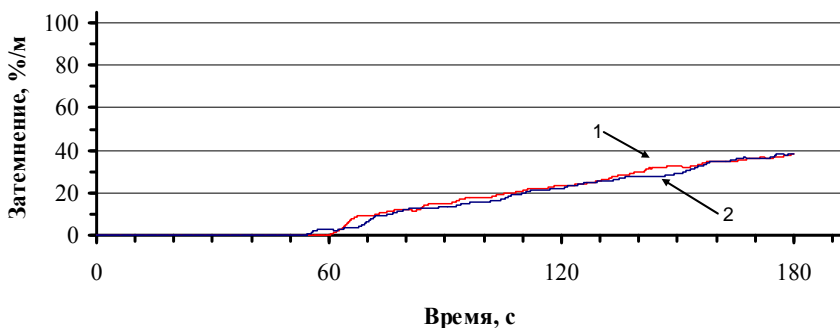


Рис. 3.7. Зависимости затемнения воздуха от времени на месте головы спящего человека в комнате из бетона (кривая 1) и дерева (2)

Как и следовало ожидать, динамика изменения затемнения на месте головы спящего человека практически одинакова в обоих случаях.

Аналогичная ситуация и на путях эвакуации – на высоте среднего роста человека (1.65 м) перед выходной дверью и дверью на лоджию (см. рис. 3.8).

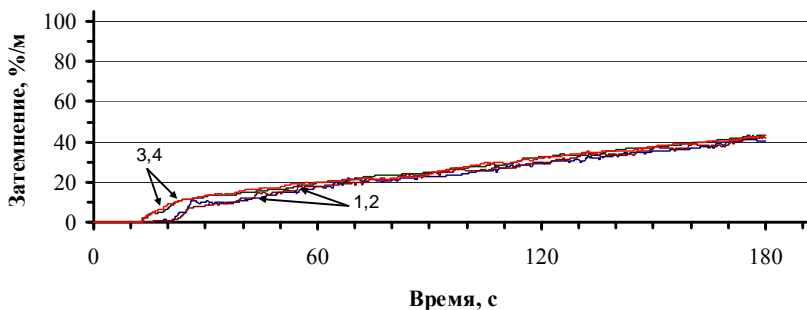


Рис. 3.8. Зависимости задымления от времени на высоте 1,65 м перед выходной дверью (кривая 1, 2) и перед дверью на лоджию (3, 4) в комнате: из бетона (1, 3) и дерева (2, 4)

Таким образом, можно сделать вывод, что модель пожара в закрытой комнате чувствует изменения теплофизических параметров конструкционных материалов комнаты при замене бетона на дерево, однако и качественно, и количественно различия в картинах обоих пожаров невелики и принципиально не влияют на безопасность находящихся в комнате людей.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты, условий моделирования и рисунка с видом модели;
- сравнительный анализ полученных результатов моделирования с результатами раздела 2, содержащий рисунки, построенные в редакторе Excel, на которых зависимости, характеризующие динамику температуры, изменения давления и затемнения воздуха от времени, полученные в настоящем разделе сравниваются с соответствующими зависимостями из предыдущего раздела;
- анализ влияния теплофизических параметров конструкционных материалов помещения на момент достижения критической температуры для спящего в комнате человека и возможности его эвакуации из комнаты;
- выводы о характере изменения опасных факторов пожара в комнате и объяснение причин этих изменений.

4. ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА ПОЖАРА НА ДИНАМИКУ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Цель работы: исследовать влияние мощности источника пожара на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении

При выполнении работы, описываемой в настоящем разделе, студенты по согласованию с преподавателем используют одну из моделей комнаты и результаты моделирования пожара заданной мощности в этой комнате из описанных в предыдущих разделах. С этой моделью проводится моделирование пожара при двух новых величинах мощности источника пожара. Все остальные параметры модели остаются неизменными. Анализируется влияние мощности источника пожара на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении и условия для находящегося в комнате человека.

Например, используем результаты работы, описанной в предыдущем разделе 2 – модель комнаты из дерева и результаты моделирования пожара с мощностью источника 50 кВт, выполним два дополнительных моделирования пожара в такой комнате с мощностями источника 100 и 250 кВт и проведем анализ результатов моделирования.

Изменение характера пожаров в закрытой комнате при увеличении мощности источника иллюстрирует рис. 4.1.

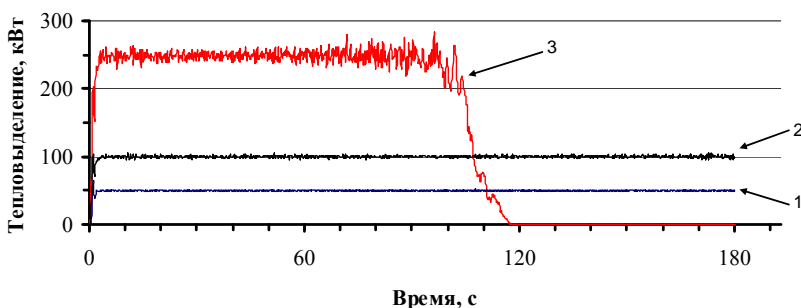


Рис. 4.1. Зависимости тепловыделения от времени при пожарах мощностью 50 (кривая 1), 100 (2) и 250 кВт (3) с источником на полу

Из рис. 4.1 видно, что при мощности источника 100 кВт характер пожара по тепловыделению остается квазистационарным, как и при мощности 50 кВт. Наблюдается увеличение амплитуды колебаний величины тепловыделения, обусловленное увеличением неустойчивостей факела пламени при увеличении мощности источника.

При мощности источника 250 кВт динамика пожара в закрытой комнате меняется. В течение первых ~ 100 с пожар остается квазистационарным с нарастающими со временем амплитудами колебаний тепловыделения. После этого наблюдается относительно короткий (~ 20 с) нестационарный участок, на котором происходит затухание пламенного горения и после ~ 120 -й секунде пламенное горение прекращается.

На рис. 4.2 показана картина пожара на первом квазистационарном этапе. Пламенное горение происходит только над источником.



Рис. 4.2. Вид комнаты, стены и потолок которой сделанной из дерева, на 60-й секунде пожара мощностью 250 кВт

На рис. 4.3 показана картина пожара на нестационарном этапе. На этом этапе температура воздуха в комнате достигает таких значений, что в некоторых местах слоя дыма, содержащем частицы топлива, могут возникать условия их самовоспламенения.



Рис. 4.3. Вид комнаты, стены и потолок которой сделанной из дерева, на 110-й секунде пожара мощностью 250 кВт

Для самовоспламенения необходима соответствующая комбинация концентраций топлива, кислорода и их температуры. Такие комбинации формируются в пространстве комнаты с помощью газодинамических процессов, и они носят случайный характер. Поэтому на затухающем участке тепловыделения самовоспламенение происходит в слое дыма в стороне от источника и случайно возникает в разных его местах, близких к источнику.

На рис. 4.4 приведены зависимости температуры воздуха возле пола и под потолком комнаты от времени для трех мощностей источника пожара.

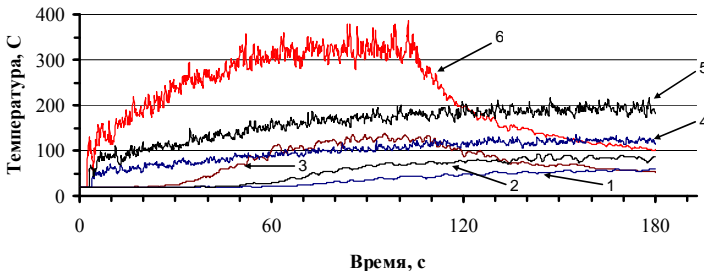


Рис. 4.4. Зависимости температуры воздуха в комнате от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 2, 3) и 2,45 м (4, 5, 6) при пожарах мощностью 50 (1, 3), 100 (2, 5) и 250 кВт (3, 6) с источником на полу

Из этого рисунка видно, что при увеличении мощности источника пожара градиент температуры воздуха на квазистационарном этапе увеличивается. На нестационарном этапе скорость поступления тепла в комнату уменьшается, а скорость тепловых потерь через ограждения остается прежней и температура воздуха в комнате начинает уменьшаться.

На рис. 4.5 приведены зависимости затемнения воздуха возле пола и под потолком комнаты от времени для трех мощностей источника пожара.

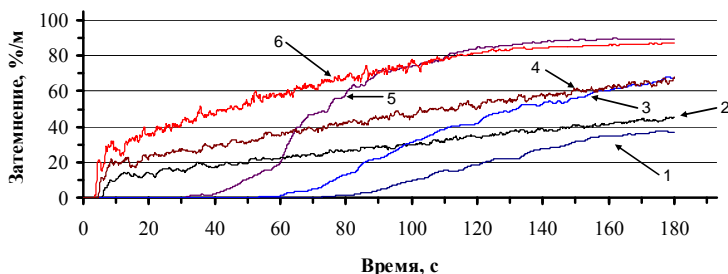


Рис. 4.5. Зависимости затемнения воздуха в комнате от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 3, 5) и 2,45 м (2, 4, 6) при пожарах мощностью 50 (1, 2), 100 (3, 4) и 250 кВт (5, 6) с источником на полу

Из рис. 4.5 видно, что величина затемнения под потолком и скорость достижения максимального значения растут при увеличении мощности источника. Также видно, что при этом происходит сокращение времени заполнения комнаты однородным по оптической плотности слоем дыма.

Рис. 4.6 показывает, как меняется избыточное давление воздуха в закрытой комнате при пожарах различной мощности.

Видно, что при работающем источнике пожара в закрытой комнате изменение давления воздуха коррелирует с изменением его температуры и также формируется градиент давления по высоте, величина которого растет при увеличении мощности источника. Однако, в отличие от градиента температуры воздуха, это обратный градиент, т. е. давление внизу, возле пола, выше, чем вверху, под потолком.

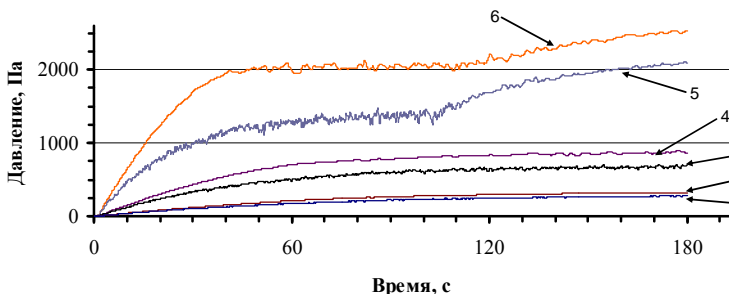


Рис. 4.6. Зависимости избыточного давления воздуха в комнате от времени на высоте 0,05 (кривая 2, 4, 6) и 2,45 м (1, 3, 5) при пожарах мощностью 50 (1, 2), 100 (3, 4) и 250 кВт (5, 6) с источником на полу

Рис. 4.7 показывает характер изменения динамики температуры воздуха на месте головы спящего человека для трех уровней мощности источника пожара.

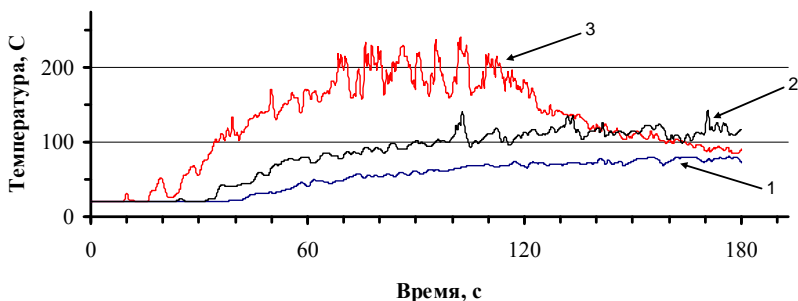


Рис. 4.7. Зависимости температуры воздуха в комнате от времени на месте головы спящего человека при пожарах мощностью 50 (кривая 1), 100 (2) и 250 кВт (3) с источником на полу

Из рисунка видно, что при увеличении мощности источника температура воздуха растет быстрее и усиливаются её колебания, обусловленные усилением газодинамических явлений в комнате. Критическая температура $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается на 102-ой секунде при мощности 50 кВт, 50-й секунде при мощности 100 кВт и 30-й секунде при мощности 250 кВт.

Как меняется затемнение воздуха со временем на месте головы спящего человека в этих случаях показано на рис. 4.8.

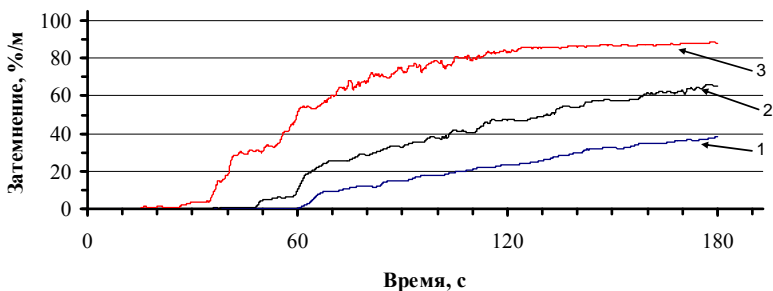


Рис. 4.8. Зависимости затемнения воздуха в комнате от времени на месте головы спящего человека при пожарах мощностью 50 (кривая 1), 100 (2) и 250 кВт (3) с источником на полу

На моменты достижения критической температуры $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 102-я секунда при мощности 50 кВт затемнение достигает величины 18,1 %/м; 50-я секунда при мощности 100 кВт затемнение достигает величины 4,58 %/м; 30-я секунда при мощности 250 кВт затемнение достигает величины 3,29 %/м. Таким образом, при увеличении мощности источника пожара на момент времени, когда температура воздуха на месте головы спящего человека увеличивается до критической, дым еще не успевает опуститься на этот уровень. Однако, если спавший человек в эти моменты времени встанет на ноги для эвакуации, то при большей мощности источника он окажется при большей температуре воздуха (см. рис. 4.9) и в условиях большего затемнения (см. рис. 4.10).

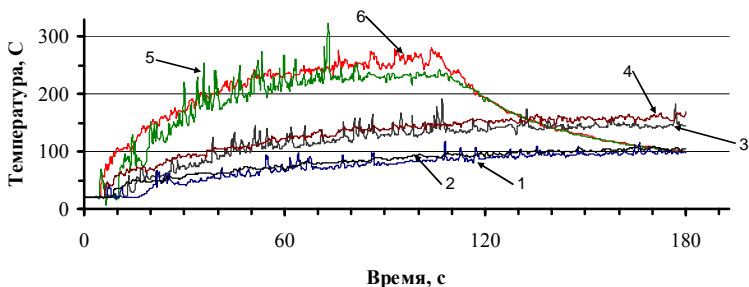


Рис. 4.9. Зависимости температуры воздуха в комнате от времени на высоте 1,65 м перед выходной дверью (кривая 1, 3, 5) и дверью на лоджию (2, 4, 6) при пожарах мощностью 50 (1, 2), 100 (3, 4) и 250 кВт (5, 6) с источником на полу

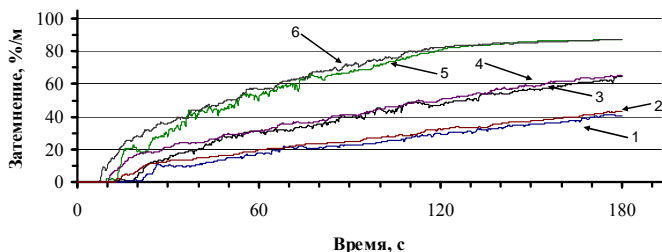


Рис. 4.10. Зависимости затемнения воздуха в комнате от времени на высоте 1,65 м перед выходной дверью (кривая 1, 3, 5) и дверью на лоджию (2, 4, 6) при пожарах мощностью 50 (1, 2), 100 (3, 4) и 250 кВт (5, 6) с источником на полу

На рис. 4.11 показано пространственное распределение температуры воздуха в комнате в вертикальной плоскости, проходящей через детекторы температуры, на 30-й секунде пожара мощностью 250 кВт. (черная линия показывает положение изотермы 65 °С)

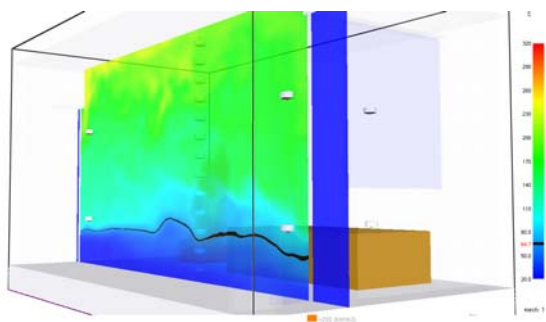


Рис. 4.11. Вертикальное распределение температуры воздуха в комнате на 30-й секунде пожара мощностью 250 кВт (черная линия показывает положение изотермы 65 °С)

Отчет по работе данного раздела должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты и условий моделирования;
- анализ полученных результатов, содержащий зависимости, характеризующие динамику пожара для трех значений мощности источника пожара;
- выводы о характере изменения опасных факторов пожара в закрытой комнате при изменении мощности источника и объяснение причин этих изменений.

5. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПОЖАРА НАД УРОВНЕМ ПОЛА НА ДИНАМИКУ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Цель работы: исследовать влияние высоты расположения источника пожара над уровнем пола на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении

В работе данного раздела по согласованию с преподавателем используется модель комнаты и результаты моделирования пожара в этой комнате с источником заданной мощности, расположенным на полу, описанные в разделе 4. С этой же моделью проводится два дополнительных моделирования пожара с источником той же самой мощности, но расположенным на различной высоте над уровнем пола. Так как источник пожара должен размещаться на твердой поверхности, то для его поднятия над уровнем пола кроме изменения координаты z нужно создать новое препятствие – специальную подставку нужной высоты и с площадью, равную площади источника, из материала, обладающими свойствами поверхности «Inert» [5]. Все остальные параметры модели остаются неизменными. Анализируется влияние высоты расположения источника пожара на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении и условия для находящегося в комнате человека.

Для примера, в настоящей работе, взят источник пожара мощностью 250 кВт и смоделирован пожар в закрытой комнате с источником на полу, высотах 1 и 2 м над уровнем пола. Динамика тепловыделения таких пожаров показана на рис. 5.1.

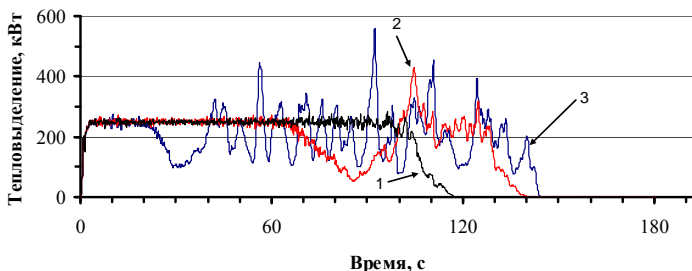


Рис. 5.1. Зависимости тепловыделения от времени при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (кривая 1), высоте 1 м (2) и 2 м (3)

Из рис. 5.1 видно, что с увеличением высоты расположения источника длительность квазистационарного этапа пламенного горения по тепловыделению сокращается, а длительность нестационарного этапа, наоборот, растет. На нестационарном этапе пламенное горение возникает в различных местах слоя дыма, в которых комбинация концентраций горючего материала, кислорода и их температуры соответствует условиям самовоспламенения. На рис. 5.2 показан пример пожара на нестационарном этапе с источником, расположенным на высоте 1 м над уровнем пола.

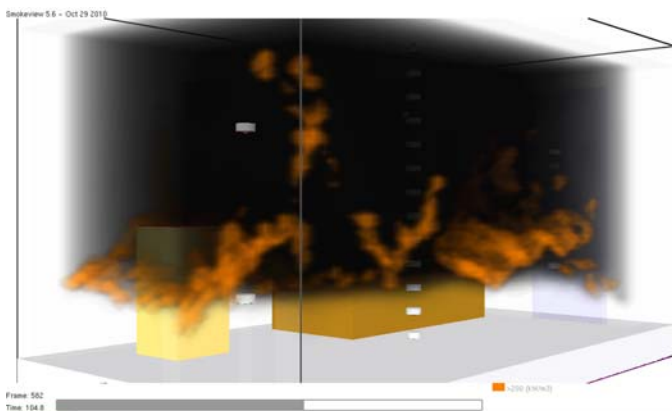


Рис. 5.2. Картина на 105-й секунде пожара в закрытой комнате с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м над полом

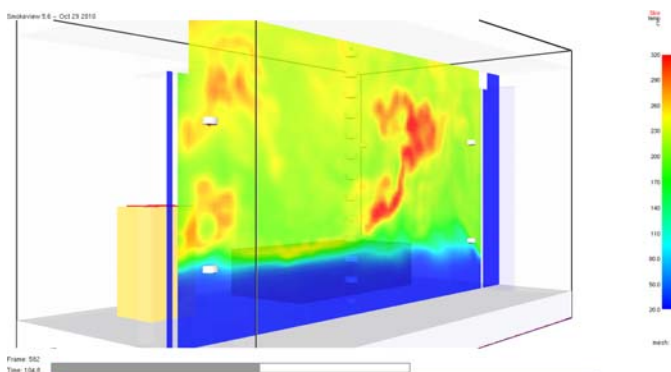


Рис. 5.3. Вертикальное распределение температуры воздуха на 105-й секунде пожара в закрытой комнате с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м над полом

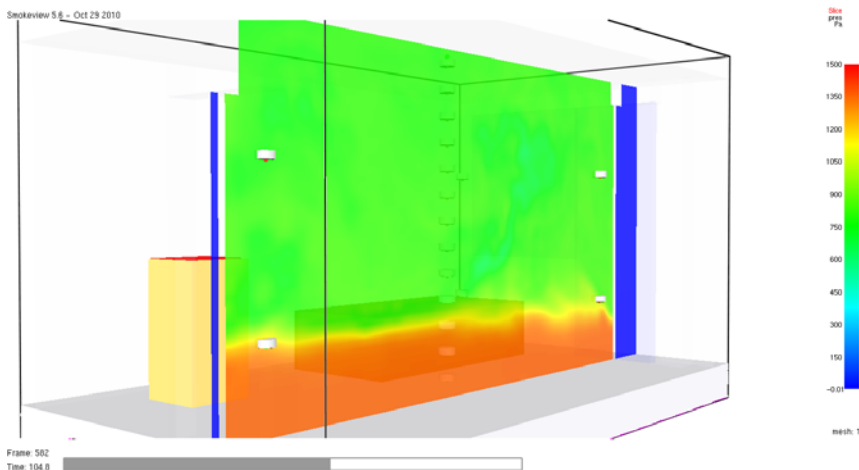


Рис. 5.4. Вертикальное распределение избыточного давления воздуха на 105-й секунде пожара в закрытой комнате с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м над полом

Зависимости, приведенные на рис. 5.5, иллюстрируют характер изменения динамики пространственного распределения температуры воздуха в комнате при изменении высоты расположения источника пожара.

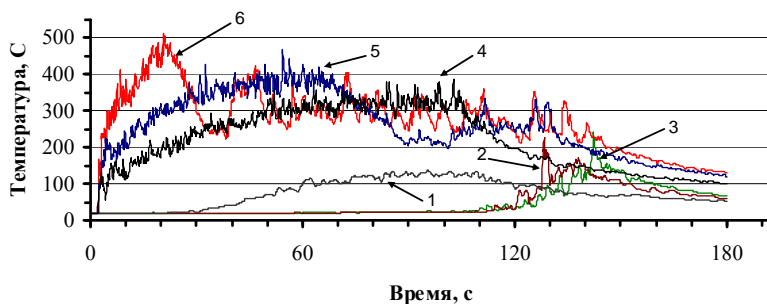


Рис. 5.5. Зависимости температуры воздуха от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 2, 3) и 2,45 м (4, 5, 6) при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (1, 4), высоте 1 (2, 5) и 2 м (3, 6)

Из рис. 5.5 видно, что на квазистационарных этапах пожара, увеличение высоты расположения источника приводит к усилению неоднородного распределения температуры воздуха по высоте – увеличению температуры воздуха под потолком и увеличению вертикального градиента температуры воздуха. На нестационарных этапах пожара возникают сильные газодинамические процессы, влияющие на пространственное распределение температуры воздуха. Самовоспламенение горючего материала, случайно происходящее в различных местах слоя дыма, приводит к локальному повышению температуры воздуха и его давления в этих местах. Возникают хаотически направленные потоки воздуха с различной температурой. Датчики температуры, расположенные в фиксированных местах комнаты, регистрируют хаотические пульсации температуры с амплитудами, зависящими от интенсивности самовоспламенения.

Характер изменения динамики заполнения комнаты дымом при изменении высоты расположения источника пожара показан на рис. 5.6.

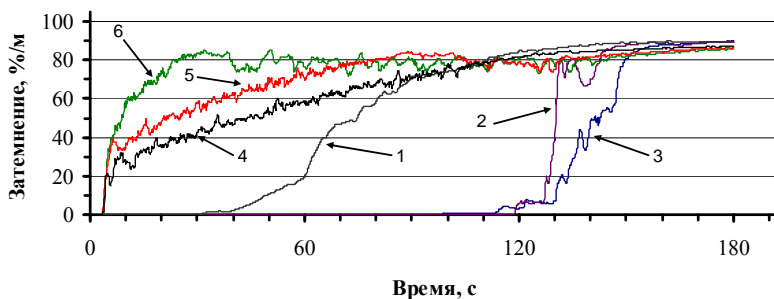


Рис. 5.6. Зависимости затемнения воздуха от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 2, 3) и 2,45 м (4, 5, 6) при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (1, 4), высоте 1 (2, 5) и 2 м (3, 6)

Из рис. 5.6 видно, что при поднятии источника пожара над полом затемнение воздуха под потолком растет быстрее, а возле пола, наоборот, дым начинает появляться позже. Заполнение комнаты дымом одинаковой оптической плотности по высоте также замедляется. Так, например, с источником на полу комната заполняется однородным слоем дыма примерно через 90 с после начала пожара, а с этим же источником, расположенным на высоте 2 м, это происходит уже после 150-й секунды пожара.

Изменение динамики избыточного давления воздуха в комнате при изменении высоты расположения источника пожара иллюстрирует рис. 5.7.

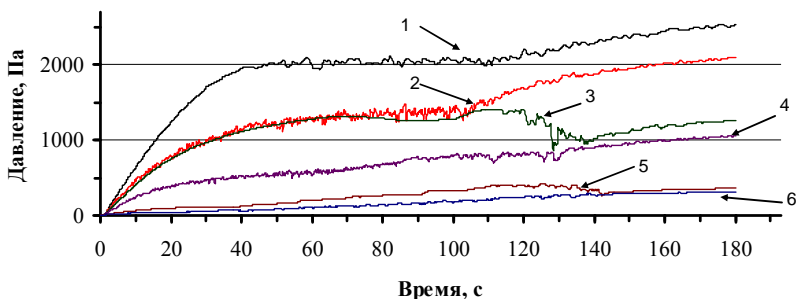


Рис. 5.7 Зависимости избыточного давления воздуха в комнате от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 3, 5) и 2,45 м (2, 4, 6) при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (1, 2), высоте 1 (3, 4) и 2 м (5, 6)

Из рис. 5.7 видно, что наибольшее изменение давления воздуха при пожаре в закрытой комнате происходит, когда источник пожара находится на полу, а наименьшее, когда сверху, на высоте 2 м. Это связано с отличием в пространственном распределении температуры воздуха по высоте. Когда источник находится на полу, весь воздух в комнате нагревается наиболее равномерно (см. рис. 5.5), поэтому и изменение его давления происходит практически во всем объеме комнаты. Когда источник пожара находится на высоте 2 м, происходит в основном локальный нагрев верхнего слоя воздуха, давление в нем повышается, но между этим слоем воздуха и остальным нет препятствия, поэтому происходит расширение верхнего слоя и уменьшение его температуры. В результате изменение давления во всей комнате оказывается небольшим.

При поднятии источника пожара над уровнем пола и увеличении длительности нестационарного этапа пожара с возникновением пламенного горения в слое дыма, увеличивается радиационный поток от слоя дыма к полу. В результате поглощения этого потока в основном поверхностью пола, температура этой поверхности значительно превышает температуру воздуха над полом (см. рис. 5.8).

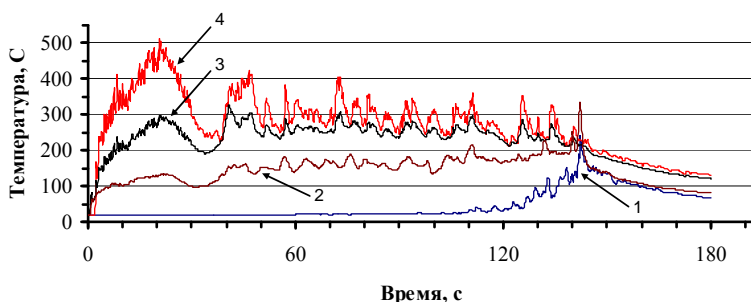


Рис. 5.8. Зависимости температуры воздуха в комнате от времени на высоте 0,05 (кривая 1) и 2,45 м (4), поверхностей пола (2) и потолка (3) при пожаре мощностью 250 кВт с источником на высоте 2 м

Динамика температуры воздуха на месте головы спящего человека для трех положений источника показана на рис. 5.9. Как уже отмечалось, при поднятии источника над уровнем пола воздух на начальном этапе пожара нагревается в основном вверху, под потолком. Из приведенных на этом рисунке зависимостей видно, для спящего человека критическая температура 65 °С достигается на 103-й секунде пожара, когда источник находится на высоте 2 м. Для сравнения, эта же температура достигается на 30-й секунде пожара, когда его источник расположен на полу.

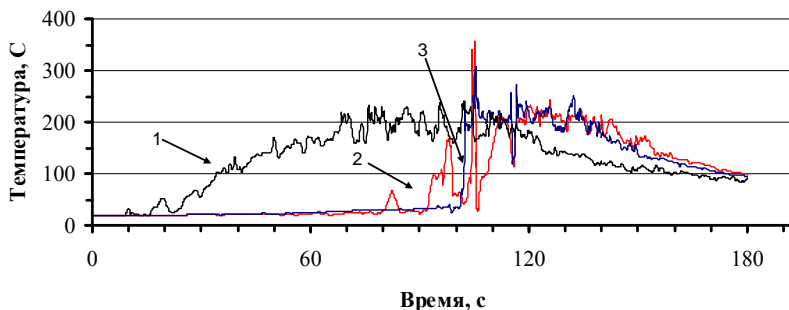


Рис. 5.9 Зависимости температуры воздуха на месте головы спящего человека от времени при пожарах мощностью 250 кВт с источником на полу (кривая 1), высоте 1 (2) и 2 м (3)

Дым от источника пожара, поднятого на высоту больше 1 м, опускается до места головы спящего человека также значительно позже, чем от источника, расположенного на полу (см. рис. 5.10).

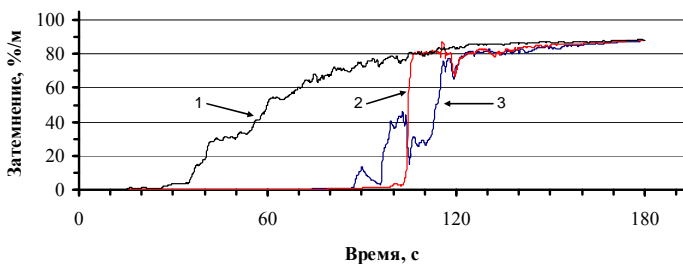


Рис. 5.10. Зависимости затемнения воздуха на месте головы спящего человека от времени при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (кривая 1), высоте 1 (2) и 2 м (3)

Ситуация с температурой воздуха и затемнением на путях эвакуации из комнаты на высоте среднего роста человека видна из рис. 5.11 и 5.12.

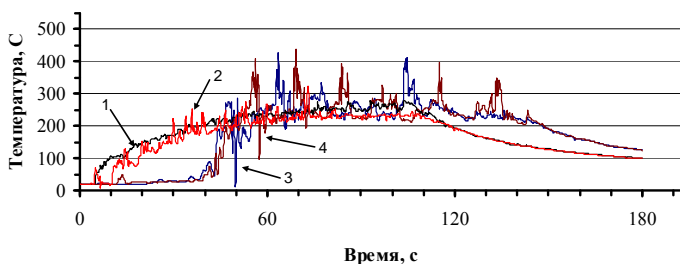


Рис. 5.11. Зависимости температуры воздуха от времени на высоте 1,65 м перед выходной дверью при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (кривая 1, 2) и на высоте 2 м (3, 4)

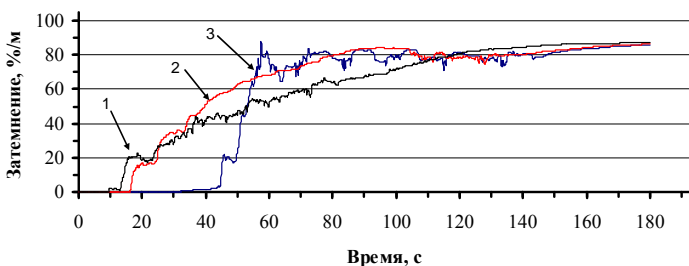


Рис. 5.12. Зависимости затемнения воздуха от времени на высоте 1,65 м перед выходной дверью при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу (кривая 1), высоте 1 (2) и 2 м (3)

Из рис. 5.9-5.12 видно, что для спящего в закрытой комнате человека, наиболее опасным является пожар с источником на полу.

Отчет по данной работе должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты и условий моделирования;
- анализ полученных результатов моделирования, содержащий рисунки с зависимостями, характеризующими динамику тепловыделения, температуры, давления и затемнения воздуха от времени для трех положений источника пожара;
- выводы о характере изменения опасных факторов пожара в закрытой комнате при изменении высоты расположения источника и объяснение причин этих изменений.

6. ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ДИНАМИКУ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Цель работы: исследовать влияние естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении

Выбирается одна из моделей закрытой комнаты, описанных в предыдущих разделах. Затем в модели комнаты создается вентиляционное отверстие, размеры и положение которого согласуются с преподавателем, а все остальные параметры модели и источника пожара остаются без изменений. Проводится моделирование такого же пожара, как и в закрытой комнате. Используя результаты моделирования, проводится анализ влияния естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении.

В качестве примера комнаты с естественной вентиляцией в настоящем разделе взята модель комнаты, стены и потолок которой сделаны из дерева, источник пожара мощностью 250 кВт расположен на полу, вентиляционное отверстие с размерами $0,8 \times 0,3$ м размещено над выходной дверью, под потолком. Нижняя граница отверстия находится на высоте 2,2 м от уровня пола.

Изменение динамики тепловыделения в комнате с естественной вентиляцией по сравнению с закрытой комнатой иллюстрирует рис. 6.1.

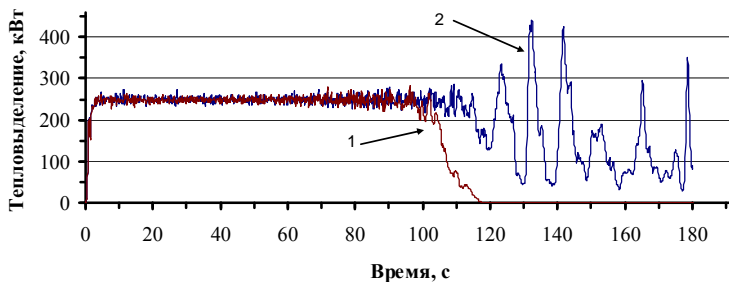


Рис. 6.1. Зависимости тепловыделения от времени при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу в закрытой комнате (кривая 1) и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком (2)

Из рис. 6.1 видно, что в комнате с вентиляцией квазистационарный этап пожара становится примерно на 20 с длиннее, чем в за-

крытой комнате, и он сменяется нестационарным этапом, продолжающимся до окончания моделирования пожара. Это связано с поступлением кислорода из наружной атмосферы в комнату через вентиляционное отверстие. На нестационарном этапе наблюдается пламенное горение, как в области источника, так и в прилегающих к нему областях слоя дыма, между источником и вентиляционным отверстием (см. рис. 6.2).

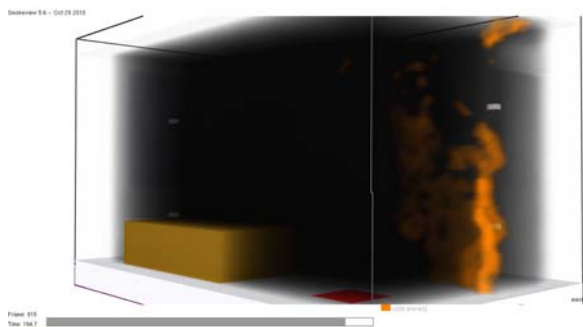


Рис. 6.2. Картина на 165-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием под потолком и с источником мощностью 250 кВт на полу

При появлении вентиляционного отверстия в комнате и фиксированной мощности пожара, часть выделяемого при горении тепла выносится из комнаты через отверстие в окружающую среду теплым воздухом и дымом, а также за счет радиационных потерь [4]. Это ведет к некоторому уменьшению температуры воздуха в комнате, что и показывают результаты моделирования, представленные на рис. 6.3.

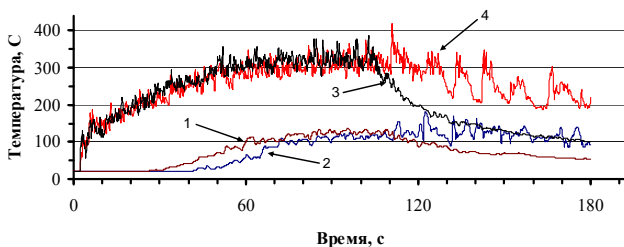


Рис. 6.3. Зависимости температуры воздуха от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 2) и 2,45 м (3, 4) при пожаре в закрытой комнате (1, 3) и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком (2, 4) с источником мощностью 250 кВт на полу

Из рис. 6.3 также видно, что основное изменение в динамике температуры воздуха наблюдается на нестационарном этапе пожара, когда хаотическое самовоспламенение, возникающее в различных областях дыма, усиливает газодинамические процессы в комнате, создавая потоки газа с различной температурой. Это иллюстрирует вертикальное распределение температуры воздуха в комнате, показанное на рис. 6.4.

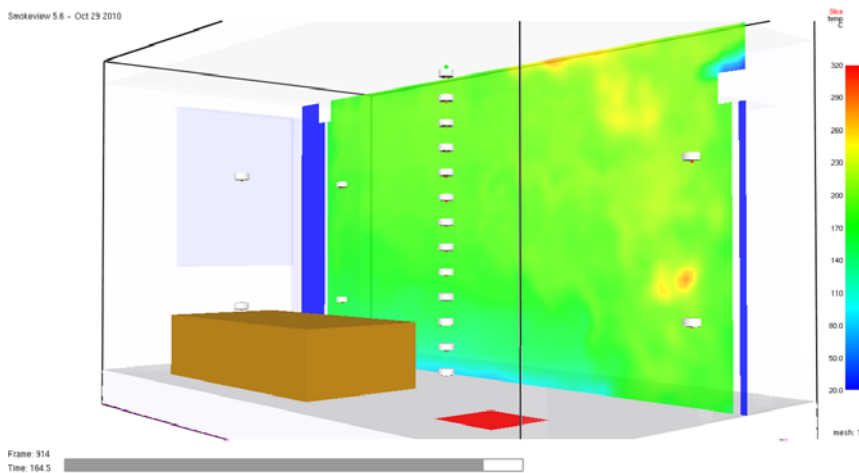


Рис. 6.4. Вертикальное распределение температуры воздуха на 165-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием под потолком и с источником мощностью 250 кВт на полу

Следует отметить, что для температуры поверхностей пола и потолка получаются примерно такие же зависимости, как и для температуры воздуха.

Для дыма получается примерно такая же картина, как и для температуры – с момента достижения вентиляционного отверстия часть дыма начинает уходить из комнаты через это отверстие и в комнате остается меньше дыма. Это отражается на динамике затемнения воздуха – заполнение комнаты однородным слоем дыма происходит позже, чем при пожаре в закрытой комнате (см. рис. 6.5).

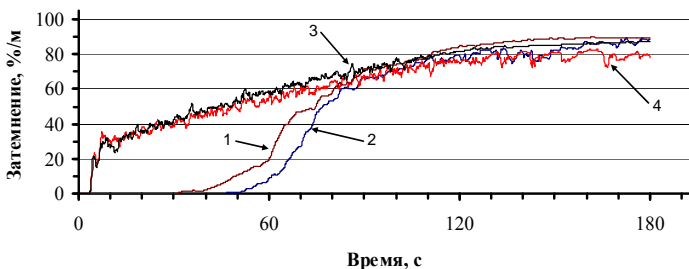


Рис. 6.5. Зависимости затемнения воздуха от времени на высоте 0,05 (кривая 1, 2) и 2,45 м (3, 4) при пожаре в закрытой комнате (1, 3) и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком (2, 4) с источником мощностью 250 кВт на полу

Наличие вентиляционного отверстия, соединяющего внутренний объем комнаты, в которой протекает пожар, с наружной атмосферой, принципиально меняет ситуацию с давлением воздуха в комнате. Так как температура воздуха в комнате при пожаре выше, чем температура окружающей атмосферы, то наличие отверстия связи между ними приводит к появлению известного эффекта дымовой трубы [5]. В зависимости от высоты расположения этого отверстия и распределения температуры воздуха в каждый момент пожара в комнате на определенной высоте находится, так называемая, нейтральная поверхность, ниже которой устанавливается давление воздуха меньше, чем давление окружающей атмосферы, а выше которой – больше (см. рис. 6.6).

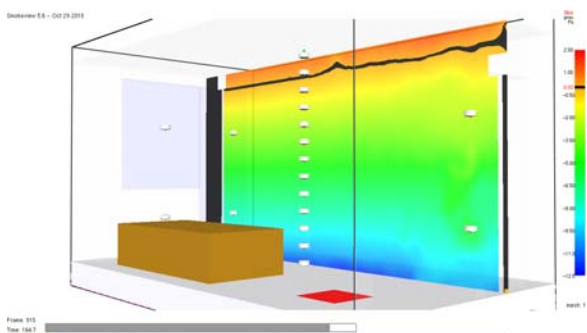


Рис. 6.6. Вертикальное распределение изменения давления воздуха на 165-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием под потолком и с источником мощностью 250 кВт на полу (черной линией показано положение нейтральной поверхности)

Динамика изменения давления воздуха под потолком и над полом показана на рис. 6.7.

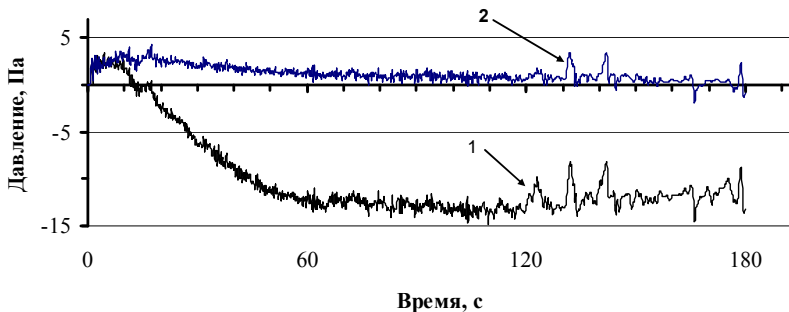


Рис. 6.7. Зависимости давления воздуха от времени на высоте 0,05 (кривая 1) и 2,45 м (2) при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием под потолком и с источником мощностью 250 кВт на полу

Рис. 6.8 и 6.9 показывают, как меняются условия по температуре и затемнению воздуха соответственно на месте головы спящего человека, если в комнате, в которой происходит пожар, есть естественная вентиляция.

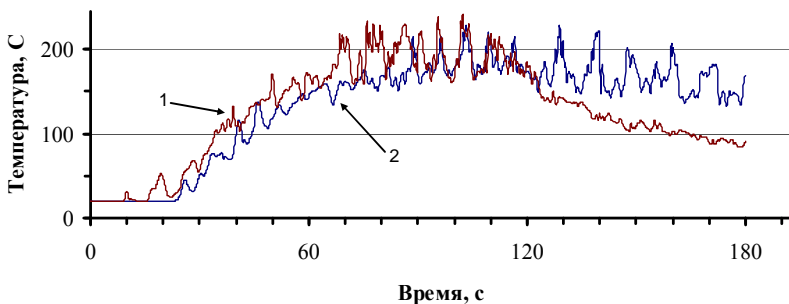


Рис. 6.8 Зависимости температуры воздуха на месте головы спящего человека в закрытой комнате (кривая 1) и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком (2) и с источником мощностью 250 кВт на полу

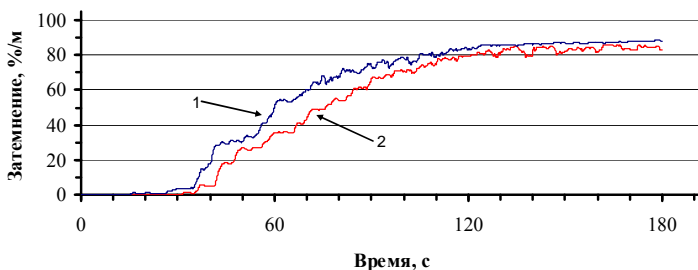


Рис. 6.9. Зависимости затемнения воздуха на месте головы спящего человека в закрытой комнате (кривая 1) и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком (2) и с источником мощностью 250 кВт на полу

Из этих рисунков видно, что в использованных при моделировании параметрах комнаты, источника пожара и вентиляционного отверстия, изменения в температуре и затемнении воздуха невелики. Так, критическая температура $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается в комнате с вентиляцией на 33-й секунде пожара, что всего на 3 с медленнее, чем в закрытой комнате. В эти моменты времени затемнение практически отсутствует в обоих случаях.

Аналогично обстоит ситуация и с параметрами на путях эвакуации — уменьшение температуры и затемнения воздуха на высоте 1,65 м на возможных путях эвакуации — перед выходной дверью и перед дверью на лоджию — при пожаре в комнате с вентиляцией не велики по сравнению с пожаром в закрытой комнате (см. рис. 6.10 и 6.11).

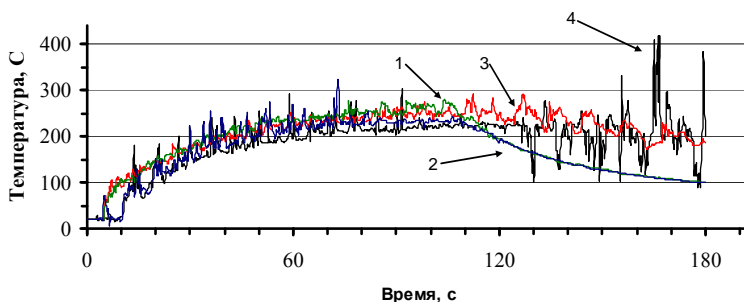


Рис. 6.10. Зависимости температуры воздуха на высоте 1,65 м перед дверью на лоджию (кривая 1, 3) и выходной дверью (2, 4) в закрытой комнате (1, 2) и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком (3, 4) с источником мощностью 250 кВт на полу

7. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕРСТИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ДИНАМИКУ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Цель работы: исследовать влияние высоты расположения отверстия естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении

В этой работе используются результаты предыдущего раздела 6 – результаты моделирования пожара в закрытой комнате и в комнате с вентиляционным отверстием под потолком над выходной дверью с источником, расположенным на полу. Дополнительно проводится моделирование пожара в комнате с таким же по размеру вентиляционным отверстием, но размещенным в нижней части выходной двери так, что его нижняя граница находится на уровне пола. Анализируется влияние высоты расположения отверстия естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении.

В качестве примера комнаты в настоящем разделе взята модель комнаты, стены и потолок которой сделаны из дерева, источник пожара мощностью 250 кВт расположен на полу. Моделируется стационарный пожар в закрытой комнате и в комнате с вентиляционным отверстием размерами $0,8 \times 0,3$ м, нижняя граница которого находится внизу, на уровне пола, и вверху, на высоте 2,2 м. Отверстие находится в области выходной двери.

Различие в динамике тепловыделения при пожаре в закрытой комнате и в комнате с вентиляционным отверстием, расположенным внизу и вверху, иллюстрирует рис. 6.1.

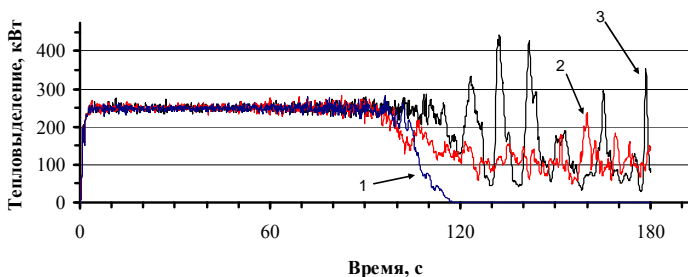


Рис. 7.1. Зависимости тепловыделения от времени при пожаре с источником мощностью 250 кВт, расположенном на полу закрытой комнаты (кривая 1), комнаты с вентиляционным отверстием внизу (2) и вверху (3)

Из рис. 7.1 видно, что на квазистационарных участках пожара динамика его тепловыделения практически одинаковая. Основное отличие наблюдается на нестационарных участках, на которых протекает горение, контролируемое содержанием кислорода [4]. В закрытой комнате из-за недостатка кислорода пламенное горение быстро затухает. В комнате с вентиляцией нестационарные этапы пожара длятся до конца моделирования, и характер тепловыделения на этих участках определяется газодинамикой поступления кислорода через вентиляционное отверстие и созданием условий для самовоспламенения в слое дыма. В случае, когда вентиляционное отверстие находится внизу, условие самовоспламенения реализуется только в нижней части слоя дыма, в области близкой к отверстию (см. рис. 7.2). В случае, когда вентиляционное отверстие находится сверху, кислород поступает в слой дыма, расположенный ниже отверстия, и условия самовоспламенения реализуются в большем объеме дыма. Пламенное горение наблюдается по всей высоте комнаты, но также вблизи вентиляционного отверстия (см. рис. 6.2). Интенсивности пульсаций тепловыделения в этом случае больше, чем в случае, когда вентиляционное отверстие расположено внизу.

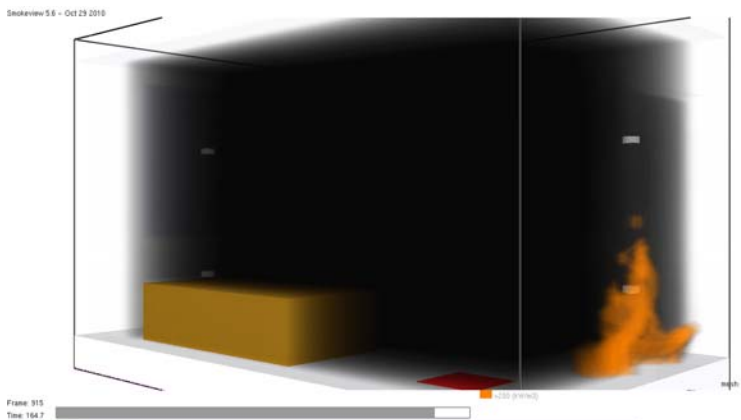


Рис. 7.2. Картина на 165-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием внизу и с источником мощностью 250 кВт на полу

На рис. 7.3 и 7.4 показана динамика изменения температуры и затемнения воздуха соответственно для трех промоделированных

случаев. Из этих рисунков видно, что в первые ~ 30 с влияния наличия вентиляционных отверстий и их расположения практически нет, а потом оно начинает проявляться. Особенность размещения вентиляционного отверстия внизу проявляется в том, что теплый воздух и дым достигают его позже. Поэтому потери тепла из комнаты в этом случае будут меньше, следовательно, температура воздуха и его затемнение будут выше. Это видно из рис. 7.3 и 7.4.

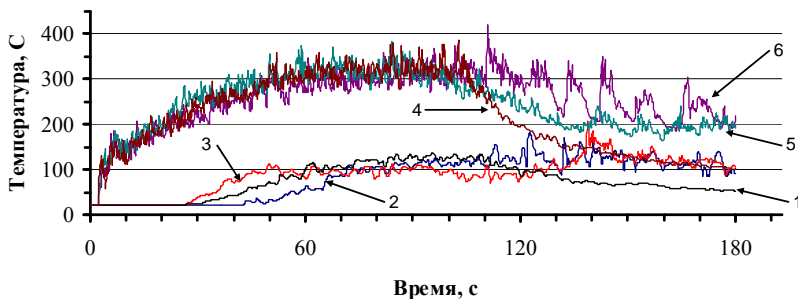


Рис. 7.3. Зависимости температуры воздуха от времени на высотах 0,05 (кривая 1, 2, 3) и 2,45 м (4, 5, 6) при пожаре мощностью 250 кВт в закрытой комнате (1, 4), в комнате с вентиляцией внизу (3, 5) и сверху (2, 6)

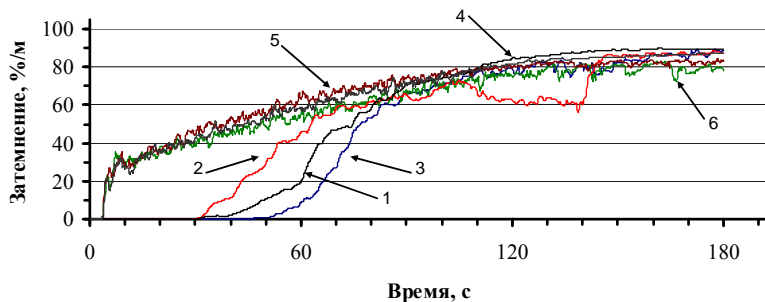


Рис. 7.4. Зависимости затемнения воздуха от времени на высотах 0,05 (кривая 1, 2, 3) и 2,45 м (4, 5, 6) при пожаре мощностью 250 кВт в закрытой комнате (1, 4), в комнате с вентиляцией внизу (2, 5) и сверху (3, 6)

Из рис. 7.4 также видно, что заполнение комнаты однородным слоем дыма, в случае расположения вентиляционного отверстия внизу, происходит наиболее быстро, так как этому способствует соответствующее распределение давления воздуха в комнате и низ-

кое расположение нейтральной поверхности (см. рис. 7.5 и 7.6). В случае размещения вентиляционного отверстия сверху, нейтральная поверхность давления также находится сверху и в большей части комнаты ниже этой поверхности, давление воздуха ниже равновесного атмосферного давления (см. рис. 6.6). Это затрудняет опускание теплого воздуха и дыма вниз, к полу.

Аналогично объясняются и различия в динамике температуры и затемнения воздуха на месте головы спящего человека (см. рис. 7.7 и 7.8), а также на путях эвакуации возле выходной двери и двери на лоджию (см. рис. 7.9 и 7.10).

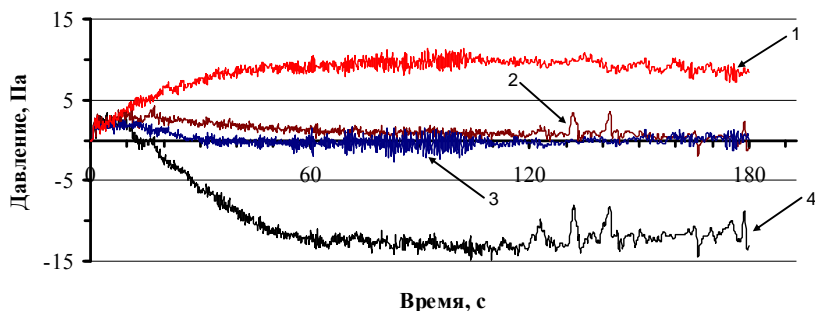


Рис. 7.5. Зависимости давления воздуха в комнате от времени на высотах 0,05 (3, 4) и 2,45 м (кривая 1, 2) при пожаре с источником 250 кВт, расположенном на полу, с вентиляционным отверстием внизу (1, 3) и сверху (2, 4)

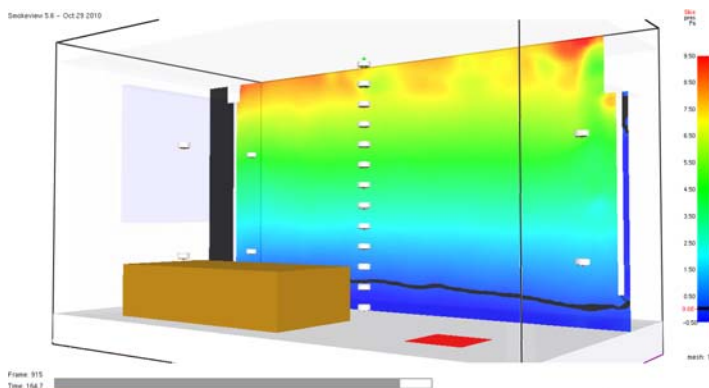


Рис. 7.6. Вертикальное распределение изменения давления воздуха на 165-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием внизу и с источником мощностью 250 кВт на полу (черной линией показано положение нейтральной поверхности)

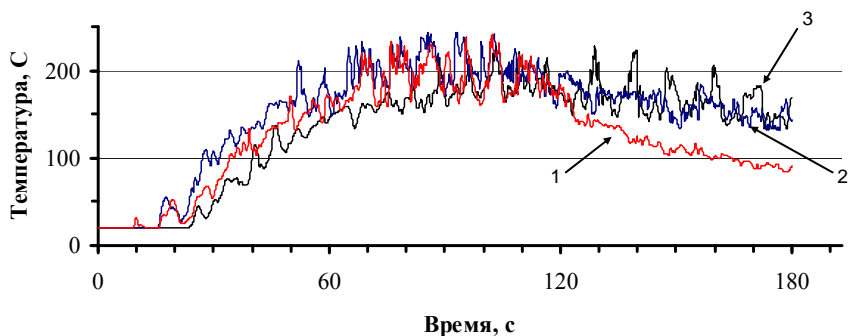


Рис. 7.7. Зависимости температуры воздуха от времени на месте головы спящего человека при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу в закрытой комнате (кривая 1), комнате с вентиляцией внизу (2) и вверх (3)

Из рис. 7.7 видно, что на месте головы спящего человека критическая температура 65 °С достигается на 25-й секунде пожара, что существенно быстрее, чем в случае с вентиляционным отверстием вверх (33-я секунда). И скорость нарастания температуры в этом месте также наиболее высокая из рассмотренных случаев.

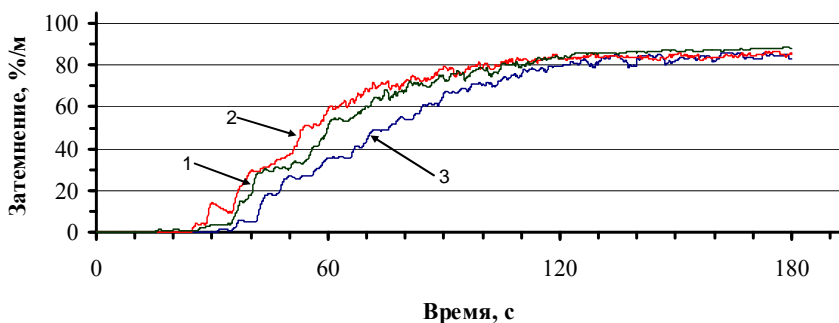


Рис. 7.8. Зависимости затемнения воздуха от времени на месте головы спящего человека при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу в закрытой комнате (кривая 1), комнате с вентиляцией внизу (2) и вверх (3)

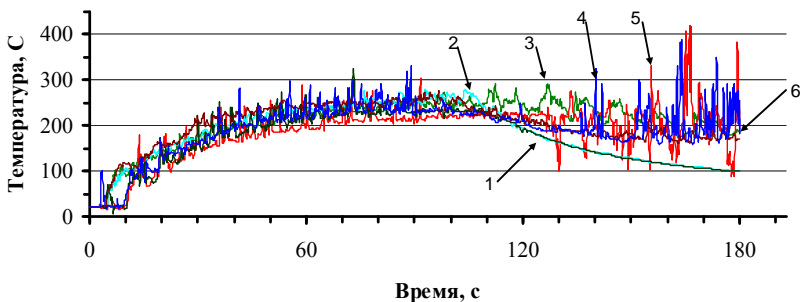


Рис. 7.9. Зависимости температуры воздуха от времени на высоте 1,65 м возле выходной двери (кривая 1, 4, 5) и двери на лоджию (2, 3, 5) при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу в закрытой комнате (1, 2), с вентиляцией внизу (4, 6) и вверх (3, 5)

Из рис. 7.9 следует, что опасные для человека температуры воздуха и величины затемнения, затрудняющие ориентацию на возможных путях эвакуации из рассматриваемой комнаты при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу, достигаются за короткое время как в закрытой комнате, так и в комнате с естественной вентиляцией через отверстия, находящиеся на любой высоте.

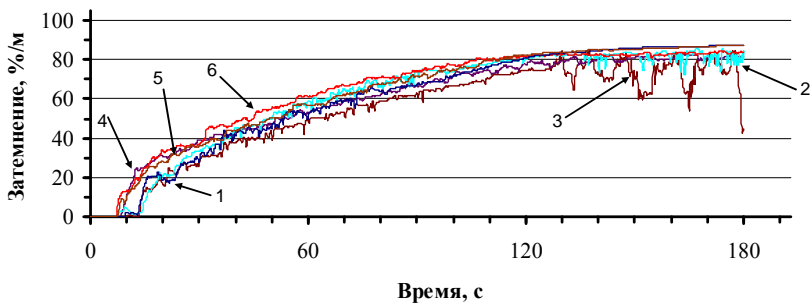


Рис. 7.10 Зависимости затемнения воздуха от времени на высоте 1,65 м возле выходной двери (кривая 1, 2, 3) и двери на лоджию (4, 5, 6) при пожаре мощностью 250 кВт с источником на полу в закрытой комнате (1, 4), с вентиляцией внизу (2, 5) и вверх (3, 6)

Таким образом, результаты проведенного моделирования показали, что для спящего в комнате человека наиболее опасным явля-

ется пожар в комнате с естественной вентиляцией, когда вентиляционное отверстие находится внизу, возле пола.

Отчет по работе должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты и условий моделирования;
- анализ полученных результатов моделирования, содержащий рисунки с зависимостями, характеризующими динамику тепловыделения, температуры, изменения давления и затемнения воздуха от времени в закрытой комнате и комнате с вентиляционным отверстием внизу и вверху;
- выводы о характере изменения опасных факторов пожара в комнате при изменении высоты расположения вентиляционного отверстия и объяснение причин этих изменений.

8. ДИНАМИКА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СТАЦИОНАРНОГО ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ И ИСТОЧНИКОМ, РАСПОЛОЖЕННЫМ ВЫШЕ УРОВНЯ ПОЛА

Цель работы: исследовать влияние высоты расположения отверстия естественной вентиляции относительно источника пожара на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении

Моделирование пожара, описанное в разделе 5, показало, что динамика начальной стадии пожара в помещении зависит от высоты расположения источника пожара над полом. В работе, описанной в разделе 7, исследовалось влияние высоты размещения отверстия естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении, когда источник пожара располагался на полу. В настоящем разделе описывается работа по исследованию динамики пожара в комбинированных условиях – источник пожара размещается на заданной высоте над полом, отверстия естественной вентиляции находятся внизу и вверху. Мощность источника пожара, высота его расположения над полом и размеры вентиляционного отверстия выбираются по согласованию с преподавателем.

В качестве примера в работе настоящего раздела проведено моделирование начальной стадии пожара мощностью 250 кВт с источником, расположенным на высоте 1 м, в трех случаях – в закрытой комнате и в комнате с вентиляционным отверстием размерами $0,8 \times 0,3$ м, нижняя граница которого находилась внизу, на уровне пола, и вверху, на высоте 2,2 м в области выходной двери.

Динамика тепловыделения для этих трех случаев показана на рис. 8.1.

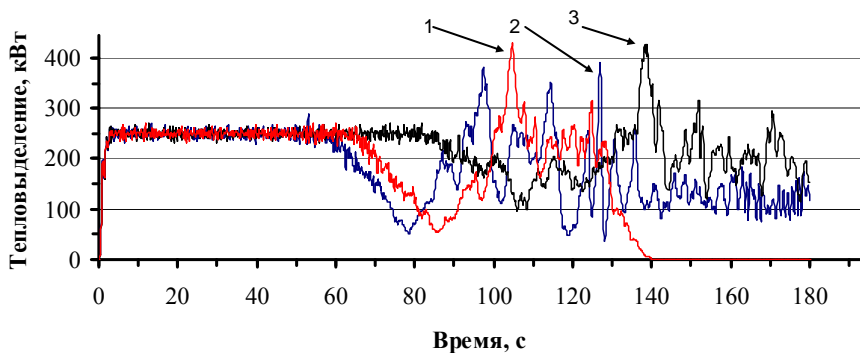


Рис. 8.1. Зависимости тепловыделения от времени при пожаре мощностью 250 кВт с источником на высоте 1 м над полом в закрытой комнате (кривая 1), комнате с вентиляцией внизу (2) и вверху (3)

Из этого рисунка видно, что длительность квазистационарного этапа пожара в комнате с вентиляцией внизу короче, а в комнате с вентиляцией вверху длиннее, чем в закрытой комнате. Основные отличия в динамике пожара наблюдаются на нестационарных этапах пожаров. В закрытой комнате на нестационарном этапе происходит самовоспламенение в нижней части слоя дыма, интенсивность которого уменьшается с течением времени до его полного затухания (см. рис. 8.2 и 5.2).

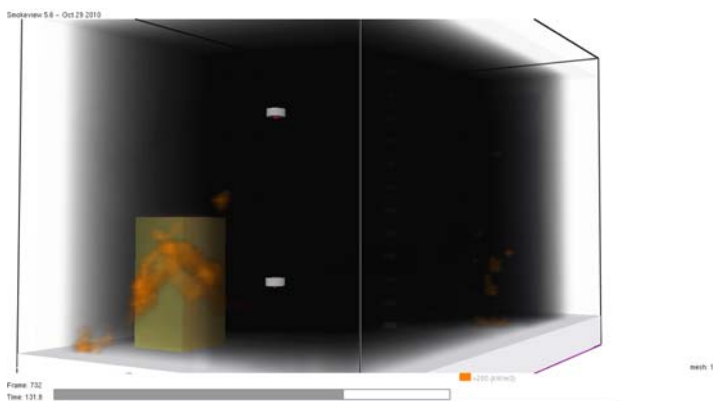


Рис. 8.2. Картина на 132-й секунде пожара в закрытой комнате с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м над полом

При уменьшении интенсивности самовоспламенения происходит выравнивание распределения давления воздуха по высоте комнаты (см. рис. 8.3 и 5.4).

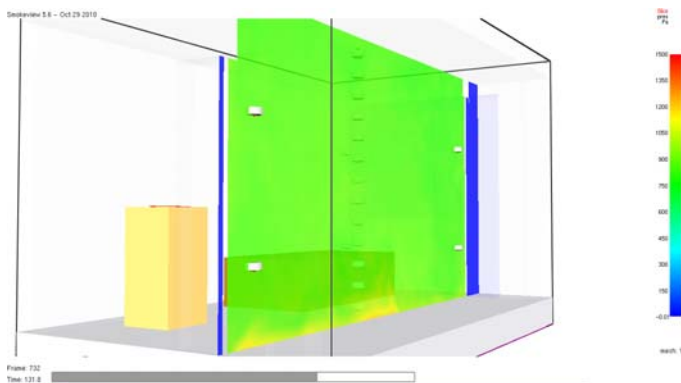


Рис. 8.3. Вертикальное распределение избыточного давления воздуха на 132-й секунде пожара в закрытой комнате с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м над полом

В комнате с вентиляционным отверстием внизу области самовоспламенения возникают, в основном в нижней части слоя дыма, и с течением времени пожара они перемещаются к вентиляционному отверстию,azole которого происходит непрерывное пламенное горение, которое может выходить через отверстие за пределы комнаты (рис. 8.4).

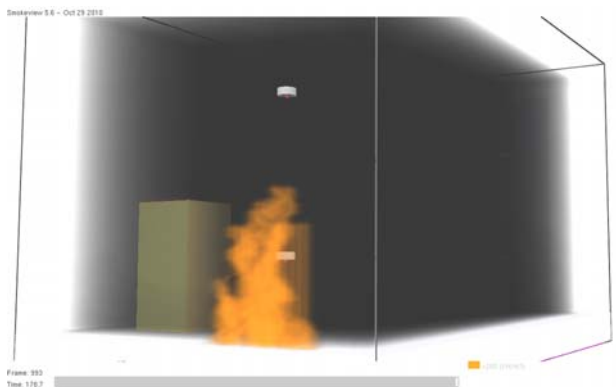


Рис. 8.4. Картина на 179-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием внизу и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м

Изменение пространственного распределения температуры и затемнения воздуха в комнате с течением пожара для этого случая показано на рис. 8.5 и 8.6 соответственно.

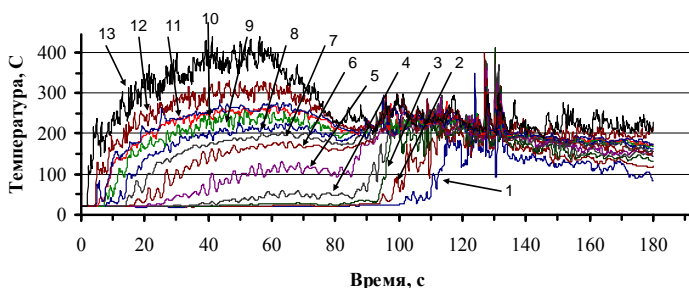


Рис. 8.5. Зависимости температуры воздуха на разных высотах от времени при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием внизу и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м: высота 0,05 (кривая 1), 0,25 (2), 0,45 (3), 0,65 (4), 0,85 (5), 1,05 (6), 1,25 (7), 1,45 (8), 1,65 (9), 1,85 (10), 2,05 (11), 2,25 (12), 2,45 м (13)

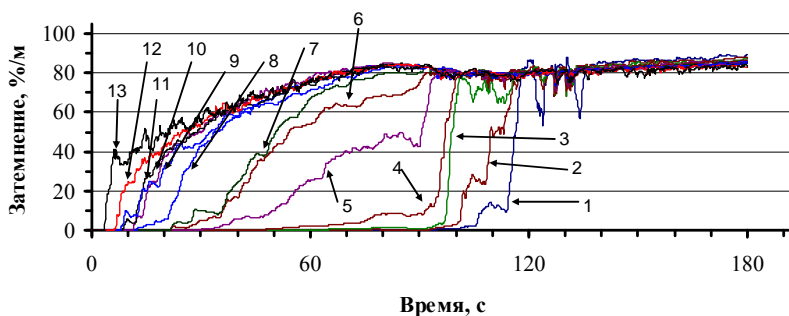


Рис. 8.6. Зависимости затемнения воздуха на разных высотах от времени при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием внизу и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м: высота 0,05 (кривая 1), 0,25 (2), 0,45 (3), 0,65 (4), 0,85 (5), 1,05 (6), 1,25 (7), 1,45 (8), 1,65 (9), 1,85 (10), 2,05 (11), 2,25 (12), 2,45 м (13)

Такая динамика пожара в комнате с вентиляционным отверстием внизу обусловлена распределением давления воздуха в комнате (см. рис. 7.5) и низким расположением нейтральной поверхности (рис. 8.7).

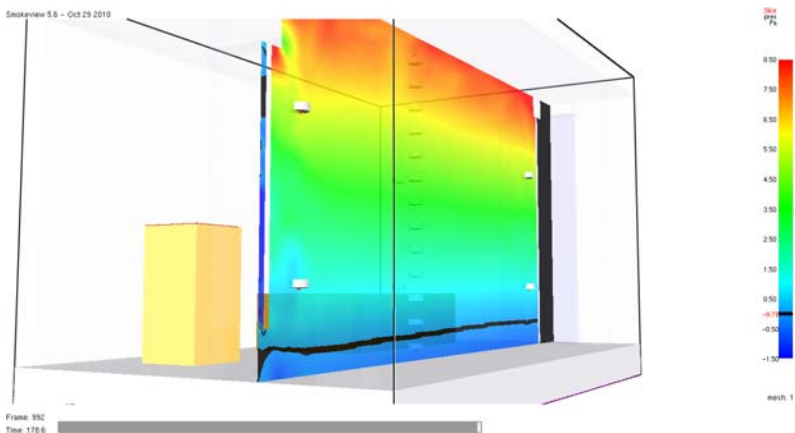


Рис. 8.7. Вертикальное распределение изменения давления воздуха на 179-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием внизу и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м (черной линией показано положение нейтральной поверхности)

В комнате с вентиляционным отверстием сверху на нестационарном этапе пожара самовоспламенение происходит по всему объему дыма, заполняющего комнату, но с течением времени пожара оно происходит в области дыма, ближней к отверстию (см. рис. 8.8).

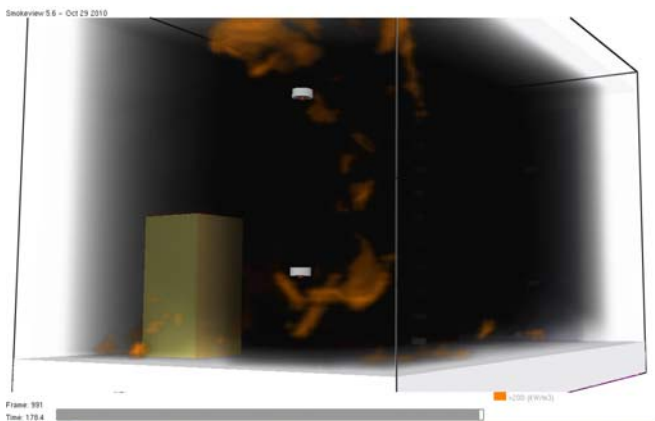


Рис. 8.8. Картина на 179-й секунде пожара в комнате с вентиляционным отверстием сверху и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м

Динамика пространственного распределения температуры и затемнения воздуха при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием вверху показана на рис. 8.9 и 8.10 соответственно.

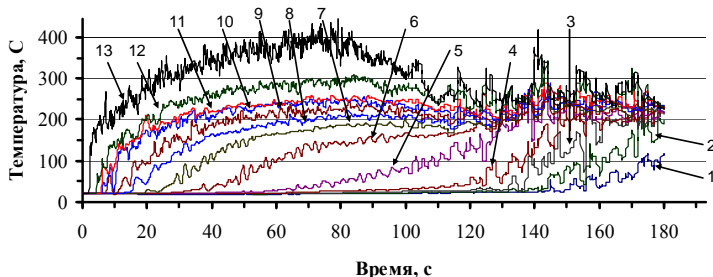


Рис. 8.9. Зависимости температуры воздуха на разных высотах от времени при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием вверху и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м: высота 0,05 (кривая 1), 0,25 (2), 0,45 (3), 0,65 (4), 0,85 (5), 1,05 (6), 1,25 (7), 1,45 (8), 1,65 (9), 1,85 (10), 2,05 (11), 2,25 (12), 2,45 м (13)

Из сравнения рис. 8.9, 8.10 с рис. 8.5., 8.6 видно, что нагретый воздух и дым при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием вверху заполняет комнату значительно медленнее, чем при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием внизу. Это связано с тем, что нейтральная поверхность давления также находится вверху и в большей части комнаты ниже этой поверхности давление воздуха меньше равновесного атмосферного давления (см. рис. 7.5 и 8.11), что и затрудняет опускание теплого воздуха и дыма вниз, к полу.

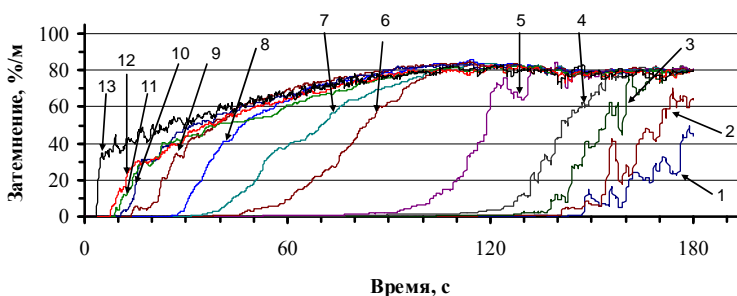


Рис. 8.10. Зависимости затемнения воздуха на разных высотах от времени при пожаре в комнате с вентиляционным отверстием вверху и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м: высота 0,05 (кривая 1), 0,25 (2), 0,45 (3), 0,65 (4), 0,85 (5), 1,05 (6), 1,25 (7), 1,45 (8), 1,65 (9), 1,85 (10), 2,05 (11), 2,25 (12), 2,45 м (13)

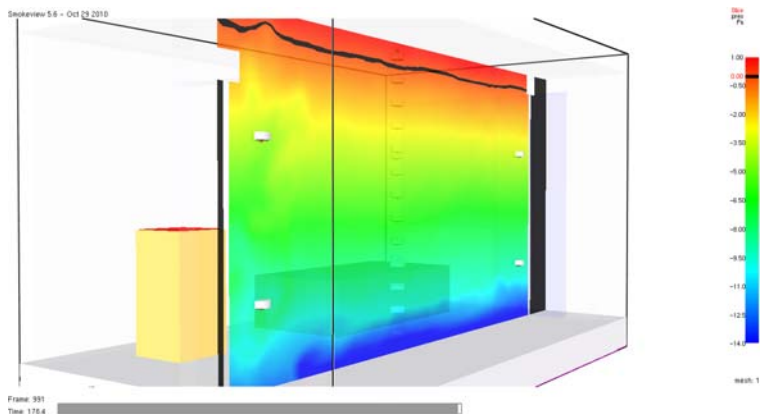


Рис. 8.11. Вертикальное распределение изменения давления воздуха на 179-й с пожара в комнате с вентиляционным отверстием под потолком и с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м (черной линией показано положение нейтральной поверхности)

Зависимости рис. 8.12 показывают, что на месте головы спящего человека выбранная критическая температура $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается на 102-й секунде пожара в закрытой комнате, на 93-й секунде в комнате с вентиляционным отверстием внизу и на 134-й секунде в комнате с вентиляционным отверстием сверху. Это намного медленнее, чем для таких же пожаров с источником на полу (см. рис. 7.7). Однако из сравнения рис. 8.12 и 7.7 видно, что при пожаре с источником на высоте 1 м после достижения критической температуры, температура воздуха на месте головы спящего человека во всех трех случаях очень быстро растет, по сравнению с пожаром с источником на полу, что делает этот пожар для спящего человека более опасным, так как у него практически нет времени для эвакуации из комнаты.

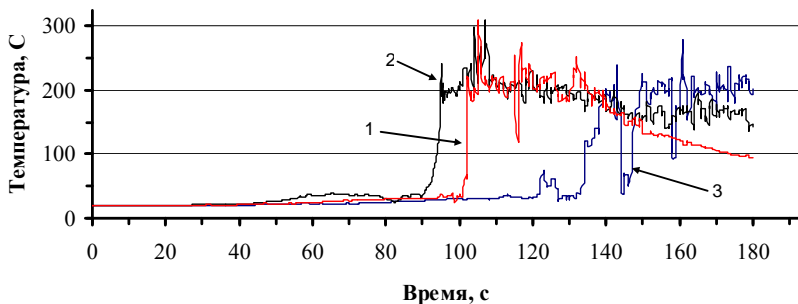


Рис. 8.12. Зависимости температуры воздуха от времени на месте головы спящего человека при пожаре мощностью 250кВт с источником на высоте 1 м в закрытой комнате (кривая 1), комнате с вентиляцией внизу (2) и вверху (3)

Аналогичная ситуация и по дыму (см. рис 8.13 и 7.8).

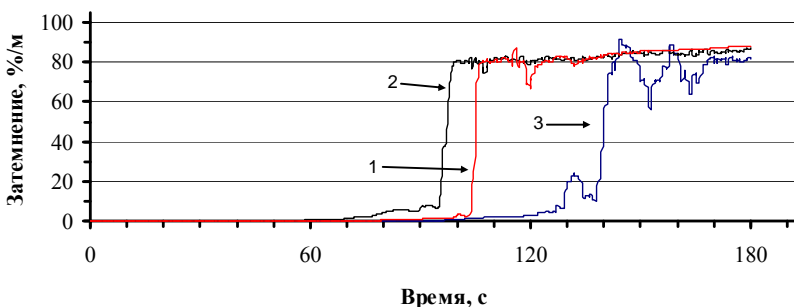


Рис. 8.13. Зависимости затемнения воздуха от времени на месте головы спящего человека при пожаре мощностью 250 кВт с источником на высоте 1 м в закрытой комнате (кривая 1), комнате с вентиляцией внизу (2) и вверху (3)

Динамика температуры и затемнения воздуха на высоте среднего роста человека на путях эвакуации из комнаты показана на рис. 8.14 и 8.15.

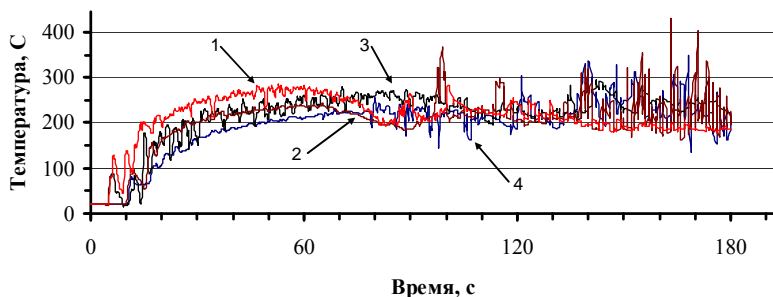


Рис. 8.14 Зависимости температуры воздуха на высоте 1,65 м возле двери на лоджию (кривая 1, 3) и выходной двери (2, 4) при пожаре с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м в комнате с вентиляцией внизу (1, 2) иверху (3, 4)

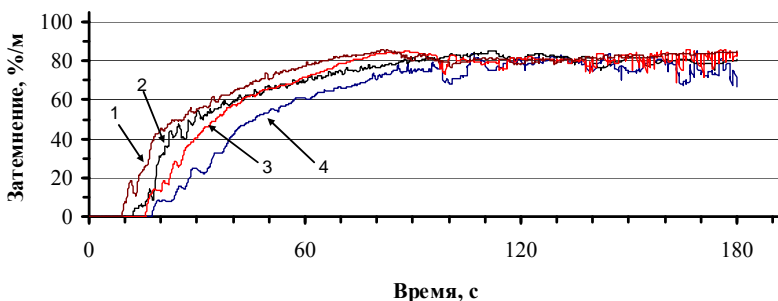


Рис. 8.15. Зависимости затемнения воздуха на высоте 1,65 м возле двери на лоджию (кривая 1, 2) и выходной двери (3, 4) при пожаре с источником мощностью 250 кВт на высоте 1 м в комнате с вентиляцией внизу (1, 3) и вверху (2, 4)

Из этих рисунков видно, что на моменты достижения критической температуры $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ для спящего в комнате с вентиляцией внизу или вверху человека (93-я и 134-я секунда) температура воздуха перед обоими дверями превышает $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затемнение достигает величины $\sim 80\text{ \%}/\text{м}$. У оказавшегося в таких условиях человека мало шансов на эвакуацию.

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- цель работы;
- описание модели комнаты и условий моделирования;

– анализ полученных результатов моделирования, содержащий рисунки с зависимостями, характеризующими динамику тепловыделения, температуры, изменения давления и затемнения воздуха от времени в закрытой комнате и комнате с вентиляционным отверстием внизу и вверху;

– выводы о характере изменения опасных факторов пожара в комнате при изменении высоты расположения вентиляционного отверстия и объяснение причин этих изменений.

Литература

1. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1 : Mathematical Model / К. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1018-5. – 2009. – 94 p.
2. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide / К. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1019-5. – 2009. – 176 p.
3. Forney, G.P. Smokeview (Version 5) : A Tool for Vizualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume 1 : User's Guide / G.P. Forney // NIST Special Publication 1017-1, 2008. — 142 p.
4. Драйздейл, Д. Д. Введение в динамику пожаров / Д. Д. Драйздейл, пер. с англ. К. Г. Бромштейна ; под ред. Ю. А. Кошмарева, В. Е. Макарова. — М. : Стройиздат, 1990. — 424 с.
5. Невдах, В. В. Компьютерное моделирование пожара в помещении : методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физико-математическое моделирование систем охраны и безопасности» / В. В. Невдах. — Минск : БНТУ, 2014. — 72 с.

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| 1. Изучение методических указаний по работе с компьютерными программами FDS и PyroSim, FDS и SmokeView и создание модели жилой комнаты в программе PyroSim..... | 5 |
| 2. Динамика начальной стадии стационарного пожара в закрытой комнате..... | 10 |
| 3. Влияние теплофизических параметров конструкционных материалов помещения на динамику начальной стадии стационарного пожара в закрытой комнате... | 20 |
| 4. Влияние мощности источника пожара на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении..... | 25 |
| 5. Влияние высоты расположения источника пожара над уровнем пола на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении..... | 32 |
| 6. Влияние естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении..... | 40 |
| 7. Влияние высоты расположения отверстия естественной вентиляции на динамику начальной стадии стационарного пожара в помещении..... | 47 |
| 8. Динамика начальной стадии стационарного пожара в помещении с естественной вентиляцией и источником, расположенным выше уровня пола..... | 54 |
| Литература..... | 64 |

Учебное издание

НЕВДАХ Владимир Владимирович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Учебно-методическое пособие по дисциплине
«Физико-математическое моделирование систем охраны
и безопасности» для студентов специальности
1-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности»

Редактор *О. В. Ткачук*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 11.05.2015. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 300. Заказ 781.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.