

СРАВНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ И ЗОННОЙ МОДЕЛЕЙ ПОЖАРА

Сивков А.М.

Введение

Оценка времени, через которое пути эвакуации людей из здания при пожаре оказываются заблокированными, требует расчета скорости изменения опасных факторов пожара. К опасным факторам относятся, прежде всего, повышенная температура воздуха и его задымление.

Чтобы рассчитать температуру воздуха и содержание в воздухе опасных примесей используются три основных группы математических моделей: интегральные, зонные и полевые.

В интегральных моделях принято упрощающее предположение, что температура воздуха и содержание в нем примесей во всех точках помещения одни и те же, и меняются только с течением времени.

В зонных моделях помещение делят на зоны, обычно две: верхнюю и нижнюю - в которых температура воздуха различна. Связано это с тем, что в помещении, где происходит горение, температурные контрасты обычно велики. Горячий воздух, имеющий существенно меньшую плотность, всплывает к потолку, а холодный остается внизу. И горячая и холодная зоны считаются однородными по температуре, но температура воздуха в каждой из зон зависит от времени. Объем зон, а значит и положение горизонтальной границы между ними, с течением времени может меняться за счет перетекания нагретого воздуха из одной зоны в другую.

В третьей группе моделей не делается подобных упрощающих предположений о температуре. В полевых моделях принято, что температура воздуха различна во всех точках помещения и может быть рассчитана лишь с учетом конкретного расположения источника горения.

В связи с этим, полевые модели очень требовательны к заданию исходных условий и вычислительным ресурсам. Имеет смысл использовать их для расчета картины пожара только в тех случаях, когда геометрия помещения и расположение в нем людей являются очень сложными: театры, многоярусные торговые центры и т.п. В остальных случаях разумнее пользоваться интегральными и зонными моделями пожара. Выбор в каждом конкретном случае между этими двумя простыми видами моделей зависит от того, какую разницу в результатах расчетов они дают.

Именно поэтому была предпринята описываемая далее работа. Она посвящена выявлению различий между результатами расчетов по интегральной и зонной модели пожара для некоторых несложных примеров.

Краткое описание моделей, использованных для сравнения

Описание интегральной и зонной математических моделей содержится в приложении к приказу МЧС РФ № 382 от 30 июня 2009 г.

В обеих моделях здание рассматривается как совокупность помещений, соединенных друг с другом проемами (дверями). Помещения также могут иметь проёмы (окна) наружу. Проемы обеспечивают перетекание горячего задымленного воздуха из помещения с источником огня в другие помещения, а также из здания в атмосферу.

Основные уравнения интегральной модели приведены ниже.

Для расхода воздуха через проемы принята выведенная из закона Бернулли упрощенная формула

$$G = F\sqrt{2\rho\Delta P} \quad (1)$$

где G – расход воздуха через проем, кг/с;

F - площадь сечения воздушного потока, м²;

ρ – плотность воздуха в потоке, кг/м³;

ΔP – средний перепад давлений между помещениями, Па.

Направление потока воздуха определяется соотношением давлений. Воздух движется через проем из помещения с большим давлением в помещение с меньшим давлением. В некоторых случаях в проеме имеется два встречных потока воздуха. В верхней части проема горячий задымленный воздух вытекает из помещения с источником пожара. В нижней части проема в помещение втекает компенсирующий поток холодного воздуха. Граница между выходящим и входящим потоками лежит на так называемой плоскости равных давлений.

Для каждого помещения используется дифференциальное уравнение баланса массы воздуха

$$\frac{dm}{dt} = \Psi + \sum_i G_i \quad (2)$$

где m – масса воздуха в помещении, кг;

Ψ – скорость выгорания пожарной нагрузки, кг/с;

$\sum_i G_i$ – сумма расходов воздуха через проемы с учетом их знака, кг/с.

Уравнение баланса энергии имеет вид

$$\frac{dU}{dt} = Q_z - Q_k + \sum_i c_p T_i G_i \quad (3)$$

где U – внутренняя энергия воздуха в помещении, Дж;

Q_z – скорость выделения тепла при горении, Дж/с;

Q_k – скорость поглощения тепла конструкциями, Дж/с;

$\sum_i c_p T_i G_i$ – сумма потоков тепла, переносимого воздухом через проемы, с учетом их знака.

В зонной модели используются аналогичные уравнения, но для каждой зоны в каждом помещении.

Компьютерная программа, реализующая интегральную модель пожара, была подготовлена автором этой работы. В качестве компьютерной реализации зонной модели пожара была взята программа CFAST Национального института стандартов США.

Обеспечение сравнимости моделей

Сравнение двух типов моделей необходимо, прежде всего, в части расчета температуры воздуха. Перетекание воздуха, и вместе с ним дыма, из горящего помещения в соседние помещения является вторичным явлением. Ведь движение воздуха порождается разностью давлений, которая в свою очередь возникает из-за разности температур. Если результаты расчета температуры воздуха по двум моделям не будут, хотя бы приблизительно, совпадать, проверять совпадение результатов расчетов распространения дыма вряд ли имеет смысл.

Однако, сравнение расчетов температуры для двух разных моделей имеет методическую трудность. Интегральная модель дает для всего помещения одну температуру воздуха, а зонная – две: для нижней зоны и для верхней. Ясно, что единая для помещения температура воздуха, рассматриваемая в интегральной модели, в действительности является средней температурой. Но только не средним арифметическим двух значений температуры, а средним с весовыми коэффициентами. Если верхняя зона

имеет, к примеру, меньшую массу, чем нижняя, то и вклад ее в среднюю температуру меньше, чем вклад нижней зоны.

Поскольку температура является показателем количества внутренней энергии газа, рассматривать надо, в сущности, не температуру, а внутреннюю энергию. Это удобнее потому, что внутренняя энергия – величина аддитивная: внутренняя энергия всего воздуха в помещении равна сумме внутренних энергий нижней и верхней зон.

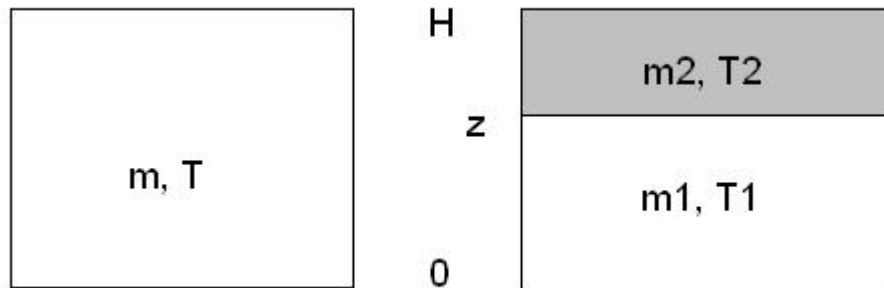


Рис. 1 Параметры интегральной и зонной модели. Здесь H – высота помещения, z – высота границы между зонами, m – масса воздуха в помещении или в зоне, T – температура воздуха.

Примем следующие приближения:

- помещение имеет отвесные стены и горизонтальные пол и потолок;
- масса воздуха в помещении много больше массы содержащихся в воздухе примесей;
- разность давлений в пределах помещения много меньше общего давления воздуха.

Учитывая, что внутренняя энергия U произвольной массы m воздуха равна

$$U = c_v m T \quad (4)$$

где c_v – удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, для «средней» температуры воздуха $\langle T \rangle$ в зонной модели имеем

$$c_v (m_1 + m_2) \langle T \rangle = c_v m_1 T_1 + c_v m_2 T_2 \quad (5)$$

или

$$\langle T \rangle = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2} \quad (6)$$

Учитывая уравнение состояния идеального газа

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (7)$$

и то, что объем зоны пропорционален её высоте, получаем удобную формулу для расчета средней температуры в помещении:

$$\langle T \rangle = \frac{H}{\frac{z}{T_1} + \frac{H-z}{T_2}} \quad (8)$$

Выбор примера для расчета

Очевидно, что начинать сравнение двух типов моделей необходимо с самого простого случая: пожара в полностью закрытом помещении. Этот случай не осложнен потоками энергии и массы через проемы и соответствует наиболее легкому и «чистому» с точки зрения физики процессов варианту расчета. Если модели не будут иметь какого-то сходства даже в таком простом случае, то сравнивать их на более сложных примерах незачем.

Для моделирования пожара было выбрано помещение в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами основания $10 \times 7 \text{ м}^2$ и высотой 3 м, что примерно соответствует размерам школьного класса. Пожар задавался действующим на уровне пола в течение 20 минут источником тепла мощностью 100 кВт (горение метана с расходом 0.002 кг/с). Было принято, что 67% теплоты сгорания передается воздуху непосредственно, а 33% расходуется пламенем на тепловое излучение.

В этом примере, для простоты, было принято, что пожар в помещении протекает адиабатически, то есть теплоотвод в стены, пол и потолок отсутствует.

Кроме тепла в помещение поступают продукты сгорания метана: углекислый газ и водяной пар в количестве, пропорциональном количеству сгоревшего топлива.

Расчет температуры с помощью интегральной модели

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (2) - (3) с привлечением уравнения (1) и уравнения состояния идеального газа, в совокупности с начальными условиями представляет собой задачу Коши. Расчеты изменения температуры воздуха и содержания в нем примесей производились путем численного интегрирования этой системы уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Уравнения интегрировались по времени с шагом 10^{-4} сек. Малый шаг обеспечивал достаточную вычислительную устойчивость схемы.

Результаты интегрирования достаточно просты, если не сказать банальны, и показаны на рисунке 2.



Рис. 2 Зависимость температуры воздуха от времени, полученная с помощью интегральной модели.

Расчеты показывают, что, пока происходит горение, температура воздуха линейно растет со скоростью 22 градуса в минуту. Это и неудивительно, так как теплота от выбранного идеализированного источника поступает в воздух в постоянном темпе. После выключения источника теплоты, температура воздуха остается постоянной, поскольку теплоотдача в стены помещения принята нулевой.

При начальной температуре воздуха 20 °С, время достижения критической для человека температуры (70°С) для рассмотренного случая - чуть больше двух минут (136 секунд). Максимальное достигнутое за 20 минут горения интегральное значение температуры составляет 456°С.

Расчет температуры с помощью зонной модели

Для того же самого примера расчеты были выполнены и с помощью программы CFAST, реализующей зонную модель. По температуре нижней и верхней зоны, высоте границы между зонами, согласно формуле (8), вычислялась средняя температура воздуха в помещении. Её зависимость от времени показана на рисунке 3.

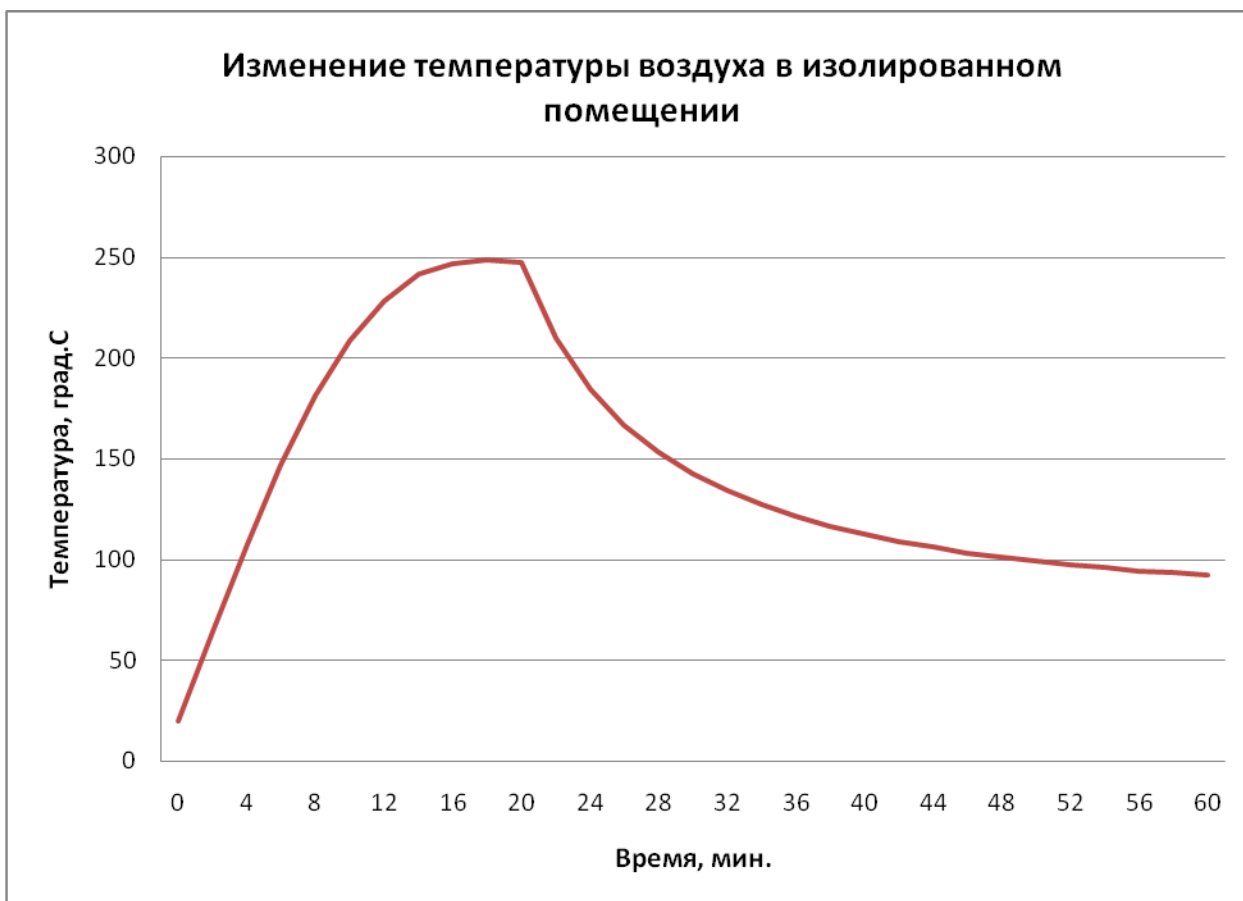


Рис. 3 Зависимость средней температуры воздуха от времени, полученная с помощью зонной модели.

Согласно расчетам, поведение средней температуры существенно отличается от результата, полученного для интегральной модели. Очень интересен эффект «насыщения». Хотя в первые несколько минут горения средняя температура линейно растет в том же темпе, что и в интегральной модели, минут через десять рост температуры заметно замедляется, а затем и вовсе прекращается. Более того, наблюдается даже некоторое падение температуры, несмотря на то, что теплота всё еще поступает в воздух. Сразу после прекращения горения температура начинает быстро убывать до величины порядка 100°C . Максимальная достигнутая средняя температура оказалась равной 249°C , что практически вдвое меньше, чем в расчете для интегральной модели.

Всё это говорит о том, что, с ростом температуры воздуха, начиная с температуры порядка 100°C , существенно возрастает потеря тепла за счет собственного теплового излучения воздуха, находящегося в помещении.

Дело в том, что при горении метана в воздух непрерывно поступают продукты горения: углекислый газ, вода и частицы сажи. Эти примеси, по сравнению с чистым воздухом, обладают гораздо большей излучательной способностью. С ростом температуры и с ростом содержания в воздухе примесей непрерывно растет и скорость тепловых потерь воздуха за счет собственного излучения. В конце концов, величина потерь становится равной притоку тепла за счет горения, и тогда рост температуры прекращается. Однако, горение продолжается, и примеси продолжают поступать в помещение, что постепенно сдвигает тепловое равновесие в область более низких температур. После окончания горения, собственное излучение всё ещё горячего воздуха продолжается, и, вследствие этого, температура довольно быстро понижается до величины, при которой излучение оказывается сравнительно небольшим.

Учет собственного излучения в интегральной модели

Если радиационный блок, аналогичный блоку, использованному в программе CFAST, подключить к интегральной модели, то согласованность результатов существенно возрастает. Результаты модификации можно увидеть на рисунке 4.

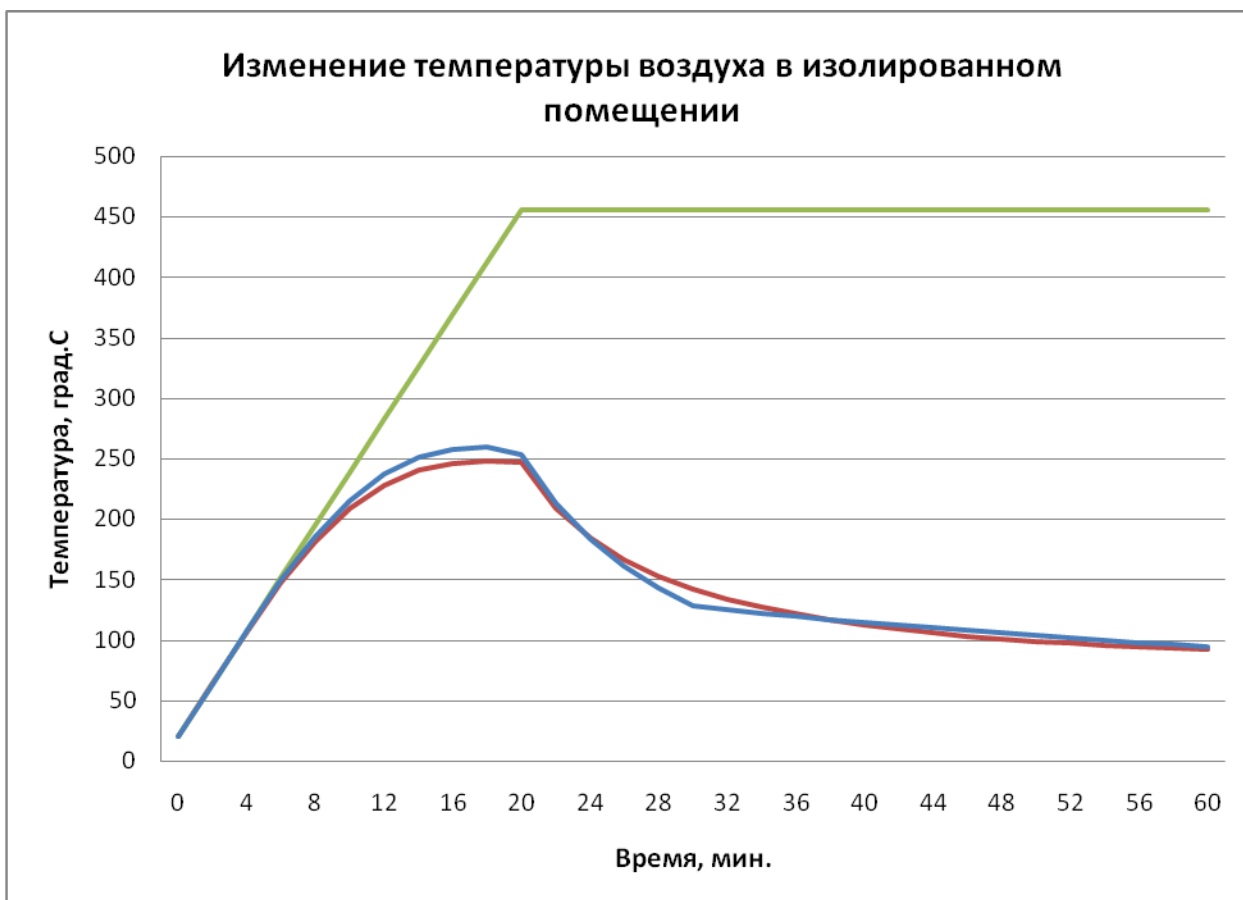


Рис. 4 Сравнение результатов расчетов. Верхняя линия - интегральная модель без учета собственного теплового излучения воздуха, две другие линии - интегральная и зонная модели с учетом собственного теплового излучения.

Сравнение результатов расчетов, полученных с помощью интегральной и зонной моделей, показывает, что обе модели дают одинаковое время достижения критической температуры (70°C): чуть более двух минут.

Заключение

Результаты расчетов позволяют сделать вывод о том, что интегральная и зонная модели дают весьма сходные результаты, если необходимо вычислить только среднюю температуру воздуха в помещении, по крайней мере, для случаев, когда перенос тепла с воздухом через проемы несущественен. Расчеты показывают, что время достижения критической температуры (70°C) в помещении, где происходит горение, не зависит не только от типа использованной модели, но даже от того, учтено ли в модели собственное излучение воздуха.

Для более сложных случаев, в которых необходимо учитывать перенос тепла и примесей через проёмы, сравнение моделей имеет смысл продолжить.