**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. № 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. № 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 табл.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:

.                                                         (1)

Уравнение сохранения импульса:

        (2)

где - тензор напряжений;

- сопротивление потока стенкам;

- сопротивление потока препятствиям, чей размер меньше одной ячейки вычислительной сетки:

.

Уравнение переноса для энтальпии:

.                          (3)

Уравнение переноса для массовой доли топлива:

.                     (4)

Уравнение переноса для доли смешения:

.                                    (5)

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

Уравнение турбулентной кинетической энергии:

.                       (6)

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии:

.                  (7)

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

,                                        (8)

где эффективная вязкость определяется следующим образом:

,                                                             (9)

где - турбулентная или вихревая вязкость.

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

,                                                      (10)

где

;                                                                 (11)

;                                                           (12)

.                                                            (13)

14. Диссипацию турбулентной энергии рекомендуется описывать уравнением:

,                                                      (14)

где модель плавучести определяется следующим образом:

.

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

.                                         (15)

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

***Таблица 2***

**Значения коэффициентов модели Лаундера и Спалдинга**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |
| 0,09 | 1,44 | 0,92 | 0,8 |

***Таблица 3***

**Значения коэффициентов модели турбулентности Прандтля-Шмидта**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
| 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:

,                                                               (16)\*\*

где и Т - плотность и температура среды;

- изобарная теплоемкость;

*k* - кинетическая энергия турбулентности;

- гравитационная постоянная;

- поток тепла от поверхности;

- скорость трения.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

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

Масштаб Монина-Обухова (табл.4) является мерой стабильности атмосферных пограничных слоев.

***Таблица 4***

**Масштабы Монина-Обухова и классы устойчивости**

|  |  |
| --- | --- |
| Масштаб Монина-Обухова | Устойчивость |
| Малый отрицательный -100<*L*<0 | Очень неустойчивая |
| Большой отрицательный -10<*L*<100 | Неустойчивая |
| Очень большой |*L*|>10 | Нейтральная |
| Большой положительный 10<*L*<10 | 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:

                                    (17)

Скорость сдвига:

,                                              (18)

где определяется по формуле:

                   (19)

где

.                                                               (20)

17. В табл.5 приводятся параметры, необходимые для расчета скорости, и в пограничных слоях.

***Таблица 5***

**Масштабы Монина-Обухова и классы устойчивости**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Класс Паскуилла | Устойчивость | Высота пограничного слоя | , м | , м |
| А | Неустойчивая | 1500 м | 33,162 | 1117 |
| В | Неустойчивая | 1500 м | 33,258 | 1146 |
| С | Слабо неустойчивая | 1000 м | 51,787 | 1,324 |
| D | Нейтральная |  | 1 | 0 |
| Е | Слабо устойчивая |  | -48,33 | 1,262 |
| F | Устойчивая |  | 31,323 | 19,36 |

По приведенным данным из табл.5 масштаб Монина-Обухова рассчитывается следующим образом:

.                                                                   (21)

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

                             (22)

                                     (23)

где - скорость передачи тепла:

,                                                             (24)

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

19. Для нейтральных и устойчивых пограничных слоев:

                                            (25)

                         (26)

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

Зависимость скорости ламинарного горения от давления:

.                                                                (27)

Для квазиламинарного режима горения:

,                                                (28)

где *R* - газовая постоянная для конкретного вещества или смеси:

,                                                                      (29)

где - универсальная газовая постоянная;

*М* - молярная масса.

21. Турбулентную скорость пламени рекомендуется определять по формуле:

.                                                 (30)

22. Скорость пламени рекомендуется определять по следующему соотношению:

.                                                        (31)

23. Коэффициент диффузии из уравнения переноса топлива определяется по формуле

.                                                                     (32)

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

;                                                              (33)

,                                                              (34)

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

- перемешивание,

.                                                              (35)

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

,                                                        (36)

где

;                                                                  (37)

.                                                                (38)

Скорость реакции топлива моделируется следующим образом:

,                                         (39)

где - функция Хевисайда.

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

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

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

***Приложение № 1***

*к* Руководству

**Список сокращений и обозначений**

В настоящем Руководстве используются следующие обозначения и сокращения:

ОВ - опасное вещество;

ТВС - топливно-воздушная смесь;

- объемная пористость;

- поверхностная пористость в *i*-м направлении;

- показатель степени давления для ламинарного горения;

- дельта функция, 1, если *i=j* и 0, если *i**j;*

- функция Хевисайда, тэта-функция; 1, если *а**b* и 0, если *а<b*;

- диссипация турбулентной кинетической энергии, *м**с*;

- доля компонента смеси;

- динамическая вязкость, Па·с;

- динамическая турбулентная вязкость, Па·с;

- эффективная вязкость, Па·с, ;

*Р* - плотность, кг·м\*;

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

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

- плотность окружающей среды, кг·м;

, , , , , - турбулентные числа Прандтля-Шмидта,

- компонента тензора напряжений, Н·м;

- прогрессная переменная, локализующая фронт пламени,

;

- предел затухания;

- скорость передачи тепла;

 - длина контрольного объема в первом слое над поверхностью земли;

, , , - константы модели турбулентности, как правило, **=1,44, **=1,92, *=*0,8; **=0,09;

**- изобарная теплоемкость воздуха;

- вектор ускорения свободного падения;

- компонента вектора ускорения свободного падения;

- гравитационная постоянная;

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

- сопротивление потока стенкам;

- сопротивление потока препятствиям, чей размер меньше одной ячейки вычислительной сетки;

*h* - энтальпия, Дж·кг;

- поток тепла от поверхности земли;

*Н* - коэффициент теплопередачи;

*k* - кинетическая турбулентная энергия, м·с\*;

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

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

*L* - масштаб Монина-Обухова, м;

 - перемешивание;

*М* - молярная масса;

*m* - масса, кг;

- скорость изменения массы, кг·с;

*р* - абсолютное давление, Па;

**- среднее давление, Па;

- член, описывающий диссипацию кинетической турбулентной энергии;

- член, описывающий генерацию кинетической турбулентной энергии;

*Q* - теплота, Дж;

- скорость потока тепла, Дж·с;

R - газовая постоянная смеси, Дж·кг·K;

- универсальная газовая постоянная, Дж·кг·K;

- скорость реакции топлива, кг·м·с;

- ламинарная скорость пламени, м·с;

- турбулентная скорость пламени, м·с;

- квазиламинарная скорость пламени, м·с;

*t* - время, с;

- температура окружающей среды, K;

- вектор скорости;

- компонент вектора скорости, м/с;

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

- характеристическая скорость, м/с;

*V* - объем, м\*;

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

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

- линейная координата, м;

*Y* - массовая доля;

*z* - высота над землей, м;

- коэффициент шероховатости, м.

***Приложение № 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. № 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов".

***Приложение № 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°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 с  | Момент времени - 4 с  |

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

|  |  |
| --- | --- |
|    |    |
| Момент времени - 6 с | Момент времени - 7 с |
|    |    |
| Момент времени - 10  | Момент времени - 15 с  |

**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°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 с | Момент времени - 4 с |
|    |    |
| Момент времени - 6 с | Момент времени - 10 с |
|    |    |
| Момент времени - 15 с  | Момент времени - 21 с |

**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°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 с | Момент времени - 3 с |
|    |    |
| Момент времени - 5 с | Момент времени - 7 с |
|    |    |
| Момент времени - 12 с  | Момент времени - 19 с  |

**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 Оу)

Параметры модуля: 25,5x20,5x5,5 м

Объем модуля: 2875 м

Площади боковых поверхностей: 112,75 м (южная/северная стена), 140,25 м (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, а на восточной 87 м.

Легкосбрасываемые конструкции срабатывают при избыточном давлении 0,05 атм.

Состав смеси: метан 87,44%;

этан 6,43%;

пропан 3,13%;

бутан 2,57%;

 0,01%;

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** **при различных сценариях моделирования**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Место воспламенения  | Значение избыточного давления , 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