

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА СТАЦИОНАРНОГО ПЛАМЕННОГО ПОЖАРА В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

*Докт. физ.-мат. наук НЕВДАХ В. В., канд. физ.-мат. наук, доц. АНТОШИН А. А.,
докт. физ.-мат. наук, проф. ЗУЙКОВ И. Е.*

Белорусский национальный технический университет

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

SIMULATION OF INITIAL STAGE OF STATIONARY FLAME FIRE IN INDOOR AREAS

NEVDAKH V. V., ANTOSHIN A. A., ZUIKOV I. E.

Belarusian National Technical University

С помощью программы FDS (version 5) проведено компьютерное моделирование начального этапа стационарного пламенного пожара в закрытом помещении. Показано, что в стационарном по массовой скорости горения пожаре присутствуют стационарный и нестационарный этапы по тепловыделению, длительности которых зависят от мощности и высоты расположения источника пожара. Нестационарный этап характеризуется нерегулярными по амплитуде и длительности пульсациями тепловыделения, обусловленными возникновением пламенного горения в объеме дыма.

Ключевые слова: стационарный пламенный пожар, закрытое помещение, компьютерное моделирование, скорость горения, тепловыделение.

Ил. 10. Библиогр.: 19 назв.

A computer simulation of the initial stage of stationary flame fire in an indoor area has been made with the help of FDS software (version 5). It has been shown that stationary and non-stationary heat release stages are present in a stationary fire according to mass burning rate. Duration of these stages depend on fire source intensity and its level. Non-stationary stage is characterized heat liberation pulsations which are irregular in amplitude and duration. The pulsations are caused by uprising of flame burning in the smoke scope.

Keywords: stationary flame fire, indoor area, computer simulation, burning rate, heat liberation.

Fig. 10. Ref.: 19 titles.

Введение. Начальный этап пожара в помещении – это пожар в интервале времени от возникновения горения до полного охвата пламенем всей поверхности горючей нагрузки. Длительность этого этапа пожара зависит от вида и количества пожарной нагрузки, мощности источника зажигания, конструктивно-планировочных характеристик помещения и может меняться в широких пределах. Принято считать, что при пожаре в закрытом помещении процесс горения вначале происходит так, как это имеет место при горении в открытом пространстве, но постепенно на ход этого процесса начинает оказывать влияние помещение [1–3]. Основные факторы данного влияния – действие обратного теплового потока от ограждений и верхних областей помещения, заполняемых нагретыми продуктами сгорания – газами и дымом, и ог-

раничение, обусловленное уменьшением количества кислорода в помещении.

Состав, толщина и температура слоя продуктов сгорания, скопившихся под потолком, определяют уровень лучистого теплового потока, действующего на нижние области комнаты. Если в помещении достаточное количество кислорода, то увеличение интенсивности лучистого теплового потока может привести к быстрому распространению пламени по всем воспламеняющимся поверхностям, увеличению тепловыделения и наступлению этапа полного охвата помещения пламенем. Если количество кислорода в помещении недостаточно, то пожар протекает по сценарию пожаров, регулируемых вентиляцией, тепловыделение замедляется и может произойти самозатухание горения. Оказывая противоположное действие на

величину тепловыделения, совместное влияние указанных факторов на начальном этапе пожара в помещении усложняет его динамику, которая имеет первостепенное значение для быстрого обнаружения пожара, разработки мероприятий по безопасной эвакуации людей, а также для оценки характера следующего этапа полного охвата помещения пламенем.

Начальные этапы пожаров в помещениях исследовали теоретически при компьютерном моделировании пожаров [4–12], а также при экспериментальном моделировании тестовых и полномасштабных пожаров [6, 9, 12–17]. Следует отметить, что экспериментальные результаты, получаемые для пожаров в закрытых помещениях, не всегда согласуются с модельными расчетами, поскольку пожар в помещении с теплофизической точки зрения является нелинейной системой, в которой протекают сложные процессы тепло- и массопереноса. А их динамика изучена недостаточно. Кроме того, для описания динамики пожара используются различные параметры: среднеобъемная температура воздуха, массовая скорость горения, величина тепловыделения или мощность пожара [1–3]. Но все эти параметры по-разному меняются со временем на начальном этапе пожара, и это затрудняет правильное понимание его динамики.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование динамики ранней стадии стационарного пламенного пожара в закрытом помещении.

Модель помещения и условия моделирования. Моделирование пожара осуществляли с помощью программы Fire Dynamics Simulator (FDS, version 5), в которой реализована полевая модель пожара [18]. С помощью специального графического интерфейса PyroSim в прямоугольной расчетной сетке с кубическими ячейками с ребром 0,1 м была создана трехмерная модель закрытого помещения – комнаты с внутренними размерами 4,7×2,8×2,5 м (рис. 1).

В качестве материала для пола и потолка комнаты толщинами 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 1,0×1,4 м и деревянная дверь – 0,75×2,00 м. В модели использовали справочные значения

параметров, определяющих тепловую инерцию конструкционных материалов комнаты – плотностей, удельных теплоемкостей и коэффициентов теплопроводности. Для удобства работы с моделью и наблюдения за развитием пожара с помощью специальной программы визуализации данных SmokeView [19] потолок и стены комнаты были сделаны частично прозрачными.

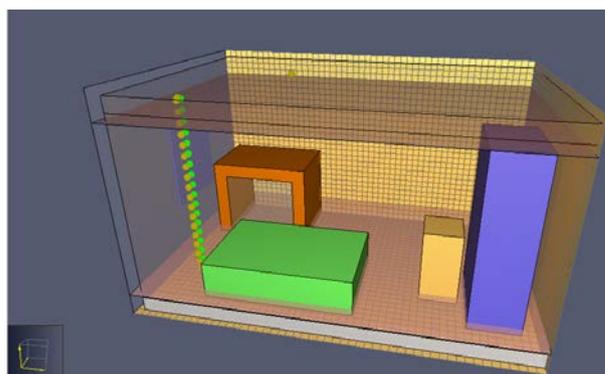


Рис. 1. Модель комнаты

Источник стационарного пожара размерами 0,5×0,5 м последовательно располагали на полу на высоте 1,0 и 2,0 м от уровня пола, на расстоянии 0,8 м от стены с дверью. Контролируемыми параметрами пожара были: массовая скорость горения (кг/с); величина тепловыделения (кВт); температура воздуха, поверхностей потолка и пола (°С); задымление воздуха (%/м). Температуру и задымление воздуха контролировали наборами соответствующих датчиков температуры и дыма (по 17 штук в каждом наборе), расположенных по вертикали 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, т. е. на расстоянии 0,01 м ниже уровня потолка и 0,20 м – от стенки комнаты с окном. В точках пересечения линии расположения датчиков температуры с плоскостями пола и потолка контролировали температуры пола и потолка. Взаимное расположение источника пожара, датчиков температуры и дыма в комнате видно из рис. 1.

Результаты моделирования и их обсуждение. Проводили моделирование начальной стадии стационарного пожара в закрытой комнате (без естественной вентиляции) с источником мощности в диапазоне 25–1000 кВт. Стационарность пожара при различных мощностях источника задавали постоянством массовой

скорости горения (рис. 2). Моделирование показало, что при любой мощности источника из выбранного диапазона пожар протекает по сценарию пожаров, контролируемых содержанием кислорода [1].

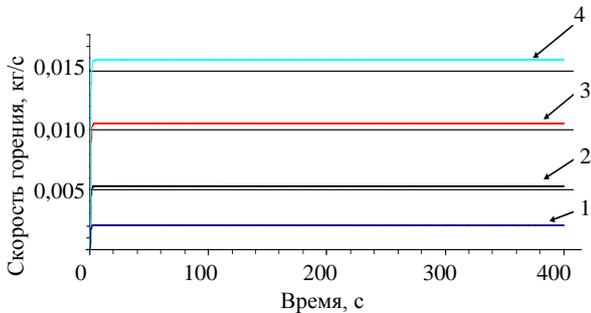


Рис. 2. Зависимость массовой скорости горения от времени для источника пожара мощностью: 1 – 100 кВт; 2 – 250; 3 – 500; 4 – 750 кВт

Получено, что для каждой мощности источника пожара w_i , расположенного на полу, существует свой момент времени τ_{i1} , до которого величина тепловыделения колеблется около заданного значения мощности источника, т. е. пожар можно считать стационарным и по величине тепловыделения (рис. 3).

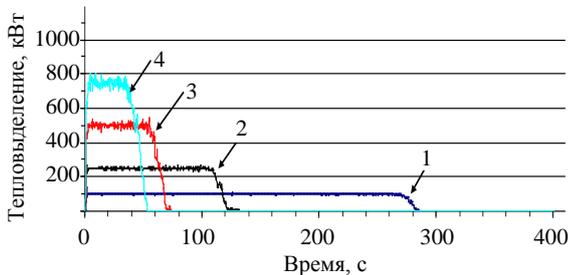


Рис. 3. Динамика тепловыделения при пожаре в закрытой комнате с источником, расположенным на полу, мощностью: 1 – 100 кВт; 2 – 250; 3 – 500; 4 – 750 кВт

Из рис. 3 видно, что амплитуда колебаний возрастает с увеличением мощности источника. Наличие этих колебаний обусловлено размерами источника пожара и газодинамической неустойчивостью пламени, усиливающейся при повышении мощности источника. На таких стационарных участках пламенное горение происходит только над поверхностью источника. Также получено, что для стационарных участков пожаров с источниками различной мощности выполняется закон сохранения выделяемой при пожаре энергии $E_i = w_i \tau_{i1} = \text{const}$.

Затем пожар переходит в режим, характеризующийся нестационарным тепловыделением. Для пожара с источником, расположенным на полу, нестационарный режим длится относительно небольшой промежуток времени до момента погасания пламени τ_{i2} (рис. 3). В промежутке между τ_{i2} и τ_{i1} неоднородность пламенного горения над источником пожара усиливается, а также может возникать пламенное горение продуктов неполного сгорания (дыма) в областях, прилегающих к источнику пожара.

Характер изменения температуры воздуха, пола и потолка в контролируемых местах комнаты с течением времени при таких пожарах с источником мощностью 250 кВт показан на рис. 4. Характерной особенностью полученных зависимостей является то, что температура пола растет быстрее, чем температура воздуха над полом, и это различие усиливается с ростом мощности источника пожара, а температура потолка увеличивается, наоборот, медленнее, чем температура воздуха под потолком.

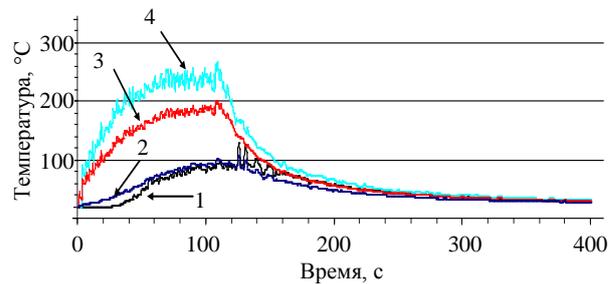


Рис. 4. Зависимость температуры от времени пожара в комнате с источником мощностью 250 кВт, расположенным на полу: 1 – воздуха над полом; 2 – пола; 3 – потолка; 4 – воздуха под потолком

Такое поведение обусловлено тем, что основным процессом, доставляющим теплоту от источника пожара в верхнюю зону комнаты, к потолку, является конвективный перенос теплоты нагретыми воздухом и дымом, тогда как перенос теплоты вниз, к полу, осуществляется в основном потоком излучения от источника пожара и слоя дыма под потолком, доля которого в общем тепловыделении растет с увеличением мощности источника пожара и которое поглощается полом сильнее, чем воздухом. Из рис. 4 также видно, что до момента времени τ_{i2} в помещении существует большой градиент температуры, поэтому говорить о средне-

объемной температуре воздуха на этом этапе пожара не имеет смысла, и что после погасания пламени все контролируемые температуры релаксируют к начальному равновесному значению.

Характер изменения пространственного распределения задымления воздуха в комнате со временем для этого же пожара иллюстрирует рис. 5. Из рисунка видно, что на момент погасания пламени τ_{i2} помещение оказывается практически полностью заполненным оптически однородным слоем дыма.

Моделирование также показало, что при повышении мощности источника на стационарных этапах пожара увеличиваются амплитуды колебаний задымления практически по всей высоте комнаты, что связано с интенсификацией газодинамических процессов – турбулентизацией воздушных потоков в комнате, и что время заполнения закрытой комнаты однородным слоем дыма по высоте при этом быстро сокращается.

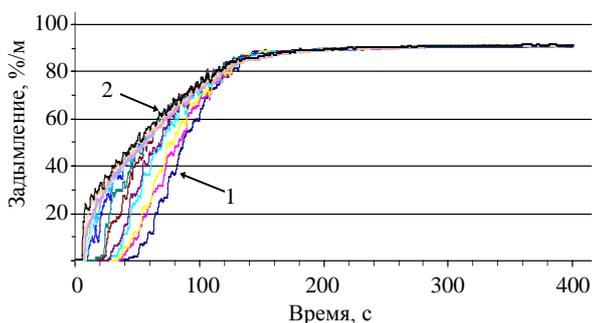


Рис. 5. Динамика пространственного распределения задымления воздуха над полом при мощности источника пожара 250 кВт, расположенного на полу, между высотами: 1 – 0,09 м; 2 – 2,49 м

Моделирование стационарного по массовой скорости горения пожара в закрытой комнате (рис. 2) также показало, что поднятие источника пожара любой мощности из исследованного диапазона 25–1000 кВт над уровнем пола приводит к изменению динамики его тепловыделения. Весь интервал времени от начала пожара до погасания – момента времени τ_{i2} – становится более продолжительным, а стационарный участок – до момента времени τ_{i1} , наоборот, короче. Между моментами времени τ_{i1} и τ_{i2} динамика тепловыделения является нестационарной и характеризуется нерегулярными по времени и амплитуде пульсациями (рис. 6, 7).

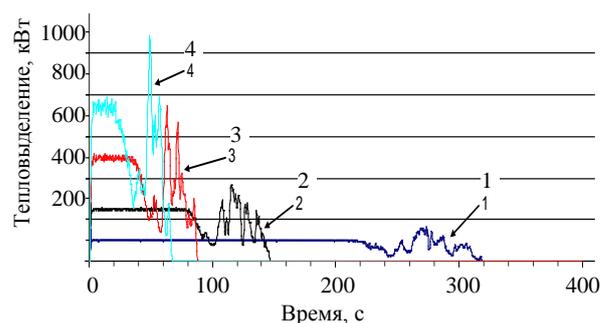


Рис. 6. Динамика тепловыделения при пожарах в закрытой комнате с источником, расположенным на высоте 1 м над полом, мощностью: 1 – 100 кВт; 2 – 250; 3 – 500; 4 – 750 кВт

Из рис. 3, 6 и 7 видно, что с увеличением высоты расположения источника пожара любой фиксированной мощности над полом амплитуды пульсаций тепловыделения на нестационарном этапе пожара возрастают.

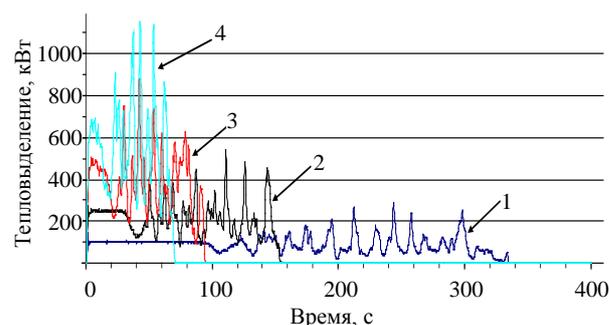


Рис. 7. Динамика тепловыделения при пожарах в закрытой комнате с источником, расположенным на высоте 2 м над полом, мощностью: 1 – 100 кВт; 2 – 250; 3 – 500; 4 – 750 кВт

Динамика пространственного распределения температур воздуха, поверхностей пола и потолка для пожара мощностью 250 кВт с источником, расположенным на высоте 2 м над полом, показана на рис. 8.

Из сравнения рис. 4 и 8 видно, что поднятие источника пожара над полом приводит к увеличению температуры потолка и воздуха под потолком и уменьшению температуры воздуха над полом, т. е. увеличению вертикального градиента температуры воздуха в комнате на первом этапе стационарного пожара и сближению этих температур на втором этапе нестационарного пожара. Кроме того, увеличение высоты расположения источника пожара над уровнем пола приводит к появлению возрастающих по

амплитуде пульсаций температуры потолка, пола и воздуха под потолком, в то время как температура воздуха над полом почти не меняется. Это обусловлено, как отмечалось выше, усиливающимися газодинамическими неустойчивостями в пламени источника пожара и в слое дыма, который не успевает за рассматриваемое время пожара опуститься до уровня пола.

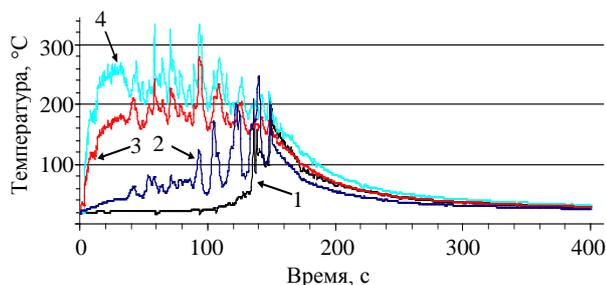


Рис. 8. Зависимость температур от времени при мощности источника пожара 250 кВт, расположенного на высоте 2 м над полом: 1 – воздуха над полом; 2 – пола; 3 – потолка; 4 – воздуха под потолком

Из рис. 8 также видно, что на нестационарном этапе пожара, на зависимостях температур поверхностей пола и потолка, а также температуры воздуха в помещении от времени, за исключением самого нижнего слоя, содержатся нерегулярные по времени и амплитуде пульсации. Аналогичные пульсации наблюдаются на этом этапе пожара и на зависимостях величины задымления воздуха (рис. 9). Эти пульсации обусловлены возникновением пламенного горения в слое дыма. Условия для возникновения такого горения – смеси горючего вещества и кислорода, их температуры, необходимые для самовозгорания, – создаются в результате действия сложных турбулентных газодинамических процессов, протекающих практически по всему объему помещения на этом этапе пожара, и поглощения теплового излучения. Место и время создания таких условий носят случайный характер.

Моделирование также показало, что при увеличении высоты расположения источника пожара над полом время достижения максимальной задымленности под потолком для любой мощности пожара сокращается, а время появления дыма возле пола после начала пожара, наоборот, увеличивается. Другими словами, чем выше источник пожара расположен над уровнем пола

закрытой комнаты, тем медленнее слой дыма опускается вниз от потолка к полу.

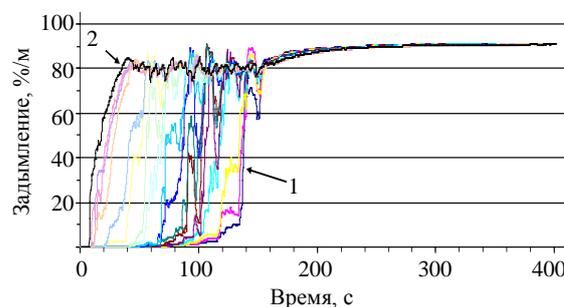


Рис. 9. Динамика пространственного распределения задымления воздуха над полом при мощности источника пожара 250 кВт, расположенного на высоте 2 м над полом, между высотами: 1 – 0,09 м; 2 – 2,49 м

Качественное отличие характера пожара на его стационарном и нестационарном этапах иллюстрируют рис. 10а, б, полученные с помощью программы визуализации данных SmokeView.

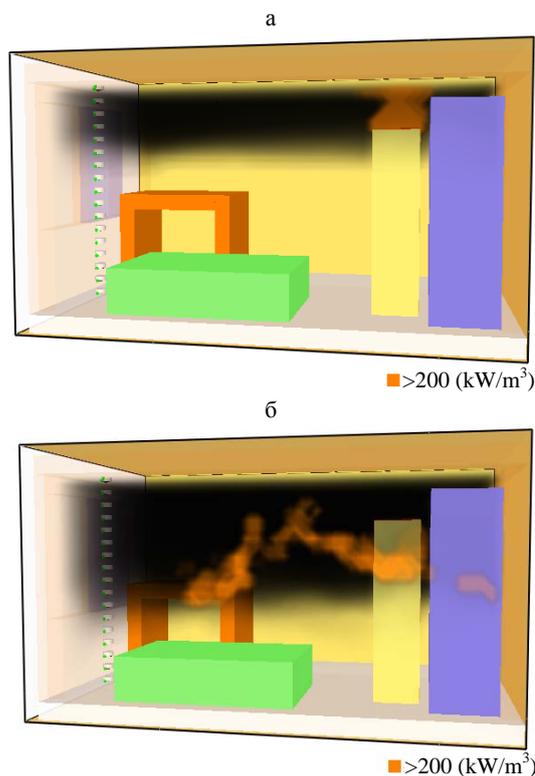


Рис. 10. Картина пожара в закрытой комнате с источником мощностью 250 кВт, расположенным на высоте 2 м от уровня пола, после начала пожара: а – на 26 с; б – 82 с

На стационарном этапе пламенное горение происходит только в пределах факела над поверхностью источника пожара (рис. 10а), на

нестационарном этапе – в слое дыма (рис. 10б), содержащем частицы несгоревшего топлива и продукты его неполного сгорания. Увеличение мощности источника пожара приводит, как и следовало ожидать, к увеличению скорости задымления комнаты как под потолком, так и над полом.

ВЫВОДЫ

Моделирование начальных этапов стационарных (по массовой скорости горения) пламенных пожаров в закрытом помещении при расположении источников возгорания с мощностью тепловыделения в диапазоне 25–1000 кВт на полу показало, что:

- пожар протекает по сценарию пожаров, контролируемых содержанием кислорода;
- по величине тепловыделения пожар имеет переменную динамику: начиная с момента возгорания, он носит стационарный характер, потом пожар приобретает нестационарный характер и происходит его погасание;
- за время протекания стационарных пожаров различной мощности в одном и том же закрытом помещении выделяется примерно одинаковое количество энергии;
- различный вклад радиационной составляющей теплопереноса в нагрев твердых поверхностей и воздуха приводит к тому, что температура пола растет быстрее, чем температура воздуха над полом, и это различие усиливается с ростом мощности источника пожара;
- при поднятии источника пожара над полом на зависимости тепловыделения от времени видно, что длительность стационарного участка сокращается, а нестационарного, характеризующегося нерегулярными по времени и амплитуде пульсациями, растет;
- изменения в газодинамике воздушных потоков и слоя дыма при увеличении высоты расположения источника пожара над полом приводят к увеличению вертикального градиента температуры воздуха в помещении на первом стационарном участке пожара и к сближению этих температур на втором нестационарном участке пожара;
- при увеличении высоты расположения источника пожара над полом скорость задымле-

ния под потолком возрастает, а скорость опускания слоя дыма вниз к полу уменьшается.

Наличие участка пожара с нестационарным тепловыделением при постоянной массовой скорости горения можно рассматривать как переходный процесс к этапу полного охвата помещения пламенем, особенностью которого является хаотическое появление пламенного горения в различных местах слоя дыма.

Полученная динамика тепловыделения для начального этапа пожара в закрытом помещении характерна для нелинейных систем, к каким относится и пожар.

Результаты проведенных авторами исследований следует учитывать при разработке систем пожарной сигнализации для помещений различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драйздейл, Д. Д. Введение в динамику пожаров / Д. Д. Драйздейл; пер. с англ. К. Г. Бомштейна; под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
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. A Non-Linear Model of Flashover / S. R. Bishor [et al.] // Fire Science and Technology. – 1992. – Vol. 12, No 2. – P. 11–27.
5. Non-Linear Dynamics of Flashover in Compartment Fires / S. R. Bishop [et al.] // Fire Safety Journal. – 1993. – Vol. 21, No 1. – P. 11–45.
6. Experimental and Theoretical Model of Flashover / P. G. Holborn [et al.] // Fire Safety Journal. – 1993. – Vol. 21, No 3. – P. 257–266.
7. Model of Instability and Flashover / A. N. Beard [et al.] // Journal of Applied Fire Science. – 1994. – Vol. 4, No 1. – P. 3–16.
8. On the Theory of Flashover Development / T. L. Graham [et al.] // Fire Safety Journal. – 1995. – Vol. 25, No 3. – P. 229–259.
9. The Effects of the Thermal Inertia of the Walls Upon Flashover Development / T. L. Graham [et al.] // Fire Safety Journal. – 1999. – Vol. 32, No 1. – P. 35–60.
10. Novozhilov, V. Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover / V. Novozhilov // Journal of Engineering Mathematics. – 2010. – Vol. 67, No 4. – P. 387–400.
11. The Effect of Model Parameters on the Simulation of Fire Dynamics / W. Jahn [et al.] // Fire Safety Science. – 2008. – Vol. 9. – P. 1341–1352.
12. Experimental Study on the Burning Behavior of Pool Fires in Rooms with Different Wall Linings / A. Poulsen [et al.] // Fire Technology. – 2012. – Vol. 48, No 2. – P. 419–439.

13. **The Effect** of Fuel Quantity and Location on Small Enclosure Fires / I. R. Thomas [et al.] // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2007. – Vol. 17, No 2. – P. 85–102.

14. **Smoke** Production, Radiation Heat Transfer and Fire Growth in a Liquid-Fuelled Compartment Fire / J. B. M. Pierce [et al.] // *Fire Safety Journal*. – 2007. – Vol. 42, № 4. – P. 310–320.

15. **Beard, A. N.** Dependence of Flashover on Temperature and Aspect Ratio of the Compartment / A. N. Beard // *Journal of Fire Sciences*. – 2003. – Vol. 21, No 4. – P. 267–284.

16. **Beard, A. N.** Flashover and Boundary Properties / A. N. Beard // *Fire Safety Journal*. – 2010. – Vol. 45, № 2. – P. 116–121.

17. **Beard, A. N.** Dependence of Flashover on Assumed Value of Discharge Coefficient / *Fire Safety Journal*. – 2001. – Vol. 36, No 1. – P. 25–36.

18. **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.

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

REFERENCES

1. **Drysdale, D. D.** (1985) *Introduction to Fire Dynamics*. Chichester: Wiley, 465 p. (Russ. ed.: Drysdale, D. (1990). *Vvedenie v Dinamiku Pozharov*. Moscow: Stroyizdat, 424 p.).

2. **Koshmarov, Yu. L.** (2000) *Forecasting of Compartment Fire Hazards*. Moscow: State Fire Academy of Ministry of Internal Affairs of Russia.

3. **Molchadsky, I. S.** (2005) *Compartment Fire*. Moscow: VNIPO.

4. **Bishop, S. R., Beard, A. N., Drysdale, D. D., & Holborn, P. G.** (1992) A Nonlinear Model of Flashover. *Fire Science and Technology*, 12 (2), 11–27.

5. **Bishop, S. R., Holborn, P. G., Beard, A. N., & Drysdale, D. D.** (1993) Non-Linear Dynamics of Flashover in Compartment Fires. *Fire Safety Journal*, 21 (1), 11–45. doi: 10.1016/0379-7112(93)90003-9.

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

7. **Beard, A. N., Drysdale, D. D., Holborn, P. G., & Bishop, S. R.** (1994) Model of Instability and Flashover. *Journal of Applied Fire Science*, 4 (1), 3–16.

8. **Graham, T. L., Makhviladze, G. M., & Roberts, J. P.** (1995) On the Theory of Flashover Development. *Fire Safety Journal*, 25 (3), 229–259.

9. **Graham, T. L., Makhviladze, G. M., & Roberts, J. P.** (1999) The Effects of the Thermal Inertia of the Walls Upon Flashover Development. *Fire Safety Journal*, 32 (1), 35–60.

10. **Novozhilov, V.** (2010) Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover. *Journal of Engineering Mathematics*, 67 (4), 387–400.

11. **Jahn, W., Rein, G., & Torero, J. L.** (2008) The Effect of Model Parameters on the Simulation of Fire Dynamics. *Fire Safety Science. 9th International Symposium on Fire Safety Science; Karlsruhe; Germany; 21 September 2008 Through 26 September 2008*, vol. 9, 1341–1352. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.9-1341.

12. **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/s10694-011-0230-0.

13. **Thomas, I. R., Moinuddin, K. A. M., & Bennetts, I. D.** (2007) The Effect of Fuel Quantity and Location on Small Enclosure Fires. *Journal of Fire Protection Engineering*, 17 (2), 85–102. doi: 10.1177/1042391506064908.

14. **Pierce, J. B. M., & Moss, J. B.** Smoke Production, Radiation Heat Transfer and Fire Growth in a Liquid-Fuelled Compartment Fire. *Fire Safety Journal*, 42 (4), 310–320. doi: 10.1016/j.firesaf.2006.11.006.

15. **Beard, A. N.** (2003) Dependence of Flashover on Temperature and Aspect Ratio of the Compartment. *Journal of Fire Sciences*, 21 (4), 267–284. doi: 10.1177/0734904103021004002.

16. **Beard, A. N.** (2010) Flashover and Boundary Properties. *Fire Safety Journal*, 45 (2), 116–121. doi: 10.1016/j.firesaf.2009.12.002.

17. **Beard, A. N.** (2001) Dependence of Flashover on Assumed Value of Discharge Coefficient. *Fire Safety Journal*, 36 (1), 25–36. doi: 10.1016/S0379-7112(00)00048-5.

18. **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.

19. **Forney, G. P.** (2009) *Smokeview (Version 5) A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, Volume I: User's Guide*, NIST Special Publication 1017-1A, U.S. Government Printing Office, Washington.

Поступила 20.11.2013