

УДК 614.841

Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование

Невдах В. В.

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 07.04.2015

Принята к печати 19.10.2015

С помощью программы *FDS* выполнено компьютерное моделирование начальной стадии пожаров в закрытом помещении объемом $\approx 60 \text{ м}^3$ с источником, расположенным на полу и на высоте 2 м. Моделировались пожары с различной скоростью роста по квадратичному закону. Быстроразвивающимся пожаром считался пожар, величина тепловыделения которого 1055 кВт достигалась за 100 с, медленноразвивающимся – за 500 с. Изучалась динамика тепловыделения и пространственных распределений температуры, затемнения и изменения давления воздуха – факторов пожара, детектируемых извещателями. Установлено, что зависимость тепловыделения от времени, начиная с момента возникновения пожара и до его затухания, состоит из двух этапов. На первом этапе, который происходит с нарастанием тепловыделения с заданной скоростью, пламенное горение происходит только в области источника. На втором этапе, который характеризуется нерегулярными пульсациями тепловыделения, пламенное горение происходит в разных местах слоя дыма из-за его самовоспламенения. Длительность второго этапа увеличивается при уменьшении скорости роста пожара и увеличении высоты расположения источника. Получено, 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, градиенты температуры и затемнения в слоях зависят от скорости роста пожара и высоты расположения его источника. Также получено, что пространственные распределения температуры и давления воздуха имеют противоположные градиенты по высоте, величины которых зависят от скорости роста и высоты расположения источника пожара. Максимальное по величине изменение давления воздуха и максимальный обратный градиент по высоте этого изменения происходит при быстром пожаре с источником на полу.

Ключевые слова: моделирование пожара, пожарные извещатели, динамика тепловыделения, температура воздуха, затемнение.

Адрес для переписки:

Невдах В.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: psf@bntu.by

Address for correspondence:

Nevdakh V.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: psf@bntu.by

Для цитирования:

Невдах В. В.
Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 239–248

For citation:

Nevdakh V. V.
Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 239–248

Введение

Опыт показывает, что успешная эвакуация и другие действия по ликвидации опасности для людей и материальных ценностей в случае возникновения пожара в помещении, возможны только на первом, начальном, этапе его развития. Поэтому основной задачей систем пожарной сигнализации является как можно более раннее обнаружение возникновения пожара. Известно, что на динамику начального этапа пожаров в помещениях оказывают существенное влияние ряд параметров, таких как мощность пожара и скорость его развития, высота расположения источника возгорания над уровнем пола, наличие естественной вентиляции помещения – сечение и высота расположения вентиляционного отверстия [1–3]. После возникновения пламенного горения большинство пожаров растут с ускорением, достигают состояния, характеризующегося максимальной мощностью тепловыделения, и затем входят в стадию затухания из-за ограниченного количества кислорода или горючего материала. Скорость развития пламенного пожара в помещении определяется типом горючего материала, его формой и расположением, геометрией помещения, наличием вентиляции. При разной скорости роста пожара наблюдается различная динамика опасных факторов пожара.

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 [4]:

$$Q = \frac{Q^*}{t_g^2} (t - t_0)^2, \text{ (кВт)} \quad (1)$$

где t_0 – время появления стабильного пламени (с), t – текущее время (с), t_g – время (с), которое должно пройти с момента возникновения стабильного пламени до достижения заданной величины мощности тепловыделения. До момента t_0 горючие материалы могут тлеть, но не будет стабильного пламенного горения. Выражение (1) обычно записывается в виде:

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

где $\alpha = Q^* / t_g^2$ (кВт/с²) – скорость роста пожара.

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

Таблица / Table

Классификация пожаров по скорости роста Classification of fires with respect to its growth rate

| Скорость роста пожара Fire growth rate | Время роста пожара Growth time $t_g, \text{ c / s}$ | $\alpha, \text{ кВт/с}^2$ kW/s^2 |
|---|---|--|
| Быстрая /Fast | $t_g < 150$ | $\alpha > 0.047$ |
| Средняя /Medium | $150 \leq t_g < 400$ | $0.0066 < \alpha \leq 0.47$ |
| Медленная /Slow | $t_g \geq 400$ | $\alpha \leq 0.0066$ |

Начальные этапы пожаров в помещениях исследовались как теоретически при компьютерном моделировании пожаров [5–9], так и при экспериментальном моделировании тестовых и полномасштабных пожаров [10–13]. Следует отметить, что экспериментальные результаты, получаемые для пожаров в закрытых помещениях, не всегда согласуются с модельными расчетами. Это является следствием того, что с теплофизической точки зрения пожар в помещении является нелинейной системой, в которой протекают сложные процессы тепло- и массопереноса, динамика которых изучена недостаточно. Кроме того, для описания динамики пожара используются различные параметры – среднеобъемная температура воздуха, массовая скорость горения и величина тепловыделения или мощность пожара (см., например, [1–3]). Но все эти параметры по-разному меняются со временем на начальном этапе пожара, и это затрудняет правильное понимание его динамики и выбор извещателей для систем пожарной сигнализации.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование с помощью программы *FDS* динамики факторов пожара, детектируемых пожарными извещателями, на начальной стадии пожаров с различными скоростями развития в закрытом помещении.

Модель помещения и условия моделирования пожара

Моделирование пожара осуществлялось с помощью программы *Fire Dynamics Simulator*

(version 5), в которой реализована полевая модель пожара [14]. С помощью специального графического интерфейса *PyroSim* в прямоугольной расчетной сетке с кубическими ячейками с ребром 0,1 м была создана трехмерная модель закрытого помещения – с размерами $4,5 \times 5,1 \times 3,0$ м.

В качестве материала для пола толщиной 0,3 м и потолка комнаты толщиной 0,2 м был выбран бетон, а для стен толщиной также 0,2 м – кирпич. В комнате имелись расположенные в противоположных стенах застекленное окно размерами $1,0 \times 1,4$ м и деревянная дверь размерами $0,75 \times 2,0$ м. В модели использовались справочные значения параметров, определяющих тепловую инерцию конструкционных материалов комнаты – плотностей, удельных теплоемкостей и коэффициентов теплопроводности.

Источник пожара размерами $0,5 \times 0,5$ м последовательно располагался на полу и на высоте 2 м от уровня пола на расстоянии 0,8 м от стены с дверью. Детектируемыми параметрами пожара были: массовая скорость горения материала (в кг/с); величина тепловыделения пожара (в кВт); температура воздуха в помещении (в °С); затемнение (в %/м) и изменение давления воздуха в помещении относительно начального атмосферного (в Па). Температура и задымление воздуха контролировались 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, верхние – на высоте 2,49 м от уровня пола, т.е. на расстоянии 0,01 м ниже уровня потолка. Ось датчиков находилась на расстоянии 0,2 м от стены комнаты с окном. Датчики давления воздуха располагались на высоте 0,09 и 2,49 м.

Для удобства работы с моделью и наблюдения за развитием пожара с помощью специальной программы визуализации данных *SmokeView* [15] потолок и стены комнаты были сделаны частично прозрачными.

Результаты моделирования и их обсуждение

В соответствии с таблицей были выбраны следующие скорости роста пожара α : для быстрого пожара $\alpha_f = 0,1055$ кВт/с², для среднего $\alpha_m = 0,01688$ кВт/с² и для медленного $\alpha_{sl} = 0,00422$ кВт/с². При этом расчетные длительности пожара t_g до достижения источником мощно-

сти тепловыделения $Q^* = 1055$ кВт составляли 100, 250 и 500 с соответственно. Время моделирования составляло 500 с для всех трех 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 показана на рисунке 1.

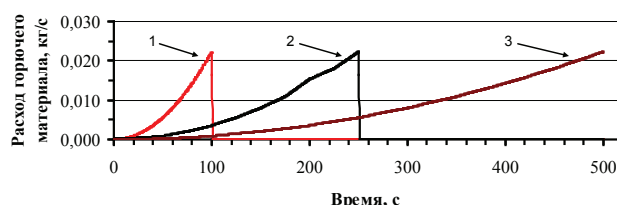


Рисунок 1 – Зависимость массового расхода горючего материала от времени при быстрой (1), средней (2) и медленной (3) скоростях горения источника пожара

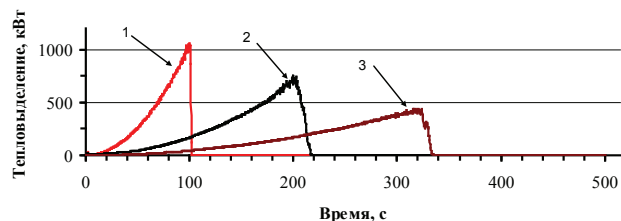
Figure 1 – Mass burning rates vs. time for fast (1), medium (2) and slow (3) fires

Моделирование показало, что, как и в случае стационарных пожаров (см., например, [10]), для всех скоростей роста пожара наблюдается сильная зависимость динамики тепловыделения от высоты расположения источника пожара. На рисунках 2а и 2б показана динамика тепловыделения для трех скоростей роста пожара с источником пожара, расположенным на полу и на высоте 2 м от уровня пола, соответственно, закрытой комнаты.

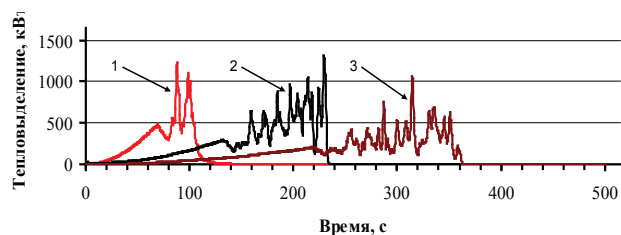
Из рисунка 2а видно, что при пожаре с источником, расположенным на полу, в используемой модели помещения мощность тепловыделения источника 1055 кВт была достигнута только при быстром пожаре. Также видно, что чем медленнее скорость роста пожара, тем меньшая достигается максимальная мощность тепловыделения и тем раньше начинается затухание пламенного пожара, обусловленное ограниченным количеством кислорода в помещении и изменением условий протекания процессов горения. При медленном пожаре было достигнуто максимальное тепловыделение менее 500 кВт.

Моделирование показало, что при быстром росте пожара на этапе нарастания тепловыделения пламенное горение происходит в области источника и только в конце этого этапа создаются условия для самовоспламенения в областях дыма, близких к источнику. Однако к этому времени в моделируемом помещении остается мало кислорода, поэто-

му происходит быстрое затухание процессов пламенного горения как в области источника, так и в прилегающих к нему областях дыма, и связанное с этим уменьшение суммарного тепловыделения.



a



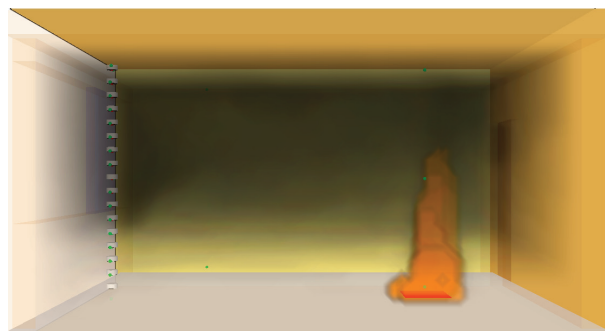
b

Рисунок 2 – Зависимость тепловыделения от времени при быстрой (1), средней (2) и медленной (3) скоростях роста пожара с источником, расположенным на полу (*a*) и высоте 2 м (*b*)

Figure 2 – Heat release rate vs. time for fast (1), medium (2) and slow (3) fires with burner on a floor (*a*) and 2 m above floor (*b*)

Если источник пожара поднят над уровнем пола на высоту 2 м, то при любой скорости роста пожара его характер изменяется – пожар протекает в два этапа и его общая продолжительность увеличивается. Длительность первого этапа, когда пламенное горение происходит только в области источника, сокращается, а второго этапа, когда пламенное горение – самовоспламенение возникает в разных местах слоя дыма, наоборот, увеличивается. На этом этапе наблюдаются пульсации в тепловыделении, амплитуда которых может превышать величину заданного тепловыделения источника 1055 кВт (рисунок 2*b*).

На рисунках 3*a–3d* для сравнения приведены картины быстрого и медленного пожаров в закрытой комнате с источником, расположенным на полу и на высоте 2 м в моменты достижения одинаковой величины тепловыделения ≈ 490 кВт. Из этих рисунков видно, что картины пожаров во всех четырех рассматриваемых случаях сильно различаются.



a



b



c



d

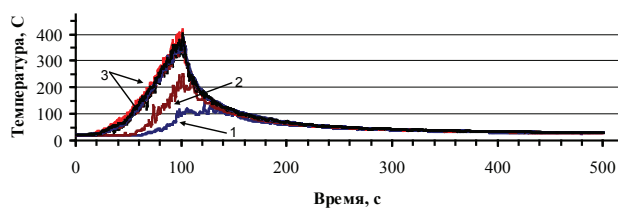
Рисунок 3 – Картины быстрого (*a* – на 64-й, *b* – на 66-й с) и медленного (*c* – на 321-й с, *d* – на 272-й с) пожаров в закрытой комнате с источником, расположенным на полу (*a*, *c*) и высоте 2 м (*b*, *d*)

Figure 3 – Pictures of fast fires (at 64 s (*a*) and 66 s (*b*)) and slow fires (at 321 s (*c*) and 272 s (*d*)) with a burner on a floor (*a*, *c*) and 2 m above floor (*b*, *d*)

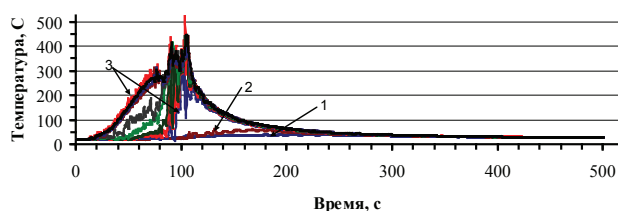
Из рисунков 3а и 3б видно, что при быстром пожаре времена достижения одинакового тепловыделения на первом этапе пожара практически не зависят от высоты расположения источника, но в случае пожара с источником на высоте 2 м дым сосредотачивается в припотолочном слое намного меньшей толщины, чем в случае пожара с источником на полу. Из рисунков 3с и 3д видно, что на моменты достижения того же уровня тепловыделения при медленном пожаре, что и при быстром, помещение оказывается заполненным дымом гораздо сильнее в обоих случаях – когда источник пожара на полу и на высоте 2 м.

Различия в картинах пожаров, показанных на рисунках 3а–3д, обусловлены различиями в динамике тепловыделения быстрых и медленных пожаров с разной высотой расположения источников.

Изменение пространственного распределения температуры воздуха в помещении при быстрых пожарах с источником на полу и на высоте 2 м иллюстрируют рисунки 4а и 4б.



a



b

Рисунок 4 – Зависимость температуры воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при быстром пожаре с источником на полу (а) и на высоте 2 м (б)

Figure 4 – Indoor air temperatures vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for fast fire with burner on a floor (a) and 2 m above floor (b)

При пожаре с источником на полу в верхней зоне помещения между высотами 1,29 и 2,49 м формируется слой наиболее нагретого воздуха,

температура которого нарастает с течением времени, но имеет небольшой, практически не меняющийся со временем вертикальный градиент. Ниже этого слоя находится слой воздуха, имеющий увеличивающийся с течением времени вертикальный градиент температуры. В нижней части этого слоя на высоте 0,09 м над уровнем пола температура воздуха начинает увеличиваться примерно через минуту после начала пожара (рисунок 4а).

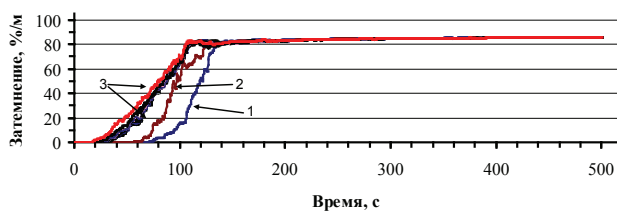
В течение первого этапа быстрого пожара с источником на высоте 2 м верхний слой воздуха нагревается быстрее, чем при пожаре с источником на полу, но его толщина заметно уменьшается – он находится между высотами 2,04 и 2,49 м. Одновременно в нижней зоне помещения – между полом и высотой 0,54 м – остается слой воздуха, температура которого не меняется. На этом этапе пожара слой воздуха между высотами 0,54 и 2,04 м имеет быстро растущий вертикальный градиент температуры (рисунок 4б).

Самовоспламенение, хаотически возникающее в различных областях слоя дыма на втором этапе быстрого пожара, приводит к хаотическому повышению температуры воздуха в этих областях, что вызывает усиление газодинамических процессов в верхней зоне помещения, приводящих к перемешиванию воздуха. В результате по всей высоте слоя воздуха между высотами 1,29 и 2,49 м наблюдаются сильные пульсации температуры. С уменьшением высоты до уровня 0,54 м амплитуды пульсаций температуры ослабевают (рисунок 4б).

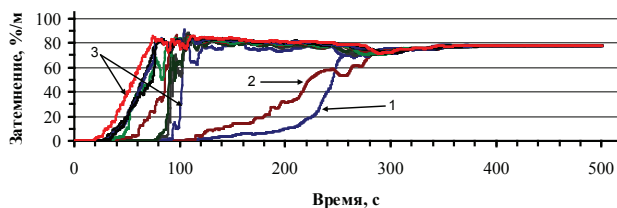
Динамика пространственного распределения дыма в помещении при быстрых пожарах с источником на полу и на высоте 2 м показана на рисунках 5а и 5б). Из этих рисунков видно, что изменение пространственного распределения дыма в помещении коррелирует с изменением пространственного распределения температуры воздуха. При быстром пожаре с источником на высоте 2 м максимальная величина затемнения достигается раньше; при этом дым опускается вниз медленнее, чем при пожаре с источником на полу, и появляется на высоте 0,54 м только в конце второго этапа пожара. В слое дыма между высотами 1,29 и 2,49 м наблюдаются сильные пульсации величины затемнения, обусловленные процессами самовоспламенения дыма (см. рисунок 5б).

Динамика пространственного распределения температуры воздуха в помещении при медленных пожарах с источником на полу и на высоте 2 м показана на рисунках 6а и 6б.

Из этих рисунков видно, что при пожаре с источником на полу, как и в случае быстрого пожара, наиболее нагретым оказывается верхний слой воздуха между высотами 1,29 и 2,49 м. В этом слое практически отсутствует вертикальный градиент температуры. Так как пламенное горение происходит в основном в области источника, то сильных колебаний температуры воздуха в стороне от источника, где находятся датчики, не наблюдается. И только в конце пожара в области нижней границы дыма наблюдаются небольшие области его самовоспламенения, что находит отражение в появлении пульсаций температуры воздуха на высоте 0,09 м (см. зависимость 1 на рисунке 6а).



a



b

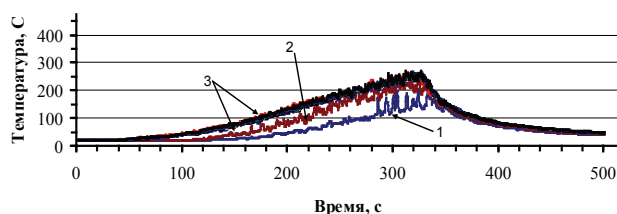
Рисунок 5 – Зависимость затемнения воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при быстром пожаре с источником на полу (a) и на высоте 2 м (b)

Figure 5 – Indoor smoke obscuration vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for fast fire with burner on a floor (a) and 2 m above floor (b)

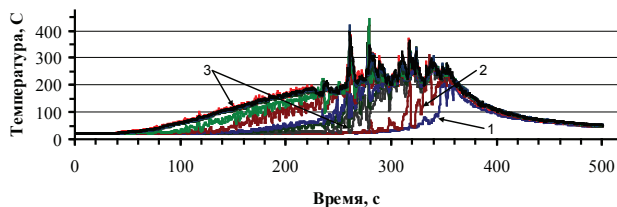
На первом этапе медленного пожара с источником на высоте 2 м воздух под потолком нагревается быстрее, чем с источником на полу, однако слой наиболее нагретого воздуха с практически отсутствующим вертикальным градиентом температуры, как и при быстром пожаре, значительно тоньше. Из сравнения рисунков 6а и 6б видно, что на этом этапе пожара нижние слои воздуха нагреваются намного медленнее.

На втором этапе пожара возникающее в различных местах слоя дыма самовоспламенение

приводит к появлению пульсаций температуры воздуха на разных высотах вплоть до высоты 0,54 м, амплитуда которых может в разы превышать максимальную температуру, достижимую на первом этапе. Это усиливает газодинамические возмущения в помещении и ведет к перемешиванию воздуха и выравниванию его температуры по высоте (см. рисунок 6б).



a



b

Рисунок 6 – Зависимость температуры воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при медленном пожаре с источником на полу (a) и на высоте 2 м (b)

Figure 6 – Indoor air temperatures vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for slow fire with burner on a floor (a) and 2 m above floor (b)

Изменение пространственного распределения дыма в помещении на начальном этапе медленных пожаров с источником на полу и на высоте 2 м показано на рисунках 7а и 7б. Из этих рисунков видно, что заполнение помещения дымом при таких пожарах происходит по-разному.

При пожаре с источником на полу максимальное затемнение в верхней зоне помещения достигается к концу первого этапа пожара, когда помещение оказывается практически полностью заполнено однородным слоем дыма. На втором этапе этого пожара самовоспламенение дыма возникает только на нижней границе слоя дыма (см. рисунки 7а и 3с).

При пожаре с источником на высоте 2 м максимальная величина затемнения меньше, достига-

ется заметно раньше – к концу первого этапа пожара, и при этом дым опускается вниз медленнее, чем при пожаре с источником на полу. На втором этапе пожара наблюдаются интенсивные пульсации затемнения, вызванные газодинамическими возмущениями, которые обусловлены процессами самовоспламенения дыма. По мере увеличения толщины слоя дыма процессы самовоспламенения локализуются в его нижней части, и в конце этапа пульсации затемнения наблюдаются только на нижней границе слоя дыма (см. рисунки 7*b* и 3*d*).

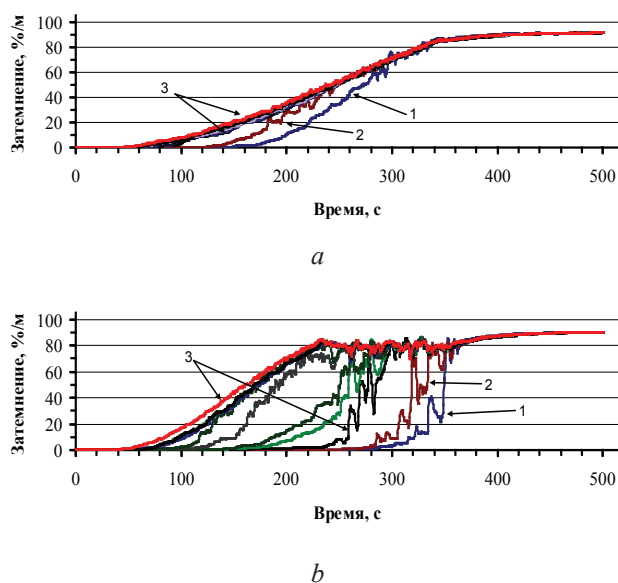


Рисунок 7 – Зависимость затемнения воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при медленном пожаре с источником на полу (а) и на высоте 2 м (б)

Figure 7 – Indoor smoke obscuration vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for slow fire with burner on a floor (а) and 2 m above floor (б)

Следует отметить, что возникающие в слое дыма области самовоспламенения и соответствующие пульсации температуры воздуха, наблюдаемые при пожарах с источником, расположенным над уровнем пола, делают такие пожары наиболее опасными при эвакуации людей из помещений.

На рисунках 8*a* и 8*b* показано, как меняется давление воздуха внизу над полом иверху под потолком закрытого помещения в стороне от источника относительно начального атмосферного давления в процессе моделируемых пожаров.

Работа источника пожара и описанные выше различия в пространственном распределении температуры воздуха при быстром и медленном по-

жарах с источником на полу и на высоте 2 м приводят к установлению в помещении сильно различающихся пространственных распределений давления воздуха при таких пожарах. Из рисунков видно, что при всех пожарах давление воздуха внизу над полом выше, чем давление под потолком. Из рисунков 4, 6 и 8 видно, что при работе источника пожара в помещении устанавливаются пространственные распределения температуры и давления воздуха с противоположными градиентами, величины которых зависят от высоты расположения источника пожара. Максимальное по величине изменение давления воздуха и максимальный обратный градиент по высоте этого изменения происходит при быстром пожаре с источником на полу.

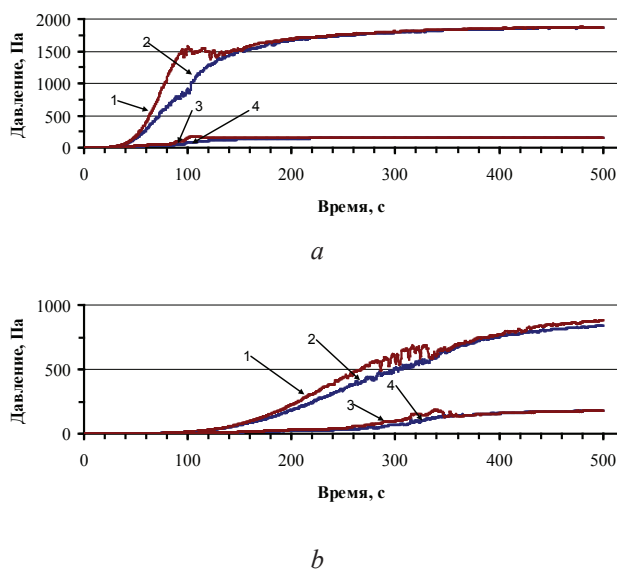


Рисунок 8 – Зависимость изменения давления воздуха в закрытой комнате на высоте 0,09 (1, 3) и 2,49 м (2, 4) с источником на полу (1, 2) и высоте 2 м (3, 4) при быстром (а) и медленном (б) пожарах

Figure 8 – Variations of air indoor pressure vs. time at heights 0,09 (1, 3) and 2,49 m (2, 4) above floor during fast (а) and slow (б) fire with burner on a floor (1, 2) and 2 m above floor (3, 4)

Заключение

В работе с помощью программы *FDS* выполнено компьютерное моделирование начальной стадии пожаров в закрытом помещении, имеющих различную скорость роста, с источником, расположенным на полу и на высоте 2 м. Быстроразвивающимся пожаром считался пожар, мощность тепловыделения которого 1055 кВт достигалась

за 100 с, медленно развивающимся – за 500 с. Моделирование показало, что скорость роста пожара оказывает сильное влияние на динамику его детектируемых факторов – величины тепловыделения, пространственных распределений температуры, затемнения и изменения давления воздуха. При всех рассмотренных скоростях нарастания пожаров, протекающих в закрытом помещении по сценарию пожара, контролируемого содержанием кислорода, зависимость тепловыделения от времени, начиная с момента возникновения пожара до его затухания, можно разделить на два этапа: первый этап, который происходит с нарастанием тепловыделения с заданной скоростью и характеризуется пламенным горением только в области источника, и второй этап, характеризующийся нерегулярными пульсациями тепловыделения и возникновением самовоспламенения в разных местах слоя дыма. Длительность второго этапа увеличивается при уменьшении скорости роста пожара и увеличении высоты расположения источника. Различия в динамике тепловыделения при быстрых и медленных пожарах с разной высотой расположения источника обуславливают различия в динамике пространственного распределения температуры, затемнения и давления воздуха в помещении при таких пожарах. Моделирование также 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, градиенты температуры и затемнения в слоях зависят от скорости роста пожара и высоты расположения его источника.

Также получено, что при пожаре в закрытом помещении устанавливаются пространственные распределения температуры и давления воздуха с противоположными градиентами по высоте, величины которых зависят от скорости роста и высоты расположения источника пожара. Максимальное по величине изменение давления воздуха и максимальный обратный градиент по высоте этого изменения происходит при быстром пожаре с источником на полу.

Полученные в настоящей работе результаты моделирования следует учитывать при выборе извещателей для разрабатываемых систем пожарной сигнализации для помещений, имеющих различную пожарную нагрузку, а также при расчетах времени эвакуации людей из таких помещений.

Список использованных источников

1. *Drysdale, D.* An introduction to fire dynamics / *D. Drysdale*. – Third edition. – Wiley, 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. *Ohlemiller, T.J.* Smoldering combustion. Chapter 9 in SFPE Handbook of fire protection engineering / *T.J. Ohlemiller*. – 3rd Edition: – 2002. – P. 200–210.
5. Experimental and theoretical model of flashover / P.G. Holborn [et al.] // *Fire Safety Journal*. – 1993. – Vol. 21, № 3. – P. 257–266.
6. A model of instability and flashover / A.N. Beard [et al.] // *Journal of Applied Fire Science*. – 1994. – V. 4, № 1. – P. 3–16.
7. The effect of model parameters on the simulation of fire dynamics / W. Jahn [et al.] // *Fire Safety Science*. 2008. – V. 9. – P. 1341–1352.
8. *Novozhilov, V.* Non-linear dynamical model of compartment fire flashover / V. Novozhilov // *Journal of Engineering Mathematics*. – 2010. – Vol. 67, № 4. – P. 387–400.
9. *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.
10. Experimental and theoretical model of flashover / P.G. Holborn [et al.] // *Fire Safety Journal*. – 1993. – Vol. 21, № 3. – P. 257–266.
11. The effect of fuel quantity and location on small enclosure fires / I.R. Thomas [et al.] // *Journal of Fire Protection Engineering*. 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 85–102.
12. *Beard, A.N.* Flashover and boundary properties / A.N. Beard // *Fire Safety Journal*. – 2010. – Vol. 45, № 2. – P. 116–121.
13. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings / A. Poulsen [et al.] // *Fire Technology*. – 2012. – Vol. 48, № 2. – P. 419–439.
14. 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.
15. *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.13. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings / A. Poulsen [et al.] // *Fire Technology*. 2012. - V. 48, №2. - P. 419-439.
14. 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.
15. 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.

Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation

Nevdakh V.V.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 07.04.2015

Accepted for publication 19.10.2015

Abstract. Computer simulation of the initial fire stages in closed compartment with the volume of $\approx 60 \text{ m}^3$ and with a burner on a floor and 2 m above floor have been carried using FDS software. Fires with different t^2 -power low heat release rates have been modeled. Fires which growth times to reach 1055 kW were 100 s and 500 s have been considered as fast and slow fires respectively. Dynamics of heat release rates and detected fire factors such as spatial distributions of air temperature, smoke obscuration and variations of indoor pressure have been studied. It has been obtained that dynamics of heat release rates of the initial fire stages in closed compartment consists of two stages. During the first stage the heat release rate is proportional to mass burning rate and flaming occurs only above a burner. At the second stage dynamics of heat release rates has a form of irregular in amplitude and duration pulsations, which are caused by self-ignition in the smoke layer. The compartment air volume may be layered with respect to the height and every layer has its oven temperature, smoke obscuration, self-ignition areas have been shown. The layer thickness, gradients of temperature and obscuration depend on a fire growth rate and on a burner height above floor have been concluded. The spatial distributions of air temperature and pressure variation have the opposite gradients on a height have been obtained. Maximal pressure variation and its gradient occurs under the fast fire with a burner on a floor have been obtained too.

Keywords: fire simulation, fire detector, heat release rate dynamics, air temperature, smoke obscuration.

Адрес для переписки:

Невдах В.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: psf@bntu.by

Address for correspondence:

Nevdakh V.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: psf@bntu.by

Для цитирования:

Невдах В. В.
Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 239–248

For citation:

Nevdakh V. V.
Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 239–248

References

1. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Third edition. Chichester, Wiley, 2011. 551 p.
2. Koshmarov Yu.L. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomescheniyi* [Danger factor forecasting of fire in premises]. Moscow, State fire academy of EMERCOM of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian)
3. Molchadsky L.S. *Pozhar v pomescheniyi* [Fire in premises]. Moscow, All-Russian Scientific-Research Institute for Fire Protection [VNIPO] Publ., 2005. 456 p. (in Russian)
4. Ohlemiller T.J. Smoldering combustion. Chapter 9 in SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd Edition, DiNenno, P. J.; Drysdale, D.; Beyler, C. L.; Walton, W. D., Editors. 2002. pp. 200–210.
5. Holborn P.G., Bishop S.R., Drysdale D.D., Beard A.N. Experimental and theoretical model of flashover. *Fire Safety Journal*. 1993. vol. 21, no. 3. pp. 257–266.
6. Beard A.N., Drysdale D.D., Holborn P.G., and Bishop S.R. A model of instability and flashover. *Journal of Applied Fire Science*. 1994. vol. 4, no. 1. pp. 3–16.
7. Jahn W., Rein G., Torero J.L. The effect of model parameters on the simulation of fire dynamics. *Fire Safety Science*. 2008. vol. 9. pp. 1341–1352.
8. Novozhilov V. Non-linear dynamical model of compartment fire flashover. *Journal of Engineering Mathematics*. 2010. vol. 67, no. 4. pp. 387–400.
9. Nevdakh V.V., Antoshin A.A., Zuikov I.E. Initial stage simulation of stationary flaming fire in the closed compartment. *Nauka i Tekhnika*, 2014, no. 3, pp. 28–35 (in Russian)
10. Holborn P.G., Bishop S.R., Drysdale D.D. and Beard A.N. Experimental and theoretical model of flashover. *Fire Safety Journal*. 1993. vol. 21, no. 3. pp. 257–266.
11. Thomas I.R., Moinuddin K.A.M., Bennets I.D. The effect of fuel quantity and location on small enclosure fires. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2007. vol. 17, no. 2. pp. 85–102.
12. Beard A.N. Flashover and boundary properties. *Fire Safety Journal*. 2010. vol. 45, no. 2. pp. 116–121.
13. Poulsen A., Jomaas G. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings. *Fire Technology*. 2012. vol. 48, no. 2. pp. 419–439.
14. McGrattan K., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermott R. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5. Gaithersburg, MA, 2008. 92 p.
15. Forney G. 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, 2008. 142 p.