



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ  
(РОСТЕХНАДЗОР)

**П Р И К А З**

*28 ноября 2022 г.*

Москва

№ 415

**Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах»**

В соответствии с пунктом 5 статьи 3 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», пунктом 1 Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 401, приказываю:

1. Утвердить прилагаемое Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах».

2. Признать утратившим силу приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 апреля 2015 г. № 160 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах».

Руководитель

А.В. Трёмбицкий

УТВЕРЖДЕНО  
приказом Федеральной службы  
по экологическому, технологическому  
и атомному надзору  
от «28» ноября 2022 г. № 415

**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 15 декабря 2020 г. № 533, зарегистрированным Минюстом России 25 декабря 2020 г., регистрационный № 61808, 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, зарегистрированным 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 7 декабря 2020 г. № 500, зарегистрированным Минюстом России 22 декабря 2020 г., регистрационный № 61706.

2. Руководство содержит рекомендации к расчетам зон распространения опасных веществ в атмосфере и оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей (далее - 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 ТВС, могут использовать иные обоснованные способы и методы, не указанные в Руководстве.

4. В Руководстве используются сокращения, обозначения, а также термины и определения, приведенные в приложениях № 1 и № 2.

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 (далее - ОВ), 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
Расчет параметров ударной волны, зон поражения и разрушения при воспламенении и взрыве облаков ТВС	Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»
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»
Определение параметров воздействия и зон поражения при горении пролива, огненном шаре, факельном горении	Методика определения величин пожарного риска на производственных объектах
Расчет параметров воздействия и зон поражения при горении ОВ в зданиях	
Расчет параметров воздействия и зон поражения продуктами горения	
Расчет параметров воздействия и зон поражения осколками	Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального трубопроводного транспорта газа»

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = \frac{\dot{m}}{V}. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

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

где:  $\sigma_{ij}$  - тензор напряжений;

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

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

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

Уравнение переноса для энтальпии:

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

Уравнение переноса для массовой доли топлива:

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

где  $R_{fuel}$  - скорость реакции топлива.

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 к-ε, которая состоит из двух уравнений: одно – для кинетической энергии турбулентности (6), второе – для диссипации кинетической энергии турбулентности (7).

Уравнение турбулентной кинетической энергии:

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

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии:

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

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:

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

где  $\rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$  – 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:

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

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

$$G_o = C_0 \beta_v \rho |\bar{u}| u_i^2 f_i. \quad (13)$$

14. Диссипацию турбулентной энергии рекомендуется описывать уравнением:

$$P_\epsilon = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{K} P_k (1 + C_{3\epsilon} R_f), \quad (14)$$

где модель плавучести определяется следующим образом:

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

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

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

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

Таблица № 2

#### Значения коэффициентов модели Лаундера и Спалдинга

$C_\mu$	$C_{1\epsilon}$	$C_{2\epsilon}$	$C_{3\epsilon}$
0,09	1,44	1,92	0,8

**Значения коэффициентов модели турбулентности Прандтля-Шмидта**

$\sigma_h$	$\sigma_{fuel}$	$\sigma_\xi$	$\sigma_\kappa$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_b$
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:

$$L = -\frac{\rho_a c_p T_a u^{*3}}{k g H_s}, \quad (16)$$

где:  $\rho_a$  и  $T_a$  — плотность и температура среды;

$c_p$  - изобарная теплоемкость;

$k$  - кинетическая энергия турбулентности;

$g$  - гравитационная постоянная;

$H_s$  - поток тепла от поверхности;

$u^*$  - скорость трения.

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

Таблица № 4

**Масштабы Монина-Обухова и классы устойчивости**

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



Распределение скорости по высоте:

$$U(z) = \begin{cases} \frac{u^*}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{(z - z_d) + z_0}{z_0} \right) - \psi_u(z) \right] & \text{при } z_0 > 0 \\ U_0 & \text{при } z_0 = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Скорость сдвига:

$$u^* = \frac{U_0 \kappa}{\ln \left( \frac{(z_{ref} - z_d) + z_0}{z_0} \right) - \psi_u(z_{ref})}, \quad (18)$$

где  $\psi_u$  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

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

17. В таблице № 5 приведены параметры, необходимые для расчета скорости,  $\kappa$  и  $\epsilon$  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	11,46
C	Слабо неустойчивая	1000 м	51,787	1,324
D	Нейтральная	$\min \left( 500 \text{ м}, 0,3 \frac{u^* L}{L_f} \right)$	1	0

Класс Паскуилла	Устойчивость	Высота пограничного слоя	$L_s$ , м	$z_s$ , м
Е	Слабо устойчивая	$0,4\sqrt{\frac{u^* L}{f}}$	-48,33	1,262
Ф	Устойчивая	$0,4\sqrt{\frac{u^* L}{f}}$	31,323	19,36

По приведенным данным из таблицы № 5 масштаб Монина-Обухова рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_s} \log \frac{z_0}{z_s}. \quad (21)$$

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

$$k(z) = \begin{cases} 0,36\omega^{*2} + 0,85u^{*2} \left(1 - 3\frac{z}{L}\right)^{2/3} & \text{при } z \leq 0,1h; \\ \left(0,36 + 0,9\left(\frac{z}{h}\right)^{2/3} \left(1 - 0,8\frac{z}{h}\right)^2\right) \omega^{*2} & \text{при } z > 0,1h; \end{cases} \quad (22)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{u^{*3}}{\kappa z} \left(1 + 0,5\left|\frac{z}{L}\right|^{2/3}\right)^{3/2} & \text{при } z \leq 0,1h; \\ \frac{\omega^{*3}}{h} \left(0,8 - 0,3\frac{z}{h}\right) & \text{при } z > 0,1h, \end{cases} \quad (23)$$

где  $\omega^*$  - скорость передачи тепла,

$$\omega^* = \left(\frac{g \dot{q}_s h}{T_0 \rho c_p}\right)^{1/3}, \quad (24)$$

где  $h$  - коэффициент теплопередачи, плотность  $\rho$  и теплоемкость  $c_p$  воздуха получены при температуре  $T_0$  и  $P_0$  плотности окружающей среды.

19. Для нейтральных и устойчивых пограничных слоев:

$$k(z) = \begin{cases} 6u^{*2} & \text{при } z \leq 0,1h; \\ 6u^{*2} \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{1,75} & \text{при } z > 0,1h; \end{cases} \quad (25)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \frac{u^{*3}}{kz} \left(1,24 + 4,3 \frac{z}{L}\right) & \text{при } z \leq 0,1h; \\ \frac{u^{*3}}{kz} \left(1,24 + 4,3 \frac{z}{L}\right) \left(1 - 0,85 \frac{z}{h}\right)^{3/2} & \text{при } z > 0,1h. \end{cases} \quad (26)$$

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

Зависимость скорости ламинарного горения от давления:

$$S_L = S_L^0 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{\gamma_r}. \quad (27)$$

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:

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

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:  $\Delta_g$  - длина контрольного объема в первом слое над поверхностью земли;

$l_{LT}$  - перемешивание,

$$l_{LT} = C_\mu \kappa^{3/2} \epsilon^{-1}. \quad (35)$$

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:

$$R_{fuel} = -W^* \rho \min(\delta_H (\chi - \chi_a), \chi_9 - 9\chi), \quad (39)$$

где  $\delta_H$  - функция Хевисайда.

24. Примеры моделирования аварий с использованием методов вычислительной гидродинамики приведены в приложении № 3 к Руководству.

Приложение № 1  
к Руководству по безопасности  
«Методика оценки последствий аварий  
на взрывопожароопасных химических  
производствах», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «28» ноября 2022 г. № 415

### Список обозначений

В Руководстве применены следующие обозначения и сокращения:

- ОВ – опасное вещество;
- ТВС – топливно-воздушная смесь;
- $\beta_v$  – объемная пористость;
- $\beta_i$  – поверхностная пористость в  $i$ -м направлении;
- $\gamma_p$  – показатель степени давления для ламинарного горения;
- $\delta_{ij}$  – дельта функция,  $\delta_{ij} = 1$ , если  $i = j$  и  $\delta_{ij} = 0$ , если  $i \neq j$ ;
- $\delta_H$  – функция Хевисайда, тэта-функция;  $\delta_H(a - b) = 1$ , если  $a \geq b$   
и  $\delta_H(a - b) = 0$ , если  $a < b$ ;
- $\varepsilon$  – диссипация турбулентной кинетической энергии,  $\text{м}^2\text{с}^{-3}$ ;
- $\xi$  – доля компонента смеси;
- $\mu$  – динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
- $\mu_t$  – динамическая турбулентная вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
- $\mu_{eff}$  – эффективная вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ,  $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ ;
- $P$  – плотность,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;
- $\rho_a$  – плотность окружающей среды,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;
- $\sigma_\varepsilon, \sigma_\xi, \sigma_b, \sigma_k, \sigma_{fuel}, \sigma_h$  – турбулентные числа Прандтля-Шмидта,
- $\sigma_{ij}$  – компонента тензора напряжений,  $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$ ;
- $\chi$  – прогрессная переменная, локализирующая фронт пламени,  

$$\chi = \frac{Y_{fuel}}{Y_{fuel}^0 + \xi(Y_{fuel}^1 - Y_{fuel}^0)}$$
;
- $\chi_q$  – предел затухания;

- $\omega^*$  – скорость передачи тепла;
- $\Delta_g$  – длина контрольного объема в первом слое над поверхностью земли;
- $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$  – константы к- $\varepsilon$  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 теплоёмкость воздуха;
- $\vec{g}$  – 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<sup>-1</sup>;
- $H_s$  – поток тепла от поверхности земли;
- $H$  – коэффициент теплопередачи;
- $k$  – кинетическая турбулентная энергия, м<sup>2</sup>·с<sup>-2</sup>;
- $L$  – масштаб Монина-Обухова, м;
- $l_{LT}$  – перемешивание;
- $M$  – молярная масса;
- $m$  – масса, кг;
- $\dot{m}$  – скорость изменения массы, кг·с<sup>-1</sup>;
- $p$  – абсолютное давление, Па;
- $P_0$  – среднее давление, Па;
- $P_\varepsilon$  – член, описывающий диссипацию кинетической турбулентной энергии;
- $P_k$  – член, описывающий генерацию кинетической турбулентной энергии;
- $Q$  – теплота, Дж;
- $\dot{Q}$  – скорость потока тепла, Дж·с<sup>-1</sup>;
- $R$  – газовая постоянная смеси, Дж·кг<sup>-1</sup>·К;
- $R_u$  – универсальная газовая постоянная, Дж·кг<sup>-1</sup>·К;

- $R_{fuel}$  – скорость реакции топлива,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- $S_L$  – ламинарная скорость пламени,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- $S_T$  – турбулентная скорость пламени,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- $S_{QL}$  – квазиламинарная скорость пламени,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;
- $t$  – время, с;
- $T_a$  – температура окружающей среды, К;
- $\vec{u}$  – вектор скорости;
- $u_i$  – компонент вектора скорости, м/с;
- $u^*$  – динамическая скорость (скорость сдвига), м/с;
- $U_0$  – характеристическая скорость, м/с;
- $V$  – объем,  $\text{м}^{-3}$ ;
- $x_j$  – линейная координата, м;
- $Y$  – массовая доля;
- $z$  – высота над землей, м;
- $z_0$  – коэффициент шероховатости, м.
-



Приложение № 2  
к Руководству по безопасности  
«Методика оценки последствий аварий  
на взрывопожароопасных химических  
производствах», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «28» сентября 2022 г. № 415

### Термины и определения

В Руководстве применены 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».

Приложение № 3  
к Руководству по безопасности  
«Методика оценки последствий аварий  
на взрывопожароопасных химических  
производствах», утвержденному приказом  
Федеральной службы по экологическому,  
технологическому и атомному надзору  
от «28» ноября 2022 г. № 415

**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 рисунке 3-1, приведены профили распространения облака пропана в различные моменты времени.

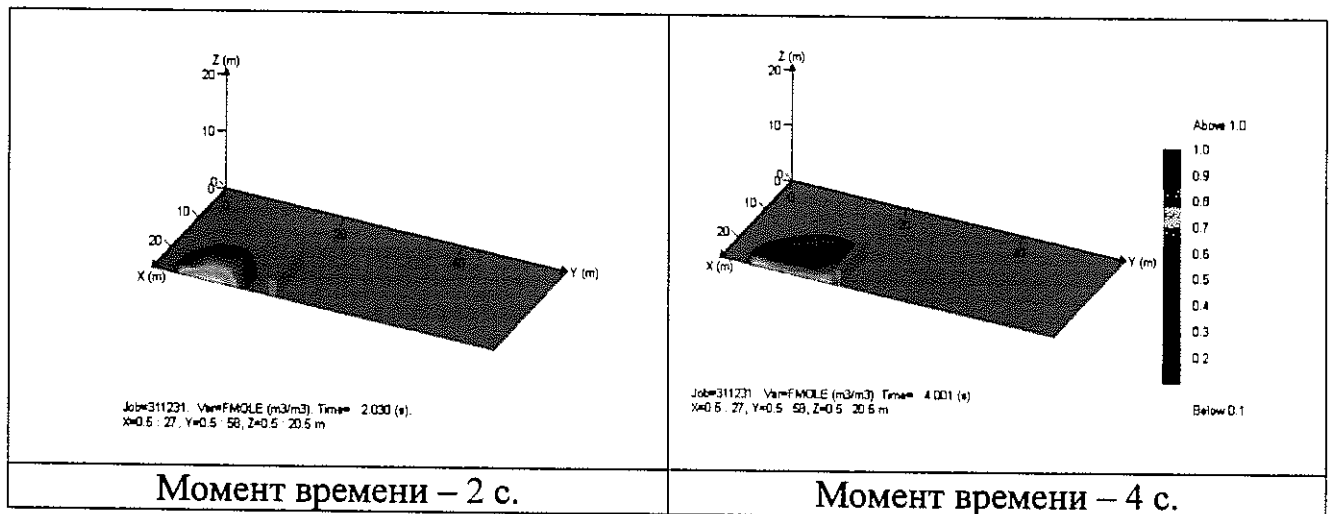


Рисунок 3-1. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (горизонтальная поверхность с препятствием) (начало).

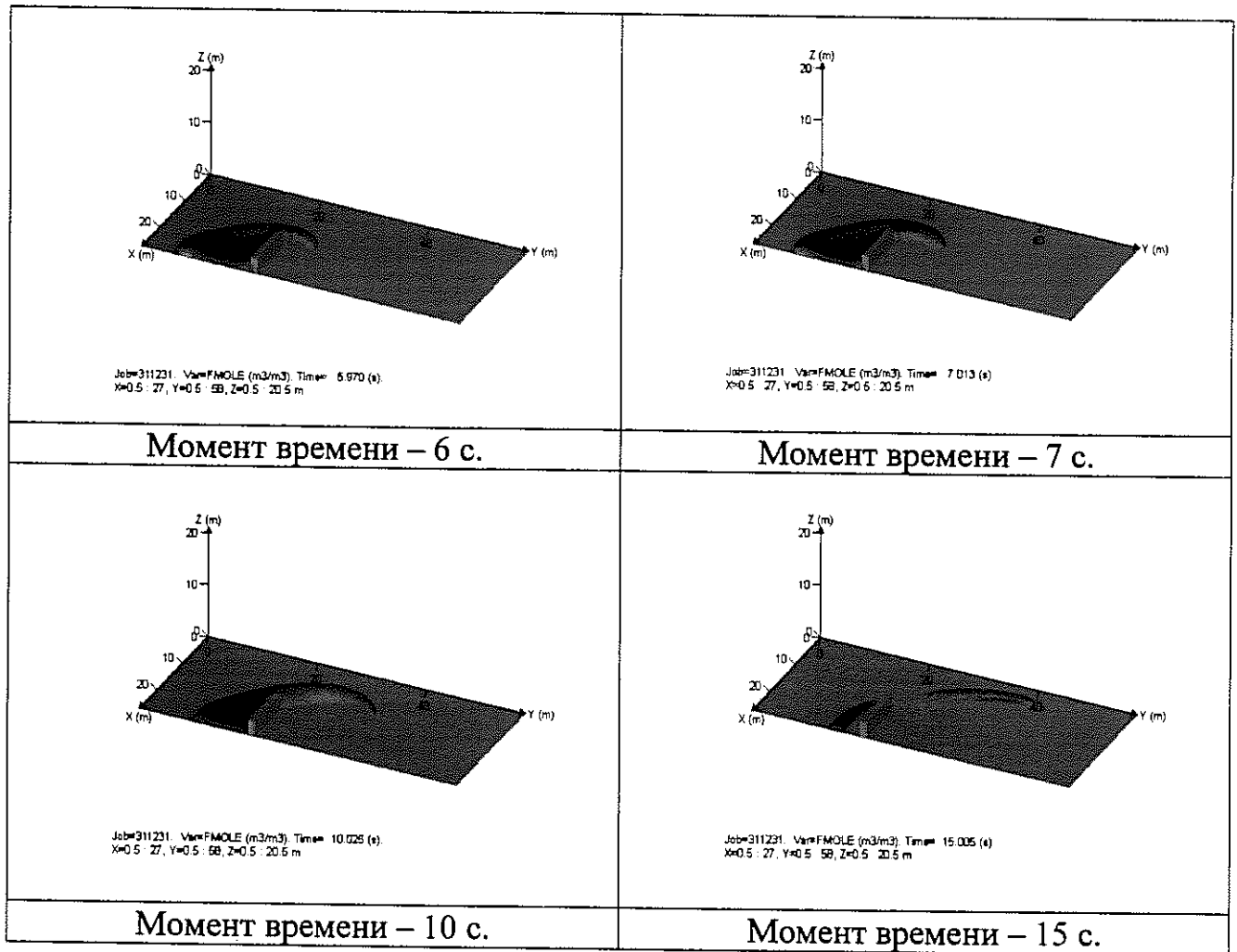


Рисунок 3-1. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (горизонтальная поверхность с препятствием)(окончание).

## 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 рисунке 3-2 приведены профили распространения облака пропана в различные моменты времени.

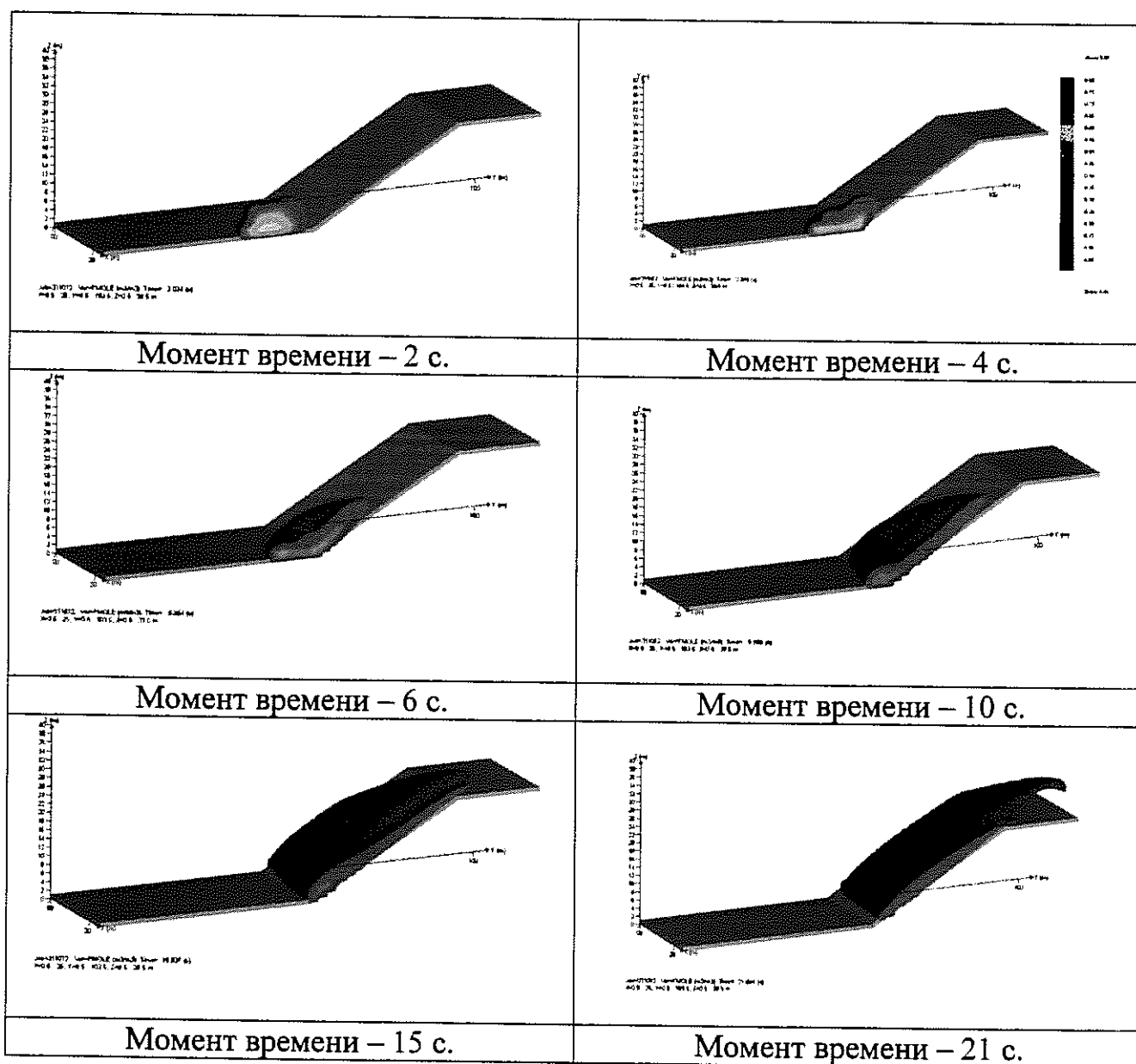


Рисунок 3-2. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (подъем в горку).

### 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 Паскуиллу – F. Емкость расположена на возвышенности в 10 м от наклонной вниз поверхности. На рисунке 3-3 приведены профили распространения облака пропана в различные моменты времени.

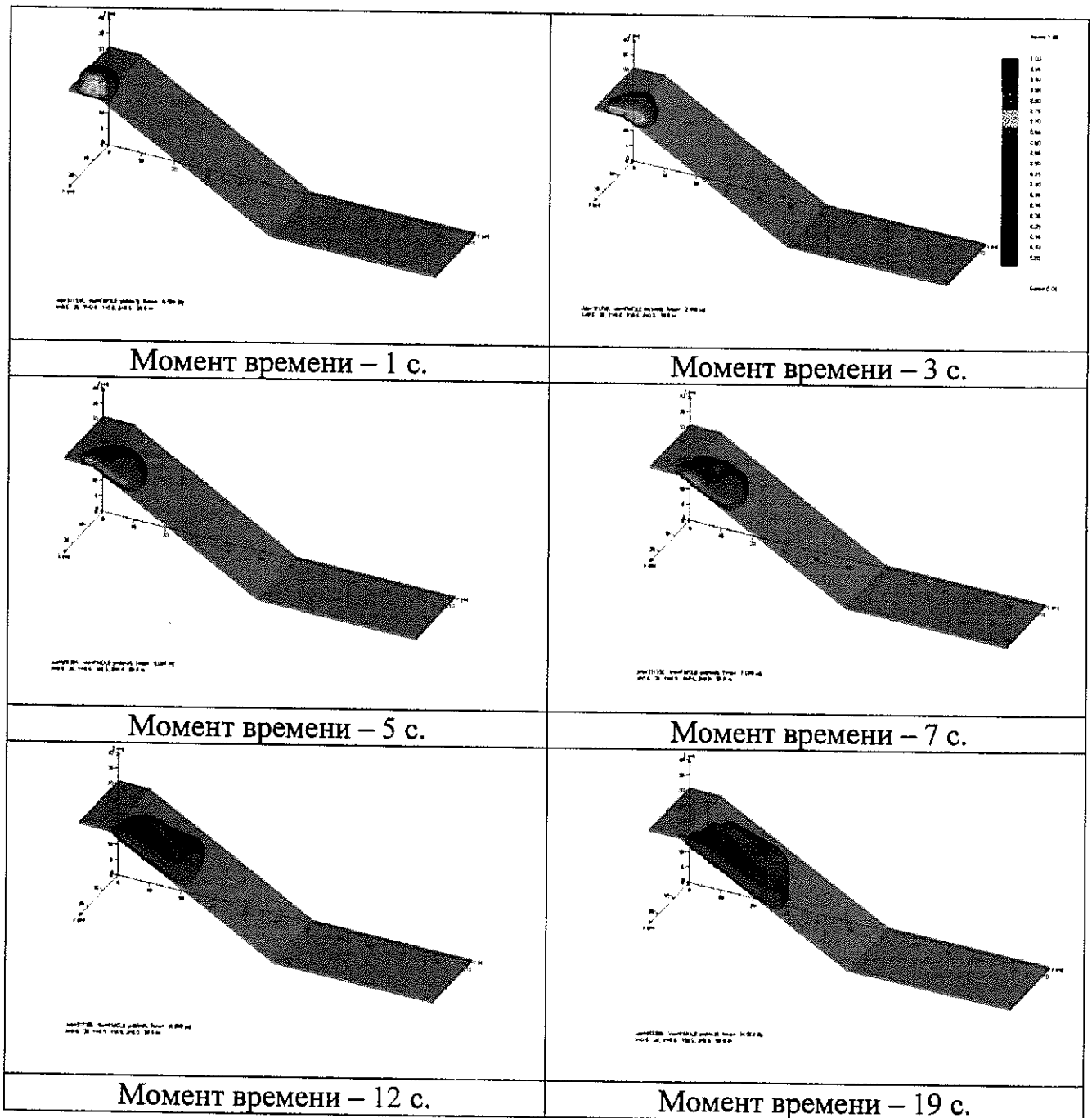


Рисунок 3-3. Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (спуск вниз).

### Пример 4

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

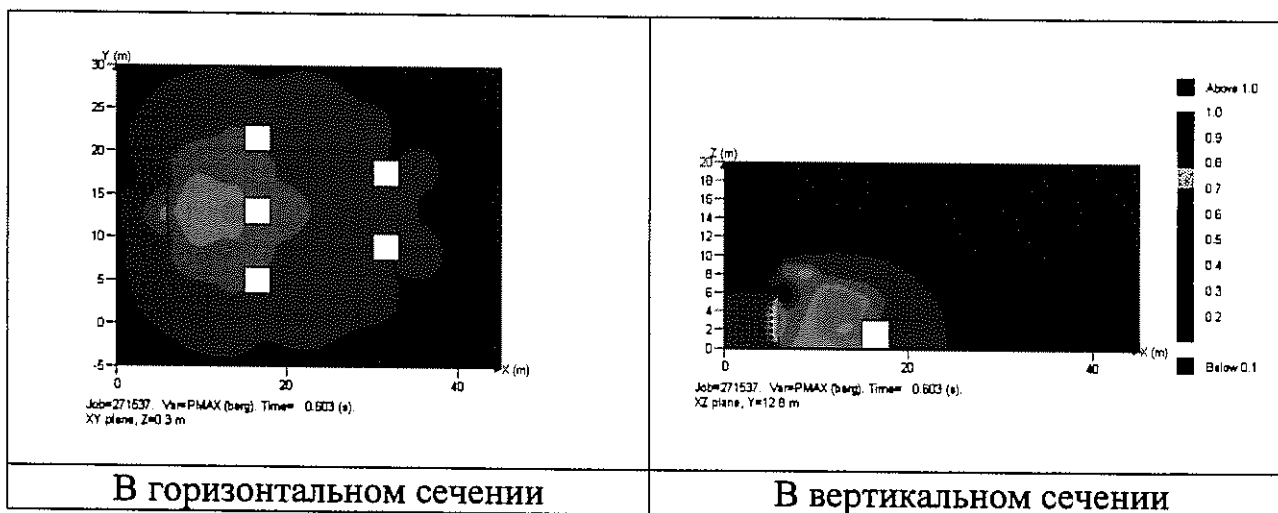


Рисунок 3-4. Распределение давления при взрыве облака ТВС.



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

### Пример 5

В загроможденном производственном модуле произошел взрыв ТВС.

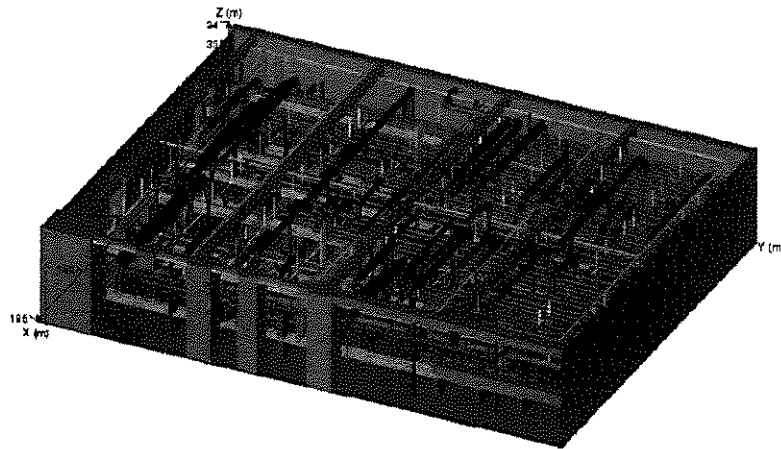


Рисунок 3-6. Схема модуля (направление на север соответствует оси Oy).

Параметры модуля:  $25,5 \times 20,5 \times 5,5$  м.

Объем модуля:  $2875 \text{ м}^3$ .

Площади боковых поверхностей:  $112,75 \text{ м}^2$  (южная/северная стена);  $140,25 \text{ м}^2$  (западная/восточная стена).

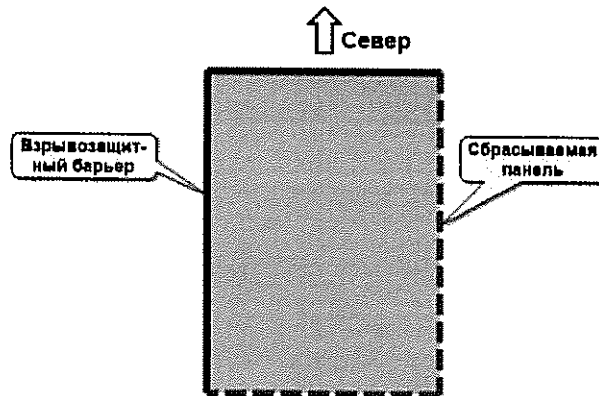


Рисунок 3-7. Конфигурация стен модуля (вид сверху).

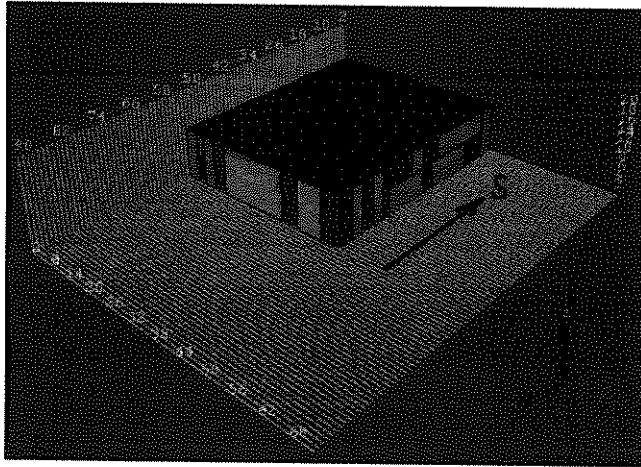


Рисунок 3-8. Моделирование объекта в программном комплексе.

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 –  $87 \text{ м}^2$ .

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

Состав смеси: метан 87,44 %;

этан 6,43%;

пропан 3,13 %;

бутан 2,57 %;

$\text{CO}_2$  0,01 %;

$\text{H}_2\text{O}$  0,01 %.

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

Координаты места воспламенения 1: (6; 5,5; 3);

2: (12; 10, 3);

3: (20; 15; 3).



Таблица № 1

**Сценарии моделирования**

Номер 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

Таблица № 2

**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

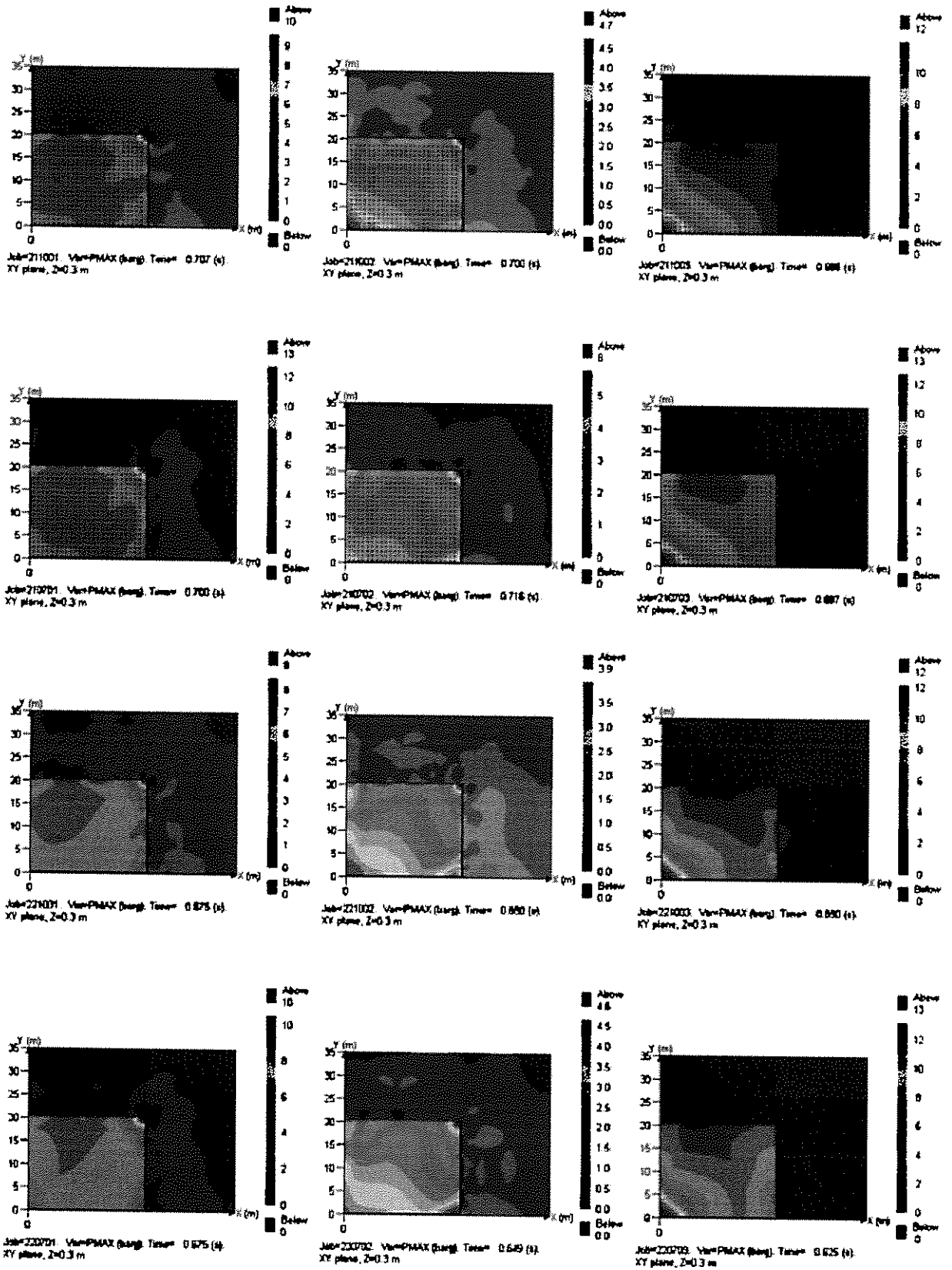


Рисунок 3-9. Распределение давления при взрыве облака ТВС при различных сценариях моделирования.