

Научная статья

УДК 614.841

doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.27.10.009

Определение потери видимости при горении двух новых материалов экспериментальным и расчетным методом

Виталий Максимович Сандалов¹

Евгения Борисовна Аносова^{1,2}

Рамиль Ринатович Фатыхов²

Андрей Александрович Блохин²

¹ФГБУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»,
г. Москва, Россия

²Академия гражданской защиты МЧС России, Московская область, г. Химки, Россия

Автор, ответственный за переписку: Рамиль Ринатович Фатыхов fat0583@mail.ru

Аннотация. В работе предложен способ контроля изменения параметров газовой среды с целью наблюдения за динамикой изменения дальности видимости в дыму при пожаре. Проведен эксперимент с получением данных непосредственно по потере видимости на специально разработанной полигонной установке по комплексному контролю динамики опасных факторов пожара. Были учтены особенности определения коэффициента дымообразования согласно стандартному методу ГОСТ, в котором учитывается начальная масса образца, а не его фактически сгоревшая масса. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных и выполнена верификация предложенного способа. Установлено, что разница сравниваемых показателей типовой пожарной нагрузки и исследуемых материалов составляет от 4 до 5 раз в сторону увеличения выхода дымообразных продуктов горения образцов новых композиционных плит на основе древесно-стружечных материалов. Сделано предположение о снижении риска потери видимости при пожаре в случае использования в расчете параметров типовой пожарной нагрузки. В результате проведения математического расчета с использованием скорректированных данных, удалось добиться высокой сходимости результатов расчета с экспериментальными значениями. На основании полученных данных сделан вывод о необходимости совершенствования подхода к расчету пожарного риска, выполняемого в рамках нормирования объектов защиты, для более объективного предъявления к собственникам и эксплуатантам требований по обеспечению пожарной безопасности на объектах защиты.

Ключевые слова: моделирование пожара, дымообразование, снижение видимости при пожаре

Для цитирования: Аносова Е.Б., Сандалов В.М., Фатыхов Р.Р., Блохин А.А., Определение потери видимости при горении двух новых материалов экспериментальным и расчетным методом // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 2 (37). С. 121-132. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.27.10.009>.

Благодарности: авторы выражают благодарность коллективу кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет» за помощь в создании образцов материалов для испытаний. Также выражаем благодарность кандидату физико-математических наук Карькину Илье Николаевичу за предоставление прав доступа к использованию программного обеспечения по расчету пожарного риска. Original article.

Determination the losing of visibility during combustion of two new materials by experimental and computational method

Vitaly M. Sandalov¹

Evgenia B. Anosova^{1, 2}

Ramil R. Fatykhov²

Andrey A. Blokhin²

¹D.I. Mendeleev Russian Chemical and Technological University, Moscow, Russia

²The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia

Corresponding author: Ramil R. Fatykhov, fat0583@mail.ru

Abstract. The paper proposes a method for monitoring changes in the parameters of the gaseous environment in order to dynamics of changes in the range of visibility in smoke during a fire. An experiment to obtaining data directly of the loss of visibility at a specially designed device for the integrated control of the dynamics of fire hazards was conducted. The peculiarities of determining the smoke generation coefficient according to the standard method, which takes into account the initial mass of the sample rather than its actual burnt mass, were taken into account, experimental and calculated data were compared, and verification of the proposed method was performed. It was found that the difference between the compared indicators of the typical fire load and the materials studied ranges from 4 to 5 times in the direction of increasing the output of smoke-like combustion products of samples of new composite boards based on chipboard materials. It is assumed that the risk lossing of visibility in case of fire is underestimated if the parameters of a typical fire load are used in the calculation. As a result of the mathematical calculation using adjusted data, it was possible to achieve high convergence of the calculation results with experimental values. Based on the data obtained, it is concluded that it is necessary to improve the approach to calculating fire risk performed within the framework of rationing protection facilities in order to more objectively present fire safety requirements to owners and operators at protection facilities.

Keywords: Fire modelling, smoke generation, reduced fire visibility

For citation: Anosova E.B., Sandalov V.M., Fatykhov R.R., Blokhin A.A., Determination of the loss of visibility during gorenje of two new materials by experimental and computational method // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 2 (37). С. 121-132. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.27.10.009>.

Acknowledgments: The authors would like to thank the staff of the Department of Logging and Wood Processing Industries of Kostroma State University for their assistance in creating samples of materials for testing. We would also like to thank Ilya Nikolaevich Karkin, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, for granting access rights to use fire risk calculation software.

Введение

В XXI веке применение композиционных материалов достигло беспрецедентных масштабов. Современные способы производства позволяют создавать материалы с требуемыми свойствами прочности, эластичности, износостойкости и другими характеристиками. Наряду с очевидными преимуществами перед традиционными материалами у композиционных материалов есть недостатки, такие как пониженная биоразлагаемость в окружающей среде, повышенная токсичность и дымообразование при горении. Последнее представляет серьёзную угрозу для жизни и здоровья людей при возникновении пожара уже в начальной стадии. Организация эвакуационных мероприятий из опасной зоны напрямую связана с возможностью человека ориентироваться в пространстве, объективно оценивать сложившуюся обстановку и выбирать кратчайший путь в безопасное место. В системе пожарной защиты под видимостью принято понимать расстояние, на котором человек может различать объекты, например, знаки пожарной безопасности.

Исходя из анализа существующих в мире методов учета влияния динамики опасных факторов пожара, можно отметить главенствующую роль потери видимости в осложнении эвакуации людей при пожаре. В работах [1-5] отражено, что снижение видимости при пожаре раньше других опасных факторов достигает критических значений.

На точность расчета дальности видимости влияет величина дымообразующей способности [1, 6, 7] веществ и материалов, которая определяется экспериментально в лабораторных условиях. На дымообразующую способность веществ и материалов влияет химический состав, физические параметры горючей нагрузки [8, 9], архитектурно-планировочные решения, проёмность, газообмен в помещении, характеристики газовой среды, количество окислителя и другие факторы [10-20].

В России, согласно методике расчета пожарного риска, осуществляется учет влияния дыма на блокирование путей эвакуации при пожаре [21]. При этом исходные данные (база данных типовой пожарной нагрузки), используемые при расчете опасных факторов пожара, получены в 1970-2000 годах, и не учитывают новые вещества и материалы (в частности композиционные и полимерные), активно используемые для отделки современных зданий [1, 22]. Более того, значения коэффициентов дымообразования исследуемых материалов, полученные стандартным методом в соответствии с пунктом 4.18 ГОСТ 12.1.044, существенно отличаются от значений, приведенных в базе данных типовой пожарной нагрузки. В связи с этим повышение качества проведения огневых испытаний по определению потери видимости и дымообразующей способности современных веществ и материалов, совершенствование методов обработки полученных данных являются актуальными научными задачами.

Целью настоящей работы является верификация с помощью программного обеспечения, основанного на полевой математической модели пожара, экспериментального способа определения потери видимости в дыму при горении древесно-стружечных плит (далее – ДСтП).

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- разработана методика проведения эксперимента;
- определены значения коэффициентов дымообразования исследуемых материалов согласно стандартной методике ГОСТ 12.1.044;
- создана полигонная установка;
- воссоздана цифровая копия полигонной установки в специализированном программном обеспечении PyroSim интегрированным с программой математического моделирования Fire Dynamics Simulator (далее - FDS);
- проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

Аналитическая часть

Нормативно принятое критическое значение дальности видимости при пожаре составляет 20 м, а для помещений меньшего размера, критическое значение принимается равным его эффективному диаметру [2]. Эффективный диаметр помещения вычисляется по формуле 1:

$$d_{эфф} = \sqrt{\frac{4F_{пом}}{\pi}} \quad (1)$$

где, $F_{пом}$ - площадь помещения.

В России моделирование динамики опасных факторов пожара проводится для определения времени блокирования путей эвакуации людей из опасной зоны. Для расчетов может быть использована одна из трех математических моделей пожара – интегральная, зонная или полевая. Все эти модели были сформулированы в конце прошлого века. Наиболее точной считается полевая модель. С научной точки зрения развитие полевой модели является наиболее перспективным направлением, над которым работают современные российские ученые, занимающиеся проблемами пожарной безопасности.

В западноевропейских странах и США, благодаря всесторонней интеграции программного обеспечения, на передовом крае прогнозирования развития пожара находится вычислительная гидродинамика (далее – CFD), в основе которой лежат те же уравнения, что и в отечественной полевой модели.

Полевая математическая модель пожара представляет собой циклическое последовательное решение дифференциальных уравнений, которые описывают сохранение массы, импульса и энергии внутри очага горения и в окружающей его среде. Численные решения дифференциальных уравнений позволяют получать изменяющиеся во времени прогнозы температуры, скорости газовых потоков, концентрации различных газов и другие параметры

в трехмерном пространстве, состоящем из сетки контрольных объемов. С учетом достоинств и преимуществ полевой модели именно она была взята за основу верификации экспериментального способа определения потери видимости в дыму, предусматривающего использование полигонной экспериментальной установки.

Для верификации экспериментального способа определения потери видимости при пожаре с использованием полевой установки была задействована одна из наиболее популярных на территории России CFD моделей, а именно FDS – свободное программное обеспечение, разработанное Национальным институтом стандартов и технологий Министерства торговли США в сотрудничестве с Центром технических исследований VTT в Финляндии. Внесение данных в FDS осуществлялось через программный комплекс PyroSim, представляющий собой графический пользовательский интерфейс.

Экспериментальные исследования

Расчет времени достижения критических значений по потери видимости в соответствии с методикой расчета пожарного риска проводится на основании дымообразующей способности веществ и материалов, объединенных в группы, в зависимости от вида помещения [21]. Дымообразующую способность определяют по коэффициенту дымообразования, определяемому экспериментально в дымовой камере с использованием стандартного метода (п. 4.18 ГОСТ 12.1.044-89).

Стандартная методика предусматривает использование двухкамерной установки, включающей камеру сгорания объемом $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и камеру измерений объемом $0,512 \text{ м}^3$, в испытаниях используются образцы размером $40 \cdot 40 \cdot 10$ (15 для пенопластов) мм. Продолжительность испытаний ограничивается временем достижения минимального значения светопропускания. В результате испытаний по формуле 2 определяется коэффициент дымообразования $D_m \text{ м}^2/\text{кг}$:

$$D_m = \frac{V}{Lm} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2)$$

где, V – объем экспозиционной камеры, м^3 ;

m – масса образца, кг ;

I_0, I – соответственно, значения начального, принимаемого за 100%, и конечного (минимального) светопропускания, %;

L – длина пути луча света в задымленной среде, м .

Для проведения исследований на базе кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет» из березовой щепы и двух разных связующих фенолоформальдегидной и карбамидоформальдегидной смол в 10% соотношении к наполнителю методом горячего прессования были созданы образцы двух видов древесностружечных плит плотностью 800 кг/м^3 .

По результатам стандартных испытаний для двух видов исследуемых ДСтП были определены основные параметры, характеризующие материал в полевой математической

модели программного комплекса FDS, а также в соответствии с ГОСТ 12.1.044, на базе кафедры пожарной безопасности Академии гражданской защиты МЧС России, для каждого вида образцов был определен коэффициент дымообразования. Коэффициент дымообразования для ДСтП на фенолоформальдегидном связующем составил $518 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$, а для ДСтП на карбамидоформальдегидном связующем составил $616 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$. В дальнейшем полученные данные стали основой для расчетной модели.

Известно о существенном влиянии особенностей экспериментальной установки и условий в камере сгорания на значение удельного коэффициента дымообразования при испытаниях по стандартному методу, например, тот факт, что при оценке результата учитывается начальная масса образца, а не его фактически сгоревшая масса [23]. В связи с этим был предложен и проведен эксперимент с получением данных непосредственно по потере видимости в специально разработанной полигонной установке по комплексному контролю за динамикой опасных факторов пожара Рис.1.

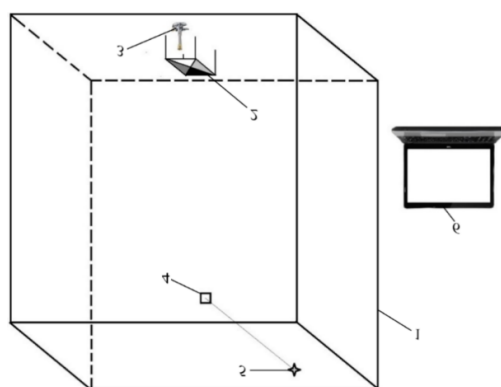


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – камера сгорания; 2 – электронные весы на платформе; 3 – газовая горелка; 4 – фоточувствительный элемент; 5 – лазерный модуль; 6 – регистрирующая аппаратура

Полигонная экспериментальная установка предполагает фиксацию динамики распространения опасных факторов пожара, в том числе снижение видимости. Технической задачей установки является создание условий, позволяющих производить оценку распространения некоторых опасных факторов пожара при термическом разложении конденсированных веществ, в том числе твердых и жидких, материалов. Предложенная установка отличается от стандартной возможностью определения параметров газовой среды с использованием автоматизированной фиксации результатов.

Методика проведения эксперимента

Датчик размещен на высоте 1,7 метра от уровня пола вне условных границ конвективной колонки с целью имитирования распространения опасных факторов пожара на ранней стадии, в помещении с очагом возгорания. Показания датчиков считываются каждую секунду на протяжении всего испытания с момента поджига навески и далее на протяжении 20 минут. Время испытания установлено, исходя из соображений о продолжительности начальной стадии пожара и реализации персоналом объекта защиты мероприятий по первичному пожаротушению и эвакуации людей.

Образцы исследуемого материала размещают посередине камеры, непосредственно над источником зажигания (газовой горелкой) на высоте 100 мм от верхней части газовой горелки до нижней кромки образца.

Далее, по готовности, открывается подача газа и осуществляется поджиг горелки, с этого момента начинается учет изменений параметров газовой среды.

По результатам проведения испытаний выходными данными являются сведения об изменении во времени: массы образца при термическом разложении; интенсивности светового потока, проходящего через задымленную газовую среду.

Цифровая модель эксперимента

Оценка потери видимости в пожаре может быть осуществлена с использованием различных методов. Перспективным в настоящее время считается расчетный метод с использованием полевой математической модели пожара и вспомогательных программных комплексов, наиболее точным традиционно остаётся эксперимент. В случае с экспериментом на точность получаемых эмпирических данных основное влияние оказывает обоснованность и логичность методики проведения эксперимента. В свою очередь, результаты экспериментальных данных позволяют выявить физические зависимости и закономерности, которые становятся основой для математических моделей.

На точность расчета влияет большое количество факторов, в частности, для определения по полевой модели потери видимости при пожаре, требуется учесть коэффициент дымообразования материала, параметры окружающей среды, объемно-планировочные решения, характеристики источника зажигания.

Для сравнения экспериментальных данных по потере видимости с расчетными данными по полевой модели в программном комплексе PyroSim была воссоздана цифровая копия полигонной установки. При этом для цифровой копии были заданы параметры газовой среды, аналогичные моменту проведения эксперимента.

Реальную установку нельзя считать условно герметичной, поэтому её цифровая копия учитывает внешний вид, особенности геометрии и проёмности цифрового двойника, представленного на Рис.2.

Непосредственно расчет изменения видимости по полевой модели пожара производился в программном комплексе FDS. Базовый расчет потери видимости в газовой среде при пожаре выполняется программным комплексом с использованием химического подхода, в котором дым отслеживается вместе с другими основными продуктами горения.

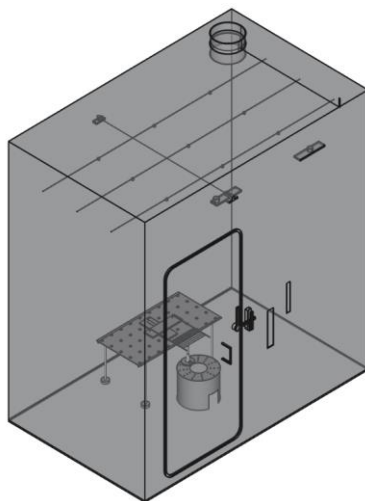


Рис.2. Цифровая копия экспериментальной полигонной установки

В FDS образование дыма и потерю видимости регулируют три параметра:

1. Выделение сажи (YS) – этот параметр определяет долю массы топлива, которая преобразуется в сажу при использовании химического подхода, на основании заданных пользователем сведений о материале (веществе). Фактически параметр YS может быть вычислен из дымообразующей способности материала по формуле 3:

$$Y_S = \frac{D_m}{K_m} \quad (3)$$

2. Массовый коэффициент экстинкции (K_m) – этот параметр представляет собой коэффициент пропорциональности между коэффициентом ослабления света, проходящего через задымленную среду, и массовой концентрацией дыма. Его значение по умолчанию составляет $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ – это усредненное значение K_m для пламенного горения древесины и пластмасс [24].

3. Фактор видимости – это константа C в уравнении (5).

Наиболее полезной величиной для оценки видимости в пространстве является ослабление света за счет процессов поглощения и рассеяния при распространении в среде (далее – коэффициент экстинкции света, K) [24]. Коэффициент экстинкции определяется через зависимость интенсивности монохроматического света, проходящего через дым на расстояние L в соответствии с формулой 4:

$$K = -\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{L} \quad (4)$$

где, I_0 , I – соответственно, значения начального, принимаемого за 100%, и конечного (минимального) светопропускания, %;

L – длина пути луча света в задымленной среде, м;

K – коэффициент экстинкции света.

По умолчанию видимость в FDS ассоциируется с дымом, который неявно определяется химической моделью. Оценка видимости сквозь дым осуществляется при помощи уравнения 5:

$$L_{\text{пр}} = C/K \quad (5)$$

где, $L_{\text{пр}}$ – предельная дальность видимости, м;

C – безразмерная константа, характеризующая тип объекта, просматриваемого сквозь дым, то есть $C \approx 8$ для светоизлучающего знака и $C \approx 3$ для светоотражающего знака [25]. Для целей воссоздания условий эксперимента значение константы было принято равным 8.

Поскольку коэффициент экстинкции изменяется во времени в связи с процессом дымообразования, предельная видимость также изменяется. Выходными данными программного комплекса являются значения предельной дальности видимости в зависимости от времени расчета.

Обработка и анализ результатов физического и математического экспериментов

В ходе испытаний в полигонной установке были получены сведения об изменении интенсивности светового потока, проходящего через задымленную газовую среду. Используя формулу 4 для каждой секунды испытания, был вычислен коэффициент экстинкции света, который в дальнейшем задействован в подстановке в формуле 5 и таким образом был получен график предельной дальности видимости в условиях эксперимента.

Для задания параметров математического моделирования в интерфейсе программного обеспечения PyroSim были внесены адаптированные под использование в расчете программного комплекса FDS основные характеристики пожарной нагрузки, для трех видов расчета: первый основан на данных типовой пожарной нагрузки, рекомендованной к расчету в соответствии с методикой расчета пожарного риска; второй и третий на данных о показателях пожарной опасности и составе двух видов исследуемых ДСтП, созданных с использованием различных связующих составов. Данные о дымообразующей способности, полученные стандартным методом, были преобразованы по формуле 3 в параметр «выделение сажи», который составил для ДСтП на фенолоформальдегидном связующем 0,059, а для ДСтП на карбамидоформальдегидном связующем 0,071. Эти данные были внесены в расчетную полевую математическую модель пожара – FDS через интерфейс программного обеспечения PyroSim. Стоит отметить, что для типовой пожарной нагрузки («Помещение, облицованное панелями; панели ДВП» [1]) значение параметра «выделение сажи» составляет 0,015. Разница сравниваемых показателей типовой пожарной нагрузки и исследуемых материалов составляет от 4 до 5 раз в сторону увеличения выхода дымообразных продуктов горения образцов ДСтП,

в связи с чем можно сделать предположение о занижении риска потери видимости при пожаре в случае использования в расчете параметров типовой пожарной нагрузки.

Испытания в камере сгорания проводились с образцами исходной массой в 240 грамм $\pm 3\%$. Для обоих видов ДСтП снижение массы имеет линейный характер при этом для плит с фенолоформальдегидной смолой в качестве связующего масса снижалась со скоростью 0,145 грамм в секунду, а для плит с карбамидоформальдегидной смолой в качестве связующего масса снижалась в два раза медленнее со скоростью 0,072 грамма в секунду. Исходя из данных об изменении дальности видимости, скорость потери массы оказала влияние на интенсивность дымообразования.

После обработки результатов эксперимента (для ДСтП обоих составов) и математического моделирования для трех случаев (типовая пожарная нагрузка и ДСтП обоих составов) был составлен график динамики изменения предельной дальности видимости в дыму Рис.3.

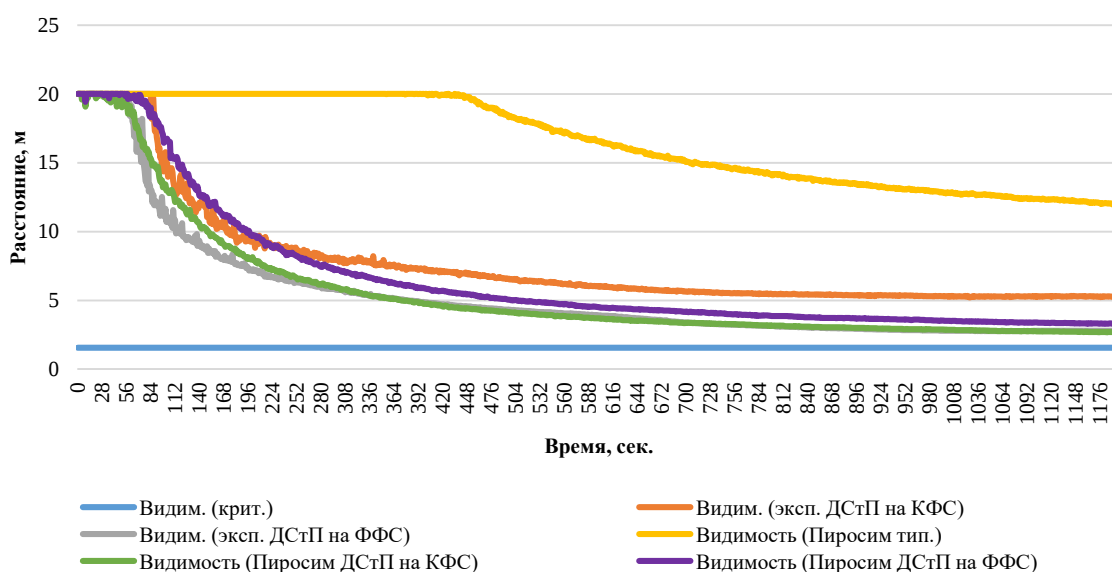


Рис.3. График изменения дальности видимости на высоте 1,7 метра от уровня пола

Форма расчетных и экспериментальных графиков схожа, что свидетельствует об их корреляции, позволяет провести их сравнение и даёт основу для верификации предлагаемого способа определения потери видимости в дыму при пожаре.

Сравнение расчетных графиков между собой показывает смещение влево кривой изменения дальности видимости при моделировании горения ДСтП относительно типовой нагрузки. Это подтверждает предположение о занижении риска потери видимости в пожаре при расчете с использованием типовой пожарной нагрузки.

После уточнения показателей пожарной опасности исследуемых веществ и преобразования этих данных в доступные для расчёта значения была достигнута высокая сходимость расчетных и экспериментальных значений, что даёт основания для верификации предлагаемого способа определения потери видимости в дыму при пожаре.

Отличие экспериментальных и расчетных данных по снижению видимости в дыму при горении ДСтП свидетельствует о более сложном процессе горения и наличии дополнительных, помимо учитываемых в FDS, параметров и зависимостей, регулирующих образование дыма и потерю видимости. К таким факторам можно отнести:

1. Влияние состава материала. Например, в ДСтП созданной с использованием карбамидоформальдегидного связующего содержится мочевины, которая является одним из традиционных ингредиентов, составляющих антипирены для древесины. Таким образом, при моделировании не учитывается фактор, замедляющий процесс распространения пламени.

2. Недостоверность данных о выделении сажи. Этот фактор, обусловлен в первую очередь недостатками метода экспериментального определения коэффициента дымообразования по ГОСТ 12.1.044, а именно: отсутствие учёта массы сгораемого образца, переходящей в дым; использование именно наибольшего значения дымообразования, полученного при стандартных испытаниях в двух режимах (горение и тление); а также другие упрощения, обусловленные условиями специальных испытаний.

Выводы

В результате сравнения экспериментальных данных о динамике потери видимости в дыму при горении ДСтП с расчетными значениями, полученными в FDS на основании данных о показателях пожарной опасности типовой горючей нагрузки, установлено, что результаты расчета значительно отличаются.

Разработана методика и предложен способ проведения экспериментальных исследований динамики изменения видимости в дыму, которые могут быть использованы для уточнения и дополнения исходных данных, вносимых в программное обеспечение, в целях совершенствования существующего подхода к нормированию объектов защиты по уровню пожарного риска.

Верифицирован экспериментальный способ определения потери видимости в дыму при горении двух видов образцов ДСтП.

Произведено уточнение показателей пожарной опасности исследуемых образцов ДСтП, на основании полученных данных внесены корректировки в расчетную модель. В результате проведения математического расчета, проведенного с использованием скорректированных данных, удалось добиться высокой сходимости результатов расчета с экспериментальными значениями.

Список источников

1. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие. – Москва: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
2. Колодяжный С.А., Переславцева И.И. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №4 (30). С. 403–412. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23419307> (дата обращения: 25.02.2025).
3. Husted B.P., Carlsson J., Goransson U. Visibility through inhomogeneous smoke using CFD proceedings of interflam. Edinburgh, 2004. – Pp. 697–702.
4. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / пер. с англ. – Москва: Стройиздат, 1990. – 424 с.
5. Мустафин В.М., Пузач С.В. Влияние начальной освещенности и дымообразующей способности на расчетное время блокирования путей эвакуации по потере видимости // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – № 2. – С. 17–22.
6. Orzel R.A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion // Occupational Medicine. – 1993. – Vol. 8 (3). – Pp. 414–429.
7. Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С., Абакумов Е.С. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 222 с.
8. Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2020. – Т. 29. – №1. – С. 23–31. – DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31.
9. Rasbash D.J., Drysdale D.D. Fundamentals of smoke production // Fire Safety Journal. 1982. Vol. 5. Issue 1. Pp. 77–86.

10. Барботько С.Л., Вольный О.С. Оценка тепловыделения при горении электрических кабелей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. – 2016. – Т. 25. – №11. – С. 35–44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.35.
11. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. – Москва: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
12. Corches A.M., Ulriksen L., Jomaas G. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (10–12 November 2014, Queensland, Australia). – Red Hook, NY: Curran Associates, Inc., 2015. – P. 346–357.
13. Gyppaz F. Smoke and safety in case of fire. – Lyon, France: Nexans Research Center, 2014. – 15 p.
14. Smoke Control Design / Performance-Based Fire Safety Design / Hurley M.J., Rosenbaum E.R. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – Pp. 131–137. DOI: 10.1201_b18375-9.
15. Gross D., Loftus J.J., Robertson A.F. Method for measuring smoke from burning materials // Symposium on Fire Test Methods – Restraint & Smoke. – Conshohocken, PA: ASTM International, 1967. – Pp. 166–204. – DOI: 10.1520/stp41310s.
16. Sharovarnikov A.F., Korolchenko D.A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 475-476. – P. 1344–1350. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.
17. Kolodyazhny S., Kozlov V. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire __ MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 193, Article No. 03007. – 8 p. DOI: 10.1051_mateconf_201819303007.
18. Пузач С.В., Сулейкин Е.В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosico Safety. – 2016. – Т. 25, №2. – С. 13-20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
19. Приказ МЧС РФ от 14.11.2022 № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности» // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2023. – 21 марта. – URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения: 25.02.2025).
20. Акперов Р.Г. «Экспериментально-теоретический подход к расчету времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре в производственных зданиях гидроэлектростанций: специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность»: Диссертация на соискание кандидата технических наук / Акперов Р.Г.; Академия Государственной противопожарной службы. – Москва, 2018. – 155 с.
21. Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-usloviy-provedeniya-ispytaniy-v-kamere-sgoraniya-melkomasshtabnoy-eksperimentalnoy-ustanovki-na-dymoobrazuyuschuyu> (дата обращения: 25.02.2025).
22. Mulholland G.W. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002. – Pp. 362-363.
23. Widmann J.F. Evaluation of the planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke // Combustion Science and Technology. – 2003. – Vol. 175. – Pp. 2299–2308. – DOI: 10.1080/714923279.

References

1. Koshmarov Y.A. Forecasting of dangerous factors of fire in the room: textbook. – Moscow. Academy of State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000. – 18 с.
2. Kolodyazhny S.A., Pereslavitseva I.I. Mathematical modelling of the dynamics of the main dangerous factors in the initial stage of a fire // Izvestiya Kazan State 85 SAFETY OF LIFETIME FIRE AND EXPLOSION SAFETY 2021 Vol. 30 No. 3 of the Kazan State University of

Architecture and Civil Engineering. 2014. № 4 (30). С. 403-412. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23419307> (accessed: 25.02.2025).

3. Husted B.P., Carlsson J., Goransson U. Visibility through inhomogeneous smoke using CFD proceedings of interflam. Edinburgh, 2004. – Pp. 697-702.

4. Drysdale D. Introduction to Fire Dynamics / transl. from Engl. – Moscow: Stroyizdat, 1990. – 424 с.

5. Mustafin, V.M.; Puzach, S.V. Influence of the initial illumination and smoke generating capacity on the estimated time of blocking the evacuation paths by the loss of visibility (in Russian) // Life safety. – 2020. – №2. – С. 17-22.

6. Orzel R.A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion // Occupational Medicine. – 1993. – Vol. 8 (3). – Pp. 414-429.

7. Puzach S.V., Smagin A.V., Lebedchenko O.S., Abakumov E.S. New ideas about calculation of necessary time of evacuation of people and about efficiency of use of portable filtering self-rescuers at evacuation on fires. – Moscow. Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2007. – 222 с.

8. Mustafin V.M., Puzach S.V., Akperov R.G. Influence of the test conditions in the combustion chamber of a small-scale experimental unit on the smoke-producing ability of wood // Fire and Explosion Safety. 2020. Т. 29. № 1. С. 23-31. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.23-31.

9. Rasbash D.J., Drysdale D.D. Fundamentals of smoke production // Fire Safety Journal. 1982. Vol. 5. Issue 1. Pp. 77-86.

10. Barbotko S.L., Volny O.S. Estimation of heat generation during the burning of electric cables // Fire and Explosion Safety. – 2016. – Т. 25. – №11. С. 35-44. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.35

11. Puzach S.V. Methods of calculation of heat and mass transfer at fire in the room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety. Moscow: Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2005. 336 с.

12. Corches A.M., Ulriksen L., Jomaas G. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies Proceedings of the 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods (10-12 November 2014, Queensland, Australia).-Red Hook, NY : Curran Associates, Inc., 2015. – P. 346-357.

13. Gyppez F. Smoke and safety in case of fire.-Lyon, France: Nexans Research Centre, 2014. – 15 p.

14. Smoke Control Design // Performance-Based Fire Safety Design / Hurley M.J., Rosenbaum E.R. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – Pp. 131-137. – DOI: 10.1201_b18375-9.

15. Gross D., Loftus J.J., Robertson A.F. Method for measuring smoke from burning materials // Symposium on Fire Test Methods-Restraint & Smoke. – Conshohocken, PA: ASTM International, 1967. – Pp. 166-204. – DOI: 10.1520/stp41310s.

16. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 475-476. – P. 1344-1350. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.

17. Kolodyazhny S., Kozlov V. Analytical calculation of time of reaching specific values based on visibility loss during a fire // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 193, Article No. 03007. – 8 p. DOI: 10.1051/mateconf/201819303007.

18. Puzach S. V., Suleykin E. V. New theoretical-experimental approach to the calculation of toxic gas propagation in a room fire // Fire and Explosive Safety/Fire and Explosico Safety. – 2016. – Т. 25, № 2. – С. 13-20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.

19. Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation 14.11.2022 № 1140 «On approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk in buildings, structures and fire compartments of different classes of functional fire hazard» from // Official Internet portal of legal information. – 2023. – URL: <http://pravo.gov.ru> (accessed: 25.02.2025).

20. Akperov, R.G. Experimental-theoretical approach to the calculation of the time of blocking the evacuation paths by toxic combustion products in case of fire in the production buildings of hydroelectric power plants: speciality 05.26.03 «Fire and industrial safety»: Dissertation for

Candidate of Technical Sciences / Akperov, R. G.; Academy of State Fire Fighting Service. - Moscow, 2018. – 155 с.

21. Puzach S.V., Mustafin V.M., Akperov R.G. Influence of test conditions in the combustion chamber of a small-scale experimental unit on the smoke-producing ability of wood // Fire and explosion safety. – 2020. – №1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-usloviy-provedeniya-ispytaniy-v-kamere-sgoraniya-melkomasshtabnoy-eksperimentalnoy-ustanovki-na-dymobrazuyuschuyu> (accessed: 25.02.2025).

22. Mulholland G.W. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002. – Pp. 362-363.

23. Widmann J.F. Evaluation of the planck mean absorption coefficients for radiation transport through smoke // Combustion Science and Technology. – 2003. – Vol. 175. – Pp. 2299-2308. – DOI: 10.1080/714923279.

Информация об авторах

Е.Б. Аносова – кандидат технических наук, доцент

Р.Р. Фатыхов – кандидат технических наук, доцент

А.А. Блохин – кандидат технических наук, доцент

В.М. Сандалов – аспирант

Information about the author

E.B. Anosova – Ph.D. of Engineering Sciences, docent

R.R. Fatykhov – Ph.D. of Engineering Sciences, docent

A.A. Blokhin – Ph.D. of Engineering Sciences, docent

V.M. Sandalov – postgraduate

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.03.2025, одобрена после рецензирования 22.05.2025, принята к публикации 01.06.2025.

The article was submitted 26.03.2025, approved after reviewing 22.05.2025, accepted for publication 01.06.2025.