

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЖАРОВ
С РАЗНОЙ СКОРОСТЬЮ РОСТА В ПОМЕЩЕНИИ
С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ**

Докт. физ.-мат. наук НЕВДАХ В. В.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: v.v.nev@bk.ru

С помощью программы FDS проведено компьютерное моделирование динамики начальной стадии пожаров с разной скоростью роста в помещении с естественной вентиляцией. При быстром пожаре тепловыделение 1055 кВт достигалось по квадратичному закону за 100 с, при среднем за 250 с и при медленном за 500 с. Источник пожара располагался на полу и на высоте 2 м. В качестве вентиляционных использовали дверной проем размером 0,8×2,0 м, а также отверстия 0,8×0,1 м – нижнее, расположенное над полом, и верхнее под потолком. Установлено, что в процессе развития пожары меняют свой характер – они контролируются сначала горючим материалом, а затем кислородом. На первом этапе тепловыделение пожаров меняется по тому же закону, что и массовый расход горючего материала, и пламенное горение наблюдается только в области источника пожара. На втором этапе динамика тепловыделения имеет вид нерегулярных по амплитуде и длительности пульсаций и становится зависимой от условий вентиляции. В этом случае вклад в тепловыделение пожара дает пламенное горение в области источника и/или в области самовоспламенения в слое дыма.

Получено, что при пожаре в помещении с вентиляцией в пространственном распределении температуры и задымления воздуха образуются два слоя – практически однородный верхний и нижний, который характеризуется нерегулярными пульсациями этих параметров, обусловленных возникновением самовоспламенения дыма. Показана связь этих распределений с пространственным распределением изменения давления воздуха в помещении при пожаре. При всех скоростях роста пожара наблюдается сильная зависимость динамики тепловыделения от высоты расположения источника пожара. Увеличение высоты расположения источника пожара над уровнем пола оказывает наибольшее влияние на динамику тепловыделения в случаях вентиляции через дверной проем и верхнее отверстие. Длительность этапа пожара, когда пламенное горение происходит только в области источника, сокращается, а длительность этапа, когда в слое дыма возникает самовоспламенение, возрастает. При этом амплитуды пульсаций тепловыделения, величин затемнения и температуры воздуха в нижней области дыма, где происходит самовоспламенение, увеличиваются, а скорости опускания вниз слоев дыма и нагретого воздуха замедляются.

Ключевые слова: моделирование пожара, помещение с естественной вентиляцией, скорость роста пожара, динамика тепловыделения, самовоспламенение, затемнение.

Ил. 17. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

**SIMULATION OF FIRE DYNAMICS
WITH VARIOUS GROWTH RATE
IN PREMISES WITH NATURAL VENTILATION**

NEVDAKH V. V.

Belarusian National Technical University

Computer simulation of the initial fire stage dynamics with various growth rate have been carried out with the help of FDS software. In case of a quick fire 1055 kW heat liberation has been reached in accordance with quadratic law within 100 seconds, averagely within 250 seconds and within 500 seconds when the fire rate is slow. Source of fire has been located on the floor and at the height of 2 m. A doorway of 0.8×2.0 m size and two 0.8×0.1 m openings have been used as ventilation holes. One opening has been located at the bottom over the floor and the other one has been positioned under the ceiling. It has been established that in the process of their development fires change their character in the following way: at the initial stage they are controlled by inflammable materials and then the fires are controlled by oxygen. At the first stage heat liberation is changed in accordance with the same law which is used for mass rate of an inflammable material and flame combustion is observed only in the field of the fire source. At the second stage heat liberation dynamics has a form of pulsations which are irregular in amplitude and duration and the dynamics becomes dependable on ventilation conditions. At this stage flame combustion in the source zone and/or self-ignition in the smoke layer provide a corresponding contribution in fire heat liberation.

It has been determined that two layers have been formed in case of a fire in the premises with ventilation in the spatial distribution of temperature and air fumigation. These top and bottom layers are practically uniform and they are characterized by irregular pulsations of the parameters which are due to smoke self-ignition occurrence. The paper shows relationship of these distributions with spatial distribution of air pressure changes in the premises during a fire. A significant dependence of heat liberation dynamics on fire source location height is observed at all fire growth rates. An increase in fire source location height above floor level exerts the most significant influence on heat liberation dynamics when ventilation occurs through a doorway and a top opening. Duration of the fire stage when flame combustion occurs in the source zone is reduced and duration of the stage when self-ignition takes place in the smoke layer is increased. In such a case heat liberation pulsation amplitudes, black-out values and air temperature in the bottom smoke zone where the self-ignition occurs are increasing and the rates of smoke layer and heated air sinking are slowing down.

Keywords: fire simulation, premises with natural ventilation, fire growth rate, heat liberation dynamics, self-ignition, black-out.

Fig. 17. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

Введение. Успешная эвакуация людей в случае возникновения пожара в помещении возможна только на первом, начальном этапе его развития. Развитие пожара в помещении зависит от характеристик горения топлив, их физической конфигурации, присутствия воздуха и геометрии помещения. Основным параметром для описания скорости роста пожара обычно является величина тепловыделения, или мощность пожара. Считается, что после того как достигнуто стабильное пламя, большинство пожаров растет с ускорением, достигая установившегося режима, характеризующегося максимальным тепловыделением, и затем переходит в стадию затухания из-за ограниченного количества топлива или недостатка кислорода для горения [1–3]. При разной скорости роста пожара в помещении наблюдается различная динамика его опасных факторов.

При описании динамики начального этапа пожара в помещении скорость его развития обычно характеризуется временем, необходимым для достижения заданной мощности тепловыделения Q^* после начала горения стабильным пламенем. Исследования показали, что мощность тепловыделения Q большинства пожаров может быть выражена так называемой моделью степенного закона развития пожара [1]

$$Q = \alpha(t - t_0)^2,$$

где $\alpha = Q^*/t_g^2$ – скорость роста пожара; t_g – время, которое должно пройти с момента возникновения стабильного пламени до достижения заданной величины мощности тепловыделения; t_0 – время появления стабильного пламени; t – текущее время. До момента t_0 горючие

материалы могут тлеть, но не будет стабильного пламенного горения.

По скорости роста пожары в помещении принято классифицировать на медленные, средние или быстроразвивающиеся с момента времени, когда появляется установившееся пламя, до момента достижения мощности тепловыделения $Q^* = 1055$ кВт (табл. 1).

Таблица 1

Классификация пожаров по скорости роста

Вид скорости пожара	Время роста пожара t_g , с	Скорость роста пожара α , кВт/с ²
Быстрая	$t_g < 150$	$\alpha > 0,0470$
Средняя	$150 \leq t_g < 400$	$0,0066 < \alpha \leq 0,0470$
Медленная	$t_g \geq 400$	$\alpha \leq 0,0066$

Начальные этапы пожаров в помещениях исследовали как при экспериментальном моделировании тестовых и полномасштабных пожаров, так и при компьютерном их моделировании [4–7]. Следует отметить, что получаемые экспериментальные результаты не всегда согласуются с модельными расчетами. Это является следствием того, что с теплофизической точки зрения пожар в помещении – сложная нелинейная система, в которой протекают процессы тепло-, массо- и радиационного переноса, а их динамика изучена недостаточно.

Целью исследований являлось компьютерное моделирование с помощью программы Fire Dynamics Simulator (FDS) динамики начальной стадии пожаров с разной скоростью развития в помещении с естественной вентиляцией.

Модель помещения и условия моделирования пожара. Моделирование пожара осуществляли с помощью программы FDS (version 5) [8]. С помощью специального графического интерфейса PyroSim в прямоугольной

расчетной сетке с кубическими ячейками с ребром 0,1 м создали трехмерную модель помещения – комнаты размером 4,5×5,1×3,0 м (рис. 1).

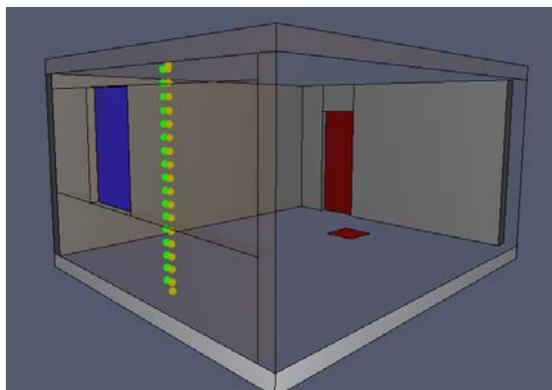


Рис. 1. Вид трехмерной модели комнаты

В качестве материала для пола толщиной 0,3 м и потолка комнаты толщиной 0,2 м выбран бетон, а для стен толщиной также 0,2 м – кирпич. В комнате имелись расположенные в противоположных стенах застекленное окно размерами 1,0×1,4 м и деревянная дверь 0,8×2,0 м. В модели использовали справочные значения параметров, определяющих тепловую инерцию конструкционных материалов комнаты – плотностей, удельных теплоемкостей и коэффициентов теплопроводности.

Моделировали помещение с естественной вентиляцией через отверстия разного размера – дверной проем, а также отверстия размерами 0,8×0,1 м, расположенные в нижней части двери от уровня пола и вверху под потолком над дверью.

Источник пожара (burner) размерами 0,5×0,5 м последовательно располагали на полу и на высоте 2,0 м от уровня пола на расстоянии 0,8 м от стены с дверью. Детектируемыми параметрами пожара были: массовая скорость горения материала (кг/с); величина тепловыделения пожара (кВт); температура воздуха в помещении (°С); затемнение (%/м) и изменение давления воздуха в помещении относительно начального атмосферного (Па).

Температуру и задымление воздуха контролировали наборами соответствующих датчиков температуры и дыма (по 17 штук в каждом наборе), расположенных по вертикальной оси с интервалом 0,15 м, нижние из которых размещались на высоте 0,09 м над уровнем пола, а верхние – на высоте 2,49 м от уровня пола. Ось датчиков находилась на расстоянии 0,20 м

от стены комнаты с окном. Датчики давления воздуха располагались на высотах 0,09 и 2,49 м. Взаимное расположение источника пожара и датчиков в комнате видно из рис. 1.

Для удобства работы с моделью и наблюдения за развитием пожара с помощью специальной программы визуализации данных Smoke-View [9] потолок и стены комнаты были сделаны частично прозрачными.

Результаты моделирования и их обсуждение. В соответствии с табл. 1 были выбраны следующие скорости роста пожара α , кВт/с²: для быстрого пожара $\alpha_f = 0,1055$; для среднего $\alpha_m = 0,01688$; для медленного $\alpha_{sl} = 0,00422$. При этом расчетное время нарастания пожара t_g до достижения источником мощности тепловыделения $Q^* = 1055$ кВт составляло 100, 250 и 500 с соответственно. Далее пожар продолжался с постоянной скоростью расходования горючего материала. Полное время моделирования составляло 600 с для всех трех типов пожаров и начиналось с момента, когда тепловыделение источника достигало величины 10 кВт, при которой наблюдалось стабильное пламя. Динамика изменения массовой скорости расхода горючего материала для этих пожаров представлена на рис. 2.

Моделирование показало, что для всех скоростей роста пожара наблюдается зависимость динамики тепловыделения от условий вентиляции.

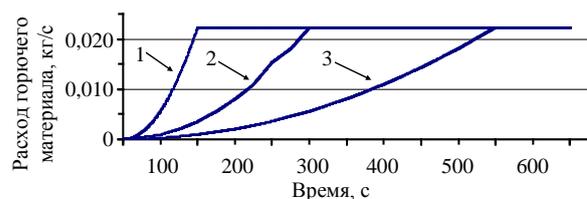


Рис. 2. Зависимость массового расхода горючего материала источником пожара от времени при скорости роста пожара: 1 – быстрый; 2 – средней; 3 – медленной

Динамика тепловыделения пожара с медленной скоростью роста (источник пожара расположен на полу комнаты) для трех случаев естественной вентиляции показана на рис. 3. Из рис. 3 видно, что на начальном этапе пожара тепловыделение меняется по тому же закону, что и массовый расход горючего материала. Это соответствует пожару, контролируемому горючим материалом. Факел пламени наблюдается в области источника пожара.

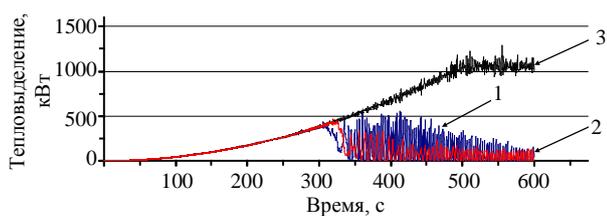


Рис. 3. Зависимость тепловыделения от времени при медленном пожаре в комнате с источником на полу: 1 – вентиляция через отверстие внизу над полом; 2 – то же сверху под потолком; 3 – дверной проем

Начиная с некоторого момента времени характер пожара меняется – он становится пожаром, контролируемым кислородом, и динамика его тепловыделения начинает зависеть от условий вентиляции.

В случае вентиляции через дверной проем пламенное горение в области источника ослабевает, но возникает вероятность самовоспламенения горючего в областях дыма, прилегающих к источнику. Так как данные условия создаются хаотически в разных местах, где происходит хаотическое тепловыделение, это усиливает газодинамические процессы в помещении, приводящие к увеличению пуль-

саций факела пламени и его смещению в стороны от источника.

Таким образом, вклад в тепловыделение пожара дает пламенное горение в областях источника и самовоспламенения в прилегающих слоях дыма. Поступление кислорода через дверной проем оказывается достаточным для того, чтобы после окончания участка роста пожар имел квазистационарный характер по тепловыделению (рис. 3, зависимость 3).

Картины медленного пожара в разные моменты времени в комнате с вентиляцией через дверной проем показаны на рис. 4 в левой колонке. Динамика пространственного распределения дыма в комнате при таком пожаре представлена на рис. 5, 6. Из рисунков видно, что через ~150 с после начала пожара дым опускается практически до уровня пола (детектора на высоте 0,09 м) и в помещении по высоте формируются два слоя дыма – нижний, между полом и высотой 1,14 м, в котором величину затемнения контролируют восемь детекторов дыма, и верхний – от высоты 1,29 м и до потолка (2,5 м), контролируемый девятью детекторами.

Вентиляция через дверной проем	Вентиляция через нижнее отверстие над полом	Вентиляция через верхнее отверстие под потолком
300-я секунда пожаров		
400-я секунда пожаров		
600-я секунда пожаров		

Рис. 4. Картины медленных пожаров в разные моменты времени в комнате с естественной вентиляцией через различные отверстия с источником пожара, расположенным на полу

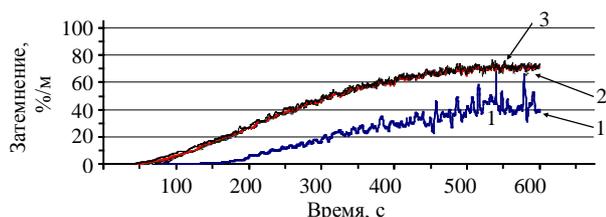


Рис. 5. Зависимость затемнения воздуха от времени при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через дверной проем: на высоте 0,09 м (1); в верхнем слое между высотами 1,29 (2) и 2,49 м (3)

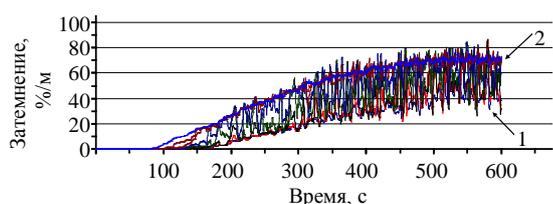


Рис. 6. Зависимость затемнения воздуха от времени при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через дверной проем: в нижнем слое между высотами 0,09 (1) и 1,14 м (2)

Верхний слой дыма является практически однородным по высоте (рис. 5, зависимости 2, 3), тогда как в нижнем слое наблюдаются пульсации затемнения, амплитуда которых достигает величины 40 %/м (рис. 6). Эти пульсации вызваны газодинамическими возмущениями, появляющимися при возникновении самовоспламенения в разных местах нижнего слоя дыма.

Динамика пространственного распределения температуры воздуха подобна динамике распределения дыма. Пример распределения изменения давления воздуха в вертикальной плоскости по центру помещения при моделируемом пожаре показан на рис. 7.

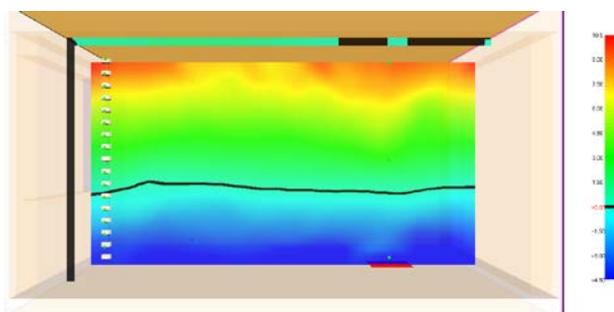


Рис. 7. Пространственное распределение изменения давления воздуха на 590-й с медленного пожара с источником на полу и вентиляцией через дверной проем (темной линией показано положение нейтральной поверхности)

Из рис. 7 видно, что пожар протекает в условиях действия эффекта дымовой трубы – есть нейтральная поверхность, на уровне которой давление воздуха в помещении равно наружному начальному давлению. Выше уровня нейтральной поверхности давление воздуха в помещении больше, а ниже этого уровня оно меньше наружного давления. Такое распределение давления обеспечивают приток свежего наружного воздуха через нижнюю часть дверного проема и выход нагретого воздуха и дыма из помещения через верхнюю часть вентиляционного отверстия.

Динамика изменения давления воздуха на высотах, ниже и выше уровня нейтральной поверхности, представлена на рис. 8. Величина создаваемой разности давлений зависит от объема помещения, мощности пожара и площади вентиляционного отверстия.

Картины медленного пожара в помещении с вентиляцией через нижнее отверстие над полом в разные моменты времени показаны на рис. 4 в средней колонке. В динамике такого пожара можно выделить три этапа (рис. 3, зависимость 1).

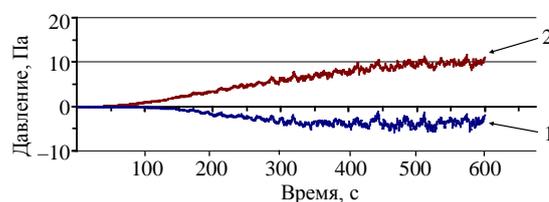


Рис. 8. Зависимость изменения давления воздуха от времени при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через дверной проем: 1 – высота 0,09 м; 2 – 2,49 м

В течение первого этапа пожар протекает по сценарию пожаров, контролируемых горючим материалом. Тепловыделение пожара повышается с ростом массового расхода горючего материала до момента времени ~ 250 с, и пламенное горение происходит только в области источника. К этому моменту времени помещение полностью наполняется практически однородным по высоте дымом (рис. 9), а вертикальный градиент температуры воздуха между высотами 0,09 и 2,49 м составляет ~ 100 °С (рис. 10).

Второй этап пожара происходит в интервале времени между 250-й и 450-й с. До момента времени ~ 310 с тепловыделение пожара растет

за счет пламенного горения над источником и появления мелкомасштабных областей самовоспламенения дыма вблизи источника и на нижней границе слоя дыма. Возникновение областей самовоспламенения приводит к появлению пульсаций на зависимостях температуры воздуха от времени в тонком слое над полом (рис. 11), а также способствует перемещению дыма в помещении.

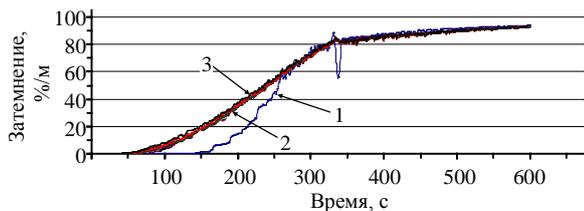


Рис. 9. Зависимость затемнения воздуха от времени при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через нижнее отверстие: на высоте 0,09 м (1); в верхнем слое между высотами 1,29 (2) и 2,49 м (3)

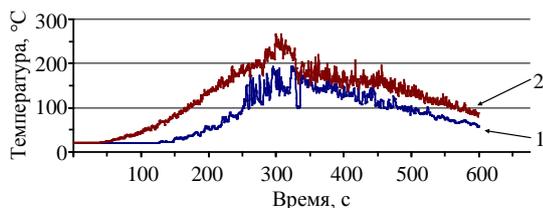


Рис. 10. Зависимость температуры воздуха от времени на высоте 0,09 (1) и 2,49 м (2) при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через нижнее отверстие

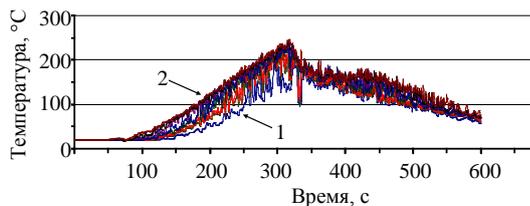


Рис. 11. Зависимость температуры воздуха от времени в нижнем слое между высотами 0,09 (1) и 1,14 м (2) при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через нижнее отверстие

С момента времени ~ 310 с развитие пожара начинает контролироваться содержанием кислорода. Интенсивность пламенного горения в области источника уменьшается, что ведет к понижению температуры воздуха, несмотря на увеличение интенсивности областей самовоспламенения на нижней границе дыма (рис. 11). На зависимости тепловыделения от

времени появляется спад, сменяющийся хаотическими пульсациями (рис. 3, зависимость 1). Места самовоспламенения дыма смещаются с течением времени пожара в область между источником и вентиляционным отверстием, и к ~ 450 -й с самовоспламенение происходит только вблизи вентиляционного проема (рис. 4).

Третий этап пожара начинается с ~ 450 -й с и до окончания моделирования (рис. 3, зависимость 1). Помещение оказывается полностью заполненным дымом, оптическая плотность которого медленно увеличивается (рис. 9). В то же время температура воздуха и ее градиент медленно снижаются (рис. 10).

Медленный пожар в помещении с вентиляцией через верхний проем под потолком протекает примерно так же, как и с вентиляцией через нижнее отверстие над полом. Динамика тепловыделения, пространственного распределения температуры и затемнения воздуха мало отличается для этих двух случаев. Различия есть только в местах расположения областей самовоспламенения дыма (рис. 4, правая колонка) и в пространственном распределении давления воздуха (рис. 12).

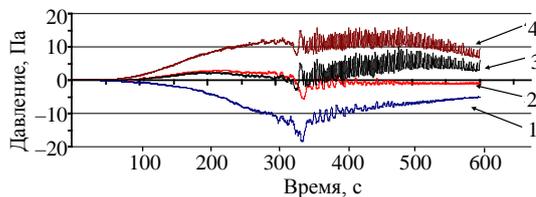


Рис. 12. Зависимость изменения давления воздуха от времени на высоте 0,09 (1, 3) и 2,49 м (2, 4) при медленном пожаре в комнате с источником на полу и вентиляцией через отверстие сверху (1, 2) и внизу (3, 4)

Из рис. 12 видно, что в случае расположения вентиляционного отверстия высотой 0,1 м внизу медленный пожар создает повышенное давление с небольшим градиентом по высоте практически во всем объеме помещения. Только в небольшой области, примыкающей к полу возле этого отверстия, давление воздуха в помещении меньше наружного. Нейтральная поверхность давления находится ниже верхней границы проема. В результате такого распределения давления через верхнюю часть отверстия наружу идет поток нагретого воздуха и дыма, а через нижнюю его часть – свежий воздух в помещение. Однако образующийся при дан-

ных условиях моделирования небольшой градиент давления обеспечивает поток свежего воздуха в помещение, достаточный для самовоспламенения дыма только вблизи вентиляционного отверстия.

Кроме того, из рис. 12 видно, что в случае расположения такого же вентиляционного проема сверху под потолком на первом этапе медленного пожара нейтральная поверхность давления располагается немного ниже уровня отверстия и в большей части помещения образуется область пониженного давления с небольшим градиентом по высоте. На втором этапе пожара эта область расширяется и нейтральная поверхность давления воздуха поднимается под потолок выше нижнего уровня вентиляционного проема. Как и с отверстием внизу, образующийся в данном случае небольшой градиент давления воздуха формирует только слабый поток свежего воздуха в помещение, создавая условия для самовоспламенения дыма лишь вблизи вентиляционного проема.

Динамика тепловыделения пожаров со средней и быстрой скоростями роста с источником, расположенным на полу комнаты, для трех случаев естественной вентиляции представлена на рис. 13а, б соответственно.

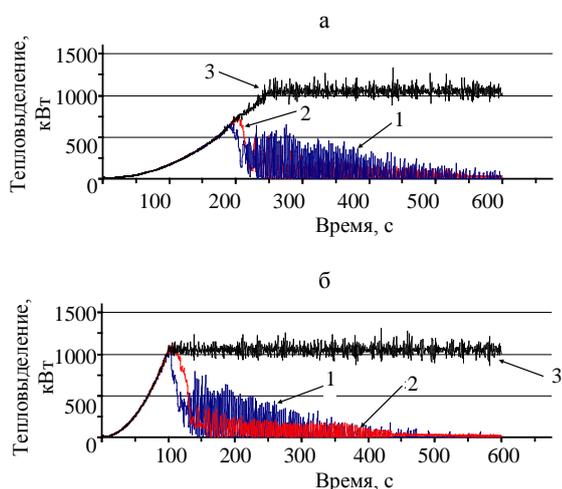


Рис. 13. Зависимость тепловыделения от времени при среднем (а) и быстром (б) пожарах в комнате с источником на полу и естественной вентиляцией через отверстие внизу (1), вверху (2) и дверной проем (3)

Моделирование показало, что влияние скорости роста пожаров в помещении с естественной вентиляцией на динамику их начальной

стадии носит количественный характер. С увеличением скорости роста пожаров повышаются температуры воздуха и их вертикальные градиенты, быстрее достигается максимальное затемнение, возрастают градиенты давления, быстрее происходит смена этапов пожара.

Моделирование также показало, что, как и в случае стационарных пожаров [10], для всех скоростей роста и условий вентиляции пожара наблюдается сильная зависимость динамики тепловыделения от высоты расположения источника пожара. Динамика тепловыделения соответственно при медленной, средней и быстрой скоростях роста рисунков пожара в помещении с источником на высоте 2 м для трех случаев вентиляции показана на рис. 14.

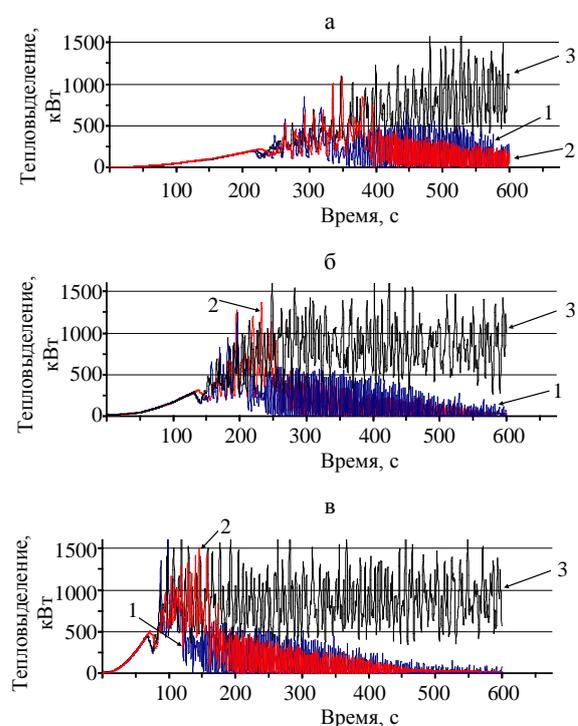


Рис. 14. Зависимость тепловыделения от времени при медленном (а), среднем (б) и быстром (в) пожарах в комнате с источником на высоте 2 м (б) и естественной вентиляцией через отверстие внизу (1), вверху (2) и дверной проем (3)

Из сравнения этих данных с рис. 3 и 13 видно, что поднятие источника пожара с любой скоростью роста на высоту 2 м оказывает наибольшее влияние на динамику тепловыделения в случаях вентиляции через дверной проем и верхнее отверстие. Длительность первого этапа, когда пламенное горение происхо-

дит только в области источника, сокращается, а длительность второго этапа, когда пламенное горение (самовоспламенение) идет в слое дыма, возрастает. При этом амплитуды пульсаций на зависимостях тепловыделения от времени заметно увеличиваются. Следствием этого является увеличение амплитуд пульсаций величин затемнения и температуры воздуха в нижней области дыма, где возникает самовоспламенение.

При поднятии источника пожара также заметно замедляются скорости опускания вниз слоев дыма и нагретого воздуха. В качестве примера на рис. 15, 16 показана динамика изменения затемнения и температуры воздуха под потолком и в нижней зоне помещения при медленном пожаре с источником на высоте 2 м и вентиляцией через верхнее отверстие. Картины медленных пожаров в разные моменты времени в комнате с естественной вентиляцией через различные проемы и с источником пожара, расположенным на высоте 2 м, показаны на рис. 17.

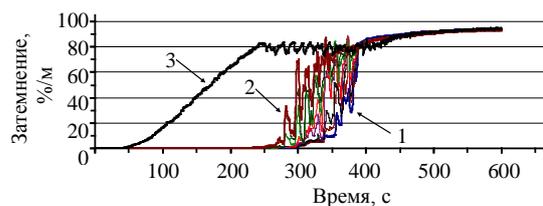


Рис. 15. Зависимость затемнения от времени в нижнем слое между высотами 0,09 (1) и 1,14 м (2) и на высоте 2,49 м (3) при медленном пожаре в комнате с источником на высоте 2 м и вентиляцией через верхнее отверстие

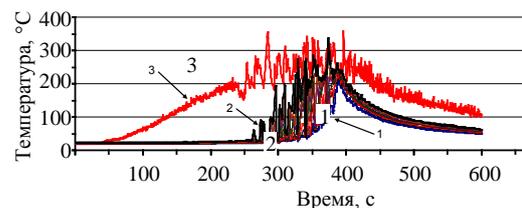


Рис. 16. Зависимость температуры воздуха от времени в нижнем слое между высотами 0,09 (1) и 1,14 м (2) и на высоте 2,49 м (3) при медленном пожаре в комнате с источником на высоте 2 м и вентиляцией через верхнее отверстие

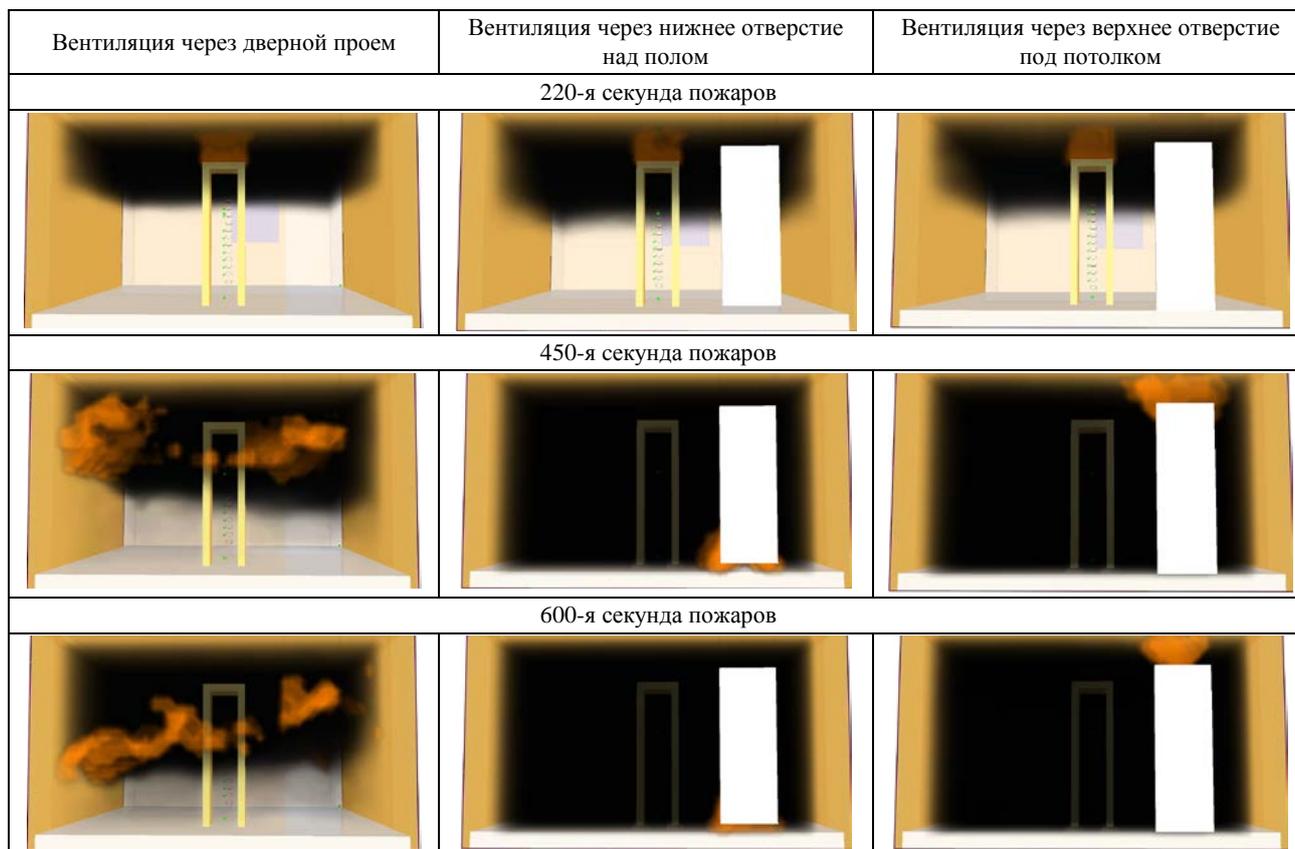


Рис. 17. Картины медленных пожаров в разные моменты времени в комнате с естественной вентиляцией через различные отверстия с источником пожара, расположенным на высоте 2 м

ВЫВОДЫ

1. С помощью программы FDS выполнено компьютерное моделирование начальной стадии пожаров с различной скоростью роста в помещении с естественной вентиляцией и источником, расположенным на полу и на высоте 2 м. Моделирование показало, что все пожары в помещении с естественной вентиляцией через одно отверстие протекают в условиях действия эффекта дымовой трубы – в помещении образуется нейтральная поверхность, на которой давление воздуха равно наружному начальному давлению. Выше уровня нейтральной поверхности давление воздуха в помещении больше, а ниже этого уровня оно меньше наружного давления. Такое распределение давления обеспечивает приток свежего наружного воздуха через нижнюю часть дверного проема и выход нагретого воздуха и дыма из помещения через верхнюю часть вентиляционного отверстия. Величина создаваемой разности давлений зависит от объема помещения, мощности пожара и площади вентиляционного проема.

2. Пожары с разной скоростью роста в помещениях с естественной вентиляцией меняют свой характер с течением времени. Начальный этап пожара с любой скоростью роста соответствует пожару, контролируемому горючим материалом, и его тепловыделение увеличивается по тому же закону, что и массовый расход горючего материала. Факел пламени на этом этапе находится в области источника пожара.

Начиная с некоторого момента времени характер пожара меняется – он становится пожаром, контролируемым кислородом с динамикой тепловыделения, зависящей от условий вентиляции. Этот этап характеризуется нерегулярными пульсациями тепловыделения, вклад в которое дают пламенное горение в области источника и самовоспламенение дыма в прилегающих к источнику местах. Длительность этого этапа увеличивается при уменьшении скорости роста пожара и увеличении высоты расположения источника.

Дальнейшее развитие пожара зависит от условий вентиляции. При размерах вентиляционного отверстия, обеспечивающих приток достаточного количества свежего воздуха, области самовоспламенения могут возникать в слое дыма по всей площади помещения. В помеще-

ниях с вентиляционными проемами меньших размеров пламенное горение происходит только вблизи вентиляционного отверстия. Зависимость тепловыделения от времени на этом этапе представляет собой хаотическую последовательность импульсов с убывающей амплитудой.

3. Моделирование показало, что все пространство помещения может быть разделено по высоте на слои, характеризующиеся своими значениями температуры и затемнения воздуха, их градиентами и наличием в них областей самовоспламенения. Толщины этих слоев, величины градиентов температуры и затемнения в них зависят от скорости роста пожара и высоты расположения его источника. С повышением скорости роста пожаров увеличиваются температуры воздуха и их вертикальные градиенты, быстрее достигается максимальное затемнение, возрастают градиенты давления, быстрее происходит смена этапов пожара.

Увеличение высоты расположения источника пожара над уровнем пола оказывает наибольшее влияние на динамику тепловыделения в случаях вентиляции через дверной проем и верхнее отверстие. Длительность этапа пожара, когда пламенное горение происходит только в области источника, сокращается, а длительность этапа, когда в слое дыма возникает самовоспламенение – возрастает. При этом амплитуды пульсаций тепловыделения, величин затемнения и температуры воздуха в нижней области дыма, где происходит самовоспламенение, увеличиваются. При поднятии источника пожара также замедляются скорости опускания вниз слоев дыма и нагретого воздуха.

4. Полученные результаты моделирования следует учитывать при разработке систем пожарной сигнализации для помещений, имеющих различную пожарную нагрузку, а также при расчетах времени эвакуации людей из таких помещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Drysdale, D.** An Introduction for Fire Dynamics / D. Drysdale. – Third Edition. – Chichester: Willey, 2011. – 551 p.
2. **Кошмаров, Ю. Л.** Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю. Л. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

3. Молчадский, И. С. Пожар в помещении / И. С. Молчадский. – М.: ВНИИПО, 2005. – 456 с.

4. **Experimental** and Theoretical Model of Flashover / P. G. Holbom [et al.] // *Fire Safety Journal*. – 1993. – Vol. 21, No 3. – P. 257–266.

5. **Graham, T. L.** On the Theory of Flashover Development / T. L. Graham, G. M. Makhviladze, J. P. Roberts // *Fire Safety Journal*. – 1995. – Vol. 25, No 3. – P. 229–259.

6. **Poulsen, A.** Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings / A. Poulsen, G. Jomaas // *Fire Technology*. – 2012. – Vol. 48, No 2. – P. 419–439.

7. **Novozhilov, V.** Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover / V. Novozhilov // *Journal of Engineering Mathematics*. – 2010. – Vol. 67, No 4. – P. 387–400.

8. **Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model**, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg: MA, 2008. – 92 p.

9. **Forney, G.** User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST Special Publication 1017-1 / G. Forney. – Washington: U.S. Government Printing Office, 2008. – 142 p.

10. **Невдах, В. В.** Моделирование начального этапа стационарного пламенного пожара в закрытом помещении / В. В. Невдах, А. А. Антошин, И. Е. Зуйков // *Наука и техника*. – 2014. – № 3. – С. 28–35.

2. **Koshmarov, Yu. L.** (2000) *Danger Factor Forecasting of Fire in the Premises*. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia. 118 p. (in Russian).

3. **Molchadsky, I. S.** (2005) *Fire in Premises*. Moscow, All-Russian Scientific-Research Institute for Fire Protection [VNIPO]. 456 p. (in Russian).

4. **Holbom, P. G.**, Bishop, S. R., Drysdale, D. D., & Beard, A. N. (1993) Experimental and Theoretical Model of Flashover. *Fire Safety Journal*, 21 (3), 257–266. Doi: 10.1016/0379-7112(93)90030-T.

5. **Graham, T. L.**, Makhviladze, G. M., & Roberts, J. P. (1995) On the Theory of Flashover Development. *Fire Safety Journal*, 25 (3), 229–259. Doi: 10.1016/0379-7112(95)00049-6.

6. **Poulsen, A.**, & Jomaas, G. (2012) Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings. *Fire Technology*, 48 (2), 419–439. Doi: 10.1007/s10694-11-0230-0.

7. **Novozhilov, V.** (2010) Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover. *Journal of Engineering Mathematics*, 67 (4), 387–400. Doi: 10.1007/s10665-009-9333-8.

8. **McGrattan, K.**, Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., & Rehm, R. (2008) *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MA. 92 p.

9. **Forney, G.** (2008) *User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data*. NIST Special Publication 1017-1. Washington: U.S. Government Printing Office. 142 p.

10. **Nevdakh, V. V.**, Antoshin, A. A., & Zuikov, I. E. (2014) Initial Stage Simulation of Stationary Flaming Fire in the Closed Premises. *Nauka i Tekhnika* [Science & Technique], 3, 28–35 (in Russian).

REFERENCES

1. **Drysdale, D.** (2011) *An Introduction for Fire Dynamics*. Third Edition. Chichester, Wiley. 551 p. Doi: 10.1002/9781119975465.refs.

Поступила 15.05.2015

UDC 004.89

**INTELLECTUAL MECHATRONIC SYSTEMS
WITH REMOTE COMPONENT INTERACTION:
STRUCTURE AND FUNCTIONS**

GULAY A. V., ZAYTSEV V. M.

Belarusian National Technical University

Basic requirements to sensor and controlling tracts of mechatronic systems with the remote organization of object control processes have been considered in the paper. A rational approach presupposes designing of the mentioned systems as multi-channel technical complexes intended for parallel or quasi-parallel force-moment control of outlet mechanical links (motion modules) by multiple coordinates of the required phase space. It has been shown that the use of digitizing principles and distributed data procession in mechatronic systems makes it possible to pass to the unified structure and typical set of software and hardware functions of the aforesaid tracts.

The paper gives consideration to a structural and functional scheme of the mechatronic system which contains an intellectual sensor device, a controlling center and an intellectual executive mechanism. The tasks that are linked with organization of preliminary information procession and construction of the systematic interface for transfer of telemetric transactions between controlled objects and the control center have been specified in the paper. Solution of a functionally full set of logically completed tasks is imposed to software and hardware tracts of the mechatronic system which is based on the above-mentioned principles.