

© Р. В. МИРОНЕНКО¹, М. В. СИБИРЯКОВ¹, А. И. СОКОВНИН¹, Р. К. ИБАТУЛИН²

¹ Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия

² ООО «Пожарный инженер», Москва, Россия

О вопросах верификации результатов моделирования теплового потока полевым методом

АННОТАЦИЯ

Тема. Одним из требований пожарной безопасности является создание условий нераспространения пожара между зданиями. Данное требование реализуется посредством соблюдения противопожарных расстояний (разрывов) между зданиями и сооружениями.

Требования по противопожарным расстояниям (разрывам) установлены в нормативных документах. В отдельных случаях выполнение данных требований либо технически невозможно, либо связано со значительными экономическими затратами, при которых дальнейшая эксплуатация объекта нецелесообразна. Для решения данной проблемы предусмотрена возможность уменьшать противопожарные расстояния (разрывы) между объектами защиты при условии подтверждения инженерным расчётом невозможности распространения пожара на соседний объект от теплового потока. Точность получаемых по методике расчёта противопожарного расстояния (разрыва) результатов непосредственно влияет на уровень пожарной опасности объекта защиты, а верификация в расчётных моделях, используемых в рамках данной методики, является важным этапом её развития и совершенствования.

Методы. Для исследований применялись методы анализа и компьютерного моделирования при помощи программного продукта *Fire Dynamics Simulator* (FDS).

Результаты. Выполнено моделирование теплового потока при горении противня гептана. Результаты, полученные

в ходе моделирования, были сопоставлены с результатами натурного эксперимента. Сформулированы рекомендации по настройке параметров FDS для моделирования теплового потока.

Область применения результатов. Результаты исследования могут быть применены при расчёте противопожарных расстояний (разрывов) полевым методом с использованием программного продукта FDS.

Выводы. Модель, созданная с помощью FDS, требует обязательного уточнения параметров, так как не во всех случаях значения, используемые по умолчанию, корректно описывают моделируемый процесс. Изучение вопроса моделирования теплового потока в FDS требует дальнейших исследований. В ходе численных экспериментов было установлено, что при расчёте падающего теплового потока необходимо обращать внимание на настройку таких параметров, как дискретизация телесного угла, доля энергии, затрачиваемой на излучение, выделение СО и сажи. Для корректной оценки падающего теплового потока рекомендуется производить моделирование горения посредством корректировки телесного угла с шагом 100 до тех пор, пока значение падающего теплового потока не стабилизируется в узком диапазоне.

Ключевые слова: тепловой поток, полевое моделирование, верификация, противопожарное расстояние

© R.V. MIRONENKO¹, M.V. SIBIRYAKOV¹, A.I. SOKOVNIN¹, R.K. IBATULIN²

¹ State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

² LLC "Fire Engineer", Moscow, Russia

On issues of verifying heat flow simulation results by the field method

ABSTRACT

Purpose. One of the fire safety requirements is the creation of conditions for preventing fire spread between buildings. This requirement is implemented by observing fire prevention distances (breaks) between buildings and structures.

Requirements for fire prevention distances (breaks) are established in regulatory documents. In some cases, the implementation of these requirements is either technically impossible, or associated with significant economic costs, when the further operation of the facility is impractical. To solve this problem, it is possible to reduce fire prevention distances (breaks) between facilities under protection, provided that the engineering calculation confirms the impossibility of fire spread to a neighboring facility by a heat flow. The accuracy of the results obtained by the method of calculating fire distance (break) directly affects the level of fire hazard in the facility

under protection, and verification in the calculation models used within the framework of this method is an important stage in its development and improvement.

Methods. For research, methods of analysis and computer simulation with the help of the *Fire Dynamics Simulator* (FDS) software product are used.

Findings. The simulation of a heat flow during heptane pan burning is performed. The results obtained during the simulation are compared with the results of a full-scale experiment. Recommendations for setting FDS parameters for heat flow simulation are formulated.

Research application field. The study results can be applied in the calculation of fire prevention distances (breaks) by the field method using *Fire Dynamics Simulator* software product.

Conclusions. The model created by means of FDS requires mandatory refinement of the parameters, since not in all cases the default values correctly describe the simulated process. The study of the issue of heat flow simulation in FDS requires further research. In the course of numerical experiments, it is found that when calculating the incident heat flux, it is necessary to pay attention to setting such parameters as discretization of the solid angle, the fraction of energy spent on radiation, CO and

soot release. For correct assessment of the incident heat flux, it is recommended to simulate combustion by solid angle correction with a step in 100 until the value of the incident heat flux stabilizes within a narrow range.

Key words: heat flow, field simulation, verification, fire prevention distance

ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований пожарной безопасности является обеспечение нераспространения пожара между зданиями. Данное требование реализуется через соблюдения противопожарных расстояний (разрывов) между зданиями и сооружениями. Под понятием противопожарное расстояние (разрыв) понимается расстояние между зданиями и сооружениями, препятствующее распространению пожара.

Требования по противопожарным расстояниям (разрывам) изложены в Своде правил 4.13130.2013 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объёмно-планировочным и конструктивным решениям» (далее СП 4.13130.2013). Значения противопожарных расстояний (разрывов) между зданиями и сооружениями зависят, в основном, от таких параметров, как степень огнестойкости, высота зданий и сооружений, назначение зданий. Соблюдение противопожарных расстояний, установленных в СП 4.13130.2013, позволяет гарантировать нераспространение пожара на объекты защиты, находящиеся вблизи.

Следует отметить, что в отдельных случаях установленные требования СП 4.13130.2013 по противопожарным расстояниям (разрывам) либо технически невозможно выполнить, либо их выполнение связано со значительными экономическими затратами, при которых дальнейшая эксплуатация объекта нецелесообразна. Для решения данной проблемы в СП 4.13130.2013 предусмотрена возможность уменьшать противопожарные расстояния (разрывы) между объектами защиты при условии подтверждения инженерным расчётом невозможность распространения пожара на соседний объект от теплового потока. Точность получаемых результатов по методике расчёта противопожарного расстояния (разрыва) непосредственно влияет на уровень пожарной опасности объекта защиты, а верификация в расчётных моделях, используемых в рамках данной методики, является важным этапом её развития и совершенствования.

Инженерные основы методики расчёта противопожарного расстояния (разрыва) были впер-

вые изложены в работе [1], в дальнейшем методика дополнялась в работах [2–5].

Методика расчёта по подтверждению предотвращения распространения пожара между зданиями и сооружениями изложена в приложении А к СП 4.13130.2013 (далее методика). Главным её условием является соотношение:

$$q_{\text{пад}} < q_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{пад}}$ – падающий тепловой поток от пламени пожара на облучаемый материал, кВт/м²; $q_{\text{доп}}$ – допустимая плотность теплового потока для материала, кВт/м².

Допустимая плотность теплового потока для материала определяется по формуле:

$$q_{\text{доп}} = 0,8 q_{\text{крит}}, \quad (2)$$

где $q_{\text{крит}}$ – критическая плотность теплового потока для веществ и материалов, кВт/м².

Критическая плотность теплового потока для некоторых веществ и материалов представлена в самой методике, этот параметр допускается также брать из справочных данных, результатов испытаний или экспериментальных исследований, опубликованных в научно-технической литературе.

Параметры падающего теплового потока от пламени пожара на облучаемый материал определяются на основании расчётов. Согласно методике расчёт падающего теплового потока от пламени пожара на облучаемый материал может быть рассчитан по представленным в ней формулам или методом полевого моделирования с использованием программных продуктов. В статье рассмотрены аспекты, связанные с определением падающего теплового потока от пламени пожара на облучаемый материал методом полевого моделирования.

Анализ программных продуктов, реализующих метод полевого моделирования [6, 7], показал, что на территории России как минимум 8 программных продуктов реализуют данный метод. Из них 6 основываются на программе *Fire Dynamics Simulator* (далее FDS). В дальнейшем

в статье будут рассмотрены вопросы определения падающего теплового потока от пламени пожара на облучаемый материал с помощью FDS.

Программный продукт FDS разрабатывался для моделирования пожаров [8–10]. При помощи FDS создаётся трёхмерная вычислительная область, в которой решаются уравнения сохранения энергии, движения и массы отдельных компонентов продуктов горения, выраженных в форме Навье – Стокса [11, 12] в декартовых координатах.

Наибольшая сложность при моделировании заключается в подборе необходимых параметров для модели, так как параметры, используемые по умолчанию, не всегда описывают процесс с необходимой точностью. Чтобы разобраться в этом вопросе подробнее, был проведён поиск отчетов по проведённым натурным испытаниям с целью уточнения параметров модели для расчёта падающего теплового потока от пламени пожара на облучаемый материал для большей сходимости экспериментальных данных с данными, полученными с помощью FDS.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве базового сценария горения был выбран эксперимент, описанный в отчёте [13], где рассматривалось горение противня с гептаном общей мощностью 116 кВт. Падающий тепловой поток замерялся на расстоянии 1,65 м от центра противня диаметром 0,3 м, противень был приподнят относительно пола на 0,15 м.

На *рисунке 1* представлена зависимость максимального падающего теплового потока от высоты, полученная в ходе эксперимента.

Исходя из ограничений FDS, была построена базовая модель. Она представляет собой расчётную область с размерами 1,65×1,65×3 м, круглый противень было решено представить в виде

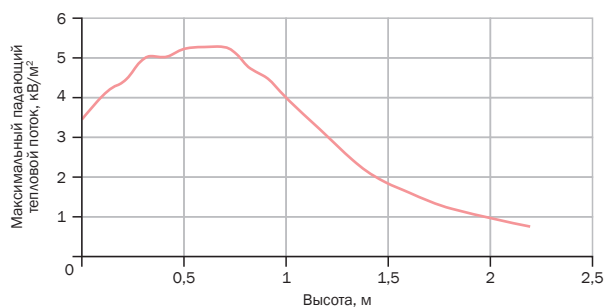


Рисунок 1. Зависимость максимального падающего теплового потока от высоты, полученная в ходе эксперимента [13]

Figure 1. Dependence of the maximum incident heat flux on height, obtained during the experiment [13]

квадрата с длиной стороны 0,3 м, выдержав тем самым геометрические размеры (расстояние от противня до плоскости измерения), противень приподнят от пола на 0,15 м. Со всех четырёх сторон модели были установлены датчики (сверху, снизу, слева, справа), фиксирующие падающий тепловой поток на расстоянии от пола на 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 м. Низшая теплота сгорания гептана согласно [13] была принята 48 181 кДж/кг. Время моделирования составило 15 с. Параметры FDS, не упоминаемые в тексте статьи, оставались по умолчанию.

Согласно [10] был проведён расчёт рекомендуемых размеров ячеек:

- крупная 0,1 м;
- средняя 0,04 м;
- мелкая 0,03 м.

Модель 1. Для первоначальной модели из-за особенностей её геометрии размер ячеек был принят 0,15 м (значение выходит за рамки рекомендуемых) (*рис. 2*). Согласно [13] для этого эксперимента удельная массовая скорость выгорания составила 0,0362 кг/м²·с, так как геометрию модели противня не представляется возможным соблюсти полностью (круглая форма) при крупной сетке (0,15 м) удельная массовая скорость в модели была установлена в 0,0268 кг/м²·с с целью получения общей мощности горения в 116 кВт. В проводимом исследовании серию экспериментов было решено начать с моделирования горения в идеальных условиях, без выделения CO, сажи и других продуктов горения.

Как видно из *рисунка 2*, полностью симметричную модель не удалось создать из-за слишком крупного размера ячейки в 0,15 м, и можно предположить, что данные, полученные по падающему тепловому потоку с разных сторон, будут существенно отличаться.

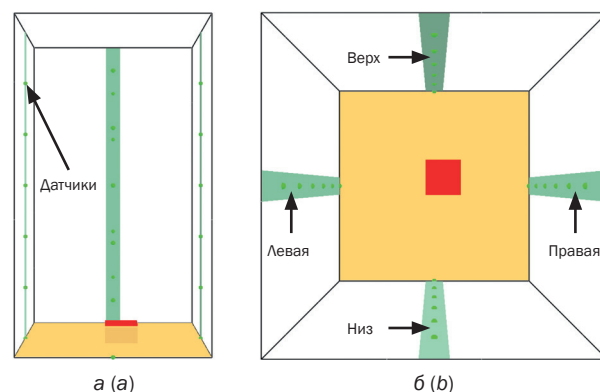


Рисунок 2. Общий вид модели 1 (а) и места размещения датчиков (б)

Figure 2. General view of model 1 (a) and sensor locations (b)

Таблица 1 (Table 1)

Результаты моделирования модели 1
Model 1 simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,54 | 4,45 | 4,57 | 3,46 | 4,01 | 3,47 | 15,5 |
| 0,50 | 5,13 | 6,94 | 7,54 | 5,07 | 6,17 | 5,25 | 17,6 |
| 1,00 | 2,83 | 3,49 | 3,82 | 2,94 | 3,27 | 4,01 | -18,3 |
| 1,50 | 1,21 | 1,31 | 1,31 | 1,27 | 1,27 | 1,67 | -23,6 |
| 2,00 | 0,82 | 0,81 | 0,80 | 0,83 | 0,82 | 0,98 | -17,0 |

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Как и ожидалось, из-за крупного размера ячеек полученные данные с различных сторон по падающему тепловому потоку имеют большой разброс. Этот эффект наблюдается из-за крупномасштабных турбулентных вихрей, которые возникают вследствие засасывания воздуха в пламя, что увеличивает его объём. Таким образом, излучающая плоскость пламени становится ближе к датчику теплового потока.

Как видно из таблицы, максимальное значение относительной ошибки составило – 23,6 %. Ошибка между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе эксперимента и посредством моделирования, составляет 44 %.

Модель 2. За базовую модель была взята модель 1. Из-за особенностей её геометрии следующая итерация была принята со значениями для ячеек 0,03 м (мелкая). С таким размером ячеек геометрию модели противня возможно с некоторыми ограничениями соблюсти (круглая форма) (рис. 4), поэтому удельная массовая скорость выгорания для модели была принята 0,0362 кг/м²·с.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке 5 и таблице 2.

Использование более мелкой сетки позволило сократить разброс между данными с различных сторон по падающему тепловому потоку, что привело к увеличению максимальной относительной ошибки (–41,6 %) и уменьшению между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе эксперимента и по средствам моделирования, (–26,9 % по сравнению с моделью 1).

Модель 3. Проводился анализ научных статей на тему моделирования горения в противнях. В статье [14] представлены результаты моделирования этого же эксперимента в *Ansys Fluent*,

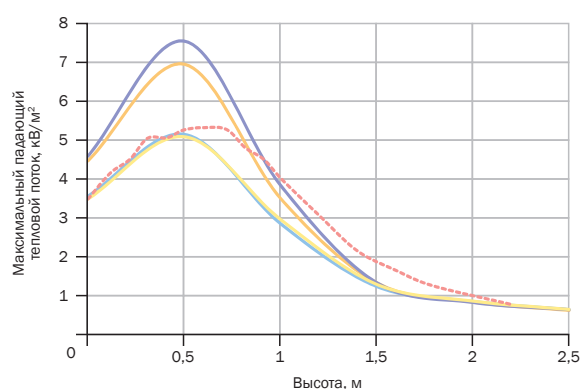


Рисунок 3. Результаты моделирования модели 1 в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; - - эксперимент
Figure 3. Model 1 simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; - - experiment

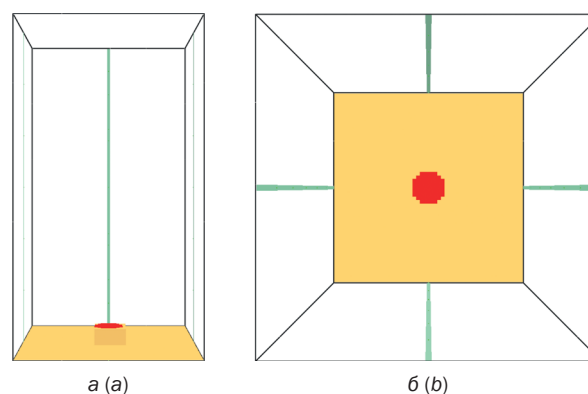


Рисунок 4. Общий вид модели 2 и места размещения датчиков:
а – общий вид модели; б – размещение датчиков
Figure 4. General view of model 2 and sensor locations:
a – general view of the model; b – sensor locations

которые были признаны удовлетворительными. В качестве настроек параметров для модели, описанной в [14], использовались следующие параметры:

- метод крупных вихрей (далее LES);
- константа Смагоринского 0,1;
- число Прандтля 0,85;
- число Шмидта 0,7.

В качестве базовой модели была взята модель 2 с изменениями, описанными выше [14], по умолчанию в FDS установлены следующие параметры:

- метод очень больших вихрей (далее VLES);
- константа Смагоринского 0,2;
- число Прандтля 0,5;
- число Шмидта 0,5.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке 6 и таблице 3.

Использование настроек, отличных от базовых, позволило уменьшить максимальную относительную ошибку (–40,8 %) и увеличить ошибку между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе эксперимента и посредством моделирования (–29 %) по сравнению с моделью 2. Характер экспериментальной зависимости, полученной на основании модели 2 в промежутке 1,5 м и 2 м, имеют очень большую сходимость.

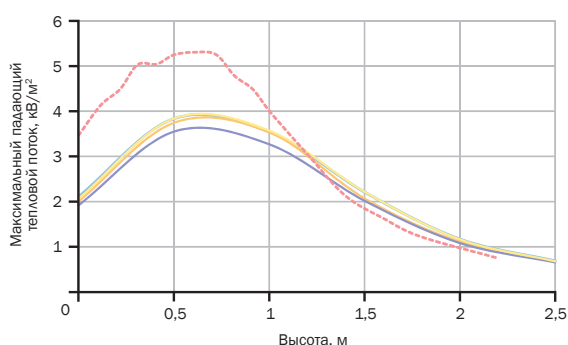


Рисунок 5. Результаты моделирования модели 2 в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 5. Model 2 simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

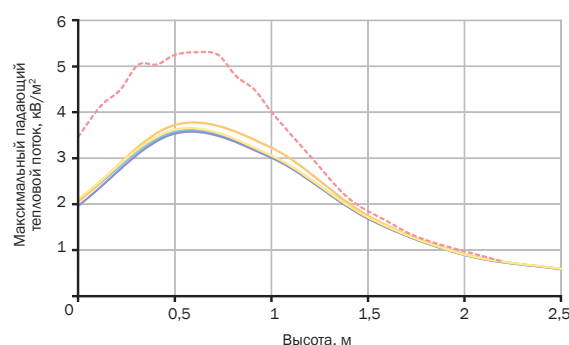


Рисунок 6. Результаты моделирования модели 3 в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 6. Model 3 simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

Таблица 2 (Table 2)

Результаты моделирования модели 2
Model 2 simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 2,11 | 2,01 | 1,92 | 2,06 | 2,02 | 3,47 | –41,6 |
| 0,50 | 3,84 | 3,74 | 3,55 | 3,84 | 3,74 | 5,25 | –28,7 |
| 1,00 | 3,54 | 3,54 | 3,27 | 3,57 | 3,48 | 4,01 | –13,1 |
| 1,50 | 2,21 | 2,07 | 2,02 | 2,22 | 2,13 | 1,67 | 27,8 |
| 2,00 | 1,17 | 1,11 | 1,08 | 1,16 | 1,13 | 0,98 | 15,2 |

Таблица 3 (Table 3)

Результаты моделирования модели 3
Model 3 simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 2,07 | 2,05 | 1,97 | 2,12 | 2,05 | 3,47 | –40,8 |
| 0,50 | 3,57 | 3,72 | 3,53 | 3,62 | 3,61 | 5,25 | –31,1 |
| 1,00 | 3,04 | 3,23 | 3,01 | 3,05 | 3,08 | 4,01 | –23,0 |
| 1,50 | 1,72 | 1,75 | 1,68 | 1,71 | 1,72 | 1,67 | 3,0 |
| 2,00 | 0,89 | 0,91 | 0,89 | 0,90 | 0,90 | 0,98 | –8,4 |

Модель 4. В процессе изучения вопроса реализации расчёта теплового потока в FDS было определено, что по умолчанию обновление полей интенсивности теплового излучения происходит каждый 15-й шаг по времени (расчёт полей интенсивности теплового излучения повторяется через каждые три шага по времени для одного из пяти углов направления) [15]. Для получения более точных данных необходимо производить расчёт полей интенсивности теплового потока каждый шаг по времени для каждого из пяти углов направления. В качестве базовой модели была взята модель 3 с изменениями, описанными вы-

ше, а именно параметры TIME_STEP_INCREMENT и ANGLE_INCREMENT были приравнены к 1.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке 7 и таблице 4.

Использование параметров TIME_STEP_INCREMENT и ANGLE_INCREMENT, приравненных к 1, позволило уменьшить максимальную относительную ошибку (–37,6 %) и уменьшить ошибку между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе эксперимента и по средствам моделирования, (–23,9 %) по сравнению с моделью 3.

Таблица 4 (Table 4)

Результаты моделирования модели 4
Model 4 simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 2,21 | 2,20 | 2,08 | 2,17 | 2,17 | 3,47 | –37,6 |
| 0,50 | 3,86 | 4,00 | 3,79 | 3,82 | 3,87 | 5,25 | –26,3 |
| 1,00 | 3,20 | 3,23 | 3,13 | 3,23 | 3,20 | 4,01 | –20,2 |
| 1,50 | 1,75 | 1,71 | 1,83 | 1,66 | 1,74 | 1,67 | 4,4 |
| 2,00 | 0,91 | 0,90 | 0,91 | 0,87 | 0,90 | 0,98 | –8,6 |

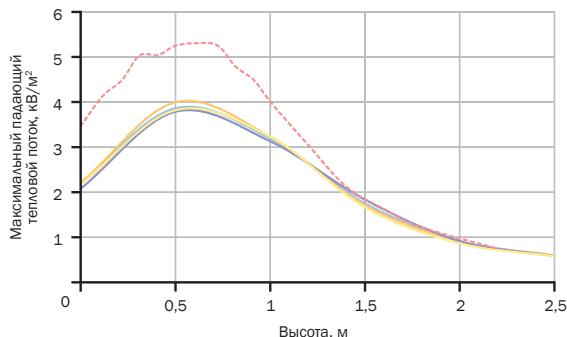


Рисунок 7. Результаты моделирования модели 4 в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 7. Model 4 simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

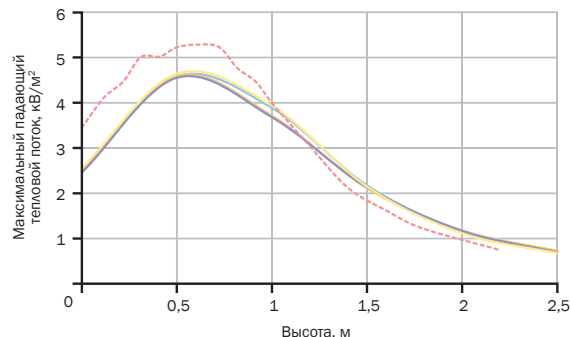


Рисунок 8. Результаты моделирования модели 5 (200) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 8. Model 5 (200) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

Таблица 5 (Table 5)

Результаты моделирования модели 5 (200)
Model 5 (200) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 2,52 | 2,50 | 2,47 | 2,57 | 2,51 | 3,47 | –27,5 |
| 0,50 | 4,61 | 4,60 | 4,57 | 4,67 | 4,61 | 5,25 | –12,1 |
| 1,00 | 3,90 | 3,73 | 3,69 | 3,95 | 3,82 | 4,01 | –4,7 |
| 1,50 | 2,18 | 2,12 | 2,14 | 2,15 | 2,15 | 1,67 | 28,9 |
| 2,00 | 1,17 | 1,18 | 1,17 | 1,12 | 1,16 | 0,98 | 18,3 |

Модели 5–13. При расчёте излучения в *FDS* одним из немаловажных параметров является дискретизация телесного угла. По умолчанию данный параметр задан 104. Для определения влияния данного параметра на излучение был проведён ряд расчётов в которых данный параметр изменялся с шагом 100, начиная с 200 до 1 000, за базовую модель была принята модель 4.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунках 8–16 и таблицах 5–13.

Высокая корреляция результатов получилась при значении телесного угла 400. Использование телесного угла со значением 400 позволило увеличить максимальную относительную ошибку (49,2 %) и уменьшить ошибку между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе эксперимента и посредством моделирования, (–0,9 %) по сравнению с моделью 4.

Модель 14. До этого рассматривались идеальные реакции горения (без выделения сажи, угарного газа и других веществ), в реальности реакция

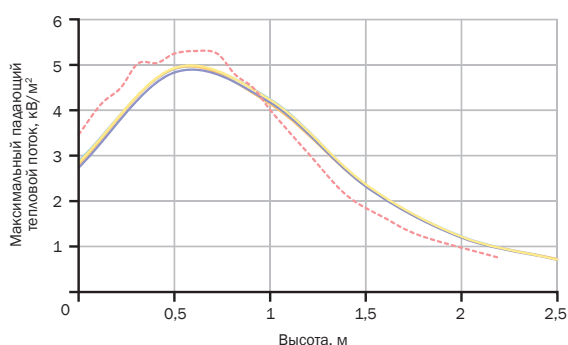


Рисунок 9. Результаты моделирования модели 6 (300) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 9. Model 6 (300) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

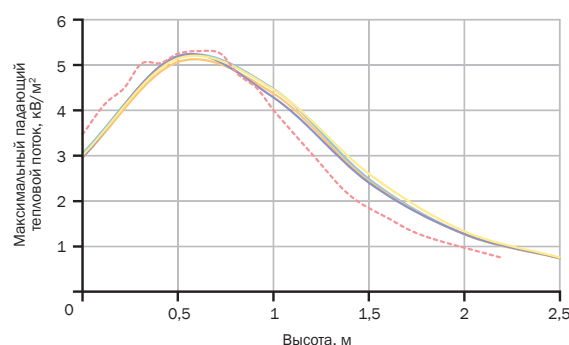


Рисунок 10. Результаты моделирования модели 7 (400) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 10. Model 7 (400) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

Таблица 6 (Table 6)

Результаты моделирования модели 6 (300)
Model 6 (300) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 2,88 | 2,81 | 2,74 | 2,85 | 2,82 | 3,47 | –18,7 |
| 0,50 | 4,91 | 4,92 | 4,83 | 4,93 | 4,90 | 5,25 | –6,7 |
| 1,00 | 4,24 | 4,14 | 4,17 | 4,23 | 4,20 | 4,01 | 4,7 |
| 1,50 | 2,36 | 2,33 | 2,32 | 2,37 | 2,34 | 1,67 | 40,8 |
| 2,00 | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,22 | 1,21 | 0,98 | 23,2 |

Таблица 7 (Table 7)

Результаты моделирования модели 7 (400)
Model 7 (400) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,06 | 2,96 | 2,97 | 3,01 | 3,00 | 3,47 | –13,6 |
| 0,50 | 5,17 | 5,07 | 5,20 | 5,14 | 5,15 | 5,25 | –2,0 |
| 1,00 | 4,47 | 4,37 | 4,29 | 4,46 | 4,40 | 4,01 | 9,8 |
| 1,50 | 2,49 | 2,44 | 2,41 | 2,60 | 2,49 | 1,67 | 49,2 |
| 2,00 | 1,27 | 1,27 | 1,28 | 1,33 | 1,29 | 0,98 | 31,2 |

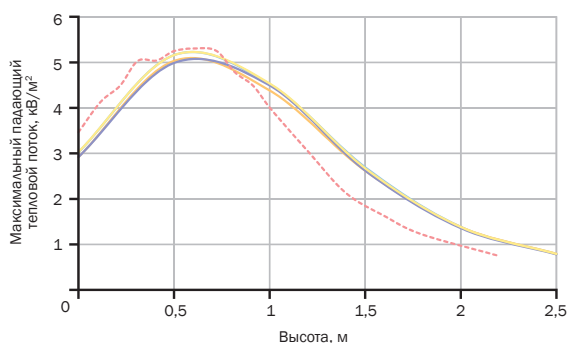


Рисунок 11. Результаты моделирования модели 8 (500) в сравнении с экспериментальными данными:

— левый; — правый; — верх; — низ; - - эксперимент
Figure 9. Model 8 (500) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; - - experiment

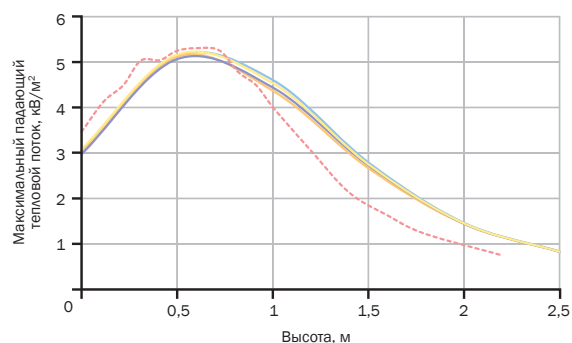


Рисунок 12. Результаты моделирования модели 9 (600) в сравнении с экспериментальными данными:

— левый; — правый; — верх; — низ; - - эксперимент
Figure 12. Model 9 (600) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; - - experiment

Таблица 8 (Table 8)

Результаты моделирования модели 8 (500)

Model 8 (500) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,02 | 2,92 | 2,92 | 3,03 | 2,97 | 3,47 | -14,3 |
| 0,50 | 5,16 | 5,03 | 4,99 | 5,16 | 5,09 | 5,25 | -3,1 |
| 1,00 | 4,52 | 4,38 | 4,50 | 4,54 | 4,48 | 4,01 | 11,9 |
| 1,50 | 2,70 | 2,62 | 2,62 | 2,67 | 2,65 | 1,67 | 59,3 |
| 2,00 | 1,38 | 1,38 | 1,36 | 1,38 | 1,38 | 0,98 | 40,2 |

Таблица 9 (Table 9)

Результаты моделирования модели 9 (600)

Model 9 (600) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,06 | 3,00 | 2,97 | 3,08 | 3,03 | 3,47 | -12,6 |
| 0,50 | 5,14 | 5,12 | 5,07 | 5,16 | 5,12 | 5,25 | -2,4 |
| 1,00 | 4,61 | 4,37 | 4,44 | 4,54 | 4,49 | 4,01 | 12,0 |
| 1,50 | 2,79 | 2,67 | 2,73 | 2,75 | 2,73 | 1,67 | 64,1 |
| 2,00 | 1,46 | 1,44 | 1,44 | 1,45 | 1,45 | 0,98 | 47,5 |

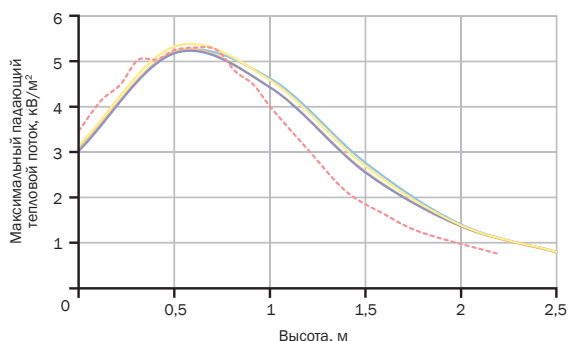


Рисунок 13. Результаты моделирования модели 10 (700) в сравнении с экспериментальными данными:

— левый; — правый; — верх; — низ; - - эксперимент
Figure 13. Model 10 (700) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; - - experiment

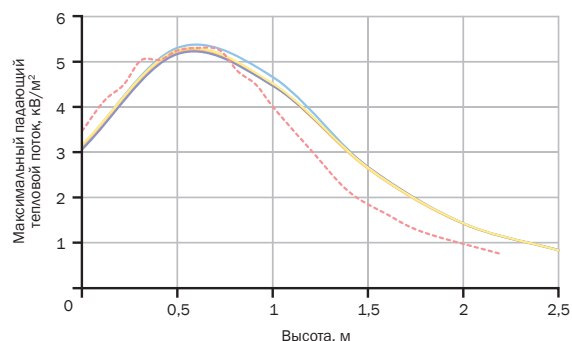


Рисунок 14. Результаты моделирования модели 11 (800) в сравнении с экспериментальными данными:

— левый; — правый; — верх; — низ; - - эксперимент
Figure 14. Model 11 (800) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; - - experiment

Таблица 10 (Table 10)

Результаты моделирования модели 10 (700)
Model 10 (700) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,08 | 3,06 | 3,02 | 3,14 | 3,08 | 3,47 | -11,3 |
| 0,50 | 5,18 | 5,21 | 5,18 | 5,33 | 5,23 | 5,25 | -0,4 |
| 1,00 | 4,63 | 4,44 | 4,43 | 4,59 | 4,52 | 4,01 | 12,8 |
| 1,50 | 2,76 | 2,57 | 2,55 | 2,69 | 2,64 | 1,67 | 58,7 |
| 2,00 | 1,40 | 1,36 | 1,37 | 1,38 | 1,38 | 0,98 | 40,3 |

Таблица 11 (Table 11)

Результаты моделирования модели 11 (800)
Model 11 (800) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,14 | 3,09 | 3,06 | 3,16 | 3,11 | 3,47 | -10,2 |
| 0,50 | 5,31 | 5,21 | 5,17 | 5,25 | 5,23 | 5,25 | -0,3 |
| 1,00 | 4,66 | 4,47 | 4,47 | 4,52 | 4,53 | 4,01 | 13,1 |
| 1,50 | 2,67 | 2,64 | 2,67 | 2,66 | 2,66 | 1,67 | 59,6 |
| 2,00 | 1,43 | 1,42 | 1,43 | 1,43 | 1,43 | 0,98 | 45,2 |

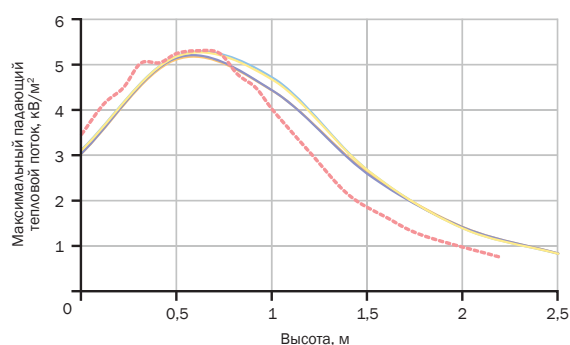


Рисунок 15. Результаты моделирования модели 12 (900) в сравнении с экспериментальными данными:

— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент

Figure 15. Model 12 (900) simulation results compared to experimental data:

— left; — right; — top; — bottom; — experiment

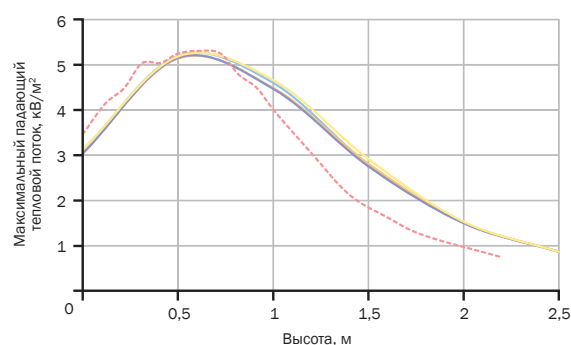


Рисунок 16. Результаты моделирования модели 13 (1000) в сравнении с экспериментальными данными:

— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент

Figure 16. Model 13 (1000) simulation results compared to experimental data:

— left; — right; — top; — bottom; — experiment

Таблица 12 (Table 12)

Результаты моделирования модели 12 (900)
Model 12 (900) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,13 | 3,04 | 3,05 | 3,11 | 3,08 | 3,47 | -11,1 |
| 0,50 | 5,19 | 5,12 | 5,15 | 5,18 | 5,16 | 5,25 | -1,6 |
| 1,00 | 4,72 | 4,43 | 4,43 | 4,67 | 4,56 | 4,01 | 13,8 |
| 1,50 | 2,67 | 2,62 | 2,59 | 2,67 | 2,64 | 1,67 | 58,2 |
| 2,00 | 1,39 | 1,42 | 1,41 | 1,39 | 1,40 | 0,98 | 42,8 |

Таблица 13 (Table 13)

Результаты моделирования модели 13 (1000)
Model 13 (1000) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,11 | 3,06 | 3,04 | 3,12 | 3,08 | 3,47 | -11,1 |
| 0,50 | 5,20 | 5,14 | 5,15 | 5,19 | 5,17 | 5,25 | -1,5 |
| 1,00 | 4,60 | 4,49 | 4,47 | 4,66 | 4,55 | 4,01 | 13,7 |
| 1,50 | 2,80 | 2,81 | 2,75 | 2,92 | 2,82 | 1,67 | 69,3 |
| 2,00 | 1,50 | 1,51 | 1,50 | 1,53 | 1,51 | 0,98 | 54,0 |

Таблица 14 (Table 14)

Результаты моделирования модели 14
Model 14 simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м ² | Справа, кВт/м ² | Верх, кВт/м ² | Низ, кВт/м ² | Среднее, кВт/м ² | Эксперимент, кВт/м ² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 0,00 | 2,97 | 2,92 | 2,92 | 3,01 | 2,96 | 3,47 | -14,8 |
| 0,50 | 5,11 | 5,10 | 5,04 | 5,11 | 5,09 | 5,25 | -3,0 |
| 1,00 | 4,44 | 4,30 | 4,37 | 4,42 | 4,38 | 4,01 | 9,4 |
| 1,50 | 2,55 | 2,52 | 2,49 | 2,61 | 2,54 | 1,67 | 52,7 |
| 2,00 | 1,37 | 1,35 | 1,34 | 1,38 | 1,36 | 0,98 | 38,6 |

горения происходит с выделением CO (продукт не полного окисления), сажи и других веществ. В FDS реализованы две модели расчёта теплового потока, одна из которых производит расчёт через долю излучения от общей мощности пожара (в дальнейшем она будет подробно рассматриваться), другая – через зависимость коэффициентов поглощения CO₂ и H₂O от длины волны. Рассмотрение второй модели в задачи исследования не входило. В ходе численных экспериментов будут постепенно добавляться и уточняться данные. В начале исследования было определено выделение CO. Анализ источников позволил установить, что при горении гептана характерен выход CO 0,01 кг/кг [16]. За базовую модель была принята модель 7.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунке 17 и таблице 14.

Результаты моделирования показали, что при добавлении в реакцию выхода CO увеличилась максимальная относительная ошибка (52,7 %) и увеличилась ошибка между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе эксперимента и посредством моделирования, (-2,6 %) по сравнению с моделью 7.

Модели 15–16. Анализ источников [16, 17] позволил установить, что при горении гептана может выделяться сажа с расходом 0,037 кг/кг [16] или 0,062 кг/кг [17], значение 0,062 кг/кг [17] оп-

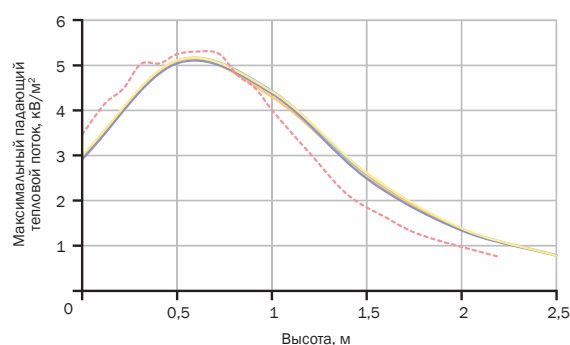


Рисунок 17. Результаты моделирования модели 14 в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 17. Model 14 simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

ределено именно для этого эксперимента. За базовую модель была взята модель 14.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунках 18–19 и в таблице 15–16.

Сравнение результатов моделирования модели 15 и 16 было установлено, что высокую корреляцию полученных результатов показала модель 16. При использовании значения с выходом сажи 0,062 кг/кг увеличилась максимальная относительная ошибка (50,1%) и уменьшилась ошибка между максимальными значениями падающего теплового потока, полученного в ходе

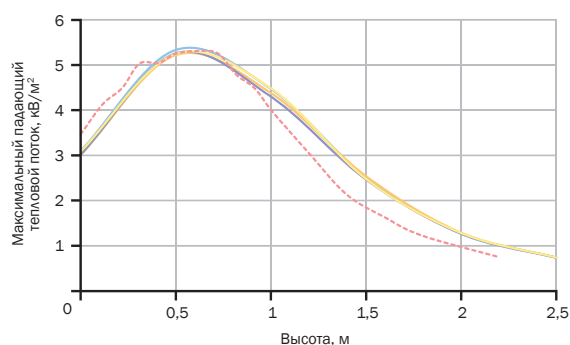


Рисунок 18. Результаты моделирования модели 15 (0,037) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 18. Model 15 (0,037) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

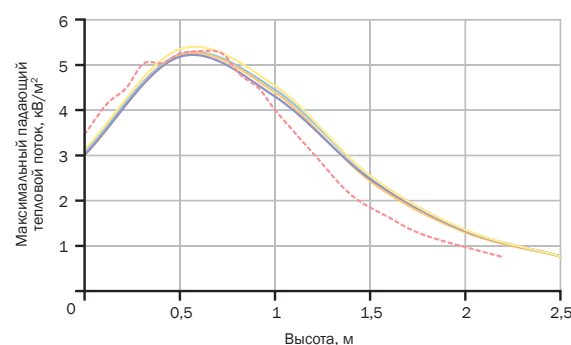


Рисунок 19. Результаты моделирования модели 16 (0,062) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 19. Model 16 (0,062) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

Таблица 15 (Table 15)

Результаты моделирования модели 15 (0,037)
Model 15 (0,037) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,10 | 3,01 | 3,02 | 3,09 | 3,05 | 3,47 | -12,0 |
| 0,50 | 5,33 | 5,22 | 5,25 | 5,24 | 5,26 | 5,25 | 0,3 |
| 1,00 | 4,47 | 4,38 | 4,30 | 4,48 | 4,41 | 4,01 | 10,0 |
| 1,50 | 2,51 | 2,54 | 2,47 | 2,48 | 2,50 | 1,67 | 50,0 |
| 2,00 | 1,26 | 1,29 | 1,27 | 1,28 | 1,28 | 0,98 | 29,9 |

Таблица 16 (Table 16)

Результаты моделирования модели 16 (0,062)
Model 16 (0,062) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,10 | 3,00 | 3,02 | 3,13 | 3,06 | 3,47 | -11,7 |
| 0,50 | 5,23 | 5,21 | 5,18 | 5,35 | 5,24 | 5,25 | -0,1 |
| 1,00 | 4,46 | 4,39 | 4,30 | 4,54 | 4,42 | 4,01 | 10,4 |
| 1,50 | 2,54 | 2,43 | 2,48 | 2,55 | 2,50 | 1,67 | 50,1 |
| 2,00 | 1,34 | 1,30 | 1,33 | 1,35 | 1,33 | 0,98 | 35,6 |

эксперимента и посредством моделирования, (1,6 %) по сравнению с моделью 14.

Модели 17–18. Одним из важных параметров, который напрямую влияет на расчёт падающего потока в FDS, является доля энергии, затрачиваемая на излучение. Этот параметр по умолчанию в FDS установлен на 0,35. Согласно справочным данным [13, 15, 17] параметр изменяется в диапазоне от 0,16 до 0,6. При горении гептана данный параметр может принимать значение 0,4 [15] и 0,31 [13], значение 0,31 [13] определено именно для этого эксперимента. За базовую модель была взята модель 16.

Результаты моделирования в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунках 20–21 и таблицах 17–18.

В процессе сравнения результатов моделирования модели 17 и 18 было установлено, что высокую корреляцию полученных результатов показала модель 18. При использовании значения 0,31 для параметра – доля энергии затрачиваемого на излучение увеличилась максимальная относительная ошибка (57 %) и увеличилась ошибка между максимальными значениями падающего теплового потока полученного в ходе эксперимента и по средствам моделирования (15,4%).

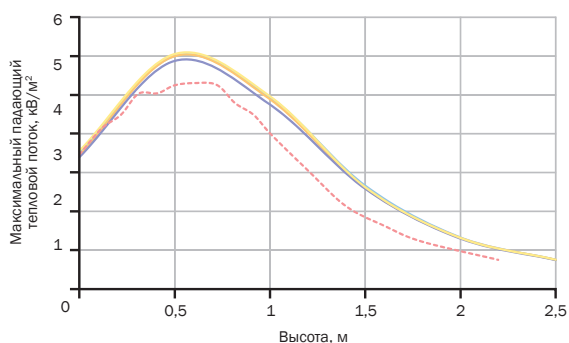


Рисунок 20. Результаты моделирования модели 17 (0,4) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 20. Model 17 (0,4) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

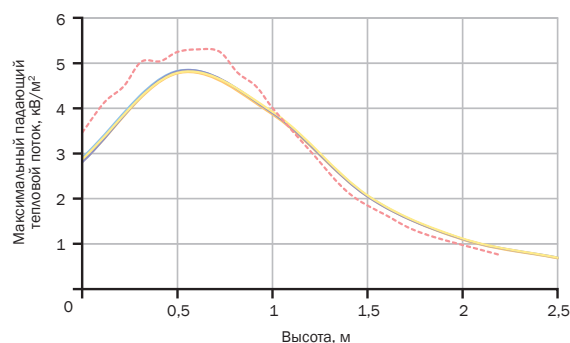


Рисунок 21. Результаты моделирования модели 18 (0,31) в сравнении с экспериментальными данными:
— левый; — правый; — верх; — низ; — эксперимент
Figure 21. Model 18 (0,31) simulation results compared to experimental data:
— left; — right; — top; — bottom; — experiment

Таблица 17 (Table 17)

Результаты моделирования модели 17 (0,4)
Model 17 (0,4) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,54 | 3,45 | 3,40 | 3,56 | 3,49 | 3,47 | 0,6 |
| 0,50 | 6,00 | 6,00 | 5,88 | 6,06 | 5,98 | 5,25 | 14,0 |
| 1,00 | 4,94 | 4,89 | 4,75 | 4,96 | 4,88 | 4,01 | 21,9 |
| 1,50 | 2,66 | 2,60 | 2,58 | 2,62 | 2,61 | 1,67 | 57,0 |
| 2,00 | 1,33 | 1,32 | 1,30 | 1,31 | 1,31 | 0,98 | 33,7 |

Таблица 16 (Table 16)

Результаты моделирования модели 18 (0,31)
Model 18 (0,31) simulation results

| Высота, м | Слева, кВт/м² | Справа, кВт/м² | Верх, кВт/м² | Низ, кВт/м² | Среднее, кВт/м² | Эксперимент, кВт/м² | Относительная ошибка, % |
|-----------|---------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,10 | 3,00 | 3,02 | 3,13 | 3,06 | 3,47 | -11,7 |
| 0,50 | 5,23 | 5,21 | 5,18 | 5,35 | 5,24 | 5,25 | -0,1 |
| 1,00 | 4,46 | 4,39 | 4,30 | 4,54 | 4,42 | 4,01 | 10,4 |
| 1,50 | 2,54 | 2,43 | 2,48 | 2,55 | 2,50 | 1,67 | 50,1 |
| 2,00 | 1,34 | 1,30 | 1,33 | 1,35 | 1,33 | 0,98 | 35,6 |

ВЫВОД

1. Модель, созданная с помощью *Fire Dynamics Simulator*, требует обязательного уточнения параметров так как не во всех случаях значения, используемые по умолчанию, корректно описывают моделируемый процесс. Изучение вопроса моделирования теплового потока в *Fire Dynamics Simulator* требует дальнейших исследований.

2. В ходе численных экспериментов было установлено, что при расчёте падающего тепло-

вого потока необходимо обращать внимание на настройку таких параметров, как:

- дискретизация телесного угла;
- доля энергии, затрачиваемая на излучения;
- выделение СО и сажи.

3. Для корректной оценки падающего теплового потока рекомендуется производить моделирование горения посредством корректировки телесного угла с шагом 100 до тех пор, пока значение падающего теплового потока не стабилизируется в узком диапазоне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грушевский Б. В. Исследование параметров, влияющих на величину противопожарных разрывов между зданиями и сооружениями промышленных объектов: дис. ... канд. техн. наук. М., 1970. 220 с.
2. Алексашенко А. А., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С. Тепломассоперенос при пожаре. М.: Стройиздат, 1982. 175 с.
3. Грушевский Б. В., Яковлев А. И., Кривошеев И. Н., Шурин Е. Т., Климушин Н. Г. Пожарная профилактика в строительстве. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985. 454 с.
4. Астапенко В. М., Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термодинамика пожаров в помещениях. М.: Стройиздат, 1988. 448 с.
5. Молчадский И. С. Пожар в помещении. М.: ВНИИПО, 2005. 456 с.
6. Мironenko P. B., Малиновская В. Н. Предпосылки по установлению основных факторов, влияющих на время компьютерного моделирования при расчете необходимого времени эвакуации // Материалы IX-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2020». М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. С. 50–53.
7. Мironenko P. B., Малиновская В. Н. Оптимизация времени компьютерного моделирования развития динамики пожара при расчете пожарных рисков // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 21 апреля 2020 г. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. С. 259–263.
8. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. NIST Special Publication 1018-1: Fire Dynamics

Simulator Technical Reference Guide // Mathematical Model. 2022. Vol. 1: 16th ed. DOI: 10.6028/NIST.SP.1018

9. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD) // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers. 2016. Pp. 1034–1065. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
10. McGrattan K., McDermott R., Vanella M., Hostikka S., Floyd J. NIST Special Publication 1019 // Fire Dynamics Simulator User's Guide. 2022. 6th ed. DOI: 10.6028/NIST.SP.1019
11. Patankar S.V., Spalding D.B. A computer model for three-dimensional flow in furnaces // 14th Symposium (International) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. 1973. Pp. 605–614.
12. Dong H., Zhang Qi S. Time analyticity for the heat equation and Navier-Stokes equations // Journal of Functional Analysis. 2020. Vol. 279. Iss. 4. DOI: 10.1016/j.jfa.2020.108563
13. Klassen M., Gore J.P. Structure and radiation properties of pool fires // NIST-GCR-94-651. 1994. 153 p.
14. Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A., Harris J., Wu T. The effect of soot modeling on thermal radiation in buoyant turbulent diffusion flames // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2016. Vol. 745. Iss. 3. DOI: 10.1088/1742-6596/745/3/032028
15. Маркус Е. С., Снегирев А. Ю., Кузнецов Е. А. Численное моделирование пожара с помощью Fire Dynamics Simulator. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2021. 173 с.
16. Morgan J. Hurley et al. (ed.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering // 5th ed. Springer, 2015. 3512 p.
17. Кузнецов Е. А. Численное моделирование воспламенения и горения полимерных и композитных материалов при испытаниях на пожароопасность: дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 217 с.

REFERENCES

1. Grushevskij B.V. *Issledovanie parametrov, vliyayushchih na velichinu protivopozharnykh razryvov mezhdu zdaniyami i sooruzheniyami promyshlennyykh ob'ektov* [Investigation of parameters affecting the magnitude of fire gaps between buildings and structures of industrial facilities objects. dis. ... Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 1970. 220 p. (in Russ.)
2. Aleksashenko A. A., Koshmarov Yu. A., Molchadskij I. S. *Teplomassoperenos pri pozhare* [Heat and mass transfer in case of fire] Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 289 p. (in Russ.)
3. Grushevskij B.V., Yakovlev A.I., Krivosheev I.N., Shurin E.T., Klimushin N.G. *Pozharnaya profilaktika v stroitel'stve* [Fire prevention in construction]. Moscow, VIPTSH of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1985. 454 p. (in Russ.)
4. Astapenko V.M., Astapenko V.M., Koshmarov Yu.A., Molchadskij I.S., Shevlyakov A.N. *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyah* [Thermal and gas dynamics of indoor fires]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 448 p. (in Russ.)
5. Molchadskij I.S. *Pozhar v pomeshchenii* [Fire in the room] Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia Publ., 2005. 456 p. (in Russ.)
6. Mironenko R.V., Malinovskaya V.N. Prerequisites for establishing the main factors affecting the time of computer simulation when calculating the required evacuation time. In: *Materialy IX-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodykh uchenykh i specialistov "Problemy tekhnosfernoy bezopasnosti – 2020"* [Materials of the IXth International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists "Problems of technosphere security – 2020"]. Moscow, State Fire Academy of EMERCOM of Russia Publ., 2020, pp. 50–53 (in Russ.)
7. Mironenko R.V., Malinovskaya V.N. Optimization of the time of computer simulation of the development of fire dynamics in the calculation of fire risks. In: *Aktual'nye voprosy sovshennstvovaniya inzhenernykh sistem obespecheniya pozharnoy bezopasnosti ob'ektov: sbornik materialov VII Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 30-j godovshchine MCHS Rossii, Ivanovo, 21 aprelya 2020 g.* [Topical

issues of improving engineering systems for ensuring fire safety of facilities: collection of materials of the VIIth All-Russian Scientific and Practical Conference Ivanovsk. Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia Publ., 2020, pp. 259–263 (in Russ.)

8. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., McDermott R., Vanella M. NIST Special Publication 1018-1: Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Mathematical Model. 6th ed. 2022, vol. 1. (in Eng.) DOI: 10.6028/NIST.SP.1018
9. McGrattan K., Miles S. Modeling fires using Computational Fluid Dynamics (CFD). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Chapter 32. 5th ed. Society of Fire Protection Engineers. 2016, pp. 1034–1065 (in Eng.) DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0
10. McGrattan K., McDermott R., Vanella M., Hostikka S., Floyd J. NIST Special Publication 1019: Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th ed. 2022 (in Eng.) DOI: 10.6028/NIST.SP.1019
11. Patankar S.V., Spalding D.B. A computer model for three-dimensional flow in furnaces. 14th Symposium (International) Combust. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA. 1973. Pp. 605–614 (in Eng.)
12. Dong H., Zhang Qi S. Time analyticity for the heat equation and Navier-Stokes equations. Journal of Functional Analysis. 2020, vol. 279, iss. 4 (in Eng.) DOI: 10.1016/j.jfa.2020.108563
13. Klassen M., Gore J.P. Structure and radiation properties of pool fires. NIST-GCR-94-651. 1994, 153 p. (in Eng.)
14. Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A., Harris J., Wu T. The effect of soot modeling on thermal radiation in buoyant turbulent diffusion flames. Journal of Physics, Conference Series. IOP Publishing, 2016, vol. 745, iss. 3 (in Eng.) DOI: 10.1088/1742-6596/745/3/032028
15. Markus E.S., Snegirev A.Yu., Kuznecov E.A. *Chislennoe modelirovanie pozhara s pomoshchyu Fire Dynamics Simulator* [Numerical simulation of a fire using Fire Dynamics Simulator]. Saint Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University, 2021, 173 p. (in Russ.)
16. Morgan J. Hurley et al (ed.) SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5th ed. Springer, 2015, 3512 p.

17. Kuznetsov E.A. *Chislennoe modelirovanie vosplamneniya i goreniya polimernykh i kompozitnykh materialov pri ispytaniyakh na požaroopasnost* [Numerical simulation of ignition and gorenje

of polymer and composite materials during fire hazard tests: diss. ... Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 2020 p. (in Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Роман Владимирович МИРОНЕНКО

Кандидат технических наук,
начальник научно-исследовательского отделения
проблем управления системами обеспечения пожарной безопасности,
Академия ГПС МЧС России, Москва, Российская Федерация
SPIN-код: 8052-8762
AuthorID: 773343
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2813-7511>
fds-smv@yandex.ru

Максим Владимирович СИБИРЯКОВ

Кандидат технических наук,
начальник учебно-научного комплекса систем
обеспечения пожарной безопасности,
Академия ГПС МЧС России, Москва, Российская Федерация
SPIN-код: 9001-8247
AuthorID: 1014698
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1156-0823>
sibiryakov.m@bk.ru

Артем Игоревич СОКОВНИН ✉

Кандидат технических наук,
доцент кафедры организации деятельности пожарной охраны,
Академия ГПС МЧС России, Москва, Российская Федерация
SPIN-код: 4917-2266
AuthorID: 773348
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4453-6355>
✉ sokovninartem88@yandex.ru

Равшан Камалович ИБАТУЛИН

Кандидат технических наук,
инженер-расчётчик,
ООО «Пожарный инженер», Москва, Российская Федерация
SPIN-код: 3935-4791
AuthorID: 942081
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7423-289X>
ibatulin@fireengin.ru

Поступила в редакцию 09.02.2023
Принята к публикации 15.02.2023

Для цитирования:

Мироненко Р. В., Сибиряков М. В., Соковнин А. И., Ибатулин Р. К.
О вопросах верификации результатов моделирования теплового
потока полевым методом // Пожары и чрезвычайные ситуации:
предупреждение, ликвидация. 2023. № 1. С. 30–43.
DOI:10.25257/FE.2023.1.30-43

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman V. MIRONENKO

PhD in Engineering,
Head of the Research Department
of Fire Safety Systems Management Problems,
State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation
SPIN-код: 8052-8762
AuthorID: 773343
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2813-7511>
fds-smv@yandex.ru

Maksim V. SIBIRYAKOV

PhD in Engineering,
Head of the Training/ Research Complex
of Fire Safety Systems,
State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation
SPIN-код: 9001-8247
AuthorID: 1014698
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1156-0823>
sibiryakov.m@bk.ru

Artem I. SOKOVNIN ✉

PhD in Engineering,
Associate Professor of the Department of Organization
of Fire Service Activities,
State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation
SPIN-код: 4917-2266
AuthorID: 773348
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4453-6355>
✉ sokovninartem88@yandex.ru

Ravshan K. IBATULIN

PhD in Engineering,
Calculation engineer,
LLC "Fire Engineer", Moscow, Russian Federation
SPIN-код: 3935-4791
AuthorID: 942081
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7423-289X>
ibatulin@fireengin.ru

Received 09.02.2023
Accepted 15.02.2023

For citation:

Mironenko R.V., Sibiryakov M.V., Sokovnin A.I., Ibatulin R.K.
On issues of verifying heat flow simulation results by the field method.
Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya –
Fire and emergencies: prevention, elimination, 2023, no. 1, pp. 30–43.
DOI:10.25257/FE.2023.1.30-43