

## РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ

### "МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ"

УТВЕРЖДЕНО [приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 апреля 2015 г. N 160](#)

Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварий на взрыво-пожароопасных химических производствах" разработано в целях содействия соблюдению требований [федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств"](#), ["Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта"](#) и ["Правила безопасности химически опасных производственных объектов"](#).

В разработке Руководства принимали участие С.Г.Радионова, Б.А.Красных, С.А.Жулина, В.В.Козельский, Г.М.Селезнев, И.С.Ясинский (Ростехнадзор), А.С.Печеркин, М.В.Лисанов, Д.В.Дегтярев, Е.А.Агапова (ЗАО "Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности"), С.И.Сумской (Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"),

Руководство содержит рекомендации по использованию методов вычислительной гидродинамики для расчета зон распространения опасных веществ в атмосфере и оценке параметров воздушных ударных волн при взрывах топливно-воздушных смесей, образующихся при промышленных авариях (в том числе с выбросом опасных веществ в сильно загроможденных пространствах и помещениях), для обеспечения выполнения требований промышленной безопасности при проектировании, строительстве, реконструкции, капитальном ремонте, техническом перевооружении, эксплуатации, консервации и ликвидации опасных производственных объектов химических производств.

#### 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. N 96](#) (зарегистрирован Минюстом России 16 апреля 2013 г., регистрационный N 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. N 306](#) (зарегистрирован Минюстом России 20 августа 2013 г., регистрационный N 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. N 559](#) (зарегистрирован Минюстом России 31 декабря 2013 г., регистрационный N 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 N 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 табл.1.

Таблица 1

Назначение	Документ
1. Расчет параметров ударной волны, зон поражения и разрушения при воспламенении и взрыве облаков топливно-воздушных смесей	<a href="#">Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей"</a>
2. Расчет концентрации, массы ОВ во взрывоопасных пределах и зон поражения при пожаре-вспышке и взрыве ТВС	<a href="#">Руководство по безопасности "Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ"</a>
3. Определение параметров воздействия и зон поражения при горении пролива, огненном шаре, факельном горении	<a href="#">Методика определения величин пожарного риска на производственных объектах</a>
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	<a href="#">СТО Газпром 2-2.3-400-2009</a> "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:

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

Уравнение сохранения импульса:

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

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

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

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

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

Уравнение переноса для энтальпии:

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

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

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

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

$$G_o = C_o \beta_o \rho \sqrt{\mu} |u_i|^2 f_i. \quad (13)$$

14. Диссипацию турбулентной энергии рекомендуется описывать уравнением:

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

где модель плавучести определяется следующим образом:

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

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

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

В уравнениях (10)-(15) используются константы, сведения о которых приведены табл.2 и 3

**Таблица 2**

**Значения коэффициентов модели Лаундера и Спалдинга**

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

**Таблица 3**

**Значения коэффициентов модели турбулентности Прандтля-Шмидта**

$\sigma_h$	$\sigma_{fuel}$	$\sigma_\xi$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_\beta$
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:

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

где  $\rho_0$  и  $T_0$  - плотность и температура среды;

$C_p$ - изобарная теплоемкость;

$k$  - кинетическая энергия турбулентности;

$g$  - гравитационная постоянная;

$H_g$  - поток тепла от поверхности;

$u^*$  - скорость трения.

\*\* Формула и экспликация к ней соответствуют оригиналу. - Примечание изготовителя базы данных.

Масштаб Монины-Обухова (табл.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:

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

Скорость сдвига:

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

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

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

17. В табл.5 приводятся параметры, необходимые для расчета скорости,  $\kappa$  и  $\varepsilon$  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 табл.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:

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

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

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

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

где Н - 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:

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

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

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

Зависимость скорости ламинарного горения от давления:

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

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

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

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,

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

При заданном пределе затухания  $\chi_q = 0,05$  получено следующее соотношение между коэффициентом диффузии  $D$  и безразмерной скоростью реакции  $W$ :

$$WD = 1,37 S_u^2 = W^* D^*, \quad (36)$$

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:

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



где  $\delta_H$  - функция Хевисайда.

25\*. Примеры моделирования аварий с использованием методов вычислительной гидродинамики приведены в [приложении N 3](#) к настоящему Руководству.

\* Нумерация соответствует оригиналу. - Примечание изготовителя базы данных.

**Приложение N 1**  
к [Руководству](#)

### Список сокращений и обозначений

В настоящем Руководстве используются 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,  $m^2 c^{-3}$ ;

$\xi$  - доля компонента смеси;

$\mu$  - динамическая вязкость, Па·с;

$\mu_t$  - динамическая турбулентная вязкость, Па·с;

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

$\rho$  - плотность,  $kg \cdot m^{-3}$ ;

\* Текст документа соответствует оригиналу. - Примечание изготовителя базы данных.

$\rho_a$  - плотность окружающей среды,  $kg \cdot m^{-3}$ ;

$\sigma_\varepsilon$ ,  $\sigma_\xi$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_{fuel}$ ,  $\sigma_h$  - турбулентные числа Прандтля-Шмидта,

$\sigma_{ij}$  - компонента тензора напряжений,  $N \cdot m^{-2}$ ;

$\chi$  - 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 теплоемкость 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;

$F_{wi}$  - сопротивление потока стенкам;

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

$h$  - энтальпия, Дж·кг<sup>-1</sup>;

$H_g$  - поток тепла от поверхности земли;

$H$  - коэффициент теплопередачи;

$k$  - кинетическая турбулентная энергия, м<sup>2</sup>·с<sup>-2</sup>\*;

---

\* Текст документа соответствует оригиналу. - Примечание изготовителя базы данных.

$L$  - 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, кг·м<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>;

$S_L$  - ламинарная скорость пламени, м·с<sup>-1</sup>;

$S_T$  - турбулентная скорость пламени, м·с<sup>-1</sup>;

$S_{QL}$  - квазиламинарная скорость пламени, м·с<sup>-1</sup>;

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, м<sup>-3\*</sup>;

\* Обозначение соответствует оригиналу. - Примечание изготовителя базы данных.

$x_j$  - линейная координата, м;

Y - массовая доля;

z - высота над землей, м;

$z_0$  - коэффициент шероховатости, м.

**Приложение N 2**  
к [Руководству](#)

### 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;

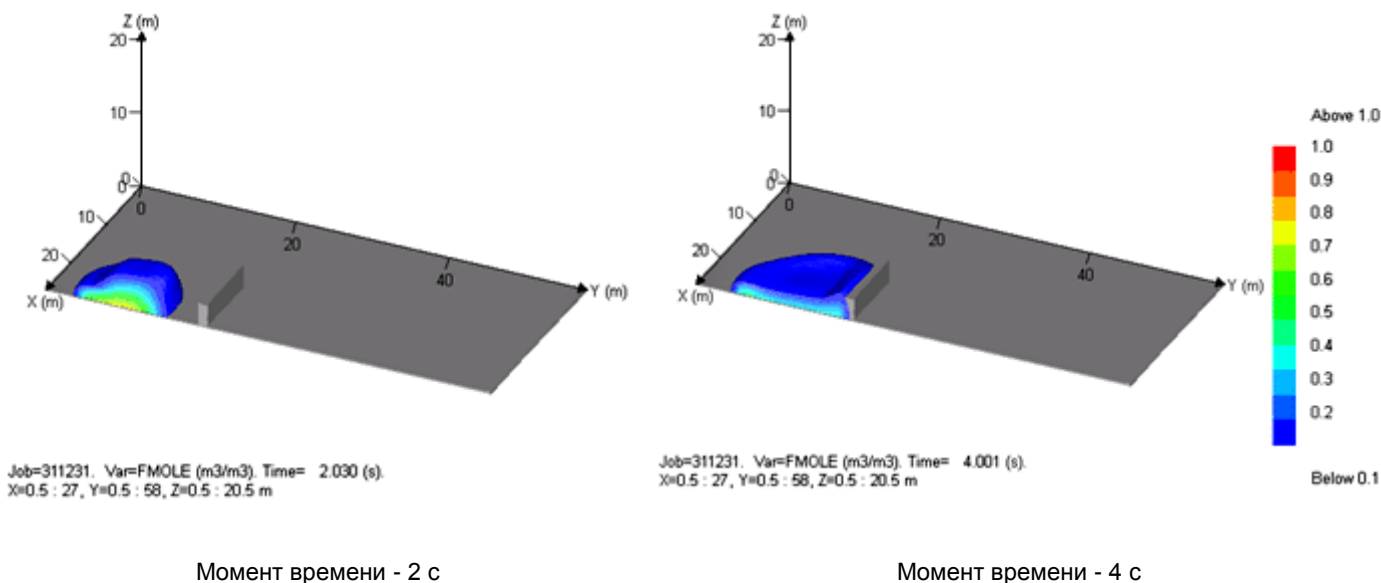
**опасные вещества** - воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные вещества и вещества, представляющие опасность для окружающей природной среды, указанные в [приложении 1 к Федеральному закону от 21 июля 1997 г. N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"](#).

### Приложение N 3 к [Руководству](#)

## 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°C, 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.



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

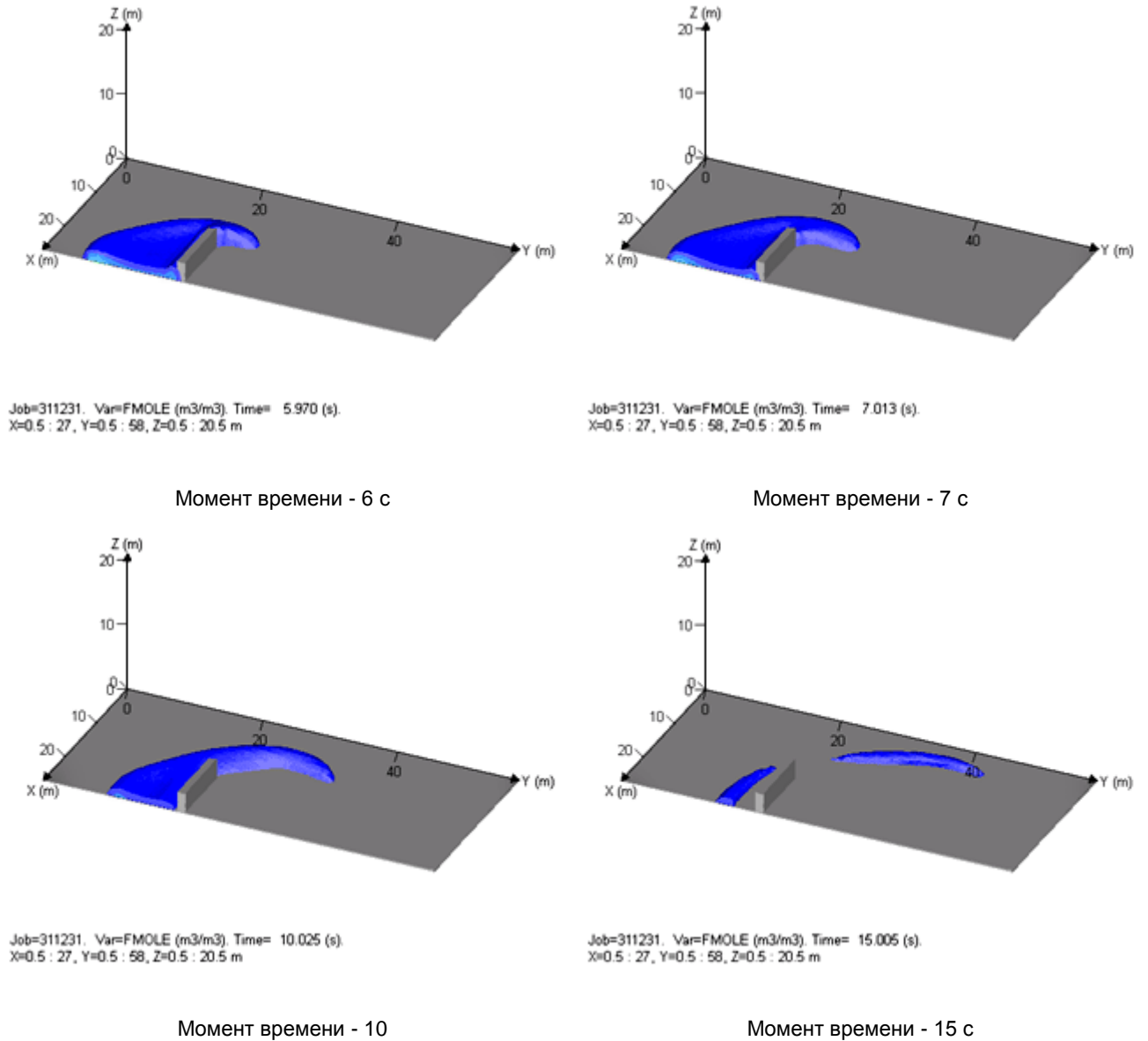
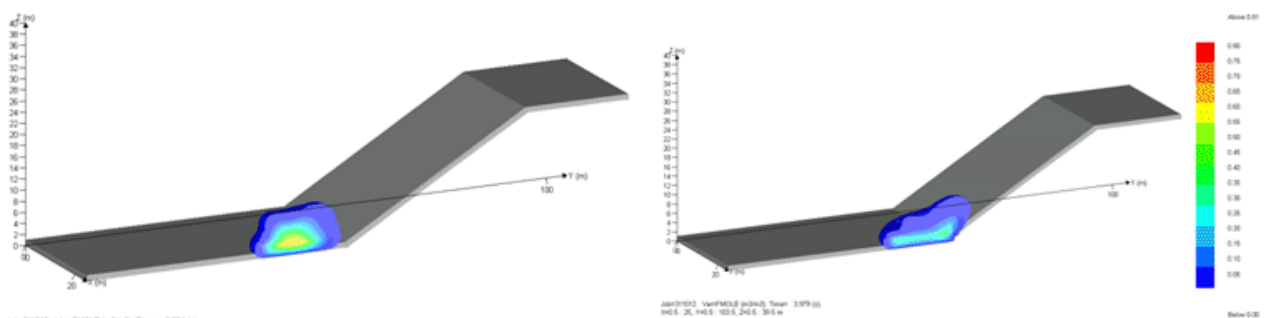
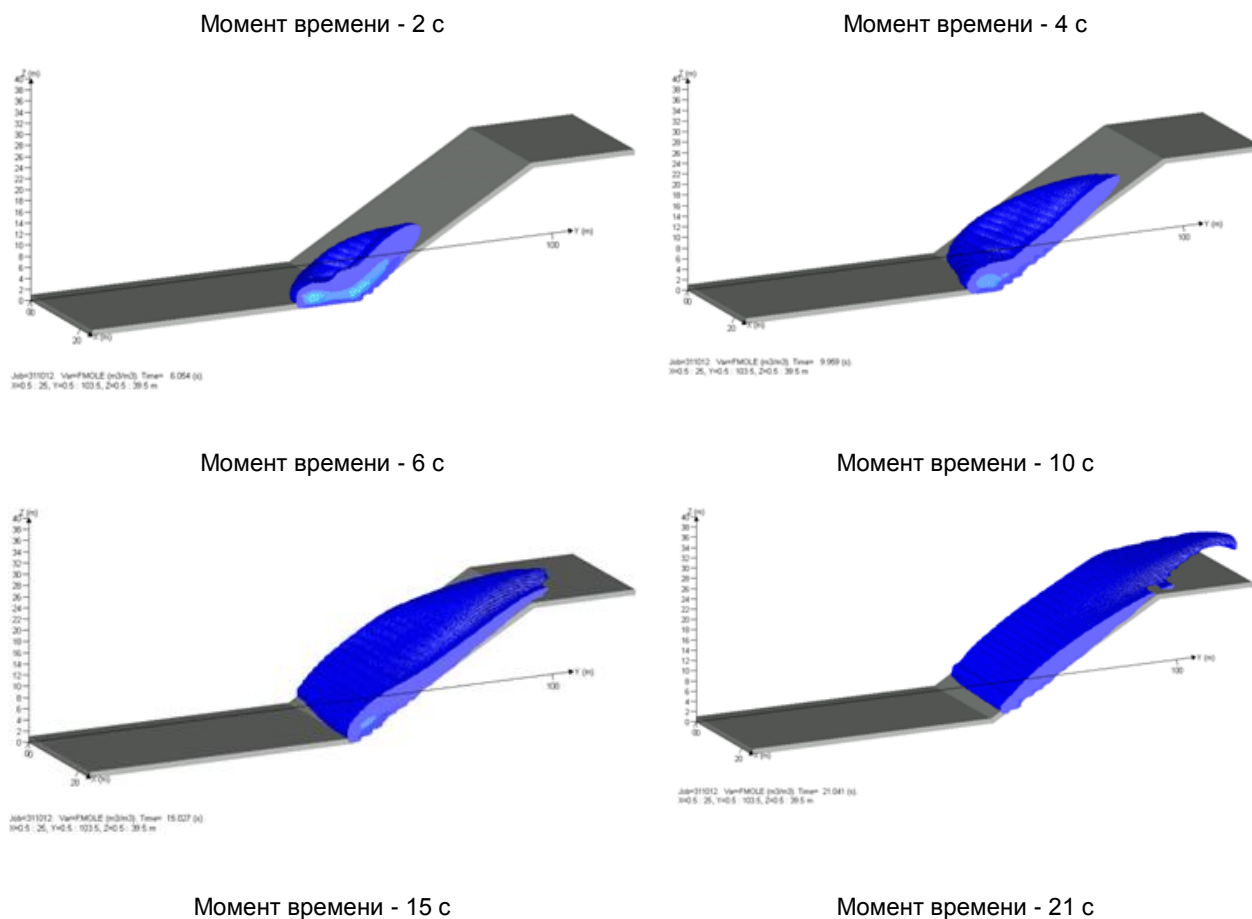


Рис.3-1. Окончание

### Пример 2

В результате полного разрушения емкости произошел выброс пропана в газовой фазе. Скорость ветра 4 м/с, температура окружающей среды 20°C, 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.

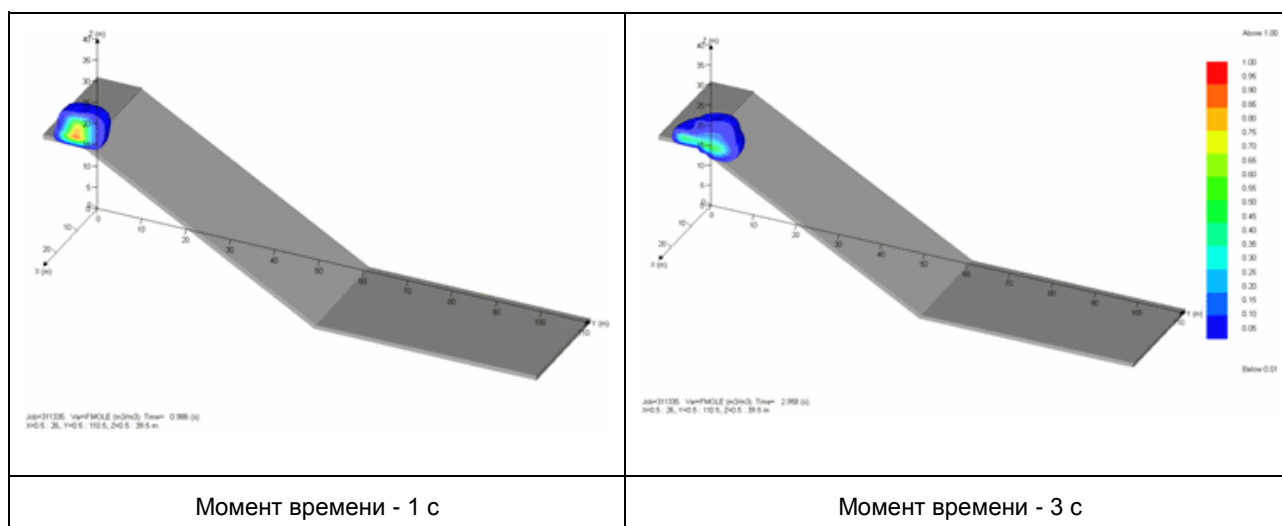


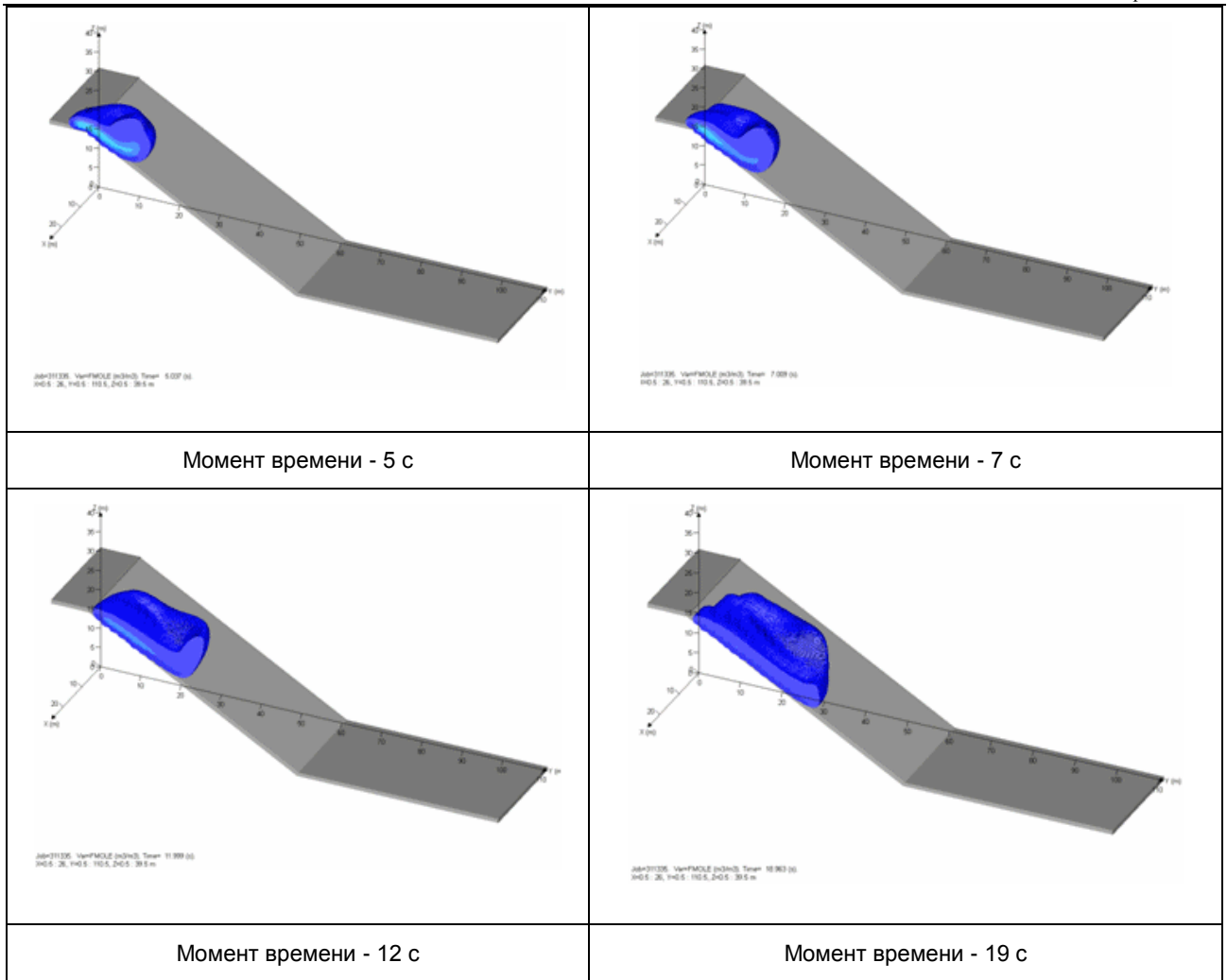


**Рис.3-2.** Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (подъем в горку)

**Пример 3**

В результате полного разрушения емкости произошел выброс пропана в газовой фазе. Скорость ветра 4 м/с, температура окружающей среды 20°C, 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.

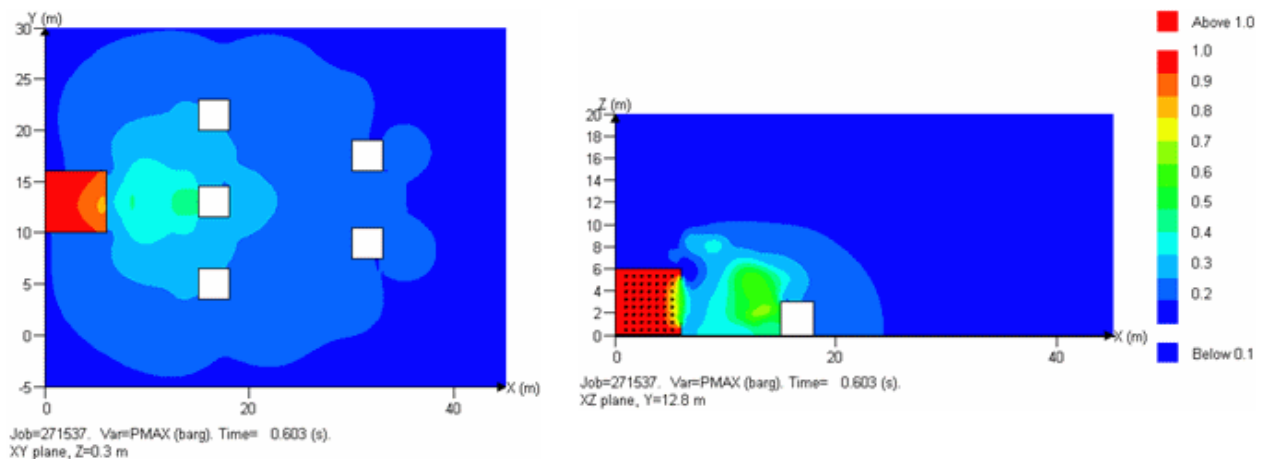




**Рис.3-3.** Профили распространения облака пропана по направлению ветра в различные моменты времени (спуск вниз)

**Пример 4**

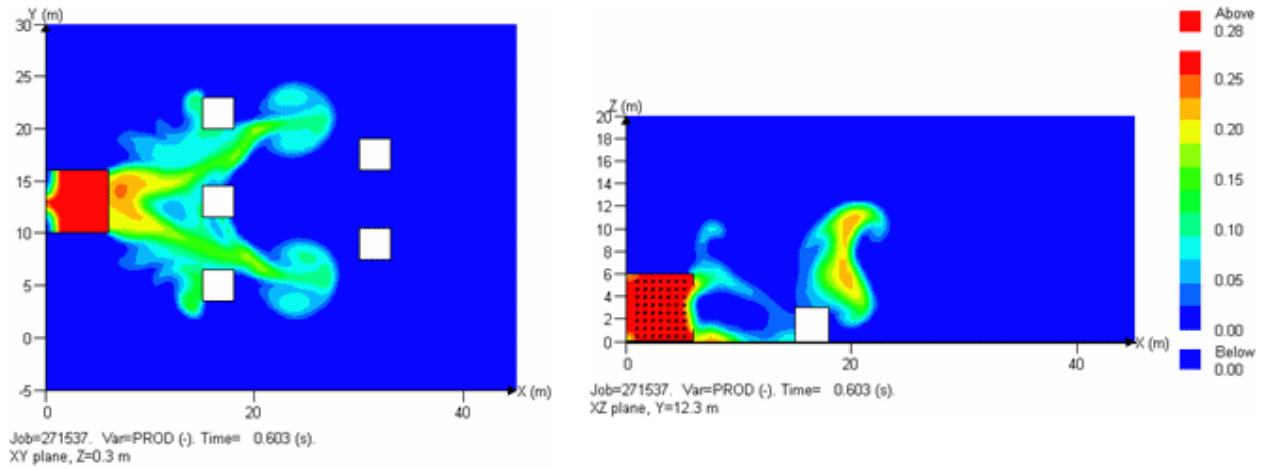
В прямоугольном ангаре, заполненном трубами, произошел взрыв ТВС. На расстоянии 10 м и 25 м от ангара расположены квадратные препятствия. На рис.3-4 приведены распределения давления при взрыве облака ТВС. На рис.3-5 приведены распределения продуктов горения при взрыве облака ТВС.



В горизонтальном сечении

В вертикальном сечении

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



В горизонтальном сечении

В вертикальном сечении

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

### Пример 5

В загроможденном производственном модуле произошел взрыв ТВС.

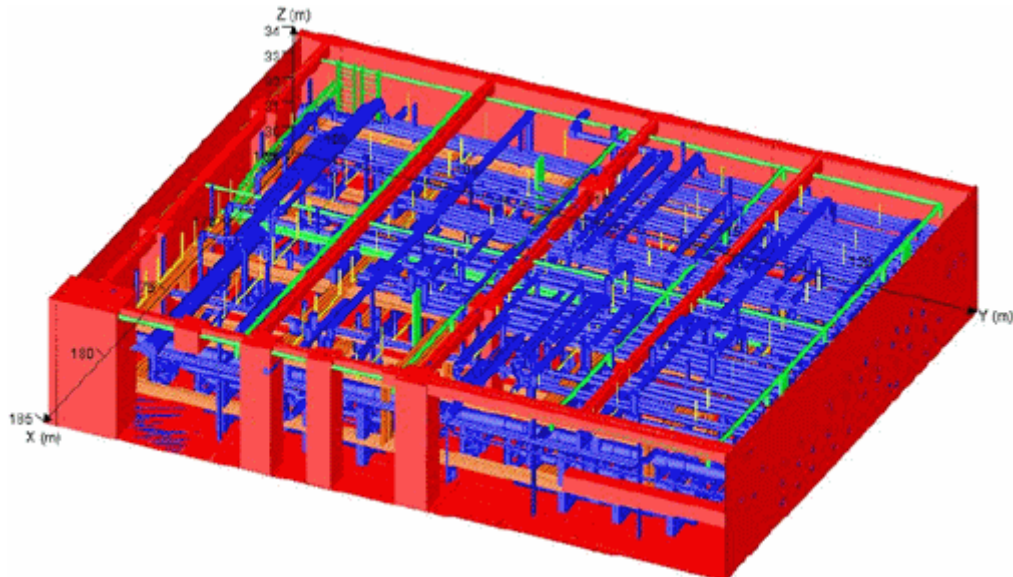


Рис.3-6. Схема модуля (направление на север соответствует оси Oy)  
Параметры модуля: 25,5x20,5x5,5 м

Объем модуля: 2875 м<sup>3</sup>



Площади боковых поверхностей: 112,75 м<sup>2</sup> (южная/северная стена), 140,25 м<sup>2</sup> (западная/восточная стена).

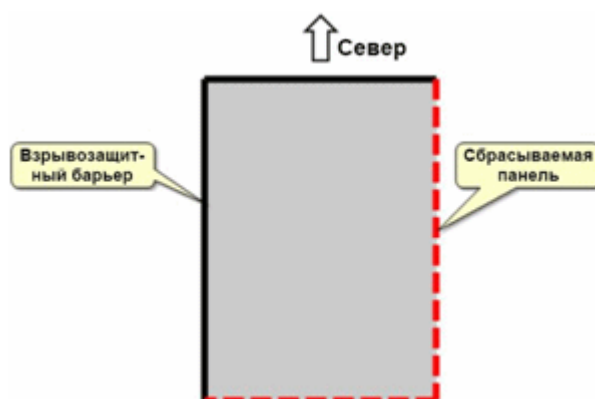


Рис.3-7. Конфигурация стен модуля (вид сверху)

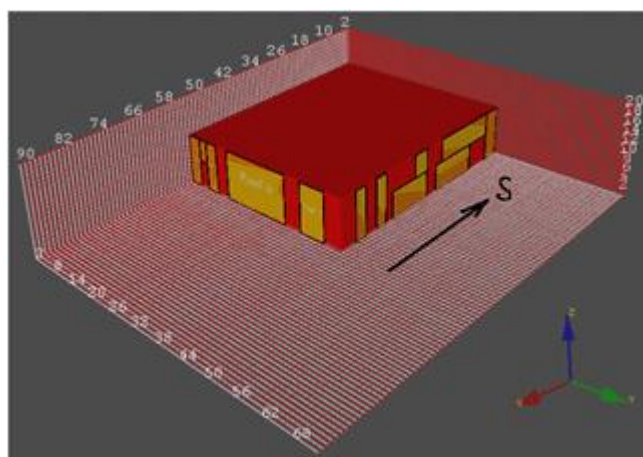


Рис.3-8. Моделирование объекта в программном комплексе

На южной и восточной стенах расположены легкосбрасываемые конструкции, которые составляют 62-68% площади соответствующей боковой стены. На южной стороне их площадь составляет 76,75 м<sup>2</sup>, а на восточной 87 м<sup>2</sup>.

Легкосбрасываемые конструкции срабатывают при избыточном давлении 0,05 атм.

Состав смеси: метан 87,44%;

этан 6,43%;

пропан 3,13%;

бутан 2,57%;

CO<sub>2</sub> 0,01%;

H<sub>2</sub>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 3-1**

**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

**Таблица 3-2**

**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%
Загроможденность 1	1	10	13
	2	4,7	6
	3	12	13
Загроможденность 2	1	8	10

	2	3,9	4,6
	3	12	13

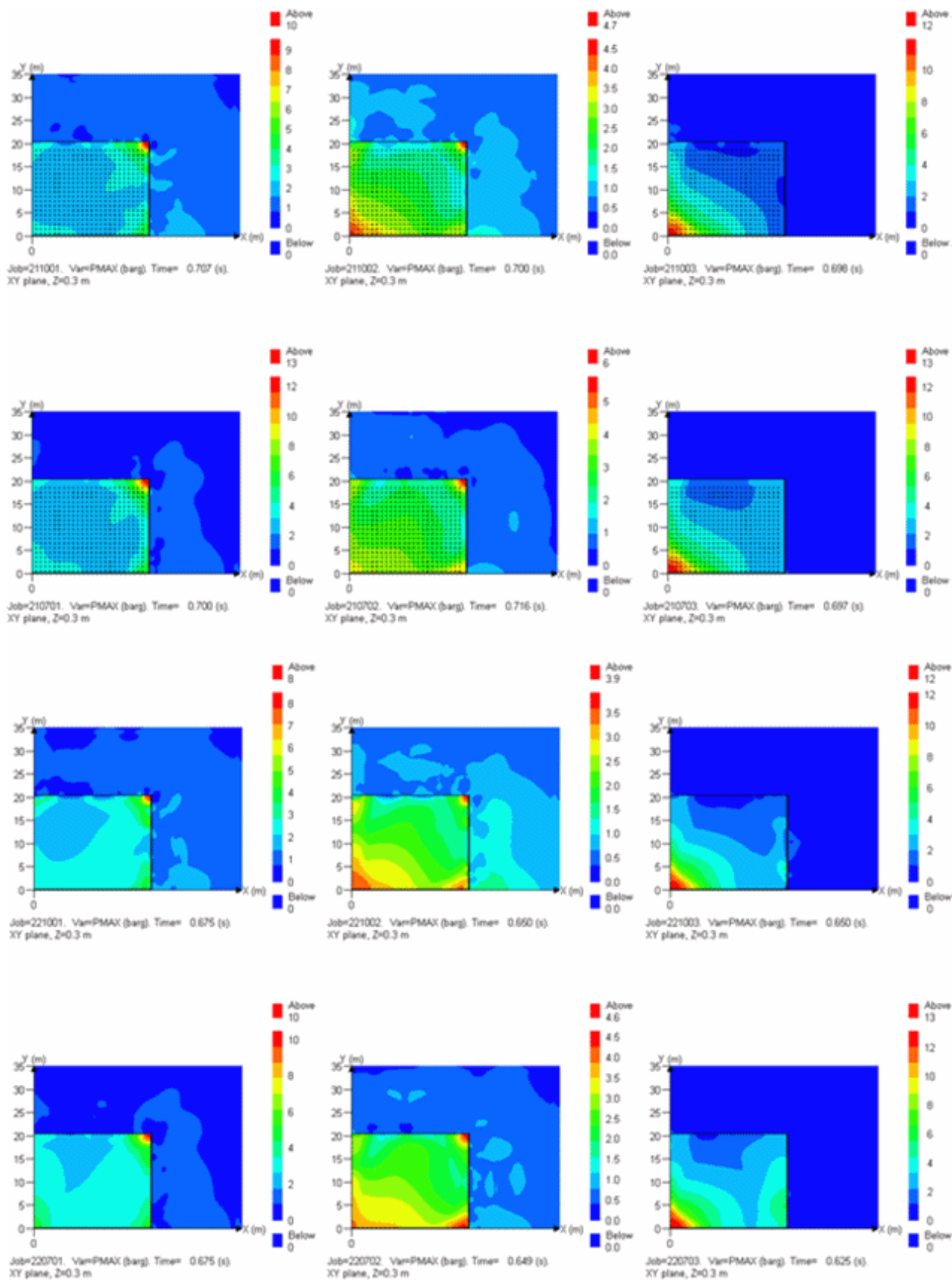


Рис.3-9. Распределение давления при взрыве облака ТВС при различных сценариях моделирования

Электронный текст документа  
подготовлен АО "Кодекс" и сверен по:

---

официальное издание

Нормативные документы в сфере деятельности

Федеральной службы по экологическому,

технологическому и атомному надзору.

Серия 09. Документы по безопасности,

надзорной и разрешительной деятельности в

химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей

промышленности. Выпуск 43. Руководство по безопасности

"Методика оценки последствий аварий на

взрывопожароопасных химических производствах" -

М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016

[Руководство по безопасности. Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах \(Источник: ИСС "ТЕХЭКСПЕРТ"\)](#)