

УДК 614.841.412

## Моделирование пожаров в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса

### Simulation of fire in the engine rooms of heat power complex objects

**И.Н. Пожаркова**  
канд. техн. наук, доцент,  
**М.В. Елфимова**  
канд. техн. наук,  
**А.Н. Лагунов**  
канд. пед. наук  
ФГБОУ ВО Сибирская  
пожарно-спасательная  
академия ГПС МЧС России

**I.N. Pozharkova**  
Ph.D. of Engineering Sciences,  
Docent,  
**M.V. Elfimova**  
Ph.D. of Engineering Sciences  
**A.N. Lagunov**  
Ph.D. of Pedagogical Sciences  
FSBEE HE Siberian Fire and  
Rescue Academy EMERCOM of  
Russia

#### Аннотация:

В статье рассматриваются аварийные ситуации на объектах теплоэнергетического комплекса, связанные с разливом горючих жидкостей в машинных отделениях. Представлены результаты исследования особенностей компьютерного моделирования горения турбинного масла. Оценивается время достижения опасными факторами пожара предельно допустимых значений при различных линейных скоростях распространения пламени, приводятся результаты моделирования эвакуации, а также нагрева металлических конструкций в помещении пожара.

**Ключевые слова:** опасные факторы пожара, машинное отделение, полевая модель, критические значения, пожарная безопасность.

#### Abstract:

In article contingency situations on a heat power complex objects, the bound to a spill of combustible liquids in engine rooms are considered. Features of computer simulation of steam-turbine oil combustion are presented. The critical time of fire dangerous factors with different velocity of flame is estimated, results of evacuation simulation and also heating of structural metalwork farms in the fire are given. Recommendations about improving of fire safety system of an heat power complex object are formulated.

**Key words:** dangerous factors of the fire, engine room, field model, critical values, fire safety.

Технологический процесс на объектах теплоэнергетического комплекса – ТЭЦ, КЭС, ГРЭС, ГТЭС и др. [1] предполагает наличие значительной пожарной нагрузки, в том числе различных видов топлива, а также имеет существенное количество потенциальных источников зажигания. Это создает риск возникновения пожара, что подтверждается статистикой [2], согласно которой около 90% крупных аварий на объектах теплоэнергетического комплекса вызываются отказами в работе оборудования и сопровождаются пожаром. При этом 72% от общего числа возгораний приходится на долю машинных отделений [3], которые являются местом сосредоточения наибольшей пожарной нагрузки: машинное масло, системы смазки турбоагрегатов и генераторов, электроизоляция обмоток оборудования.

В машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса наибольшую опасность с точки зрения масштабов возможных последствий представляет собой разрушение турбины, которое приводит к про-

ливу большого количества масла и возникновению пожара при контакте турбинного масла с нагретыми частями оборудования. При этом объем разлитого масла в зависимости от емкости маслосистем и степени их повреждения может достигать нескольких десятков кубометров.

Горение турбинного масла отличается высокой скоростью выгорания и большим удельным тепловыделением, что обуславливает не только быстрое достижение опасными факторами пожара (ОФП) предельно допустимых значений (ПДЗ), но и может привести к нагреву незащищенных несущих строительных конструкций, в частности ферм, до критических температур прогрева и, как следствие, к обрушению конструкций в течение нескольких минут с момента возгорания [4]. Поэтому для машинных отделений объектов теплоэнергетического комплекса при анализе развития пожаров время достижения температурой несущих строительных конструкций критических значений относится к приоритетным предметам исследования.

Одним из этапов оценки пожарного риска на производственных объектах является математическое моделирование динамики опасных факторов пожара для различных сценариев его развития [5, 6], как правило, с использованием программных средств. Моделирование развития пожара при горении горючих жидкостей (ГЖ) имеет ряд сложностей. В данной статье представлены результаты исследования особенностей компьютерного моделирования горения турбинного масла при пожаре в машинном отделении ТЭЦ с использованием программы Pyrosim, входящей в состав программного комплекса FireCat.

В целом, динамика горения жидкости зависит от ее свойств (температуры вспышки, температуры воспламенения, теплоты испарения и др.) и начальной температуры.

Развитие пожара в машинном отделении во многом зависит от характера горения масла при той или иной аварии. Выделяют несколько разновидностей пожаров в машинных отделениях: горение фонтанирующего масла (при выбросе масла с высоким давлением), пожар пролива (горит масло, пролившееся на пол), трехмерное горение пролитого масла на различных отметках (при протечке из резервуаров не находящихся под давлением в направлении «вниз»). Таким образом, линейная скорость распространения пламени вдоль поверхности жидкости будет зависеть не только от ее пожароопасных свойств, но и от скорости разлива.

С другой стороны, линейная скорость распро-

странения фронта пламени зависит от температуры жидкости. Если температура жидкости не превышает температуру вспышки, то скорость перемещения пламени небольшая. С ростом температуры ГЖ скорость увеличивается и достигает значений, соответствующих распространению пламени по паровоздушной смеси. Поэтому, в зависимости от интенсивности теплового излучения от зоны пламени на незагоревшие соседние участки жидкости, а также взаимного расположения очага пожара и зон пролива масла на разных отметках будет наблюдаться различная динамика пожара.

Следует отметить, что при моделировании пожара с использованием Pyrosim, по умолчанию в программе считается, что вся поверхность зеркала ГЖ мгновенно охватывается пламенем, т.е. линейная скорость распространения пламени по поверхности жидкости от источника зажигания принимается бесконечно большой. Как было показано выше, данная величина конечна и имеет определенные значения в зависимости от конкретных условий.

В программе Pyrosim существует возможность самостоятельного задания пользователем линейной скорости распространения пламени [7] вдоль поверхности жидкости. В справочной [8] и нормативной литературе зачастую отсутствует информация о данной величине для ГЖ. Расчетный метод определения максимальной скорости распространения пламени над поверхностью жидкости [9] применим для случая, когда начальная температура ГЖ существенно превышает нижний температурный предел ее воспламенения. Данное условие не соответствует начальным условиям моделирования горения турбинного масла, имеющего нижний температурный предел воспламенения 148 °С [10], что значительно больше начальной температуры жидкости, даже с учетом ее нагрева в маслосистемах оборудования во время рабочего цикла. В [11] указана только приблизительная величина скорости распространения пламени по разлитому нефтепродукту, которая составляет для жидкости, имеющей температуру ниже температуры вспышки, 0,05 м/с. В [12] на основании результатов исследования скорости распространения пламени над разливом горючей жидкости, предложена формула для оценки линейной скорости перемещения пламени для ГЖ с высокой температурой воспламенения:

$$V_n = \frac{A}{T_{вос} - T_0}, \quad (1)$$

где  $V_n$  – линейная скорость перемещения пламени, см/с;  $A=28$  см·°С/с – коэффициент (на практике для обеспечения запаса увеличивается вдвое);

$T_{\text{вос}}, T_0$  – соответственно температура воспламенения ГЖ и начальная температура ГЖ, °С.

Следует принимать во внимание ограничения данного метода [13]. В частности, формула (1) не учитывает динамику движения жидкости при растекании, а также увеличение скорости перемещения пламени при нагреве жидкости излучением. Необходимо отметить, что в машинных залах объектов теплоэнергетического комплекса при повреждении маслосистем площади разлива турбинного масла могут достигать нескольких сотен квадратных метров. На таких значительных площадях линейная скорость распространения пламени по поверхности ГЖ может оказывать существенное влияние на развитие пожара, особенно на начальной стадии.

Перечисленные факторы создают сложности и неопределенности при выборе алгоритма моделирования горения. Учитывая рассмотренные выше изменения параметров горючей жидкости, моделирование развития пожара при ее горении не всегда дает достоверный результат. В частности, в исследовании [14] представлены результаты сравнения натуральных испытаний и моделирования диффузионного горения над поверхностью ГЖ, согласно которым в определенных условиях модельные данные могут иметь низкую степень соответствия натурным испытаниям на начальной стадии пожара и стадии затухания, и высокую – на стадии развитого пожара. При этом, модельные значения опасных факторов пожара на всех стадиях превышают экспериментальные.

Таким образом, моделирование развития пожара в машинных залах объектов теплоэнергетического комплекса осложняется рядом факторов:

- большая площадь разлива горючей жидкости, которая в некоторых сценариях может достигать нескольких сотен квадратных метров, значительно повышает вычислительную сложность задачи моделирования;
- возможность пролива горючих жидкостей на нижние технологические уровни машинного отделения, что также усложняет задачу моделирования с точки зрения геометрии пространства;
- моделирование горения жидкости осложняется тем, что ее параметры, определяющие развитие пожара, меняются в зависимости от температуры.

В рамках исследования, которому посвящена данная статья, проведено моделирование развития пожара в машинном зале типового здания главного корпуса ТЭЦ, выполненного по проекту 67-68 для мощности турбоагрегата 100 МВт [1], не оборудованного автоматической системой пожаротушения.

Для проведения расчетов в программе Pyrosim построена трехмерная модель помещения (рис. 1). Основной пожарной нагрузкой является турбинное масло ТП-22С [10], теплота сгорания которого составляет 41,9 МДж/кг [8].

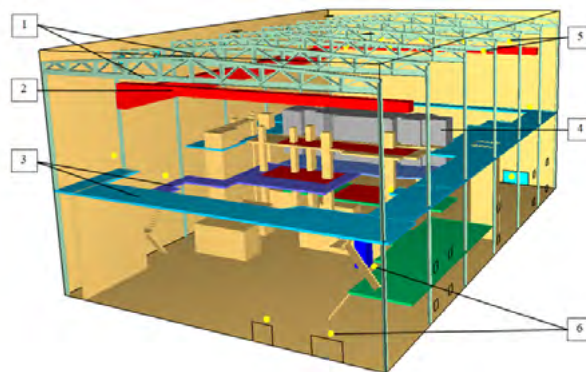


Рис. 1. Модель машинного отделения ТЭЦ  
1 – фермы, 2 – кран-балка, 3 – промышленные площадки, 4 – турбина, 5 – датчики температуры ферм, 6 – датчики ОФИ

Для оценки влияния линейной скорости распространения пламени по поверхности ГЖ на динамику пожара выполнено два компьютерных эксперимента: в первом (эксперимент 1) – в момент начала моделирования воспламеняется вся поверхность разлива ГЖ, т.е. линейная скорость полагается бесконечно большой, во втором (эксперимент 2) – пламя по поверхности жидкости распространяется от источника зажигания с линейной скоростью, рассчитанной по формуле (1).

Рассматривается наихудший сценарий пожара пролива в результате повреждения масляной системы смазки турбины, с возникающим распространением пожара по площадке турбоагрегатов на отметке обслуживания (12,00 м), а также на ниже лежащие отметки 8,00 м; 4,00 м и на сборники и емкости масла, расположенные на отметке 0,00 м. За расчетную принимается площадь пожара турбинного масла, разлитого вследствие разгерметизации масляных трубопроводов на площади 100 кв.м на отметке 12,00 м, горение масла на нижних отметках 8,00 м; 4,00 м; 0,00 м площадью 75 кв.м. Для данного сценария характерна значительная суммарная площадь разлитого масла, достигающая нескольких сотен квадратных метров, что объясняется высокой емкостью системы масляной смазки турбины. Следовательно, отличия в динамике развития пожара при постепенном распространении пламени по поверхности зеркала ГЖ от источника зажигания и при ее мгновенном воспламенении наиболее заметны.

Для сравнения динамики развития пожара при различных условиях распространения пламени по поверхности ГЖ сопоставляются как время дости-

жения ОФП предельно допустимых значений на путях эвакуации на высоте рабочей зоны на каждой отметке, так и время прогрева строительных конструкций до критических температур.

Для фиксирования параметров газовой среды в помещении, соответствующих оцениваемым ОФП, используются датчики, установленные в расчетных точках на путях эвакуации на различных отметках машинного отделения (6, рис. 1).

С целью оценки времени достижения критических температур несущих металлических ферм (1, рис. 1) устанавливаются датчики измерения прогрева твердого тела [7] (5, рис. 1). Для ферм, которые изготовлены из углеродистой стали С345 приведённой толщины 2,4 мм, задаются следующие теплофизические параметры [15]: плотность – 7890 кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоёмкость – 0,5 кДж/кг·К, теплопроводность – 27...80 Вт/м·К.

Время моделирования принимается равным 804 с, в соответствии с временем свободного развития

пожара до момента подачи огнетушащих веществ, вычисляемым по формуле [16]:

$$t_{\text{св}} = t_{\text{дс}} + t_{\text{сл}} + t_{\text{бр}} = 5 + 2,4 + 6 = 13,4 \text{ мин} = 804 \text{ с}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{дс}}$  - время от момента возникновения пожара до сообщения о нем, мин (принимается равным 5 мин, как для объекта, оборудованного АПС и АУПЗ);  $t_{\text{сл}}$  - время следования с учетом времени обработки информации, сбора и выезда по тревоге, мин (принимается равным 2,4 мин, с учетом расстояния от пожарной части до объекта, равного 1 км);  $t_{\text{бр}}$  - время боевого развертывания, мин (принимается равным 6 мин).

На рис. 2-4 представлены результаты моделирования при различных условиях распространения пламени по поверхности ГЖ в виде временных графиков опасных факторов пожара (снижения видимости в дыму, повышенной температуры окружающей среды), по которым время блокирования путей эвакуации  $t_{\text{бл}}$  минимально. Для наглядности на графиках временная шкала ограничена значением 150 сек.

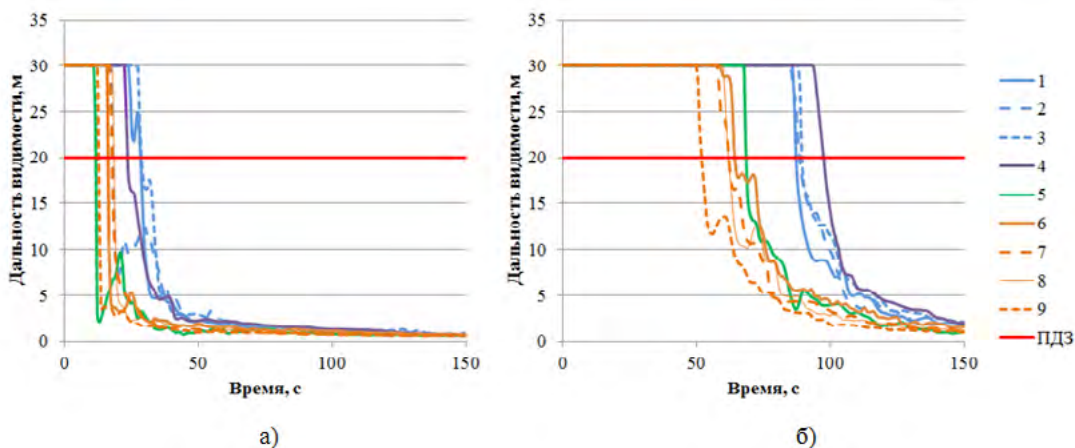


Рис. 2. Временные графики дальности видимости на отметках 0,00 м (точки 1-3), 4,00 м (точка 4), 8,00 м (точка 5), 12,00 м (точки 6-9) а – эксперимент 1; б – эксперимент 2

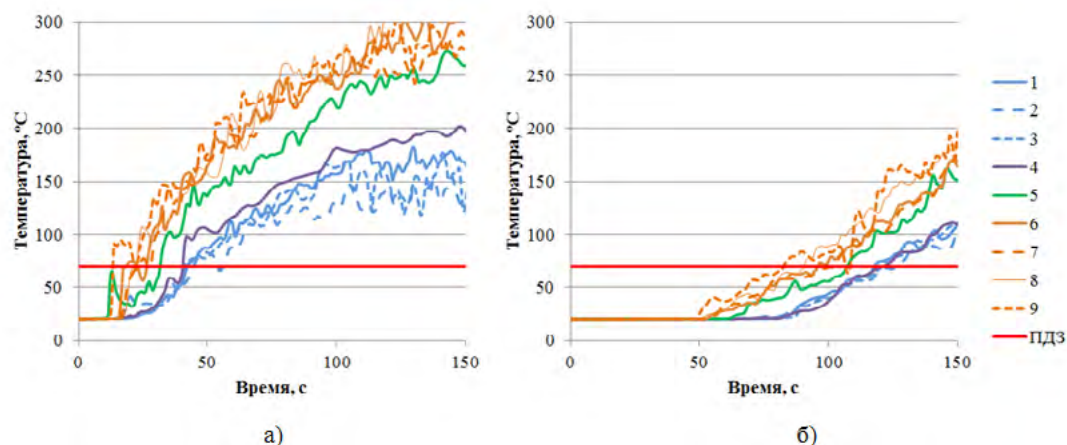


Рис. 3. Временные графики температуры газовой среды на отметках 0,00 м (точки 1-3), 4,00 м (точка 4), 8,00 м (точка 5), 12,00 м (точки 6-9) а – эксперимент 1; б – эксперимент 2

Как следует из полученных результатов, в обоих экспериментах наиболее опасным фактором пожара является потеря видимости. В случае с мгновенным воспламенением ГЖ (эксперимент 1) дальность видимости в расчетных точках на различных отметках достигает предельно-допустимых значений в течение первых 8-26 секунд пожара, блокируя пути эвакуации. При постепенном распространении пламени (эксперимент 2) значения ОФП к этому времени значительно не изменяются, пути эвакуации на различных отметках блокируются по потере видимости в течение 50-95 секунд от начала пожара.

В среде Pathfinder, входящей в программный комплекс FireCat, было проведено моделирование эвакуации. Время начала эвакуации из машинного отделения принято равным нулю, как для зального помещения, согласно [5]. Сводные результаты моделирования эвакуации и ОФП представлены в таблице.

**Таблица. Результаты моделирования эвакуации и ОФП**

Расчетная точка	Отметка, м	Время последнего вышедшего, с	$0,8 \cdot t_{об}, c$	
			эксперимент 1	эксперимент 2
1	0,00	17	20,72	68
2	0,00	37	20,72	68,56
3	0,00	37	20,72	69,68
4	4,00	11	16,72	77,44
5	8,00	15	10,96	53,04
6	12,00	3	7,49	49,52
7	12,00	0	12,64	47,84
8	12,00	21	12,64	47,04
9	12,00	9	8,88	39,76

При мгновенном воспламенении всей поверхности ГЖ (эксперимент 1) условия безопасной эвакуации людей при рассмотренном сценарии пожара не выполняются на отметках 0,00 м, 8,00 м, 12,00 м. При постепенном распространении пламени (эксперимент 2) контакт людей при эвакуации с ОФП, превышающими предельно-допустимые значения, отсутствует на всех отметках, что согласуется с опытом пожаров на объектах теплоэнергетического комплекса [2].

Таким образом, с точки зрения оценки пожарного риска использование различных подходов к моделированию горения турбинного масла дает кардинально отличающиеся результаты.

Также был выполнен анализ результатов моделирования на предмет существования опасности разрушения металлических конструкций – сталь-

ных ферм, вследствие их прогрева до критической температуры 500 °С [17]. На рис. 4 представлены графики показаний температурных датчиков фермы, находящейся над очагом пожара и имеющей наибольшую температуру. Для наглядности ось времени ограничена значением в 700 секунд, т.к. к этому моменту температура в одной из расчетных точек превышает критическую, а потеря несущей способности хотя бы одним элементом приводит к отказу при пожаре всей конструкции [18].

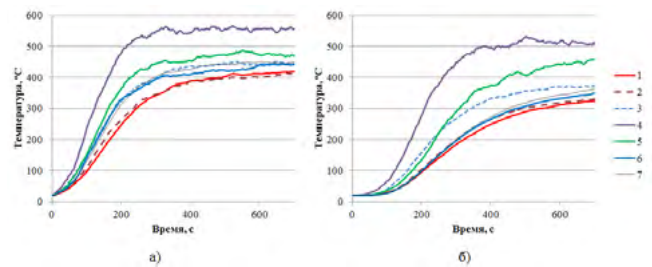


Рис. 4. Графики показаний температурных датчиков, расположенных на ферме  
 а – эксперимент 1; б – эксперимент 2

Как видно, участок фермы нагревается до критической температуры (датчик 4) в момент времени 209 с при мгновенном воспламенении ГЖ и в момент времени 371 с при постепенном воспламенении ГЖ. При этом время свободного развития пожара составляет 13,4 минуты (2), т.е. к моменту боевого развертывания сил и средств пожаротушения часть элементов металлических конструкций будет находиться в критическом по нагреву состоянии более 7 минут в обоих экспериментах. Соответственно, при рассматриваемом сценарии пожара существует опасность обрушения несущих строительных конструкций независимо от скорости распространения пламени.

На основе проведенного исследования получены следующие результаты:

- при рассмотренном сценарии пожара контакт людей с предельно-допустимыми значениями ОФП в расчетных точках отсутствует при постепенном распространении пламени по поверхности ГЖ, что говорит об обеспечении условий безопасной эвакуации, в отличие от варианта с ее мгновенным воспламенением, при котором данные условия не выполняются;
- время прогрева металлических ферм, находящихся непосредственно над очагом, до критической температуры значительно меньше времени свободного развития пожара независимо от скорости распространения пламени по поверхности ГЖ. Следовательно, в каждом из рассмотренных вариантов существует опасность обрушения несущих строительных конструкций.

Таким образом, выбор скорости распространения пламени по поверхности горючей жидкости может значительно влиять на результаты моделирования при оценке времени блокирования путей эвакуации. Поэтому при моделировании пожаров в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса целесообразно использовать рекомендации, представленные в [15] с учетом ограничений метода. Необходимо отметить, что независимо от выбранной для моделирования скорости распространения пламени эксперименты показывают существование опасности обрушения несущих строительных конструкций при пожаре на исследуемом объекте. Поэтому для обеспечения пожарной безопасности в машинных отделениях объектов теплоэнергетического комплекса необходимы меры, не допускающие нагрев металлических ферм до критических температур на протяжении времени свободного развития пожара.

### Литература

1. Купцов И.П. Проектирование и строительство тепловых электростанций / И.П. Купцов, Ю.Р. Иоффе. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 405 с.
2. ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Федеральный банк данных «ПОЖАРЫ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vniipo.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/federalnyy-bank-dannykh-pozhary/>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Основные технологические процессы тепловых электростанций. Пожарная опасность и обеспечение пожарной безопасности: учебное пособие / Р.С. Сатюков, П.И. Зыков, Т.В. Штеба, Ю.В. Мельниченко. - Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2018. – 143 с.
4. Моделирование пожара в машинном зале электростанции для оценки мероприятий по повышению огнестойкости его покрытия / А.Ю. Акулов, Р.С. Сатюков, С.В. Субачев, А.А. Субачева // Технологии техносферной безопасности. - 2015. - № 2 (60). - С. 38-48.
5. Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (с изменениями и дополнениями).
6. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями).
7. Контарь Н.А. Pygosim 2016. Примеры построения расчетных моделей для решения различных задач пожарной безопасности зданий и сооружений / Н.А. Контарь, И.Н. Карькин. - Екатеринбург, 2016. - 220 с.
8. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие. - М.: Академия ГПС МВД России, 2005. - 118 с.
9. Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов: Руководство. - М.: ВНИИПО, 2002. - 77 с.
10. ТУ 38.101821-2013. Масло турбинное Тп-22С МАРКА 1. – Взамен ТУ 38.101821-2001; введ. с 13.08.2013 № 200/114604. – М.: Стандартинформ, 2013.
11. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. - М.: ГУГПС-ВНИИПО-МИПБ, 1999.
12. Моделирование пожаров и противопожарная защита зданий и сооружений. Поисковые исследования по разработке расчетно-экспериментального метода определения скорости распространения пламени над разливом горючей жидкости: отчет о НИР по теме П.3.4.П.01.2004 «Разлив», п. 3.4.2 ЕТП-2005 / отв. исп. Н.Л. Полетаев [и др.]; УОП МЧС России, ВНИИПО, г. Балашиха, 2005.
13. Карькин И.Н. Работа в программном комплексе FireCat для расчета индивидуального пожарного риска. Скорость распространения пламени по жидкости при низкоскоростном горении / И.Н. Карькин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.dropbox.com/s/m343o0k4bfm1x4r/скорость пламени по жидкости.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/m343o0k4bfm1x4r/скорость%20пламени%20по%20жидкости.pdf?dl=0), свободный. – Загл. с экрана.
14. Гравит М.В. Моделирование и проверка результатов натурных испытаний диффузионного горения над поверхностью воспламеняющейся жидкости / М.В. Гравит, О.В. Недрышкин // ХХІХ Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: материалы конференции. – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2017. - С. 291-294.
15. Крестулева Р.А. Численное моделирование термомеханических процессов в зоне сварного шва плакированных сталей на стадии остывания / Р.А. Крестулева, О.И. Черепанов, Р.О. Черепанов // Физическая мезомеханика. - 2012. - № 3 (15). - С. 71-78.

16. Тербнев В.В. Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений / В.В. Тербнев. - М.: Пожкнига, 2004. – 256 с.
17. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 53295-2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 71-ст) (с изменениями и дополнениями). – М.: Стандартинформ, 2009. - 14 с.
18. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: учебник / В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, Б.Б. Серков, А.Ю. Фролов, Е.Т. Шурин. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. - 656 с.