

3533-41-ТР-1

СИТИС: ВИМ 4.10

Техническое руководство

Редакция 1

13.02.2017

АННОТАЦИЯ

Данный документ является техническим руководством программы «СИТИС: ВИМ». В документе приведены основные математические зависимости вероятностной интегральной модели (ВИМ), границы возможного применения модели, показано соответствие модели положениям российских нормативных и методических документов в области пожарной безопасности, описаны действия по обработке исходных данных и результатов.

ВЕРСИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Данное техническое руководство применимо к версиям программы «СИТИС: ВИМ», начиная с «СИТИС: ВИМ 4.10».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

интегральная модель, опасные факторы пожара, технический регламент, пожарная безопасность, сценарий пожара, СИТИС: ВИМ

АВТОРСКОЕ ПРАВО

© ООО «СИТИС», 2016 г.

ООО «СИТИС» предоставляет право бесплатных печати, копирования, тиражирования и распространения этого документа в сети Интернет и локальных и корпоративных сетях обмена электронной информацией. Не допускается взимание платы за предоставление доступа к этому документу, за его копирование и распечатывание. Не разрешается публикация этого документа любым другим способом без письменного согласия ООО «СИТИС».

ОГЛАВЛЕНИЕ

Аннотация.....	2
Версии программного обеспечения	2
Ключевые слова	2
Сведения о разработчиках	Ошибка! Закладка не определена.
Авторское право	2
Оглавление	3
1. Термины и определения	4
2. Обозначения	5
3. Описание программы «СИТИС: ВИМ»	6
4. Математическая модель «СИТИС: ВИМ»	6
4.1. Интегральная модель пожара.....	6
4.2. Реализация модели для системы нескольких помещений	9
4.3. Метод определения площади пожара.....	12
4.4. Ограничения метода	14
4.5. Моделирование процесса прекращения горения	14
4.6. Вычисление локальных значений ОФП в расчетных точках.....	14
4.7. Учет освещенности путей эвакуации	15
5. Область применения модели «СИТИС: ВИМ»	16
6. Существенные параметры модели «СИТИС: ВИМ»	17
6.1. Описание.....	17
6.2. Геометрия	17
6.3. Источник пожара	17
6.4. Проемность.....	17
6.5. Теплообмен	18
7. Точность модели «СИТИС: ВИМ».....	19
8. Сведения о валидации модели «СИТИС: ВИМ»	20
9. Обзор основных методов верификации расчетов.....	21
10. Требования к ресурсам.....	22
11. Список литературы.....	23

1. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

- 1.1. **валидация** – документированное доказательство достоверности метода [5]
- 1.2. **верификация** – документированное доказательство достоверности полученного результата [5]
- 1.3. ВИМ – вероятностная интегральная модель.
- 1.4. **интегральная модель** – математическая модель расчета тепломассопереноса при пожаре, в основе которой лежит усреднение параметров по объему
- 1.5. **источник зажигания** – средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение горения [17]
- 1.6. **качественный анализ** – выявление тенденций и закономерностей на основе обобщения существующей практики
- 1.7. **количественный анализ** – определение численных характеристик процессов и объектов, расчет
- 1.8. **концептуальная модель** – абстрактная модель, определяющая структуру моделируемой системы, свойства её элементов и причинно-следственные связи, присущие системе и существенные для достижения цели моделирования
- 1.9. **математическая модель** – упрощенное отображение зависимостей и закономерностей реальных объектов и явлений в математической форме
- 1.10. **методика** – «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности», утвержденная приказом МЧС №382 от 30.06.09 г. [10] с учетом изменений, внесенных приказами МЧС №749 от 12.12.2011 [19], № 632 от 02.12.15 [20]
- 1.11. **модель** – упрощенное отображение зависимостей и закономерностей реальных объектов и явлений в форме, удобной для решения определенных задач;
- 1.12. **модель методики** – интегральная модель расчета тепломассопереноса при пожаре, описанная в Приложении 6 Методики
- 1.13. **необходимое время эвакуации** – время с момента возникновения пожара, в течение которого люди должны эвакуироваться в безопасную зону без причинения вреда жизни и здоровью людей в результате воздействия опасных факторов пожара [17]
- 1.14. **опасные факторы пожара (ОФП)** – факторы пожара, воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и (или) к материальному ущербу [17]
- 1.15. **очаг пожара** – место первоначального возникновения пожара [17]
- 1.16. **пожарный риск** – мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей [17]
- 1.17. **ПРВ** – пожар, регулируемый вентиляцией [8];
- 1.18. **ПРН** – пожар, регулируемый нагрузкой [8];
- 1.19. **расчетный сценарий ОФП** – набор данных, описывающий входные параметры для моделирования распространения ОФП в данном здании (создается в расчетной программе)
- 1.20. **расчетная точка** – точка в здании, которая используется для указания в сценарии, что для нее следует получить результаты расчета в расчетной программе. В расчетной точке выполняется сравнение времени эвакуации и времени блокирования
- 1.21. **система противопожарной защиты** – комплекс организационных мероприятий и технических средств, направленных на защиту людей и имущества от воздействия ОФП и (или) ограничение последствий воздействия ОФП на объект защиты (продукцию) [17]

2. ОБОЗНАЧЕНИЯ

- 2.1. b – ширина проема, м;
- 2.2. D – дымообразующая способность горючего вещества, Нп·м²·кг⁻¹;
- 2.3. F – площадь проема;
- 2.4. F_G – площадь горения, м²;
- 2.5. F_f, F_w, F_c – площадь поверхности пола, стен и потолка, м²;
- 2.6. $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²;
- 2.7. G_B – расход воздуха, поступающего в помещение через проемы из окружающей атмосферы и соседних помещений, кг·с⁻¹;
- 2.8. G_G – расход газов, покидающих помещение через проёмы, кг/с;
- 2.9. $G_{ПР}$ и $G_{ВЫТ}$ – массовые расходы воздуха, создаваемые приточной и вытяжной вентиляцией, кг·с⁻¹;
- 2.10. K – функция режима пожара (ПРН-ПРВ);
- 2.11. $k_c = 0,003$ – коэффициент седиментации (скорость осаждения) частиц дыма на поверхностях ограждающих конструкций, Нп·с⁻¹;
- 2.12. L_1 – количество кислорода, необходимое для сгорания единицы массы горючего материала, кг/кг;
- 2.13. L_2 – стехиометрический коэффициент для продукта горения (количество продукта горения, образующегося при сгорании единицы массы горючего материала), кг/кг;
- 2.14. λ – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К);
- 2.15. μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп·м⁻¹;
- 2.16. η – коэффициент полноты сгорания;
- 2.17. p_a – атмосферное давление на уровне половины высоты помещения.
- 2.18. p_m – среднеобъемное давление воздуха, Па;
- 2.19. Δp – перепад давлений в проеме;
- 2.20. Pr – число Прандтля;
- 2.21. Q_H – низшая теплота сгорания, Дж/кг;
- 2.22. $Q_{П}$ – мощность пожара, Вт;
- 2.23. Q_0 – мощность системы отопления, Вт;
- 2.24. Q_f, Q_w, Q_c – мощность теплоотдачи в пол, стены и потолок, Вт;
- 2.25. Ra – число Релея;
- 2.26. R – газовая постоянная, Дж·кг⁻¹·К⁻¹;
- 2.27. T_m – среднеобъемная температура воздуха, К;
- 2.28. T_0 – температура воздуха в помещении до пожара, К;
- 2.29. T_f, T_w, T_c – температура поверхности пола, стен, потолка, К;
- 2.30. U_m – среднеобъемная внутренняя энергия воздуха, Дж;
- 2.31. x_1 – средняя массовая доля кислорода в помещении;
- 2.32. x_{1B} – массовая доля кислорода в поступающем воздухе;
- 2.33. x_2 – средняя массовая доля продукта горения в помещении;
- 2.34. ξ – коэффициент расхода проема;
- 2.35. ρ_m – среднеобъемная плотность воздуха, кг·м⁻³;
- 2.36. ψ – скорость выгорания (скорость газификации) горючего материала в рассматриваемый момент времени, кг·с⁻¹;
- 2.37. $\psi_{УД}$ – удельная скорость выгорания, кг·м⁻²·с⁻¹.
- 2.38. $(\psi_{УД})_0$ – удельная скорость выгорания на открытом воздухе, кг·м⁻²·с⁻¹;

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ «СИТИС: ВИМ»

- 3.1. Программа «СИТИС: ВИМ» предназначена для расчета времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара на основе интегральной математической модели пожара в здании, описывающей среднеобъемные параметры состояния газовой среды в каждом помещении:
- температуру;
 - содержание кислорода;
 - содержание токсичных газообразных продуктов горения (CO, CO₂, HCl);
 - дальность видимости;
 - тепловой поток.
- 3.2. Кроме этого программа позволяет получить форму и площадь пожара в каждый момент времени моделирования.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «СИТИС: ВИМ»

4.1. Интегральная модель пожара

- 4.1.1. Интегральная математическая модель пожара представлена системой обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении в процессе развития пожара, которые впервые были сформулированы в 1976 г. профессором Ю.А. Кошмаровым. Они вытекают из фундаментальных законов природы – первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы и закона сохранения массы [8].
- 4.1.2. С позиций термодинамики газовая среда, заполняющая помещение с проемами (окна, двери и т.п.), есть открытая термодинамическая система. Ограждающие конструкции (пол, потолок, стены) и наружный воздух (атмосфера или соседнее помещение) являются внешней средой, с которой эта система взаимодействует путем тепло- и массообмена. В процессе развития пожара через проёмы выталкиваются из помещения нагретые газы, а также поступает холодный воздух, т.е. масса газа в течение времени изменяется. Эта термодинамическая система взаимодействует также с ограждающими конструкциями путем теплообмена. Кроме того, в эту систему с поверхности горящего материала поступает вещество в виде газообразных продуктов горения. Таким образом, состояние рассматриваемой термодинамической системы изменяется в результате взаимодействия с окружающей средой.
- 4.1.3. В интегральной математической модели пожара принимается, что, во-первых, газовая среда внутри помещения при пожаре есть смесь идеальных газов. Во-вторых, в каждой точке пространства внутри помещения в любой момент времени реализуется локальное равновесие: локальные значения основных термодинамических параметров состояния (плотность, давление, температура) связаны между собой уравнением Клапейрона, т.е. $p = \rho RT$.
- 4.1.4. В интегральном методе описания состояния термодинамической системы, которой является газовая среда в помещении, используются интегральные параметры состояния – масса всей газовой среды и ее внутренняя тепловая энергия. Отношение этих двух интегральных параметров позволяет оценивать в среднем степень нагретости газовой среды. Однако, учитывая, что объём помещения в процессе развития пожара практически не изменяется, используются удельные (среднеобъемные) параметры – среднеобъемная плотность газовой среды ρ_m и среднеобъемная внутренняя энергия u_m .
- 4.1.5. Среднеобъемная внутренняя энергия газовой среды связана со среднеобъемным давлением соотношением:
- 4.1.6.
$$u_m = \frac{1}{k-1} p_m,$$
 где $k = c_p / c_v = 1,4$ – отношение изобарной и изохорной теплоемкостей воздуха (показатель адиабаты).
- 4.1.7. Основная система дифференциальных уравнений, описывающих процесс изменения состояния среды, заполняющей помещение, имеет вид:

$$4.1.8. \quad V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi + G_B - G_\Gamma + G_{ПП} - G_{ВЫТ};$$

$$4.1.9. \quad V \frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_m}{k-1} \right) = \eta Q_H \psi + c_{pB} T_B (G_B + G_{ПП}) - c_p T_m (G_\Gamma + G_{ВЫТ}) - (Q_w + Q_c + Q_f) + Q_0$$

$$4.1.10. \quad V \frac{d\rho_1}{d\tau} = -\eta L_1 \psi + x_{1B} (G_B + G_{ПП}) - x_1 (G_\Gamma + G_{ВЫТ});$$

$$4.1.11. \quad V \frac{d\rho_2}{d\tau} = \eta L_2 \psi - x_2 (G_\Gamma + G_{ВЫТ});$$

$$4.1.12. \quad V \frac{d\mu_m}{d\tau} = D\psi - \mu_m \left(\frac{G_\Gamma + G_{ВЫТ}}{\rho_m} \right) - k_c (F_w + F_c + F_f).$$

4.1.13. Левая часть уравнения () есть скорость изменения внутренней тепловой энергии газовой среды в помещении за единицу времени в рассматриваемый малый промежуток времени $d\tau$. В правой части этого уравнения первый член представляет собой количество тепла, поступающего за единицу времени в газовую среду в результате горения (скорость тепловыделения). Второй член есть сумма внутренней тепловой энергии воздуха, поступающей за единицу времени. Третий член представляет собой сумму внутренней тепловой энергии, которую уносят за единицу времени уходящие газы. Четвертый член представляет собой тепловой поток, поглощаемый ограждающими конструкциями и излучаемый через проёмы. Q_0 – мощность системы отопления.

4.1.14. Начальные значения для этих функций задаются условиями, которые имеют место в помещении перед началом пожара:

$$4.1.15. \quad \left. \begin{aligned} \tau &= 0; \\ \rho_m &= \frac{p_a}{R_a T_0}; \frac{\rho_{1B}}{\rho_m} = x_{1B} = 0,23; \rho_2 = 0; \\ p_m &= p_a; \\ \mu_m &= 0, \end{aligned} \right\}$$

4.1.16. Ниже представлены дополнительные уравнения, используемые в интегральной модели пожара.

4.1.17. Уравнение Клапейрона для газовой среды помещения:

$$4.1.18. \quad p_m = \rho_m R_m T_m.$$

4.1.19. Теплоотдача в ограждающие конструкции (конвективный теплообмен и теплообмен излучением от пламени):

$$4.1.20. \quad Q_w = Nu_w \cdot \alpha \cdot F_w \cdot (T_m - T_w) \cdot L_w + 0,3 \cdot Q_p \cdot F_w / (F_f + F_w + F_c);$$

$$4.1.21. \quad Q_f = Nu_f \cdot \alpha \cdot F_f \cdot (T_m - T_f) \cdot L_f + 0,3 \cdot Q_p \cdot F_f / (F_f + F_w + F_c);$$

$$4.1.22. \quad Q_c = Nu_c \cdot \alpha \cdot F_c \cdot (T_m - T_c) \cdot L_c + 0,3 \cdot Q_p \cdot F_c / (F_f + F_w + F_c);$$

где L – характерный размер (для стен – высота помещения, для пола и потолка – ширина помещения), м; Nu – число Нуссельта, определяемое для стен, пола и потолка по формулам:

$$4.1.23. \quad Nu_w = \left[0,825 + \frac{0,387 Ra_w^{1/6}}{\left(1 + \left(0,492 / Pr_w \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2,$$

$$4.1.24. \quad Nu_f = 0,13 \cdot Ra_f^{1/3},$$

$$4.1.25. \quad Nu_c = 0,16 \cdot Ra_c^{1/3},$$

где Ra – число Релея, Pr – число Прандтля.

$$4.1.26. \quad Ra_{w,f,c} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_m - T_{w,f,c}) \cdot L^3}{\nu \cdot a},$$

где $\beta = 1/T_m$ – коэффициент температурного расширения, К-1;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; а – температуропроводность воздуха, м²/с.

4.1.27. Кинематическая вязкость воздуха определяется по формуле:

$$\nu = \frac{1,717 \cdot 10^{-5} \cdot (T_m/273)^{0,683}}{\rho_m}.$$

4.1.28. Температуропроводность воздуха определяется по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho_m} = \frac{2,44 \cdot 10^{-2} \cdot (T_m/273)^{0,82}}{\left(1,0005 + 1,1904 \cdot 10^{-4} \cdot (T_m - 273)\right) \cdot 10^3 \cdot \rho_m}.$$

4.1.29. Число Прандтля определяется по формуле:

$$Pr = \nu / a.$$

4.1.30. Расходы газов через вертикальные проемы (в стенах) определяются по формулам:

$$4.1.31. \quad G_B = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_a(\rho_a - \rho_m)} \sum_{i=1}^n \xi_i b_i \left[(y_* - y_{ни})^{1,5} - (y_* - Z_i)^{1,5} \right],$$

$$4.1.32. \quad G_\Gamma = \frac{2}{3} \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \sum_{i=1}^n \xi_i b_i \left[(y_{ви} - y_*)^{1,5} - (Z_i - y_*)^{1,5} \right],$$

где $y_{ни}$, $y_{ви}$ – координаты соответственно нижней и верхней границы i-го проема, м; y_* – высота плоскости равных давлений, м, определяемая по формуле

$$4.1.33. \quad y_* = h - \frac{p_m - p_a}{g(\rho_a - \rho_m)},$$

где h – половина высоты помещения, м; Z_i – формальный параметр, определяемый следующим образом:

$$4.1.34. \quad Z_i = \begin{cases} y_{ни}, & \text{при } y_* \leq y_{ни}, \\ y_*, & \text{при } y_{ни} < y_* < y_{ви}, \\ y_{ви}, & \text{при } y_* \geq y_{ви}. \end{cases}$$

4.1.35. Коэффициент расхода вертикального проема ξ принимается равным 1,0 при открытом и 0,001 при закрытом проеме. Для фиктивных проемов, которыми разделяются протяженные коридоры (см. раздел II приложения 6 методики), этот коэффициент равен 2,0.

4.1.36. При равенстве плотностей воздуха внутри и вне помещения ($\Delta\rho_g < 10^{-6}$) расходы газов через вертикальные проемы определяются только исходя из разности давлений:

$$4.1.37. \quad \begin{cases} G_B = \sum_{i=1}^n \xi_i F_i \sqrt{2\rho_a \cdot |\Delta p|}; & G_\Gamma = 0 \quad \text{— при } p_a > p_m; \\ G_\Gamma = \sum_{i=1}^n \xi_i F_i \sqrt{2\rho_m \cdot |\Delta p|}; & G_B = 0 \quad \text{— при } p_m > p_a. \end{cases}$$

- 4.1.38. Расходы газов через горизонтальные проёмы (в перекрытиях) определяются с учетом разности давлений и разности плотностей воздуха в смежных помещениях (узлах гидравлической схемы) здания.
- 4.1.39. Объемный расход газа через горизонтальный проем, вызванный разностью давлений в узлах i и j , определяется по формуле:

$$4.1.40. \quad W_{ij}^P = \xi \cdot F \sqrt{2gk \frac{\Delta p_{ij}}{\rho_{mi}}},$$

4.1.41. где k – коэффициент, принимаемый равным 0,05 с²/м.

4.1.42. Расход газа через горизонтальный проем, вызванный разностью плотностей воздуха в узлах i и j , определяется по формуле:

$$4.1.43. \quad W_{ij}^P = W_{ji}^P = \xi \cdot K \cdot F \sqrt{\Delta \rho_{ij}},$$

4.1.44. где $K = 1$ при расположении помещения с более нагретым воздухом снизу, $K = 0,3$ – сверху.

4.1.45. Коэффициент расхода горизонтального проема ξ принимается равным 1,0 при открытом и 0,001 при закрытом проеме. Для фиктивных проемов, которыми разделяется пространство лестничной клетки, этот коэффициент принимается равным 2,0.

4.1.46. Результирующие расходы определяются из следующих зависимостей:

$$4.1.47. \quad W_{ij} = \begin{cases} W_{ij}^P + 0,5W_{ij}^P, & \text{при } W_{ij}^P \leq 2W_{ij}^{\rho} \\ W_{ij}^P, & \text{при } W_{ij}^P > 2W_{ij}^{\rho} \end{cases}, \quad G_{ij} = W_{ij} \cdot \rho_{mi},$$

$$4.1.48. \quad W_{ji} = \begin{cases} W_{ji}^P - 0,5W_{ji}^P, & \text{при } W_{ji}^P \leq 2W_{ji}^{\rho} \\ 0, & \text{при } W_{ji}^P > 2W_{ji}^{\rho} \end{cases}, \quad G_{ji} = W_{ji} \cdot \rho_{mj}.$$

4.1.49. Скорость выгорания горючего материала в каждый момент времени вычисляется по формуле:

$$4.1.50. \quad \psi = \psi_{УД} \cdot F_{\Gamma},$$

$$4.1.51. \quad \psi_{УД} = \left(\psi_{УД} \right)_0 K + \frac{0,23(G_B + G_{ПП})}{L_1 F_{\Gamma}} (1 - K),$$

где K – функция режима пожара (ПРН-ПРВ), имеющая вид

$$4.1.52. \quad K = \left(\frac{x_1}{0,23} \right)^C \cdot \exp \left[C \left(1 - \frac{x_1}{0,23} \right) \right], \quad \text{где } C = 1 / (1 - 0,12 / 0,23)^2.$$

4.1.53. Ниже описан реализованный в «СИТИС: ВИМ» алгоритм численного решения комбинированной модели (интегральной модели пожара во взаимосвязи с моделью распространения пожара по площади).

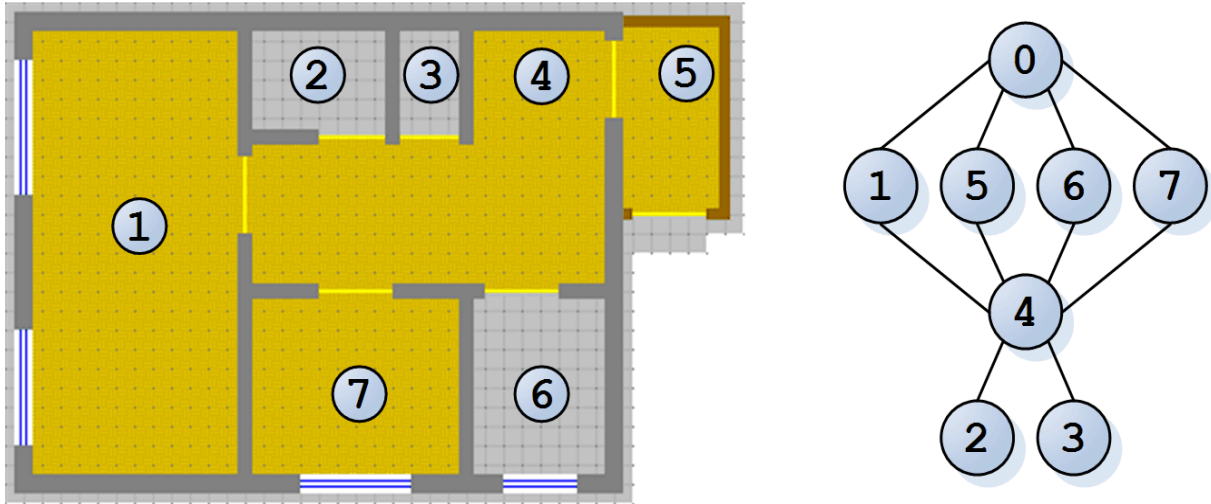
4.2. Реализация модели для системы нескольких помещений

4.2.1. Система уравнений интегральной модели пожара ()–() и, соответственно, алгоритмы её решения зависят от количества помещений и проёмов между ними. Поэтому имитационная система должна обладать функциями анализа введённой пользователем планировки здания и автоматического построения соответствующей системы балансовых уравнений. Такая адаптивность расчетной модели обеспечивается применением метода идентификации гидравлической схемы здания, подобного описанному в работах [6, 7].

4.2.2. Для определения газообмена между помещениями и моделирования на его основе распространения продуктов горения по зданию, изменений температуры в помещениях и пр. в рамках интегрального подхода здание заменяется гидравлической схемой – графом, узлы которого моделируют помещения здания, а ветви – связи между ними (проёмы), через которые осуществляется газообмен. Таким образом, математическое моделирование динамики ОФП в помещениях здания

осуществляется путём решения системы уравнений газообмена и системы дифференциальных балансовых уравнений, соответствующих графу рассматриваемого здания.

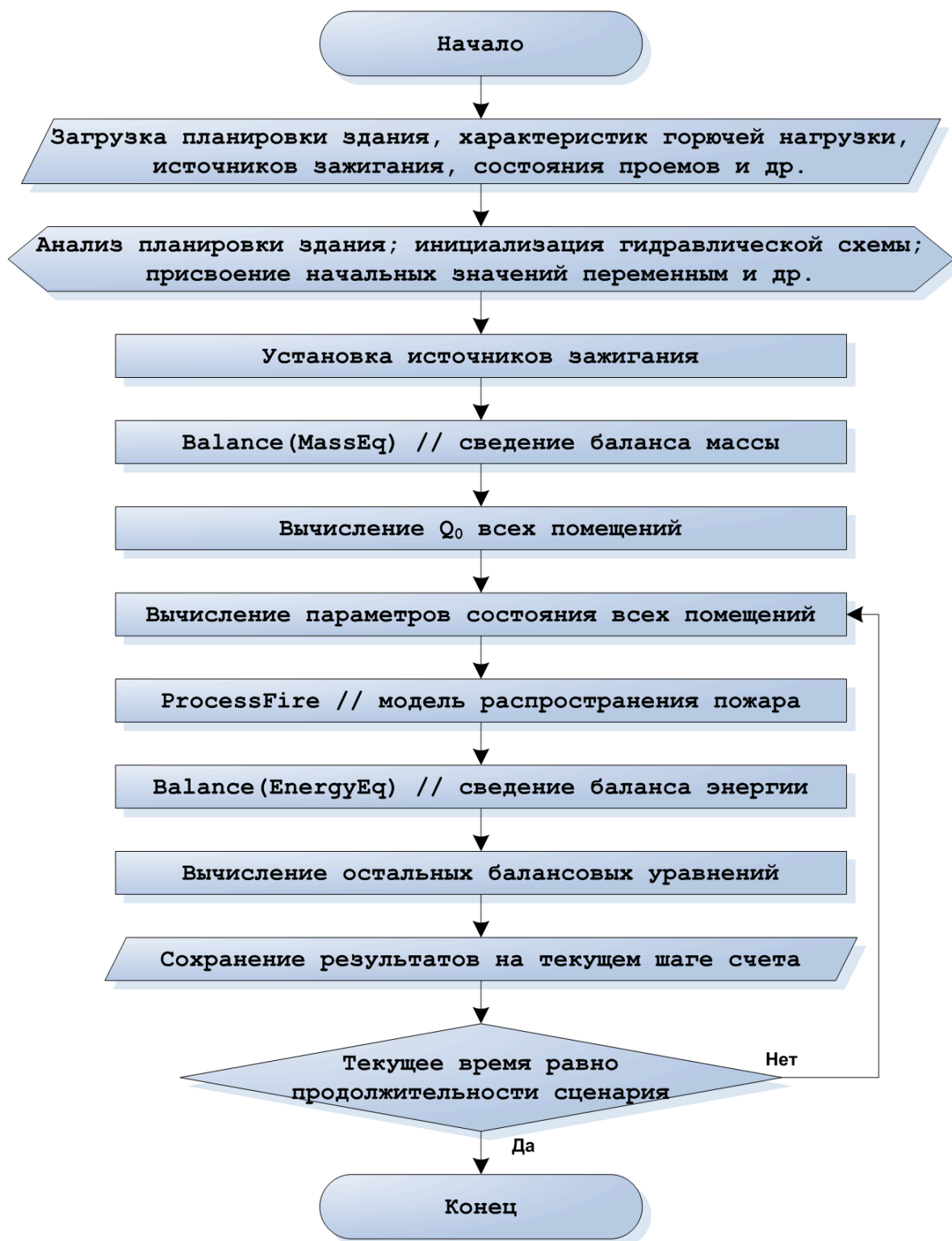
- 4.2.3. Граф помещений строится путём заполнения у каждого помещения массива-списка, отражающего все имеющиеся связи и их параметры: ссылки на связанные помещения (узлы), количество, расположение и ширина проемов, их состояние (открыт/закрыт) и др.
- 4.2.4. Такой подход позволяет решать систему балансовых уравнений в соответствии с любой введённой пользователем структурой здания без изменений кода программы.
- 4.2.5. Пример графа помещений (узел 0 – атмосфера):



- 4.2.6. Для решения системы уравнений используется допущение о квазистационарности процесса: в течение некоторого малого промежутка времени $d\tau$ процесс считается стационарным, и уравнения газообмена решаются для каждого помещения при определенном распределении температур, плотностей и давлений во всех помещениях здания.
- 4.2.7. Модель реализуется с применением метода секущих и метода итераций.
- 4.2.8. В момент времени $\tau = 0$ методом секущих в каждом помещении здания вычисляется давление, при котором выполняется баланс массы с допустимой погрешностью.
- 4.2.9. Определяя давление в i -ом узле гидравлической схемы, считаем, что давления во всех узлах, связанных с i -ым, известны и равны давлениям на предыдущем временном шаге (при $\tau = 0$ – атмосферному давлению). После того, как в процессе решения достигается заданная точность, осуществляется переход к $i+1$ -му узлу. Однако, при сведении баланса массы в $i+1$ -ом узле схемы, баланс массы в i -ом узле нарушается. Для того чтобы получить удовлетворительную точность решения балансовых уравнений для здания в целом организуется итерационный процесс, суть которого состоит в многократном повторении расчета давлений во всех узлах схемы до тех пор, пока при допустимой погрешности решения давления во всех узлах схемы не перестанут изменяться.
- 4.2.10. Алгоритмы процедур, осуществляющих сведение баланса массы или энергии во всех помещениях здания:



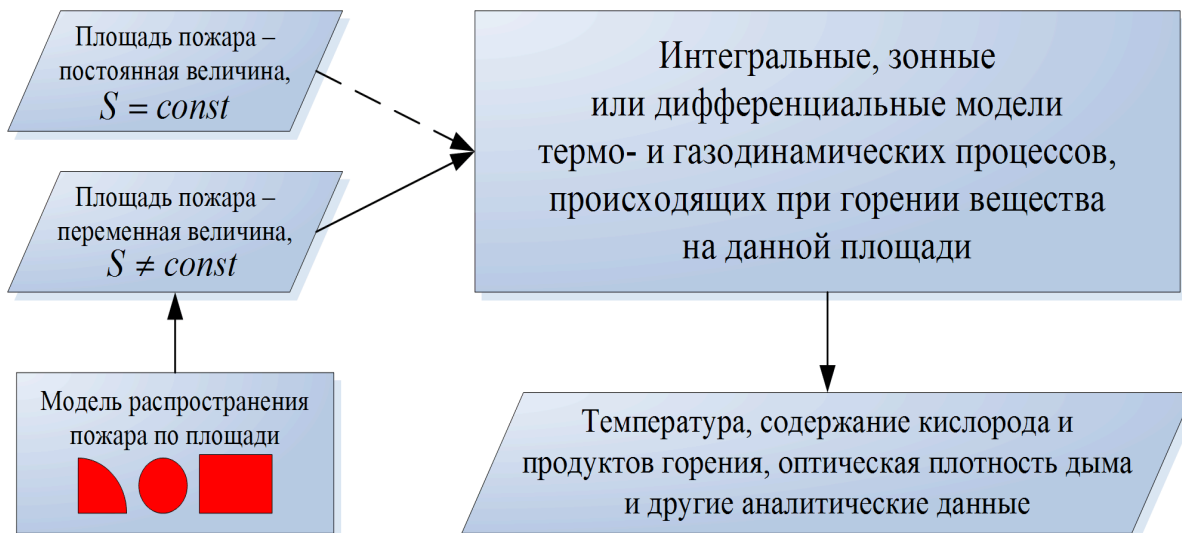
- 4.2.11. При $\tau = 0$ в результате сведения баланса массы вычисляются: давление p_m , плотность воздуха ρ_m , мощность системы отопления Q_0 и значения притока и оттока воздуха (G_B , G_G) в каждом помещении.
- 4.2.12. При возникновении источника зажигания выполняется непрерывный цикл: вычисление давлений в помещениях и сведение баланса энергии () гидравлической схемы; на основании полученных расходов воздуха вычисление балансовых уравнений (), ()-(); вычисление остальных параметров состояния среды в помещениях, параметров горения, теплообмена и т.д. на текущий момент времени.
- 4.2.13. Общий алгоритм реализации комбинированной модели пожара в здании:



- 4.2.14. В окне «Настройка», которое вызывается с помощью пункта главного меню Сервис → Настройка, на вкладке «Результаты» пользователем устанавливается максимальное количество итераций и допустимая погрешность вычислений.
- 4.2.15. Если при установленной пользователем погрешности вычислений баланс массы или баланс энергии за указанное количество итераций не установлен, то погрешность автоматически увеличивается в 5 раз и итерационный процесс повторяется.

4.3. Метод определения площади пожара

- 4.3.1. Интегральные, зонные или дифференциальные модели пожаров непосредственно не позволяют определить площадь пожара: они лишь отражают термодинамические, физико-химические и другие процессы, сопровождающие горение вещества на некоторой уже известной площади:



4.3.2. Поэтому при моделировании пожаров в помещениях площадь пожара обычно принимается либо постоянной (например, горение разлившейся на определённой площади горючей жидкости), либо определяется с помощью вспомогательных моделей развития пожара по площади. Одни из таких моделей существенно ограничены очень узкой областью применения (частные случаи горения некоторых веществ при определённых условиях), другие – «геометрическим» подходом, когда площадь пожара представляется в виде совокупности элементарных геометрических фигур. Такой метод не позволяет моделировать распространение пожара по нескольким помещениям или хотя бы по одному помещению произвольной (непрямоугольной) формы, так как для каждой формы помещения нужна своя модель распространения пожара.

4.3.3. Задача определения площади пожара в нескольких смежных помещениях сложной формы ещё более усложняется, если допустить одновременное нахождение в помещениях горючих материалов с разными характеристиками или наличие нескольких источников зажигания.

4.3.4. Кроме того, вышеуказанные подходы не позволяют моделировать прекращение горения вследствие выгорания горючей нагрузки или подачи огнетушащих веществ.

4.3.5. Задача определения формы и площади пожара в каждый момент времени в одном или нескольких помещениях произвольной формы в «СИТИС: ВИМ» решается с применением метода имитационного моделирования [12, 13].

4.3.6. Площадь поверхности горения представляется в виде множества пикселей, каждый из которых содержит характеристики горючей нагрузки, в том числе линейную скорость распространения пламени. Распространение пожара в том или ином направлении от источника зажигания определяется вероятностью загорания каждого такого пикселя с учетом его характеристик и наличия соседних горящих пикселей:

$$4.3.7. \quad P = \frac{V \cdot FP}{4},$$

где V – линейная скорость распространения пламени, выраженная в единицах *пкс./шаг_счета*; FP – параметр, характеризующий количество и относительное расположение соседних горящих пикселей (\cdot). Он может принимать значение в интервале $[0..12]$, т.к. «удельный вес» горящих пикселей, расположенных ортогонально по отношению к рассматриваемому, принимается в 2 раза больше, чем диагонально расположенных (закон обратных квадратов):

$$4.3.8. \quad FP = 2n_{+} + n_{\times},$$

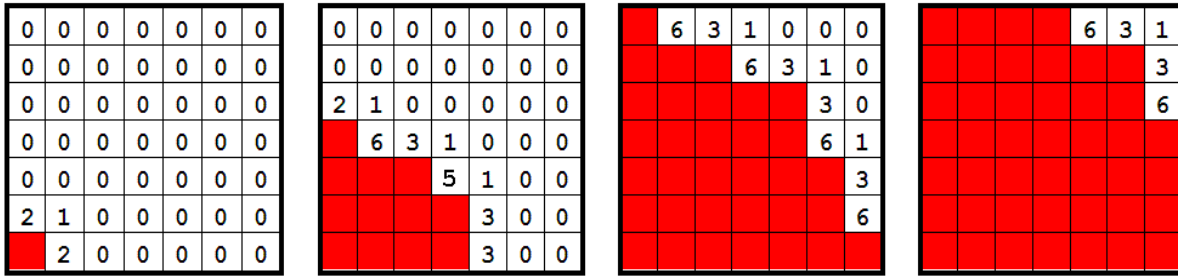
где n_{+} – количество горящих пикселей, расположенных ортогонально по отношению к рассматриваемому; n_{\times} – количество горящих пикселей, расположенных по диагонали относительно рассматриваемого.

4.3.9. Загорание пикселя на текущем шаге счета происходит при выполнении неравенства

$$4.3.10. \quad Random < P,$$

4.3.11. где $Random$ – случайное действительное число в интервале $[0..1)$, получаемое при помощи генератора псевдослучайных чисел.

4.3.12. Пример распределения параметра FP в разные моменты времени моделирования:



4.3.13. Данная модель позволяет получить площадь (количественно) и форму площади пожара при любых введенных пользователем конфигурациях помещений, произвольном количестве источников загорания и горючих нагрузок с различными характеристиками.

4.4. Ограничения метода

4.4.1. Необходимо отметить, что за один шаг счета фронт пожара (периметр) может переместиться только на один пиксель ($V_{max} = 1 \text{ пкс./шаг_счета}$), поэтому максимально возможная моделируемая линейная скорость распространения пламени в каком-либо направлении равна произведению количества шагов счета в секунде и линейного размера квадрата, приравненного к пикселю:

$$V_{max} = V \cdot a,$$

где V – частота шагов счета, s^{-1} ; a – линейный размер расчетной единицы площади (пикселя), м.

4.4.3. Поэтому размер пикселей выбирается, с одной стороны, минимальным (для уменьшения дискретности процесса увеличения площади пожара), с другой стороны, не меньше, чем размер, при котором максимальная скорость распространения пламени будет достаточна для использования в программе необходимых видов горючей нагрузки.

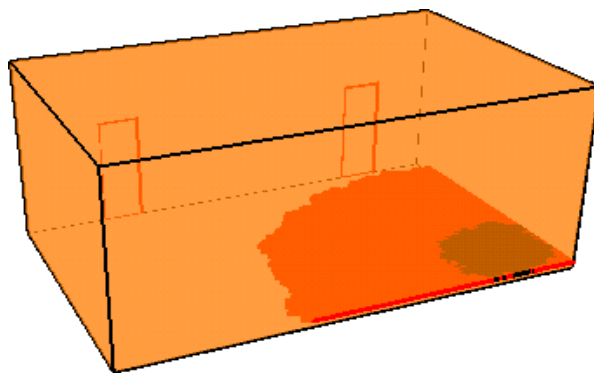
4.4.4. В программе «СИТИС: ВИМ» расчет площади пожара производится 5 раз в секунду, а площадь, занятая горючей нагрузкой разбивается на элементы размером 2,5x2,5 см. Таким образом, максимальная моделируемая линейная скорость распространения пламени составляет 0,125 м/с (7,5 м/мин).

4.5. Моделирование процесса прекращения горения

4.5.1. Вероятностная модель распространения пожара по площади позволяет моделировать не только движение фронта пламени, но и прекращение горения вследствие выгорания горючей нагрузки.

4.5.2. Продолжительность горения каждого пикселя поверхности горения зависит от свойства «Масса на единицу площади», которое указывается при создании поверхности горения, а также от массовой скорости выгорания горючего материала в каждый момент времени.

4.5.3. На каждом временном шаге счета из оставшейся массы пикселя вычитается масса, выгоревшая с момента предыдущего шага счета. Горение пикселя прекращается при достижении оставшейся массой нулевого значения.



4.6. Вычисление локальных значений ОФП в расчетных точках

4.6.1. Локальные значения опасных факторов пожара (кроме теплового потока) на уровне рабочей зоны определяются исходя из распределения их величин по высоте помещения, полученного Т.Г. Мер-

В.Н. Тимошенко, по формуле:

$$4.6.2. \quad X = X_0 + Z \cdot (X_m - X_0),$$

4.6.3. где X , X_0 , X_m – локальное, начальное и среднееобъемное значение ОФП соответственно; Z – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте помещения, определяемый по формуле (29) приложения 2 [4]:

$$4.6.4. \quad Z = \frac{h}{H} \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right),$$

4.6.5. где h – высота рабочей зоны (расчетной точки), м; H – высота помещения, м.

4.6.6. Плотность теплового потока в месте расположения расчетной точки определяется по формуле:

$$4.6.7. \quad q = \frac{0,3Q_n}{4\pi L^2},$$

4.6.8. где q – тепловой поток, Вт/м²; Q_n – мощность пожара, Вт; L – расстояние от расчетной точки до ближайшего источника зажигания в помещении, м.

4.7. Учет освещенности путей эвакуации

4.7.1. Дальность видимости определяется из соотношения:

$$4.7.2. \quad l = \frac{2,38}{\mu} \cdot K_E,$$

4.7.3. где l – дальность видимости, м; μ – оптическая плотность дыма, Нп/м; K_E – коэффициент, учитывающий начальную освещенность E_0 в помещении:

$$4.7.4. \quad K_E = \frac{\ln(1,05 \cdot a \cdot E_0)}{\ln(1,05 \cdot a \cdot 50)} = \frac{\ln(0,315 \cdot E_0)}{2,757},$$

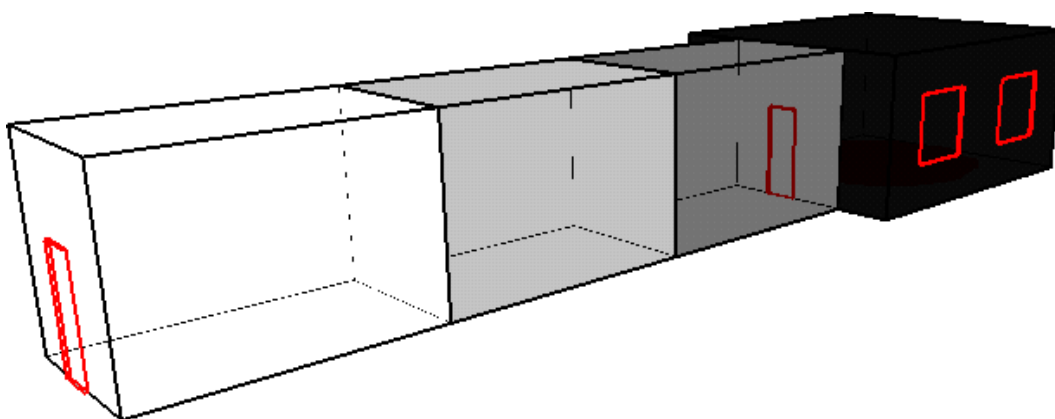
4.7.5. где a – коэффициент отражения предметов на пути эвакуации, принят равным 0,3 [4].

4.7.6. Начальная освещенность задается пользователем для каждого объема (помещение, коридор, рампа, лестница) в сценарии. Таким образом, данный параметр позволяет учитывать уровень освещения на путях эвакуации.

4.7.7. По умолчанию установлено значение $E_0 = 50$ лк [4].

5. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ «СИТИС: ВИМ»

- 5.1.1. Результаты, получаемые с помощью интегральной модели пожара, могут быть практически значимыми в том случае, когда газовую среду с достаточной степенью достоверности можно считать однородной, т.е. когда при пожаре в помещении существует хорошее перемешивание продуктов горения и поступающего воздуха. Такое состояние характерно для объемных пожаров в развивающейся, развитой и затухающей стадиях в условиях горения распределенной пожарной нагрузки.
- 5.1.2. В связи с этим, и в соответствии с методикой интегральный метод описания пожара в здании может быть применен:
- 5.1.3. для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- 5.1.4. для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара;
- 5.1.5. для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз).
- 5.1.6. При использовании «СИТИС: ВИМ» в третьем случае – при наличии коридоров, у которых длина более чем в 5 раз превышает ширину и высоту – необходимо при создании топологии такие коридоры представлять в виде нескольких коридоров с соизмеримыми размерами. В местах соединения таких коридоров согласно методике автоматически создаются фиктивные проемы.
- 5.1.7. Моделирование распространения ОФП в коридоре, длина которого более чем в 5 раз превышает его ширину:



5.1.8.

6. СУЩЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ «СИТИС: ВИМ»

6.1. Описание

- 6.1.1. Для выполнения расчета рассматриваемые здания и сооружения представляются в виде системы помещений, соединенными проемами, источников пожаров, дымоприемных отверстий и устройств, систем подпора воздуха. С учетом теоретических основ интегральной модели и экспериментальных оценок при валидационных натурных испытаниях, программа «СИТИС: ВИМ» дает решение с достаточной инженерной точностью (10-25%) при описанных параметрах рассчитываемой модели. При других параметрах исходных данных возможность применения «СИТИС: ВИМ» должна быть рассмотрена дополнительно.

6.2. Геометрия

- 6.2.1. В рассчитываемой модели помещения должны быть простой геометрической конфигурации. Помещения должны представляться прямыми призмами с соизмеримыми размерами, или с достаточной достоверностью представляться такими помещениями.
- 6.2.2. В помещениях не должно быть выступающих частей, препятствующих созданию однородного состояния.
- 6.2.3. Не рекомендуется выполнять расчеты с помощью интегральной модели, если требуется определить время блокирования для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в помещениях большой высоты (более 6 метров).

6.3. Источник пожара

- 6.3.1. Характерный размер очага пожара должен быть соизмерим с объемом помещения.
- 6.3.2. «СИТИС: ВИМ» включает в себя модель распространения пожара по площади, учитывающую не только расположение горючей нагрузки и противопожарных преград на плане, но и позволяющую определить площадь пожара при наличии в помещении одновременно нескольких видов горючей нагрузки и источников зажигания. Эти характеристики оказывают существенное влияние на динамику развития пожара.
- 6.3.3. На скорость тепловыделения значительно влияет содержание кислорода в помещении.
- 6.3.4. При моделировании горения очень большой мощности (2 МВт и более) с большой долей тепла, рассеиваемого в виде излучения (например, горение газовой струи) модель теплообмена с ограждающими конструкциями становится неприменимой, что приводит к большим погрешностям.

6.4. Проемность

- 6.4.1. Каждое помещение должно иметь связь с атмосферой – прямую или опосредованную, через смежные помещения. Обычно в качестве связи с атмосферой выступают наружные двери, окна.
- 6.4.2. В рамках интегрального подхода к описанию развития пожара совокупность помещений в здании представляет собой открытую термодинамическую систему. Поэтому для получения наиболее достоверных результатов пользователям настоятельно рекомендуется включать все имеющиеся проёмы в расчёт.
- 6.4.3. Кроме того, при малом коэффициенте проёмности (отношение площади проемов к объему помещения) значительно увеличивается количество итераций в вычислениях, что приводит к увеличению длительности расчёта.
- 6.4.4. Если проемность совокупности помещений в пределах этажа оказывается менее 1%, программа выводит предупреждение о возможной неадекватности результатов расчета. Данное предупреждение является совещательным, и не запрещает выполнять расчет.
- 6.4.5. Помимо естественной вентиляции модель учитывает работу принудительной приточной и (или) вытяжной вентиляции, что также оказывает существенное влияние на результаты вычислений.

6.5. Теплообмен

- 6.5.1. На среднеобъёмную температуру воздуха в помещениях (в первую очередь) и другие ОФП существенно влияют характеристики ограждающих конструкций, определяющие интенсивность теплообмена их с воздухом.

7. ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИ «СИТИС: ВИМ»

- 7.1. Точность модели зависит от её предполагаемого использования. Также она сильно зависит от точности и детальности задания входных данных, и особенно чувствительна к заданной скорости тепловыделения.
- 7.2. В значительной степени на точность результатов моделирования влияет установленная в настройках программы допустимая погрешность вычислений материального и энергетического баланса.
- 7.3. Исследования показывают, что предсказания модели обычно находятся в пределах 10–25% от результатов экспериментов для ряда сценариев. В основном этого достаточно для расчетов пожарной безопасности и оценки пожарного риска.

8. СВЕДЕНИЯ О ВАЛИДАЦИИ МОДЕЛИ «СИТИС: ВИМ»

- 8.1. Эксперименты по уточнению и проверке достоверности оригинальной интегральной модели описаны в работах [2,11].
- 8.2. Экспериментальные стенды представляли собой помещения размерами 5,8 x 5,8 x 5,8 метров, 5 x 4 x 3 метра, а также стенд с размерами 6 x 6 метров в плане и от 3 до 6 метров по высоте. Эксперименты проводились с различным количеством и расположением пожарной нагрузки и величиной проемов.
- 8.3. В экспериментах измерялись температура газа, температура поверхностей ограждений, плотность излучения через проемы, массовая скорость выгорания горючего материала, линейная скорость распространения пламени, распределение статических давлений по высоте помещения, скорости потока поступающего воздуха, концентрации кислорода и углекислого газа внутри помещения и в потоке уходящих газов.
- 8.4. Сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными позволяют говорить о том, что в рамках своей области применения интегральная модель позволяет получить адекватные для решения задач пожарной безопасности результаты.
- 8.5. Сведения о валидации программы «СИТИС: ВИМ» приведены в документе [18]. Основываясь на них, можно сказать, что прогнозы модели ВИМ в ряде испытаний согласуются с экспериментальными данными с погрешностью 10-25%. В основном такой точности достаточно для расчётов пожарного риска и решения других задач пожарной безопасности.

9. ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ВЕРИФИКАЦИИ РАСЧЕТОВ

- 9.1. **Верификация** – это документированное доказательство достоверности результата; проверка его адекватности. Верификация подразделяется на верификацию кода и верификацию вычислений. **Верификация кода** – это проверка того, что расчетная программа адекватно реализует математическую модель. **Верификация вычислений** – проверка адекватности полученных результатов. Если валидация метода и верификация кода могут быть выполнены один раз для расчетной программы, то верификация вычислений должна выполняться для каждого расчета.
- 9.2. Верификация вычислений может выполняться следующими способами:
- 9.3. сопоставление результата вычисления и инженерного суждения, основанного на имеющейся практике создания аналогичных объектов (зданий);
- 9.4. сопоставление результата вычисления с результатом выполнения оценочного расчета – упрощенного расчета, проведенного по более грубой модели/алгоритму;
- 9.5. проведение анализа чувствительности (определение влияния неопределенности исходных данных на результат расчета);
- 9.6. сопоставление результата вычисления с результатом уточняющего расчета: расчета, проведенного по более точной модели с использованием уточненных/расширенных исходных данных.

10. ТРЕБОВАНИЯ К РЕСУРСАМ

- 10.1. Для работы программы «СИТИС: ВИМ» необходимы следующие минимальные требования:
- 10.2. ПК с процессором 1,8 ГГц;
- 10.3. 512 МБ оперативной памяти;
- 10.4. цветной монитор 1024 x 768 пикселей, 16 бит;
- 10.5. операционная система: Microsoft® Windows 2000, Microsoft® Windows XP, Microsoft® Windows Vista или Microsoft® Windows 7.
- 10.6. Расчет сценария может выполняться от нескольких секунд до нескольких часов, в зависимости от сложности и детализации сценария.

11. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 11.1. NFPA 551. Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments. 2010 Edition.
- 11.2. Астапенко В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н.Шевляков; под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
- 11.3. Брушлинский Н.Н. Моделирование пожаров и взрывов / Под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М. : Изд. «Пожнаука», 2000. – 492 с.
- 11.4. ГОСТ 12.1.004-91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
- 11.5. Грачев В.Ю. Введение в моделирование пожаров для расчета пожарного риска. - Екатеринбург: Издательский дом «Ажур», 2009. – 69 с.
- 11.6. Гутов В.Н. Математическая модель развития пламенного горения в здании / В.Н. Гутов, В.В. Лицкевич // Пожаровзрывобезопасность. – 1994. – Т.3. – №4. – С.58–65.
- 11.7. Есин В.М. Математическая модель движения продуктов горения по зданию при пожаре / В.М. Есин, И.И. Ильминский, П.Н. Попов, М.П. Стецовский // Пожарная техника и тушение пожаров: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1982. – С.147–149.
- 11.8. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2000. – 118 с.
- 11.9. Кошмаров Ю.А., Астапенко В.М., Шевляков В.Н., Зернов С.И. Экспериментальное исследование процесса развития пожара в помещении // Пожарная профилактика: Сб.науч.тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1980.
- 11.10. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (утв. приказом МЧС России от 30.06.2009 №382).
- 11.11. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности зданий: монография / С.В.Пузач.– М.: Академия ГПС МЧС России, 2005.– 336 с.
- 11.12. Субачев С.В. Имитационное моделирование развития и тушения пожаров в системе подготовки специалистов противопожарной службы / С.В. Субачев, А.А. Субачева // Прикладная информатика. – 2008. – №4. – С.27–37.
- 11.13. Субачев С.В. Совершенствование подготовки персонала противопожарной службы на основе технологий имитационного моделирования пожаров в зданиях: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008. – 113 с.
- 11.14. ТР-5042. Валидация математических моделей пожаров. Обзор зарубежных источников.
- 11.15. ТР-5044. Пожарная нагрузка. Обзор зарубежных источников. Под редакцией Грачева В. Ю. — СИТИС, 2009.
- 11.16. ТР-5045. Противодымная защита атриумных зданий. Обзор зарубежных источников. Под редакцией Грачева В. Ю. — СИТИС, 2009.
- 11.17. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
- 11.18. 4188-ВЛ-1.50. Руководство по валидации «СИТИС: ВИМ». – Екатеринбург: СИТИС, 2011.
- 11.19. Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 №382 (утв. приказом МЧС России от 12.12.2011 №749).
- 11.20. Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.09 г. № 382. Приложение к приказу МЧС России №632 от 02.12.2015