

УДК 614.849

## **Математическое моделирование распространения пожара в помещении, с использованием неравномерной сетки по пространству**

*Мельникова К.С., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Техническая физика»*

*Научный руководитель: Иванов М.Ф., д.ф.-м.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)*

В настоящей работе представлены полевая математическая модель и компьютерный код прогнозирования пожаров в производственных помещениях. В трёхмерной постановке численно решалась система уравнений Навье-Стокса, с применением модифицированного метода «крупных частиц», для моделирования газодинамических задач с источником энерговыделения [1]. Моделирование процессов горения выполнено с помощью диффузионно-вихревой модели горения. Из-за больших объёмов помещений, охваченных, или предполагаемых быть охваченными пожаром количество ячеек дискретной сетки, необходимых для корректного расчета пожара, чрезвычайно велико. В результате на расчеты динамики пожара в стандартных помещениях уходит несколько недель, поэтому для решения данной задачи были использованы неравномерные по пространству сетки.

Моделирование процессов горения выполнено с помощью диффузионно-вихревой модели горения. Данная модель позволяет смоделировать процесс перемешивания горючего и воздуха, и, таким образом, рассчитать (а не задать предварительно) величину тепловыделения. Также, с помощью расчета образования и переноса химических компонентов данная модель позволяет оценить локальные концентрации токсичных компонентов.

При моделировании процесса горения без учета химической кинетики, в области горения источники энергии и массы задаются в объеме параллелепипеда с площадью нижней поверхности, равной площади горючей нагрузки, охваченной горением. Далее от заданного очага начинается распространение волны горения с постоянной скоростью, задаваемой для каждой горючей нагрузки. По мере распространения волны горения по

горючей нагрузке площадь, объята пламенем, расширяется согласно закону  $dR/dt=S_L$ , где  $R$  - радиус области, объята пламенем,  $S_L$  - нормальная скорость горения, известная для различных горючих нагрузок, представленная, например, в таблицах, приведенных в работах [2, 3, 4].

Расчет общей площади горения:  $F=N \cdot h_x \cdot h_y$ ,  $N$  - число ячеек, объятых пламенем. Высота “факела” - высота, на которой происходит энерговыделение  $d_f \sim 0.01-0.1$  м (целесообразно выбирать равной линейному размеру ячейки  $h_z$ ).

Помимо скорости распространения волны горения в модели учитываются выделения продуктов горения и энергии в зоне очага. В данной работе использовались известные эмпирические зависимости на основе скоростей выгорания для различных горючих нагрузок. Соответственно изменение массы горючей нагрузки можно представить через известную скорость выгорания:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\Psi$$

Согласно [5] скорость выгорания для жидкой горючей нагрузки:

$$\Psi(t) = \begin{cases} \Psi_0 F \sqrt{t/\tau_{st}}, & t \leq \tau_{st} \\ \Psi_0 F, & t \geq \tau_{st} \end{cases}$$

где  $\Psi_0$  - удельная скорость выгорания горючего материала;  $F$  - площадь открытой поверхности горючей жидкости;  $t$  - время от начала процесса выгорания;  $\tau_{st}$  - время стабилизации горения. Для твердого горючего материала зависимость от времени содержится только косвенно через изменение площади выгорания  $F$ :

$$\Psi(t) = \Psi_0 F(t).$$

Стоки (поглощение) кислорода и источники (выделение) продуктов горения локально определяются через известную скорость выгорания, задаваемые таблично коэффициенты потребления кислорода и выделения продуктов по массе при сгорании 1 кг горючего материала  $L_{X_i}$  и через полноту сгорания  $\eta$ :

$$(m_i)_{хим} = \frac{\eta \Psi L_{X_i}}{\Delta V}.$$

Согласно [6] полнота сгорания может быть задана по формуле:

$$\eta = 0.63 + 0.2X_{O_2} + 1500X_{O_2}^6,$$

где  $X_{O_2}$  - среднеобъемная массовая концентрация кислорода в рассматриваемом объеме  $\Delta V$ , который в случае использования точечной модели в газодинамических расчетах

соответствует объему расчетной ячейки, в которой находится зона реакции, выделяется энергия и продукты горения и поглощается кислород. В виду того, что при расчете крупногабаритных помещений ожидается использовать для расчета довольно крупные расчетные ячейки, превосходящие по линейным размерам расстояние от поверхности горючей нагрузки до фронта пламени,  $\Delta V$  представляет объем ячейки, граничащей с горючей нагрузкой. Соответственно вклад энергии и продуктов горения следует рассчитывать только в прилегающих к горючему ячейках. Удельный энерговклад от зоны горения в расчетную ячейку рассчитывается по формуле:

$$(Q)_{\text{хил}} = \frac{\eta \Psi Q_0}{\rho \Delta V},$$

где  $Q_0$  – рабочая теплота сгорания горючего,  $\rho \Delta V$  – масса газа в ячейке, на которую приходится выделившаяся энергия.

Принципиальной сложностью, возникающей при решении задач такого класса, является необходимость описывать процессы распространения горения в больших пространственных объёмах, что требует использования расчетных сеток с большим (до сотен миллионов) количеством ячеек и, следовательно, выполнения большого числа вычислительных операций. В результате на расчеты динамики пожара в стандартных помещениях уходит несколько недель, поэтому было решено использовать для решения данной задачи неравномерные по пространству сетки. Использование неравномерной сетки по пространству позволяет тщательнее исследовать область очага пожара.

Целью настоящего исследования является анализ введения неравномерной по пространству сетки на результаты компьютерного моделирования пожара в помещениях и на значения текущих термодинамических параметров процесса. В исследовании было проведено количественное сравнение значения термодинамических параметров среды в случае равномерной и неравномерной сетки по пространству.

Было проведено четыре вычислительных эксперимента, для случая, когда здание было кубической формы с параметром  $a=3,9$  м, с минимальным шагом по пространству  $h_x=0,1$  м. Шаг по времени 0,0002 секунды. Очаг возгорания располагался на уровне пола, на одинаковом расстоянии от стен. Горючий материал во всех экспериментах одинаков. Зона возгорания ( $1.8 \leq X \leq 2.2$ ;  $1.8 \leq Y \leq 2.2$ ;  $Z=0.1$ ) во всех экспериментах исследовалась с одинаковым шагом по пространству, а при удалении от нее мы увеличивали шаг вдоль направлений X и Y. Итак, в первом эксперименте использовалась равномерная сетка. Во втором, зона около стен рассчитывалась с шагом на 10% большим, то есть область возле

стен исследовалась с пространственным шагом  $h_x=0,11$  м, чем в зоне очага. В третьем, на 20% ( $h_x=0,12$  м). В четвертом на 30% ( $h_x=0,13$  м).

Значения термодинамических параметров, представленные на рисунке 1, были сняты через 5 минут после начала пожара. Температура в зоне очага при расчетах с равномерной сеткой соответствует справочным данным. Однако, температура, полученная с помощью неравномерных сеток с 20% и 30% увеличением шага, отличается более чем на  $200^0$  К. Исходя из этого, можно утверждать, что для задач с изначально крупным пространственным шагом использование неравномерно сетки влечет за собой ещё большую потерю точности полученных результатов.

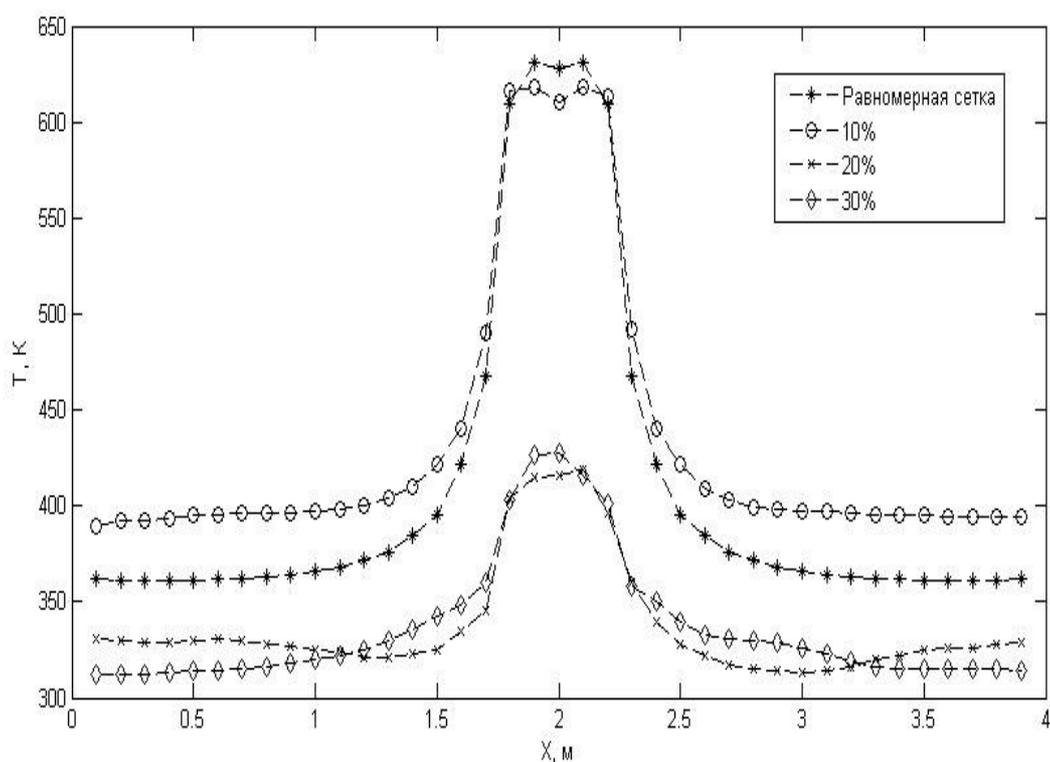


Рис.1 Зависимость  $T(x)$  в сечении  $Z=0.1$  м и  $Y=2.0$  м для различных сеток.

Рассмотрим эксперимент в той же постановке в помещении кубической формы  $a=1,95$  м, но пространственный шаг выберем в два раза меньше. Зона возгорания ( $0.9 \leq X \leq 1.1$ ;  $0.9 \leq Y \leq 1.1$ ;  $Z=0.05$ ) Минимальный шаг по пространству  $h_x=0,05$  м. Шаг по времени  $0,0001$  секунды. Зависимость температуры от координаты вдоль оси  $Y=0,95$  м и  $Z=0,1$  м, в момент времени  $t=5$  минут, представлена на рисунке 2.

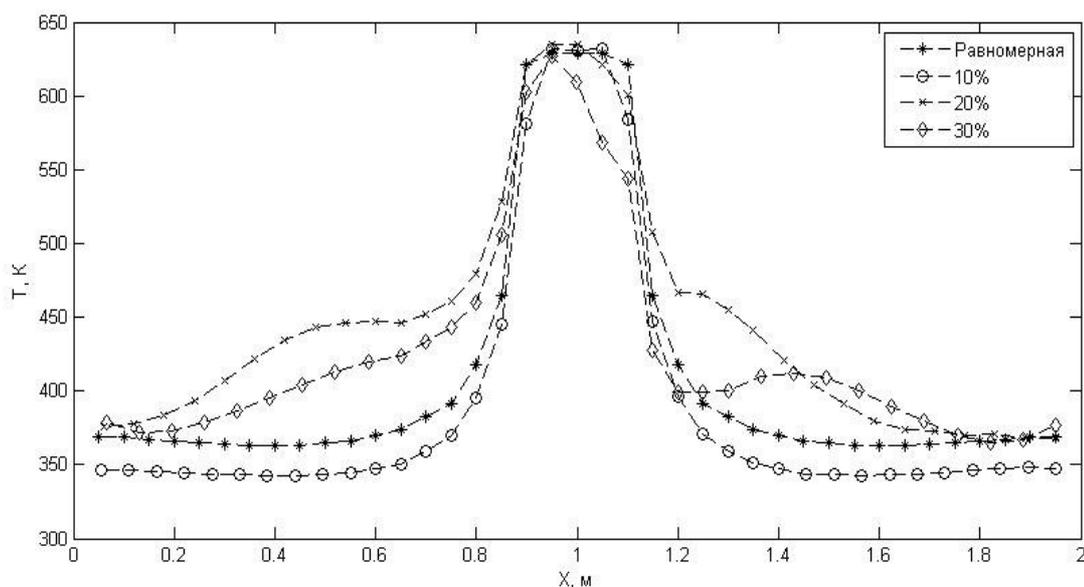


Рис.2 Зависимость  $T(x)$  в сечении  $Z=0.1$  м и  $Y=0.95$  м для различных сеток.

В обоих вариантах результаты расчетов на равномерных сетках дают достаточно хорошие результаты, соответствующие справочным данным. Таким образом, выбранные размеры ячеек позволяют на равномерных сетках в данной постановке получать достаточно корректные расчеты. Однако, во втором вычислительном эксперименте максимальные значения температуры остаются примерно одинаковыми и при использовании неравномерных сеток. Из этого можно сделать вывод, что для данного пространственного шага результаты, полученные с помощью неравномерных сеток, остаются по-прежнему корректными.

Итак, использование неравномерных сеток для решения задач о распространении пожаров в реальных помещениях, значительно ускоряет время счета, но не может использоваться для сеток, минимальный размер ячеек которых, хотя и приемлем для расчетов на равномерных сетках, тем не менее является излишне грубым.

### Список литературы

1. Мельникова К.С. Разработка математической модели и компьютерного кода прогнозирования распространения пожаров в помещениях // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им.Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 3. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/560126.html> (дата обращения 25.05.2014).
2. Пузач С.В. Математическое моделирование теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности. М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. 45 с.

3. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 119 с.
4. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С., Шевляков А.Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях. М.: Стройиздат, 1988. 448 с.
5. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: пер. с англ. / под. ред. А.В. Ступоченко. М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. 928 с. [J. O. Hirschfelder, Ch. F. Curtiss, R. B. Bird. Molecular theory of gases and liquids. New York : John Wiley and sons, 1954.]
6. Гостинцев Ю.А., Рыжов А.М. Численное моделирование динамики пламен, огненных вихрей и штормов при пожарах на открытом пространстве // Механика жидкости и газа. 1994. № 6. С. 52-61.