

РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ
НА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах" (далее - Руководство) разработано в целях содействия соблюдению требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств", утвержденных Приказом Ростехнадзора от 11 марта 2013 г. № 96 (зарегистрирован Минюстом России 16 апреля 2013 г., регистрационный № 28138), требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта", утвержденных Приказом Ростехнадзора от 15 июля 2013 г. № 306 (зарегистрирован Минюстом России 20 августа 2013 г., регистрационный № 29581), и требований Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности химически опасных производственных объектов", утвержденных Приказом Ростехнадзора от 21 ноября 2013 г. № 559 (зарегистрирован Минюстом России 31 декабря 2013 г., регистрационный № 30995).

2. Настоящее Руководство содержит рекомендации к расчетам зон распространения опасных веществ в атмосфере и оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах ТВС, образующихся в атмосфере при промышленных авариях, для обеспечения требований промышленной безопасности при проектировании, строительстве, капитальном ремонте, техническом перевооружении, реконструкции, эксплуатации, консервации и ликвидации опасных производственных объектов химических производств.

3. Организации, осуществляющие оценку последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей, могут использовать иные обоснованные способы и методы, чем те, которые указаны в настоящем Руководстве.

4. В Руководстве используют сокращения, обозначения, а также термины и определения, приведенные в Приложениях № 1 и 2 к настоящему Руководству.

5. Руководство распространяется на опасные производственные объекты, на которых обращаются взрывопожароопасные вещества.

II. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ОЦЕНКЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ
НА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

6. При количественной оценке последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах рекомендуется проводить:

а) определение количества опасного вещества, участвующего в создании поражающих факторов аварии;

б) определение количественных параметров, характеризующих действие поражающих факторов (давление и импульс для ударных волн, интенсивность теплового излучения для пламени, размеры пламени и зоны распространения высокотемпературной среды при термическом воздействии, дальность дрейфа облака ТВС до источника зажигания);

в) сравнение рассчитанных количественных параметров с критериями поражения (разрушения).

7. Для определения количества опасного вещества, участвующего в создании поражающих факторов аварии, рекомендуется учитывать деление технологического оборудования и трубопроводов на изолируемые запорной арматурой секции (участки); интервал срабатывания и производительность систем аварийного сброса и опорожнения (в том числе на факел); влияние волновых гидродинамических процессов на режим истечения опасного вещества для протяженных трубопроводных систем (длиной более 500 м).

8. Оценку возможных последствий аварий рекомендуется проводить на основе методических документов, указанных в таблице № 1.

Таблица № 1

Назначение	Документ
1. Расчет параметров ударной волны, зон поражения и разрушения при воспламенении и взрыве облаков топливно-воздушных смесей	Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей"
2. Расчет концентрации, массы ОВ во взрывоопасных пределах и зон поражения при пожаре-вспышке и взрыве ТВС	Руководство по безопасности "Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ"
3. Определение параметров воздействия и зон поражения при горении пролива, огненном шаре, факельном горении	Методика определения величин пожарного риска на производственных объектах
4. Расчет параметров воздействия и зон поражения при горении ОВ в зданиях	
5. Расчет параметров воздействия и зон поражения продуктами горения	
6. Расчет параметров воздействия и зон поражения осколками	СТО Газпром 2-2.3-400-2009 "Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО "Газпром"

9. Для более точного расчета, а также расчета последствий аварий с выбросом опасных веществ и взрывом облака ТВС в помещениях рекомендуется использовать методы вычислительной гидродинамики в соответствии с разделом III настоящего Руководства.

III. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС

10. Для моделирования распространения опасных веществ рекомендуется проводить численное интегрирование системы уравнений в частных производных, представимых в виде уравнений (1 - 5).

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_i \rho u_i) = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_i \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{ij}) + F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g, \quad (2)$$

где σ_{ij} - тензор напряжений;

$F_{w,i}$ - сопротивление потока стенкам;

$F_{o,i}$ - сопротивление потока препятствиям, чей размер меньше одной ячейки вычислительной сетки:

$$F_{o,i} = -\rho \left| \frac{\partial \beta}{\partial x} \right| u_i |u_i|$$

Уравнение переноса для энтальпии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_v \rho u_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \beta_v \frac{Dp}{Dt} + \frac{Q}{V} \quad (3)$$

Уравнение переноса для массовой доли топлива:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho Y_{fuel}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j Y_{fuel}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{fuel}} \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j} \right) + R_{fuel} \quad (4)$$

Уравнение переноса для доли смешения:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho \xi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \xi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

11. Турбулентность рекомендуется моделировать по модели $k-\varepsilon$, которая состоит из двух уравнений, одно для кинетической энергии турбулентности (6), а второе для диссипации кинетической энергии турбулентности (7).

Уравнение турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \beta_v P_k - \beta_v \rho \varepsilon \quad (6)$$

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \beta_v P_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \beta_v \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

12. Тензор турбулентных вязких напряжений, используемый в уравнении (2), рекомендуется определять следующим образом:

$$\sigma_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right), \quad (8)$$

где эффективная вязкость определяется следующим образом:

$$\mu_{eff} = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (9)$$

где $\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ - турбулентная или вихревая вязкость.

13. Вклад сдвиговой турбулентности G_s , движения поверхностей G_w , гравитационной турбулентности G_b и препятствий, чей размер меньше одной ячейки G_o , в образование кинетической энергии турбулентности рекомендуется представлять в виде:

$$P_k = G_s + G_w + G_b + G_o, \quad (10)$$

где

$$G_s = \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (11)$$

$$G_b = -\frac{1}{\rho} \frac{\mu_{eff}}{\sigma_b} g_i \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (12)$$

$$G_o = C_o \beta_v \rho |\bar{u}| u_i^2 f_i. \quad (13)$$

14. Диссипацию турбулентной энергии рекомендуется описывать уравнением:

$$P_\varepsilon = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k \left(1 + C_{3\varepsilon} R_f \right), \quad (14)$$

где модель плавучести определяется следующим образом:

$$R_f = -\frac{G_b}{P_k} \frac{|u * g|}{|u||g|}.$$

Для моделей с вихревой вязкостью тензор напряжений Рейнольдса определяется следующим образом:

$$-\rho u_i'' u_j'' = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij}. \quad (15)$$

В уравнениях (10) - (15) используются константы, сведения о которых приведены в таблицах № 2 и 3.

Таблица № 2

Значения коэффициентов модели Лаундера и Спалдинга

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$
0.09	1.44	0.92	0.8

Таблица № 3

Значения коэффициентов модели турбулентности Прандтля - Шмидта

σ_h	σ_{fuel}	σ_ξ	σ_k	σ_ε	σ_b
0.7	0.7	0.7	1.0	1.3	0.9

15. У поверхности земли рекомендуется учитывать эффекты пограничного слоя. Характеристический масштаб в приграничном слое определяется по формуле:

$$L = - \frac{\rho_a C_p T_a u^{*3}}{kgHs} , \quad (16)$$

где ρ_0 и T_0 - плотность и температура среды;

C_p - изобарная теплоемкость;

k - кинетическая энергия турбулентности;

g - гравитационная постоянная;

H_θ - поток тепла от поверхности;

u^* - скорость трения.

Масштаб Монины - Обухова (таблица № 4) является мерой стабильности атмосферных пограничных слоев.

Таблица № 4

Масштабы Монины - Обухова и классы устойчивости

Масштаб Монины - Обухова	Устойчивость
Малый отрицательный $-100 < L < 0$	Очень неустойчивая
Большой отрицательный $-10^5 < L < 100$	Неустойчивая
Очень большой $ L > 10^5$	Нейтральная
Большой положительный $10 < L < 10^5$	Устойчивая
Малый положительный $0 < L < 10$	Очень устойчивая

16. Масштаб Монины - Обухова рекомендуется оценивать с помощью классов по Паскуиллу, которые являются методом классификации количества турбулентности в атмосфере.

Распределение скорости по высоте:

$$U(z) = \begin{cases} \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{(z - z_d) + z_o}{z_o} \right) - \psi_u(z) & \text{при } z_o > 0 \\ U_o & \text{при } z_o = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Скорость сдвига:

$$u^* = \frac{U_o k}{\ln \left(\frac{(z - z_d) + z_o}{z_o} \right) - \psi_u(z_{ref})}, \quad (18)$$

где ψ_u определяется по формуле:

$$\psi_u(z) = \begin{cases} 0 & \text{Для класса устойчивости } D \\ 2 \ln \left(\frac{1 + \xi}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + \xi^2}{2} \right) - \arctan(\xi) + \frac{\pi}{2} & \text{при } L < 0 \\ -17 \left(1 - \exp \left(-0.29 \frac{z}{L} \right) \right) & \text{при } L > 0 \end{cases}, \quad (19)$$

где:

$$\xi = \left(1 - \frac{16z}{L} \right)^{1/4} \quad (20)$$

17. В таблице № 5 приводятся параметры, необходимые для расчета скорости, k и ε в пограничных слоях:

Таблица № 5

Масштабы Монина - Обухова и классы устойчивости

Класс Паскуилла	Устойчивость	Высота пограничного слоя	L_s , м	z_s , м
A	Неустойчивая	1500 м	33.162	1117
B	Неустойчивая	1500 м	33.258	1146
C	Слабо неустойчивая	1000 м	51.787	1.324
D	Нейтральная	$0,3 \frac{u^* L}{L_f}$	1	0
E	Слабо устойчивая	$0,4 \sqrt{\frac{u^* L}{f}}$	-48.33	1.262
F	Устойчивая	$0,4 \sqrt{\frac{u^* L}{f}}$	31.323	19.36

По приведенным данным из таблицы № 5 масштаб Мони́на - Обухова рассчитывается следующим образом (21):

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_s} \log \frac{z_o}{z_s} \quad (21)$$

18. Для неустойчивых пограничных слоев (А, В и С) параметры рекомендуется рассчитывать по формулам:

$$k(z) = \begin{cases} 0.36\omega^{*2} + 0.85u^{*2} \left(1 - 3\frac{z}{L}\right)^{2/3} & \text{при } z \leq 0.1h \\ \left(0.36 + 0.9\left(\frac{z}{h}\right)^{2/3} \left(1 - 0.8\frac{z}{h}\right)^2\right) \omega^{*2} & \text{при } z > 0.1h \end{cases} \quad (22)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{u^{*2}}{\omega^{*2}} \left(1 + 0.5\left|\frac{z}{L}\right|^{2/3}\right)^{3/2} & \text{при } z \leq 0.1h \\ \frac{\omega^{*2}}{h} \left(0.8 - 0.3\frac{z}{h}\right) & \text{при } z > 0.1h \end{cases} \quad (23)$$

где ω^* - скорость передачи тепла:

$$\omega^* = \left(\frac{gq_s H}{T_o \rho C_p}\right)^{1/3} \quad (24)$$

где Н - коэффициент теплопередачи, плотность ρ и теплоемкость C_p воздуха получены при температуре T_0 и P_0 плотности окружающей среды.

19. Для нейтральных и устойчивых пограничных слоев:

$$k(z) = \begin{cases} 6u^{*2} & \text{при } z \leq 0.1h \\ 6u^{*2} \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{1.75} & \text{при } z > 0.1h \end{cases} \quad (25)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{u^{*3}}{kz} \left(1.24 + 4.3\frac{z}{h}\right) & \text{при } z \leq 0.1h \\ \frac{u^{*3}}{kz} \left(1.24 + 4.3\frac{z}{h}\right) \left(1 - 0.85\frac{z}{h}\right)^{3/2} & \text{при } z > 0.1h \end{cases} \quad (26)$$

20. Ламинарную скорость пламени смеси горючих веществ рекомендуется оценивать по формулам (27) - (28).

Зависимость скорости ламинарного горения от давления:

$$S_L = S_L^o \left(\frac{P}{P_o} \right)^{\gamma_p} \quad (27)$$

Для квазиламинарного режима горения:

$$S_{QL} = S_L \left(1 + \chi \min \left(\left(\frac{R}{3} \right)^{0.5}, 1 \right) \right) \quad (28)$$

где R - газовая постоянная для конкретного вещества или смеси:

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (29)$$

где R_u - универсальная газовая постоянная;
M - молярная масса.

21. Турбулентную скорость пламени рекомендуется определять по формуле:

$$S_T = 15 S_L^{0.784} u^{0.412} l_I^{0.190} \quad (30)$$

22. Скорость пламени рекомендуется определять по следующему соотношению:

$$S_u = \max(S_{QL}, S_T) \quad (31)$$

23. Коэффициент диффузии из уравнения переноса топлива определяется по формуле (32):

$$D = \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{fuel}} \quad (32)$$

Безразмерную скорость реакции и коэффициент диффузии можно определить по следующим соотношениям:

$$W^* = \frac{w}{\beta} = W \frac{l_{LT}}{\Delta_g} \quad (33)$$

$$D^* = D\beta = D \frac{\Delta_g}{l_{LT}} \quad (34)$$

где Δ_g - длина контрольного объема в первом слое над поверхностью земли;
 l_{LT} - перемешивание.

$$l_{LT} = C_\mu k^{3/2} \varepsilon^{-1} \quad (35)$$

При заданном пределе затухания $\chi_q = 0.05$ получено следующее соотношение между коэффициентом диффузии D и безразмерной скоростью реакции W:

$$WD = 1.37S_u^2 = W^*D^* , \quad (36)$$

где:

$$W^* = C_{1\beta} \frac{S_u}{\Delta_g} , \quad (37)$$

$$D^* = C_{2\beta} S_u \Delta_g . \quad (38)$$

Скорость реакции топлива моделируется следующим образом:

$$R_{fuel} = -W^* \rho \min \left(\delta_H (\chi - \chi_q), \chi, 9 - 9\chi \right) , \quad (39)$$

где δ_H - функция Хевисайда.

25. Примеры моделирования аварий с использованием методов вычислительной гидродинамики приведены в Приложении № 3 к настоящему Руководству.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем Руководстве используются следующие обозначения и сокращения:

ОВ - опасное вещество;

ТВС - топливно-воздушная смесь;

β_v - объемная пористость;

β_i - поверхностная пористость в i -м направлении;

γ_p - показатель степени давления для ламинарного горения;

δ_{ij} - дельта функция, $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$;

δ_H - функция Хевисайда, тэта-функция; $\delta_H(a - b) = 1$, если $a \geq b$ и $\delta_H(a - b) = 0$, если $a < b$;

ε - диссипация турбулентной кинетической энергии, $\text{м}^2\text{с}^{-3}$;

ξ - доля компонента смеси;

μ - динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

μ_t - динамическая турбулентная вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

μ_{eff} - эффективная вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$;

ρ - плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

ρ_a - плотность окружающей среды, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

σ_ε , σ_ξ , σ_b , σ_k , σ_{fuel} , σ_h - турбулентные числа Прандтля - Шмидта;

σ_{ij} - компонента тензора напряжений, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$;

χ - прогрессная переменная, локализирующая фронт пламени,

$$\chi = \frac{Y_{fuel}}{Y_{fuel}^o + \xi(Y_{fuel}^1 - Y_{fuel}^o)};$$

χ_q - предел затухания;

ω^* - скорость передачи тепла;

Δ_s - длина контрольного объема в первом слое над поверхностью земли;

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ - константы $k-\varepsilon$ модели турбулентности, как правило,
 $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_{3\varepsilon} = 0,8$, $C_\mu = 0,09$;

C_p - изобарная теплоемкость воздуха;

\mathbf{g} - вектор ускорения свободного падения;

g_i - компонента вектора ускорения свободного падения;

g - гравитационная постоянная;

f - коэффициент, характеризующий турбулизацию от препятствий меньшего размера, чем размер расчетной сетки;

$F_{w,i}$ - сопротивление потока стенкам;

$F_{o,i}$ - сопротивление потока препятствиям, чей размер меньше одной ячейки вычислительной сетки;

h - энтальпия, Дж·кг⁻¹;

H_s - поток тепла от поверхности земли;

H - коэффициент теплопередачи;

k - кинетическая турбулентная энергия, м²·с⁻²;

L - масштаб Монины - Обухова, м;

I_{LT} - перемешивание;

M - молярная масса;

m - масса, кг;

\dot{m} - скорость изменения массы, кг·с⁻¹;

p - абсолютное давление, Па;

P_0 - среднее давление, Па;

P_ε - член, описывающий диссипацию кинетической турбулентной энергии;

P_k - член, описывающий генерацию кинетической турбулентной энергии;

Q - теплота, Дж;

\dot{Q} - скорость потока тепла, Дж·с⁻¹;

R - газовая постоянная смеси, Дж·кг⁻¹·К;

R_u - универсальная газовая постоянная, Дж·кг⁻¹·К;

R_{fuel} - скорость реакции топлива, кг·м⁻³·с⁻¹;

S_L - ламинарная скорость пламени, м·с⁻¹;

S_T - турбулентная скорость пламени, м·с⁻¹;

S_{QL} - квазиламинарная скорость пламени, м·с⁻¹;

t - время, с;

T_a - температура окружающей среды, К;

\mathbf{u} - вектор скорости;

u_i - компонент вектора скорости, м/с;

u^* - динамическая скорость (скорость сдвига), м/с;

U_0 - характеристическая скорость, м/с;

V - объем, м³;

x_j - линейная координата, м;

Y - массовая доля;

Z - высота над землей, м;

Z_0 - коэффициент шероховатости, м.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящем Руководстве используются следующие термины с соответствующими определениями:

авария - разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ;

анализ риска аварии - процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды;

взрыв - неконтролируемый быстропротекающий процесс выделения энергии, связанный с физическим, химическим или физико-химическим изменением состояния вещества, приводящий к резкому динамическому повышению давления или возникновению ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям;

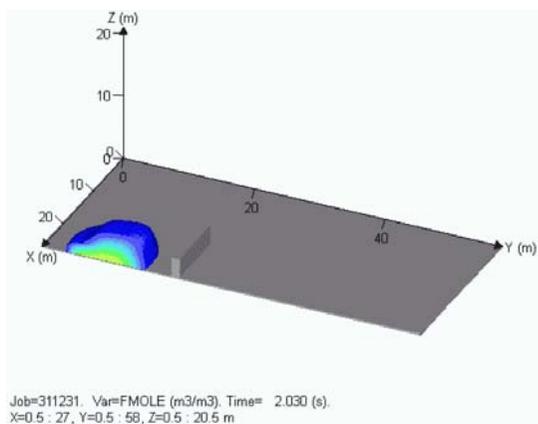
обоснование безопасности - документ, содержащий сведения о результатах оценки риска аварии на опасном производственном объекте и связанной с ней угрозы, условия безопасной эксплуатации опасного производственного объекта, требования к эксплуатации, капитальному ремонту, консервации и ликвидации опасного производственного объекта;

опасные вещества - воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды, указанные в приложении 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов".

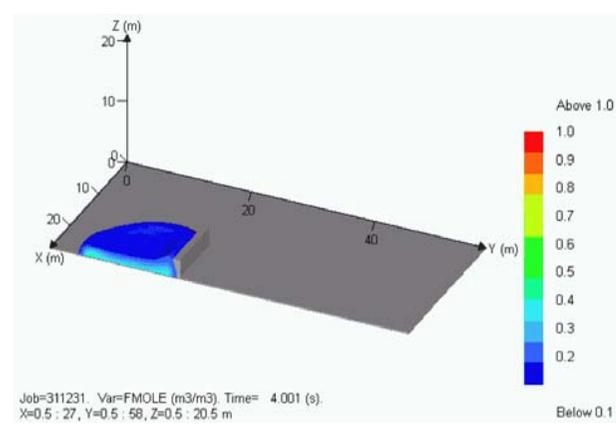
**ПРИМЕРЫ
МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ**

Пример 1

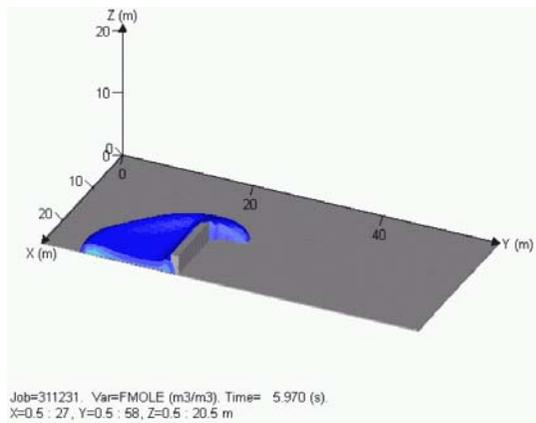
В результате полного разрушения емкости произошел выброс пропана в газовой фазе. Скорость ветра 4 м/с, температура окружающей среды 20 °С, класс устойчивости атмосферы по Паскуиллу - F. На расстоянии 10 м по направлению ветра от емкости находится непроницаемое препятствие высотой 3 м. На рис. 3-1 приведены профили распространения облака пропана в различные моменты времени.



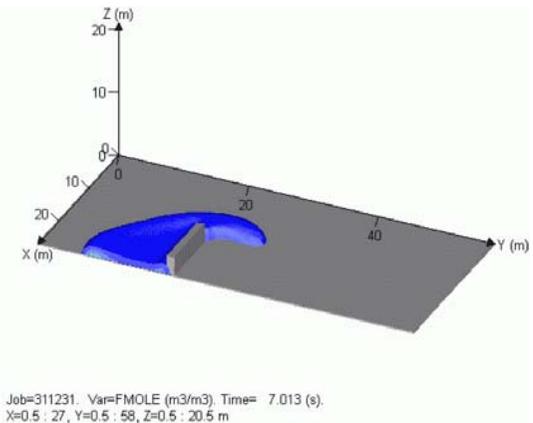
Момент времени - 2 сек.



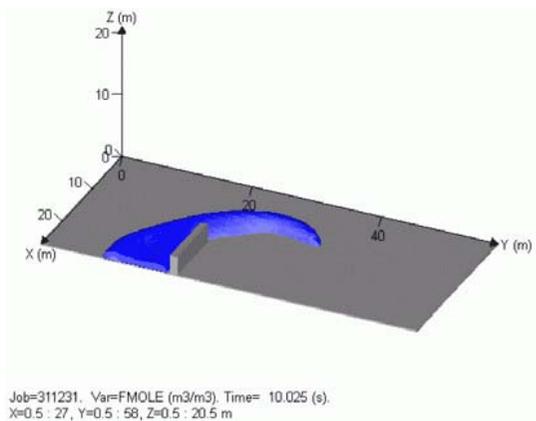
Момент времени - 4 сек.



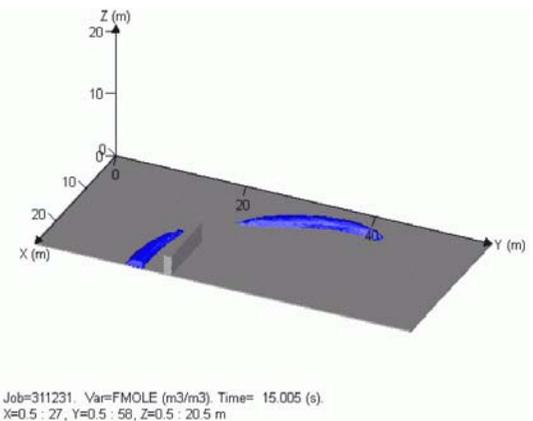
Момент времени - 6 сек.



Момент времени - 7 сек.



Момент времени - 10 сек.

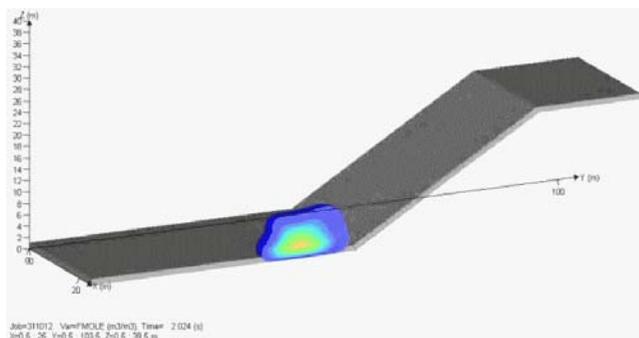


Момент времени - 15 сек.

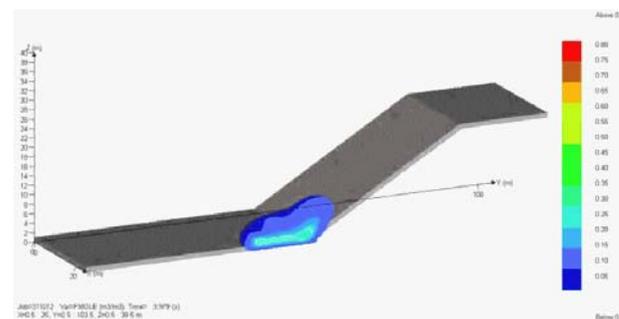
Рисунок 3-1. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (горизонтальная поверхность с препятствием)

Пример 2

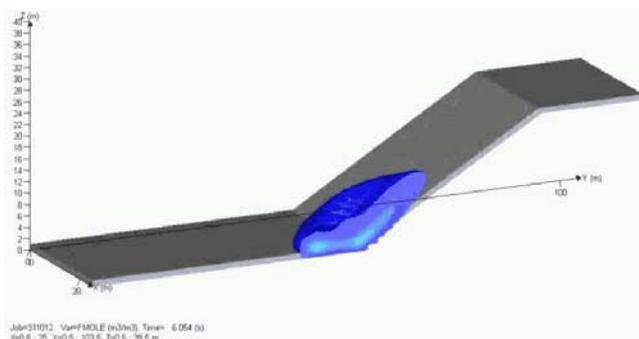
В результате полного разрушения емкости произошел выброс пропана в газовой фазе. Скорость ветра 4 м/с, температура окружающей среды 20 °С, класс устойчивости атмосферы по Паскуиллу - F. На расстоянии 10 м по направлению ветра от емкости находится наклонная вверх поверхность. На рис. 3-2 приведены профили распространения облака пропана в различные моменты времени.



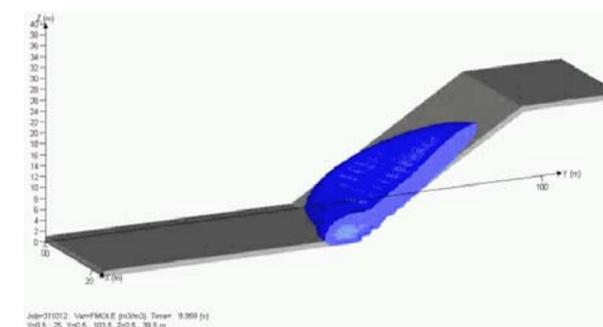
Момент времени - 2 сек.



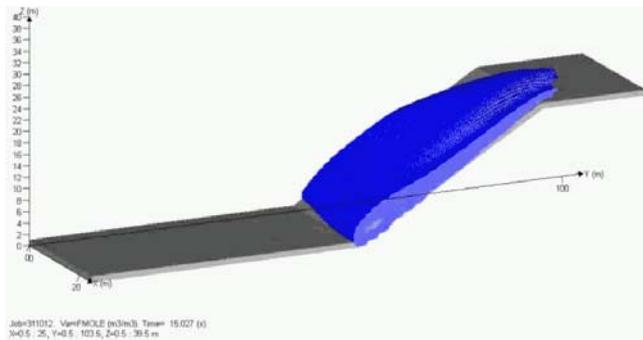
Момент времени - 4 сек.



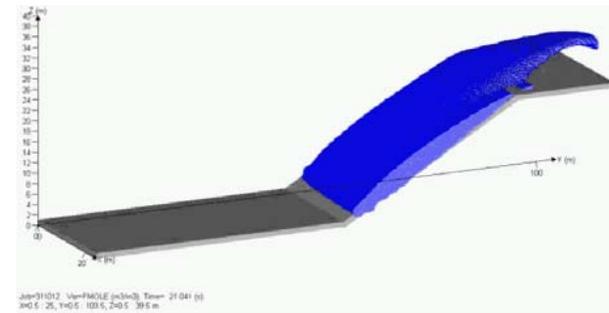
Момент времени - 6 сек.



Момент времени - 10 сек.



Момент времени - 15 сек.

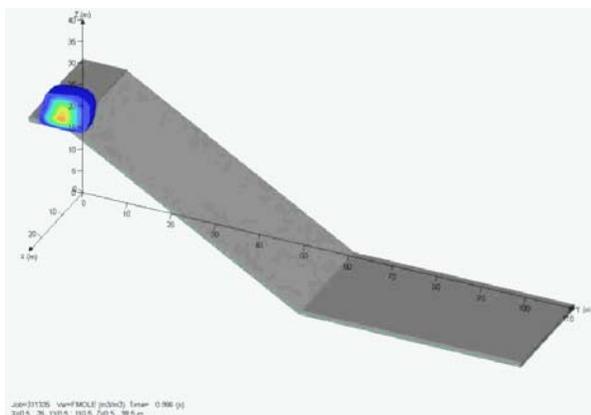


Момент времени - 21 сек.

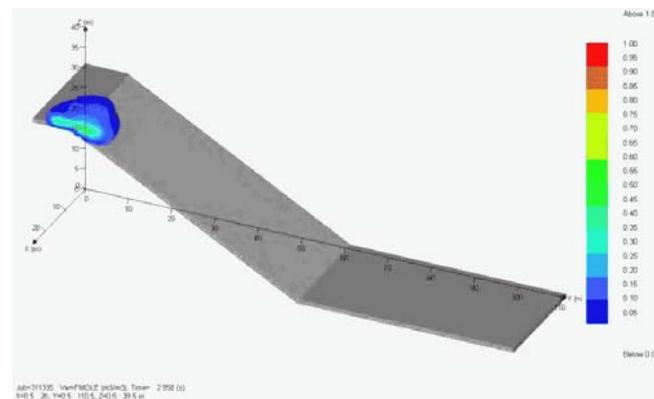
Рисунок 3-2. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (подъем в горку)

Пример 3

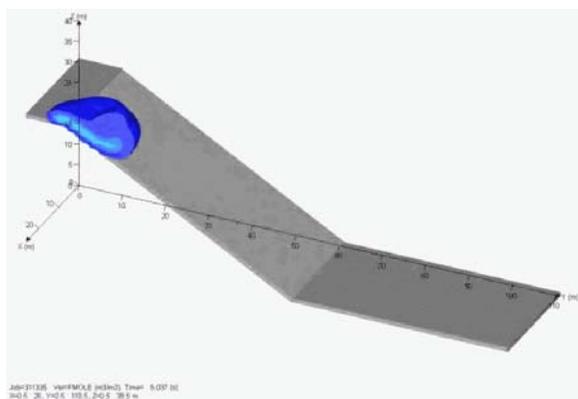
В результате полного разрушения емкости произошел выброс пропана в газовой фазе. Скорость ветра 4 м/с, температура окружающей среды 20 °С, класс устойчивости атмосферы по Паскуилу - F. Емкость расположена на возвышенности в 10 м от наклонной вниз поверхности. На рис. 3-3 приведены профили распространения облака пропана в различные моменты времени.



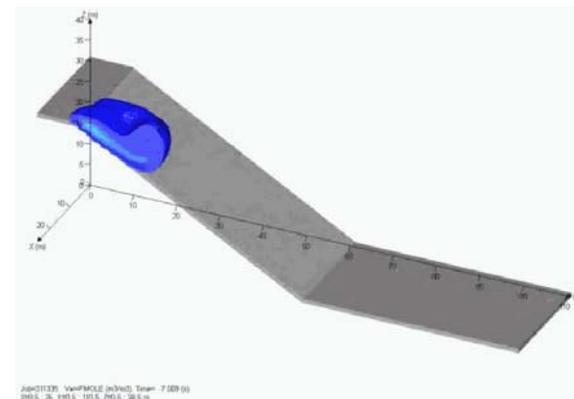
Момент времени - 1 сек.



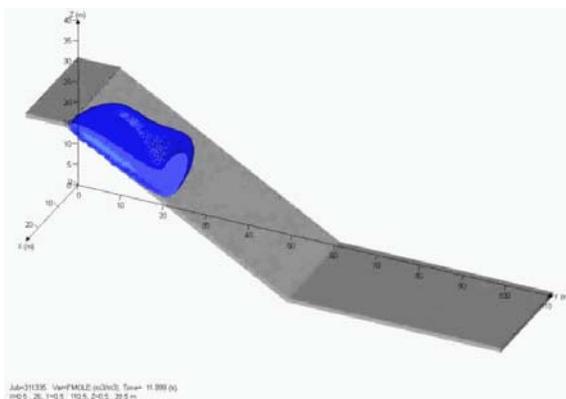
Момент времени - 3 сек.



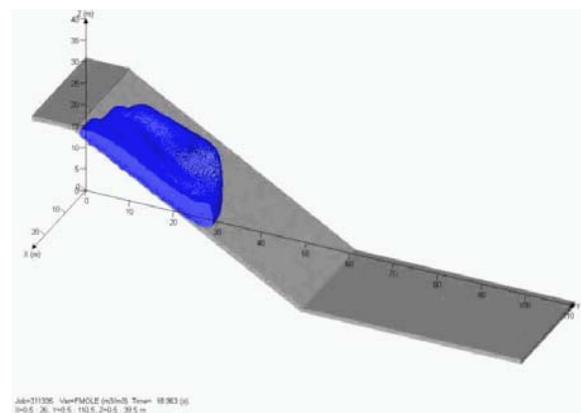
Момент времени - 5



Момент времени - 7 сек.



Момент времени - 12 сек.



Момент времени - 19 сек.

Рисунок 3-3. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (спуск вниз)

Пример 4

В прямоугольном ангаре, заполненном трубами, произошел взрыв ТВС. На расстоянии 10 м и 25 м от ангара расположены квадратные препятствия. На рис. 3-4 приведены распределения давления при взрыве облака ТВС. На рис. 3-5 приведены распределения продуктов горения при взрыве облака ТВС.

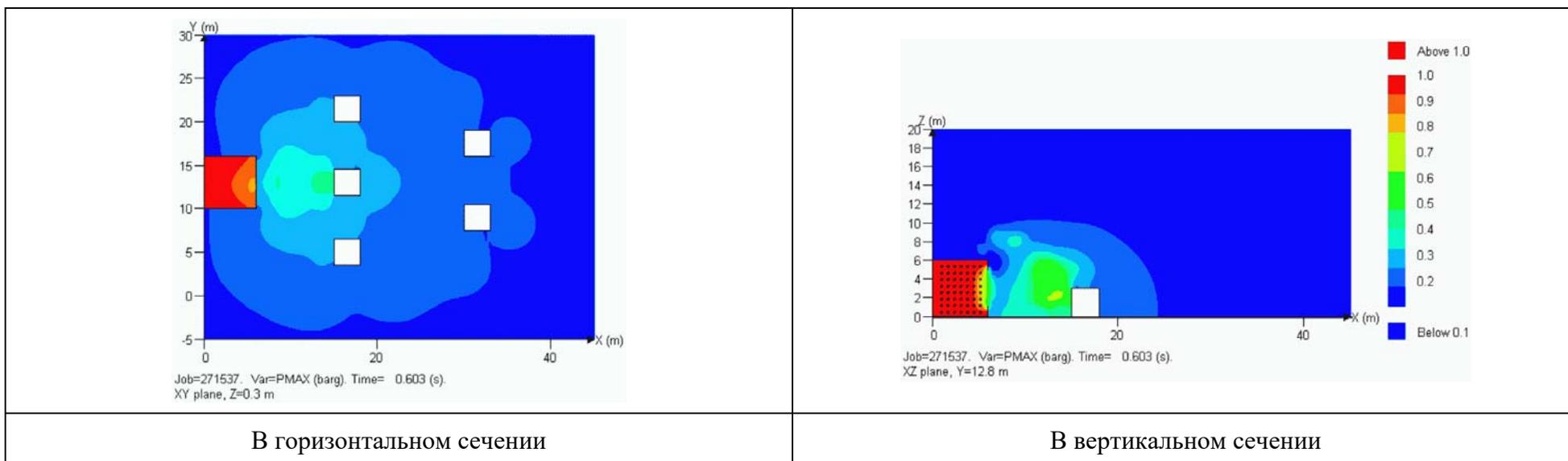


Рисунок 3-4. Распределение давления при взрыве облака ТВС

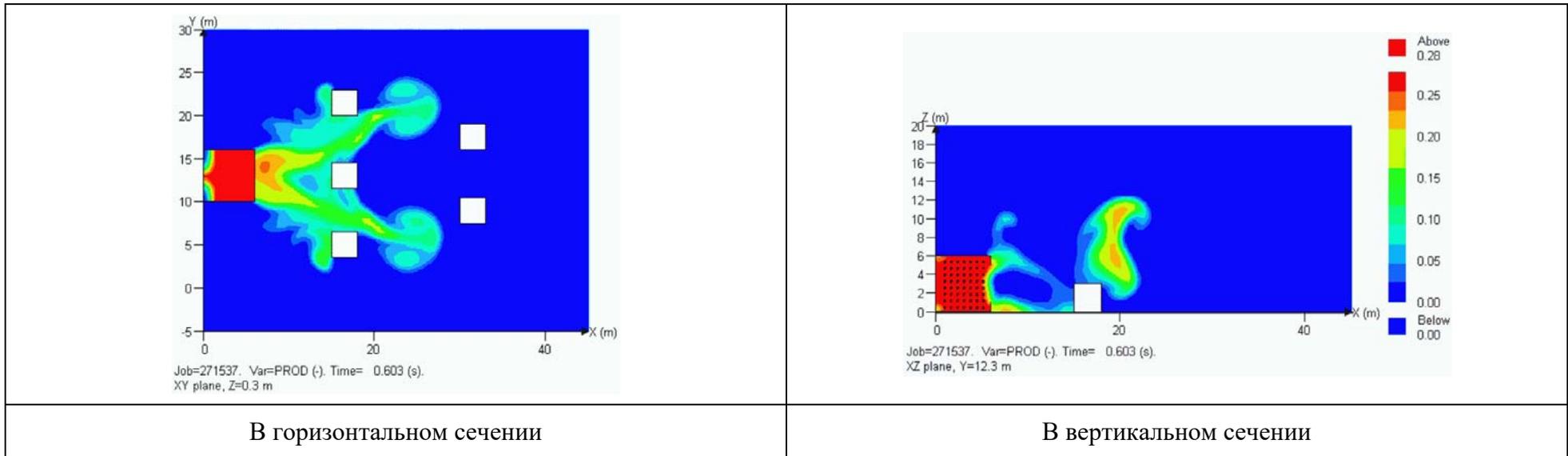


Рисунок 3-5. Распределение продуктов горения при взрыве облака ТВС

Пример 5

В загромажденном производственном модуле произошел взрыв ТВС.

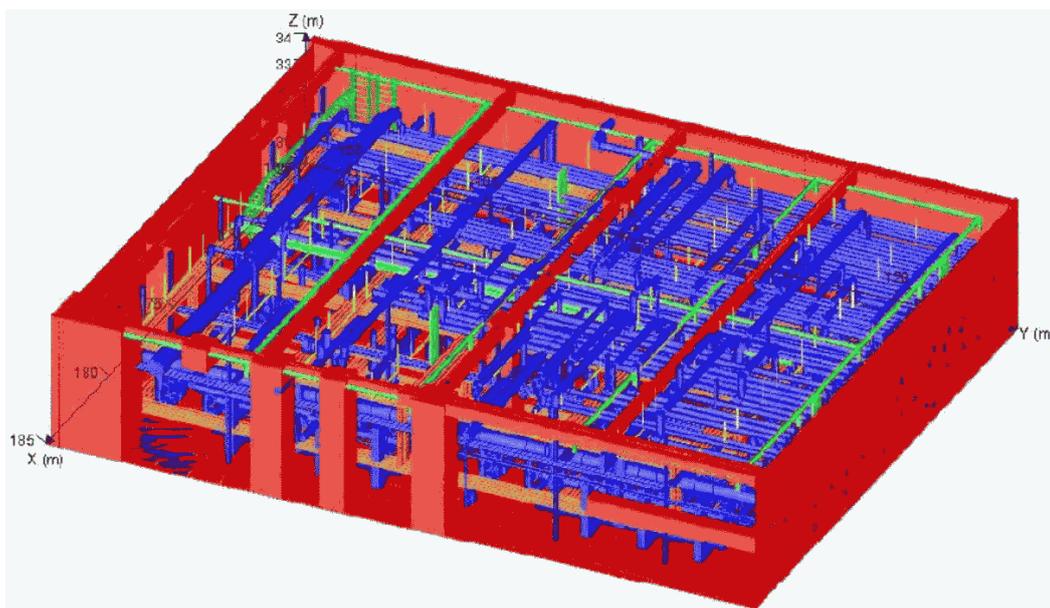


Рисунок 3-6. Схема модуля
(направление на север соответствует оси Oy)

Параметры модуля: 25,5 x 20,5 x 5,5 м

Объем модуля: 2875 м³

Площади боковых поверхностей: 112,75 м² (южная/северная стена)

140,25 м² (западная/восточная стена)

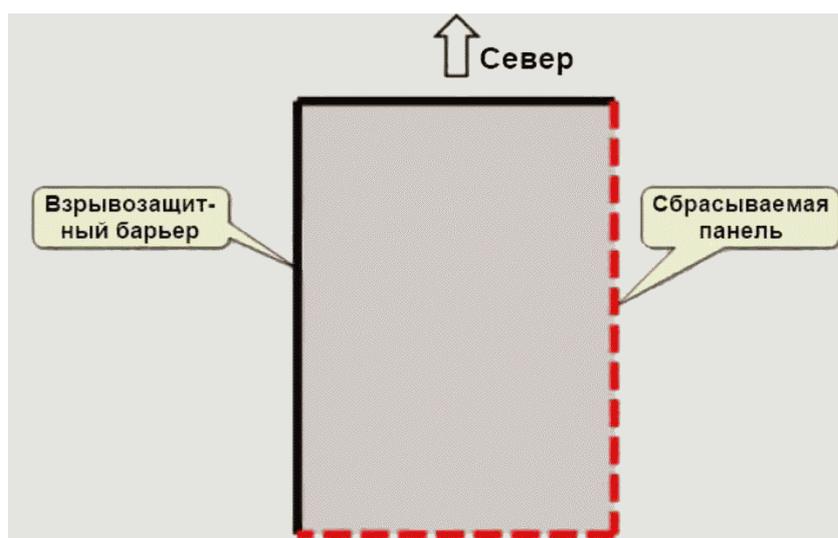


Рисунок 3-7. Конфигурация стен модуля (вид сверху)

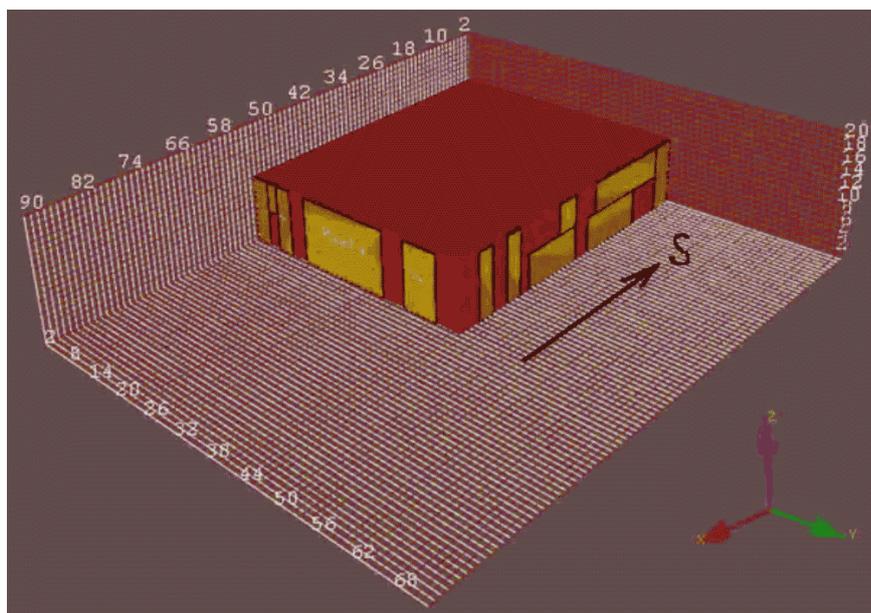


Рисунок 3-8. Моделирование объекта в программном комплексе

На южной и восточной стенах расположены легкобрасываемые конструкции, которые составляют 62 - 68% площади соответствующей боковой стены. На южной стороне их площадь составляет $76,75 \text{ м}^2$, а на восточной - 87 м^2 .

Легкобрасываемые конструкции срабатывают при избыточном давлении $0,05 \text{ атм}$.

Состав смеси: Метан 87,44%;

Этан 6,43%;

Пропан 3,13%;

Бутан 2,57%;

CO_2 0,01%;

H_2O 0,01%.

Загроможденность 1 (неравномерная), загроможденность 2 (равномерная);

Координаты места воспламенения 1: (6;5,5;3); 2: (12,10,3); 3: (20;15;3).

Сценарии моделирования

№ эксперимента	Загроможденность	Угол раскрытия панели, % (или площадь панели)	Координата места воспламенения
211001	1	100	1
211002	1	100	2
211003	1	100	3
210701	1	70	1
210702	1	70	2
210703	1	70	3
221001	2	100	1
221002	2	100	2
221003	2	100	3
220701	2	70	1
220702	2	70	2
220709	2	70	3

Значение избыточного давления P_{max} при различных
сценариях моделирования

	Место воспламенения	Значение избыточного давления P_{max} , бар.	
		Угол раскрытия ЛСК (или площадь панели)	
		100%	70%
1 Загроможденность	1	10	13
	2	4,7	6
	3	12	13
2 Загроможденность	1	8	10
	2	3,9	4,6
	3	12	13

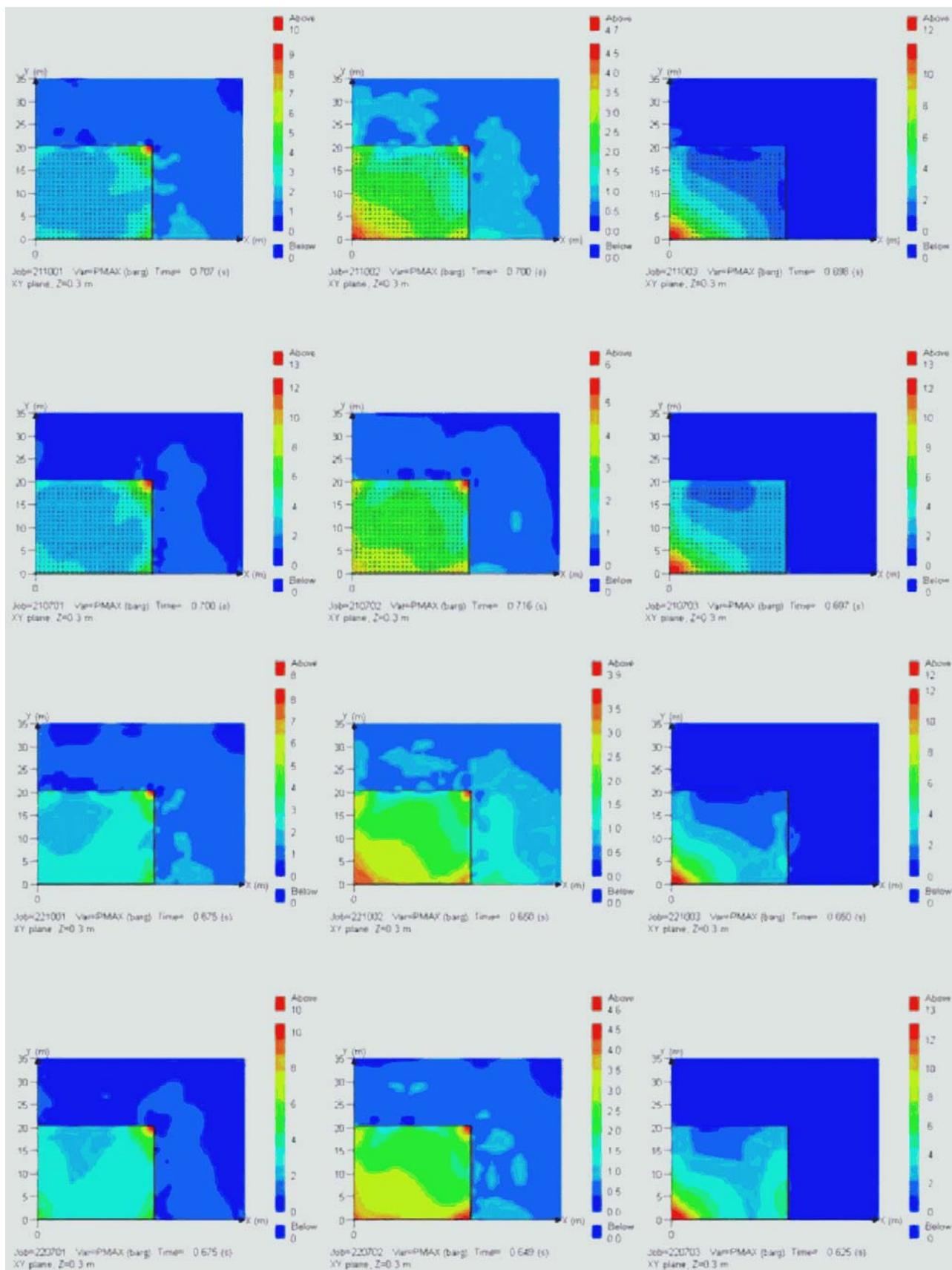


Рисунок 3-9. Распределение давления при взрыве облака ТВС при различных сценариях моделирования