



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

П Р И К А З

28 ноября 2022 г.

№ 412

Москва

Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»

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 аварийных взрывов топливно-воздушных смесей».
2. Признать утратившим силу приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г. № 137 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей».

Руководитель

А.В. Трёмбицкий

УТВЕРЖДЕНО
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «28» ноября 2022 г. № 412

**РУКОВОДСТВО ПО БЕЗОПАСНОСТИ
«МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ
ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ»**

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (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 (зарегистрирован Минюстом России 25 декабря 2020 г., регистрационный № 61808), и 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).

2. Руководство содержит рекомендации к 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 и не является нормативным правовым актом. Руководство содержит рекомендации по определению вероятных степеней поражения людей и степени

повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами облаков топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах.

3. Организации, осуществляющие оценку последствий аварий со взрывом топливно-воздушных смесей на опасных производственных объектах, могут использовать иные обоснованные способы и методы, чем те, которые указаны в Руководстве. В частности, подтвержденные практикой достоверные методы вычислительной газодинамики, в том числе методы моделирования горения и детонации, а также распространения волн давления в трехмерной постановке.

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

II. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОЦЕНКЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВОВ ТВС

5. Для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при взрывах ТВС рекомендуется рассматривать частичную разгерметизацию и полное разрушение оборудования, содержащего горючее вещество в газообразной или жидкой фазе, выброс этого вещества в окружающую среду, образование и дрейф облаков ТВС, формирование капельных включений в облако, инициирование ТВС, взрывное превращение (горение или детонация) в облаках ТВС, распространение воздушных волн в окружающем пространстве.

6. Параметры выброса горючего вещества в окружающую среду определяются с учетом специфики аварийного оборудования на основе методик, изложенных в руководствах по безопасности Ростехнадзора.

7. Характеристики образования и пространственно-временные поля концентрации горючих веществ при дрейфе облаков ТВС определяются с использованием методик, изложенных в Руководстве по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утвержденном приказом Ростехнадзора от 2 ноября 2022 г. № 385 (далее - «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ»), Руководстве по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах»,

утвержденном приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2022 г. № 415 (далее – «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах»).

В результате моделирования определяется зона возможного воспламенения облаков ТВС как область с концентрацией горючего не менее нижнего концентрационного предела распространения пламени (далее – НКГР), а зона появления открытого пламени – как область с концентрацией не менее $0,5 \cdot \text{НКГР}$.

8. Моделирование процессов инициирования облака ТВС, взрывного превращения (горение или детонация) в облаке ТВС, распространения воздушных волн в окружающем пространстве рекомендуется выполнять с использованием следующих подходов:

А. Численное моделирование с использованием методов вычислительной гидродинамики согласно рекомендациям Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах» в трехмерной постановке;

В. Параметрические модели взрыва ТВС (раздел III);

С. Одномерные газодинамические модели взрыва ТВС (раздел IV).

9. В качестве исходных данных для выполнения расчета с использованием методов вычислительной гидродинамики в трехмерной постановке выступают: трехмерная модель окружающего пространства, параметры механического движения ТВС (в частности уровень турбулентности), пространственно-временные поля концентраций горючего, определенные на стадии моделирования образования и дрейфа облаков ТВС, параметры источников зажигания облака (облаков) ТВС.

10. Рекомендуется геометрические характеристики окружающего пространства разделять на виды в соответствии со степенью его загроможденности в связи с тем, что характер окружающего пространства (его ограниченность и загроможденность) в значительной степени определяет скорость взрывного превращения облака ТВС:

Вид 1. Наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно формирование турбулентных струй продуктов сгорания с размером не менее трех размеров детонационной ячейки для данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси неизвестен, то минимальный характерный размер турбулентных струй рекомендуется принимать равным 5 см для веществ класса 1; 20 см – для веществ класса 2; 50 см – для веществ класса 3 и 150 см – для веществ класса 4.

Вид 2. Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий.

Вид 3. Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк.

Вид 4. Слабо загроможденное и свободное пространство.

11. При моделировании сгорания облаков ТВС, целиком находящихся в слабо загроможденном пространстве (вид 4), допускается рассматривать последствия в следующем порядке:

- смертельное поражение людей на открытом пространстве от воздействия волны давления не рассматривается;

- в качестве основного смертельного поражающего фактора для людей на открытом пространстве рассматривается тепловое воздействие в результате горения облаков ТВС;

- при этом несмертельное поражение людей на открытом пространстве от воздействия волны давления учитывается в спектре рассматриваемых уровней поражения;

- для учета взрывоустойчивости зданий и сооружений рассматривается барическое воздействие волн давления на здания и сооружения, в т. ч. для учета гибели и травмирования людей, находящихся в этих зданиях и сооружениях.

12. В зоне возможного воспламенения облака выделяются области видов 1–4. При отсутствии данных об источниках воспламенения облаков ТВС такие

источники учитываются в центре каждой области загромождения. Взрыв ТВС моделируется от каждого источника воспламенения отдельно.

13. С целью расчета последствий взрыва допускается упрощенное представление распределения концентраций горючего в облаках ТВС внутри областей видов 1–4 как равномерно распределенного по области горючего в стехиометрической концентрации.

14. При отсутствии данных о вероятности появления источников воспламенения облаков ТВС допускается принимать их равновероятными.

III. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Общие положения по применению параметрической модели

15. В образовании облака ТВС рекомендуется рассматривать горючее вещество одного вида, а для смеси нескольких горючих веществ характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

16. Для расчета параметров ударных волн при взрыве облака ТВС рекомендуется учитывать следующие исходные данные:

- характеристики горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС;
- агрегатное состояние ТВС (газовое или гетерогенное);
- средняя концентрация горючего вещества в смеси c_2 ;
- стехиометрическая концентрация горючего газа с воздухом $c_{ст}$;
- масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, M_2 ;
- удельная теплота сгорания горючего вещества q_2 ;
- информация об окружающем пространстве (вид окружающего пространства, пункт 10).

17. При оценке последствий аварийных взрывов ТВС можно рассматривать (с определенным консерватизмом) облако в целом. Взрыв ТВС моделируется в момент времени, когда достигается максимальная масса горючего во взрывоопасных пределах во всем облаке. Центр взрыва в этом

случае полагается в центре масс облаков ТВС, а загроможденность пространства определяется по наихудшему с точки зрения последствий взрыва ТВС виду загромождения в пределах зоны возможного воспламенения облаков ТВС.

18. В случае если в облаке реализуется не детонационный, а дефлаграционный режим энерговыделения, то для оценки последствий можно использовать более точный подход. Этот подход исходит из тех соображений, что при дефлаграционном горении с переменной скоростью за генерацию ударных волн отвечает дефлаграционное горение с наибольшей скоростью, последующее же сгорание облака с более низкой скоростью не вносит в уже сгенерированные волны давления существенного вклада. Это означает, что если в облаке существует область с высокой скоростью горения (в силу высокой загроможденности пространства) и граничащая с ней область с невысокой скоростью горения, то процесс будет развиваться следующим образом: при сгорании части облака с высокой скоростью генерируется волна давления, после же перехода горения в слабозагроможденную область пространства и сброса скорости горения генерация волны давления становится пренебрежимой по сравнению с предыдущей стадией горения. При этом однако надо учитывать возможность нового ускорения пламени, если оно вновь переходит в область с высокой загроможденностью, что может способствовать усилению волн давления. Таким образом, оценку последствий аварийных взрывов ТВС можно проводить, учитывая только сгорание объемов при высокой скорости дефлаграции. В этом случае для более точных оценок последствий аварийных взрывов ТВС можно использовать алгоритм расчета последствий аварийных взрывов ТВС, который включает следующие этапы:

18.1. Определение области возможных взрывов ТВС путем расчета зоны, в которой возможны появления концентрации не ниже НКПР, в заданных условиях аварии.

18.2. Определение ожидаемого режима взрывного превращения ТВС для каждой области загромождения. Если для какого-либо объема реализуется

детонационный режим взрывного превращения, то при оценке последствий этот режим рассматривается как единственный для всего облака в целом.

18.3. Выделение в области возможных взрывов ТВС областей загроможденности 1–3 видов (для выделения таких областей рекомендуется использовать прямоугольные параллелепипеды). При этом, если области загромождения 1–3 вида разделены областями 4 вида, то эти области могут рассматриваться отдельно только в случае, если:

имеет место только дефлаграция (если в облаке имеет место детонация, то области отдельно рассматриваться не должны);

минимальное расстояние между областями загромождения 1-3 больше предельно допустимой величины, определяемой на основе характерного размера соответствующей области.

Под характерным размером загроможденной области $L_{\text{загр}}$ подразумевается её максимальная протяженность по длине или высоте, или ширине. Области объединяются, если расстояние между объемами меньше $k_0 L_{\text{загр}}$,

где $k_0 = 0,5$, если избыточное давление, возникающее при взрыве в рассматриваемой загроможденной области, больше 100 кПа;

$k_0 = 0,25$, если избыточное давление, возникающее при взрыве в рассматриваемой загроможденной области, меньше 10 кПа;

k_0 линейно интерполируется между 0,25 и 0,5 в остальных случаях.

Вид загромождения для объединенной области определяется по наибольшему среди объединяемых областей. Таким образом, для одного дрейфующего облака решается в общем случае несколько задач о взрывах различных частей облака. При этом итоговая опасность оценивается по уровню воздействия от каждого взрыва, но не менее уровня воздействия взрыва всего дрейфующего облака при условии его расположения в пространстве вида 4.

18.4. Определение масс горючего вещества, содержащегося в облаке ТВС в концентрационных пределах воспламенения, в каждой области загромождения (в т. ч. в полученных путем объединения областей).

18.5. Определение эффективного энергозапаса ТВС для каждой области загромождения (в т. ч. в полученных путем объединения областей).

18.6. Определение отдельно центра взрыва как центра масс для каждой области загромождения (в т. ч. в полученной путем объединения нескольких областей).

18.7. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн для каждой области загромождения отдельно (в т. ч. в полученных путем объединения областей).

18.8. Определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки.

18.9. Оценка поражающего воздействия от различных вариантов взрывов ТВС.

19. Эффективный энергозапас горючей смеси в пределах области загромождения (здесь и далее приведены зависимости для расчета конкретного варианта взрыва ТВС в пределах области загромождения) определяется по соотношению:

$$E = M_{\Gamma} \cdot q_{\Gamma} \text{ при } c_{\Gamma} \leq c_{\text{ст}} \quad (1)$$

или

$$E = M_{\Gamma} \cdot q_{\Gamma} \cdot c_{\text{ст}} / c_{\Gamma} \text{ при } c_{\Gamma} > c_{\text{ст}}$$

20. При расчете параметров взрыва облака ТВС, лежащего на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается. Для оценки объема газового облака ТВС можно воспользоваться простым соотношением:

$$V = M_{\Gamma} / c_{\text{ст}} \quad (2)$$

Стехиометрическая концентрация горючего вещества в ТВС определяется из справочных данных или рассчитывается отдельно.

В случае, если определение концентрации горючего вещества в смеси затруднено, в качестве величины c_{Γ} в соотношении (1) принимается концентрация, соответствующая стехиометрической концентрации.

21. Теплота сгорания горючего газа q_{Γ} в ТВС берется из справочных данных или оценивается по формуле: $q_{\Gamma} = 44\beta$ МДж/кг.

Корректировочный параметр β для наиболее распространенных в промышленном производстве опасных веществ определяется по таблице № 1 приложения № 3 к Руководству.

Определение ожидаемого режима взрывного превращения

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

22. ТВС, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своим взрывоопасным свойствам разделены на четыре класса. Классификация горючих веществ по степени чувствительности приведена в таблице № 1 приложения № 3 к Руководству.

В случае, если вещество отсутствует в таблице № 1 приложения № 3 к Руководству, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в данной таблице веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного вещества – относить его к классу 1, то есть рассматривать как наиболее опасный случай.

Классификация ожидаемого режима взрывного превращения

23. Для оценки параметров действия взрыва возможные режимы взрывного превращения ТВС разбиваются на шесть диапазонов по скоростям их распространения, причем пять из них приходятся на процессы дефлаграционного горения ТВС, поскольку характеристики процесса горения со скоростями фронта, меньшими 500 м/с, имеют существенные качественные различия.

24. Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения при типовых источниках воспламенения (искры, открытые пламена, разряды статического электричества, нагретые поверхности) определяется с помощью таблицы № 2 приложения № 3 к Руководству в зависимости от класса горючего вещества и вида окружающего пространства. Если в качестве источника воспламенения облака ТВС выступает внутренний взрыв в здании/помещении, куда произошла инфильтрация ТВС из облака, на пути которого находятся эти здания/сооружения, то ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения

уменьшается на 1 (мощность взрывного превращения повышается на 1 уровень). Допускается использование более точных значений скорости взрывного превращения при их обосновании. В случае если согласно пункту 18.3 проводится объединение нескольких областей пространства и проводятся предварительные расчеты для каждой отдельной области на соответствие критерию ее возможного объединения с другими областями, то для каждой отдельной области определяется соответствующий ей ожидаемый режим взрывного превращения.

25. Ниже приводятся режимы взрывного превращения ТВС по диапазонам скоростей.

Диапазон 1. Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и больше.

Диапазон 2. Дефлаграция, скорость фронта пламени 300–500 м/с.

Диапазон 3. Дефлаграция, скорость фронта пламени 200–300 м/с.

Диапазон 4. Дефлаграция, скорость фронта пламени 150–200 м/с.

Диапазон 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_T = k_1 \cdot M_T^{1/6}, \quad (3)$$

где k_1 – константа, равная 43.

Диапазон 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$V_T = k_2 \cdot M_T^{1/6}, \quad (4)$$

где k_2 – константа, равная 26.

Оценка агрегатного состояния ТВС

26. Для дальнейших расчетов необходимо оценить агрегатное состояние топлива в смеси. Предполагается, что смесь гетерогенная, если более 50% топлива содержится в облаке в виде капель, иначе ТВС считается газовой. Провести такие оценки можно исходя из величины давления насыщенных паров топлива при данной температуре и времени формирования облака. Для летучих веществ, таких как пропан, при температуре + 20 °С смесь можно считать

газовой, а для веществ с низким давлением насыщенного пара (например, распыл дизельного топлива при +20 °С) расчеты проводятся в предположении гетерогенной ТВС.

Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн

27. После того как определен вероятный режим взрывного превращения, рассчитываются основные параметры воздушных ударных волн (избыточное давление ΔP и импульс волны давления I) в зависимости от расстояния до центра облака.

Детонация газовых и гетерогенных ТВС

28. Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии r от центра облака при детонации облака ТВС предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению:

$$R_x = r / (E/P_0)^{1/3}. \quad (5)$$

При этом все соотношения также могут быть записаны в функциях аргумента $\lambda_{\text{пар}} = 100 \cdot r / E^{1/3}$. При принятых в Руководстве допущениях между R_x и $\lambda_{\text{пар}}$ существует простая связь: $\lambda_{\text{пар}} = 2,15 \cdot R_x$.

29. Далее рассчитываются безразмерное давление P_x и безразмерный импульс фазы сжатия I_x .

30. В случае детонации облака газовой ТВС расчет производится по следующим формулам:

$$\ln(P_x) = -0,9278 - 1,5415 \cdot \ln(R_x) + 0,1953 \cdot \ln(R_x)^2 - 0,0285 \cdot \ln(R_x)^3; \quad (6)$$

$$\ln(I_x) = \begin{cases} -3,3228 - 1,3689 \cdot \ln(R_x) - 0,9057 \cdot \ln(R_x)^2 - \\ -0,4818 \cdot \ln(R_x)^3, & R_x \in [0,2, 0,8]; \\ -3,2656 - 0,9641 \cdot \ln(R_x) - 0,0108 \cdot \ln(R_x)^2, & R_x \in (0,8, 50]. \end{cases} \quad (7)$$

Зависимости (6) и (7) справедливы для значений R_x , больших величины $R_x = 0,2$ и меньших $R_x = 50$. В случае если $R_x \leq 0,2$, величина P_x полагается равной 18,6, а величина I_x полагается равной 0,53.

31. В случае детонации облака гетерогенной ТВС расчет производится по следующим формулам:

$$P_x = 0,125/R_x + 0,137/R_x^2 + 0,023/R_x^3; \quad (8)$$

$$I_x = 0,022/R_x \quad (9)$$

Зависимости (8) и (9) справедливы для значений R_x , больших величины $R_k = 0,25$. В случае, если $R_x < R_k$, величина P_x полагается равной 18, а величина $I_x = 0,16$.

Формулы (8) и (9) могут применяться как для капельных включений (жидкие углеводороды), так и для большинства твердых пылевых частиц (древесная пыль, угольная пыль, металлическая пыль, пыль фармацевтических производств, производства красителей, пыль пищевых продуктов, прежде всего зерновая и мучная пыль, пыли пластиков; исключая пыль магнезия, торфа).

Дефлаграция газовых и гетерогенных ТВС

32. В случае дефлаграционного взрывного превращения облаков ТВС или их частей к параметрам, влияющим на величины избыточного давления и импульса положительной фазы сжатия, добавляются скорость видимого фронта пламени V_T и степень расширения продуктов сгорания σ . Для газовых смесей σ принимается равной 7, для гетерогенных равной 4. Для расчета параметров ударной волны при дефлаграции гетерогенных облаков величина эффективного энергозапаса смеси домножается на коэффициент $(\sigma - 1)/\sigma$.

33. Безразмерные давление P_{x1} и импульс фазы сжатия I_{x1} определяются по соотношениям:

$$P_{x1} = (V_T/C_0)^2 (\sigma - 1)/\sigma \cdot (0,83/R_x - 0,14/R_x^2); \quad (10)$$

$$I_x = (V_T/C_0) (\sigma - 1)/\sigma \cdot (1 - 0,4 \cdot (\sigma - 1) \cdot V_T/\sigma \cdot C_0) \times \\ \times (0,06/R_x + 0,01/R_x^2 - 0,0025/R_x^3). \quad (11)$$

Выражения (10) и (11) справедливы для значений R_x , больших величины $R_k = 0,34$, иначе вместо R_x в соотношения (10) и (11) подставляется величина $R_{кр}$.

34. Далее вычисляются величины P_{x2} и I_{x2} , которые соответствуют режиму детонации, и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (6), (7), а для детонации гетерогенной смеси – по соотношениям (8), (9). Окончательные значения P_x и I_x выбираются из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) \quad (12)$$

35. После определения безразмерных величин давления и импульса фазы сжатия вычисляются соответствующие им размерные величины:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0; \quad (13)$$

$$I = I_x \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 \quad (14)$$

Профиль ударной волны

36. Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС показан на рисунке 3-1 приложения № 3 к Руководству.

При определении количественных характеристик дополнительных параметров ударной волны необходимо пользоваться рекомендациями, указанными в пунктах 37–43 Руководства.

Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси

37. Параметры падающей волны при детонации облака газовой смеси рассчитывают по следующим соотношениям ($1,3 \leq \lambda_{\text{пар}} \leq 14$):

Амплитуда фазы сжатия:

$$\ln(\Delta P_+ / P_0) = 0,375 - 1,8894 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,2605 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2 - 0,0285 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^3. \quad (15)$$

Амплитуда фазы разрежения:

$$\ln(\Delta P_- / P_0) = -1,46 - 1,402 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,079 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (16)$$

Длительность фазы сжатия:

$$\ln(10^5 \cdot \tau_+ / E^{1/3}) = 0,106 + 0,448 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,26 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (17)$$

Длительность фазы разрежения:

$$\ln(10^5 \cdot \tau_- / E^{1/3}) = 1,299 + 0,412 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,79 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (18)$$

Импульс фазы сжатия:

$$\ln(I_+ / E^{1/3}) = \begin{cases} -0,7364 - 0,8283 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,1973 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2 - \\ \quad -0,4818 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^3, & \lambda_{\text{пар}} \in [1,3,1,7]; \\ -0,681 - 0,9476 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,0108 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2, & R_x \in (1,7,14]. \end{cases} \quad (19)$$

Импульс фазы разрежения:

$$\ln(I_- / E^{1/3}) = -0,873 - 1,25 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,132 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (20)$$

38. Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением:

$$\Delta P(t, \lambda_{\text{пар}}) = \Delta P \times \sin(\pi \cdot (t - \tau_+) / \tau_-) / \sin(-\pi \cdot \tau_+ / \tau_-) \cdot e^{-K_i t / \tau_+}. \quad (21)$$

39. Декремент затухания в падающей волне рассчитывается по соотношению:

$$K_i = 0,889 - 0,356 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,105 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (22)$$

Более детально профиль падающей волны определяется путем газодинамического моделирования (раздел IV).

Параметры отраженной ударной волны

40. Для расчета параметров отраженной ударной волны при ее нормальном падении на преграду используются следующие соотношения:

Амплитуда отраженной волны давления:

$$\ln(\Delta P_{r+} / P_0) = 1,264 - 2,056 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,211 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (23)$$

Амплитуда отраженной волны разрежения:

$$\ln(\Delta P_{r-} / P_0) = -0,673 - 1,043 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,252 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (24)$$

Длительность отраженной волны давления:

$$\ln(10^5 \cdot \tau_{r+}/E^{1/3}) = -0,109 + 0,983 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,23 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (25)$$

Длительность отраженной волны разрежения:

$$\ln(10^5 \cdot \tau_{r-}/E^{1/3}) = 1,265 + 0,857 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,192 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (26)$$

Импульс фазы сжатия отраженной волны давления:

$$\ln(I_{r+}/E^{1/3}) = -0,07 - 1,033 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,045 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (27)$$

Импульс фазы разрежения отраженной волны разрежения:

$$\ln(I_{r-}/E^{1/3}) = -0,052 - 0,462 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,27 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (28)$$

Общее время действия отраженных волн на мишень:

$$\ln(10^5 \cdot (\tau_{r+} + \tau_{r-})/E^{1/3}) = 1,497 + 0,908 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,404 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (29)$$

41. Форма отраженной волны с описанием фаз сжатия и разрежения с хорошей для практических целей точностью может быть описана соотношением:

$$\Delta P_r(t, \lambda_{\text{пар}}) = \Delta P_{r+} \times \sin(\pi \cdot (t - \tau_{r+})/\tau_{r-}) / \sin(-\pi \cdot \tau_{r+}/\tau_{r-}) \cdot e^{-K_r \cdot t/\tau_{r+}}. \quad (30)$$

42. Декремент затухания в отраженной волне рассчитывается по соотношению:

$$K_r = 0,978 - 0,554 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,26 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2. \quad (31)$$

Соотношения (15)–(31) справедливы при значениях $\lambda_{\text{пар}}$ до 14.

Более детально профиль отраженной (в т. ч. многократно отраженной) волны определяется методами вычислительной газодинамики (раздел IV).

Параметры волны при произвольном режиме сгорания

43. Импульсные характеристики падающих и отраженных волн не зависят от скорости взрывного превращения в связи с чем интенсивность и длительность действия ударных волн при $\lambda_{\text{пар}} \geq 1$ рассчитываются по соотношениям,

указанным в пунктах 37–42 Руководства. Возможность таких оценок основана на сравнении опытных данных с фактическими сведениями об авариях.

IV. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ТВС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОМЕРНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Детонация и дефлаграция газовых и гетерогенных ТВС (одномерное газодинамическое моделирование)

44. В случае, если существует необходимость более точного моделирования параметров волн давления (прежде всего генерируемых при дефлаграции) за счет учета различных неоднородностей в скорости (режиме) взрывного превращения, то величины избыточного давления, длительности и импульса фазы сжатия, а также профили волн (включая вторичные волны и нескачкообразный характер нарастания давления при дефлаграции) рассчитываются с помощью газодинамического моделирования, в котором рассматривается послойная дефлаграция по областям, характеризующимся различной скоростью (режимом) энерговыделения, определенной по таблице № 2 приложения № 3, для каждой отдельной области загромождения (пункт 10), в т. ч. с привлечением необходимых обоснований (пункт 12).

45. Расчет взрывов ТВС с использованием одномерной газодинамической модели выполняется по алгоритму пункта 18, при этом объединение загроможденных областей (пункт 18.3) может не проводиться.

46. Газодинамическая модель представляет собой конечно-разностную схему численного решения уравнений газодинамики в одномерной постановке.

Ниже представлена система уравнения газодинамики в форме Лагранжа.

Уравнение неразрывности (закон сохранения массы):

$$v = -r^{\alpha-1} \frac{\partial r}{\partial t}; \quad (32)$$

Уравнение Эйлера (закон сохранения импульса):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -r^{\alpha-1} \frac{\partial p}{\partial t}; \quad (33)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial \left(i + \frac{u^2}{2} \right)}{\partial t} = - \frac{\partial (r^{\alpha-1} p u)}{\partial m}; \quad (34)$$

Уравнение состояния:

$$p = \frac{i(\gamma - 1)}{v}. \quad (35)$$

При газодинамическом моделировании рассматриваются течения до и после фронта энерговыделения (фронта горения, фронта детонации), который рассматривается как разрыв, на котором происходит энерговыделение. Значения параметров потока непосредственно перед и за фронтом энерговыделения используются в качестве граничных условий для расчета течений во всем пространстве до и после фронта.

Для детонации на фронте в каждый момент времени должны выполняться законы сохранения массы, импульса и энергии:

Сохранение массы:

$$\rho_3 \cdot u_3 = \rho_1 \cdot u_1. \quad (36)$$

Сохранение импульса:

$$p_3 + \rho_3 \cdot u_3^2 = p_1 + \rho_1 \cdot u_1^2. \quad (37)$$

Сохранение энергии:

$$i_3 + \frac{u_3^2}{2} = i_1 + \frac{u_1^2}{2} + Q_{CJ} \quad (38)$$

$$\frac{p_3 \cdot \gamma_3}{\rho_3(\gamma_3 - 1)} + \frac{u_3^2}{2} = \frac{p_1 \cdot \gamma_1}{\rho_1(\gamma_1 - 1)} + \frac{u_1^2}{2} + Q_{CJ},$$

где индекс «1» относится к параметрам исходной смеси перед фронтом реакции (скорость u_1 , плотность ρ_1 и давление p_1 , показатель адиабаты исходной смеси γ_1), а индекс «3» - к параметрам продуктов реакции за фронтом реакции (скорость u_3 , плотность ρ_3 и давление p_3 , показатель адиабаты продуктов γ_3), Q_{CJ} – теплота реакции ТВС во фронте энерговыделения детонационной волны. Соотношения (36)–(38) записаны в системе координат, где фронт покоится, соответственно, $u_1 = D_{CJ}$, где D_{CJ} – скорость движения фронта энерговыделения

(скорость детонации). При стационарной волне энерговыделения D_{CJ} – скорость детонации в режиме Чэпмена-Жуге.

Величины показателя адиабаты исходной смеси и продуктов, теплота реакции и скорости движения детонации, а также параметры за фронтом детонации (параметры с индексом «3» в (36)–(38)) берутся из справочных данных или из термодинамических расчетов (задача о детонации Чэпмена-Жуге).

В результате решения уравнений (36)–(38) совместно с соотношениями (32)–(35) получаются как пространственно-временные распределения давления, так и временные зависимости давления в отдельных точках.

При дефлаграции перед и за фронтом волны энерговыделения могут распространяться волны давления (волны сжатия, волны разрежения). Движение среды до и после фронта энерговыделения для дефлаграции описывается системой уравнений:

Для дефлаграции на фронте в каждый момент времени должны выполняться законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$p_2 = \begin{cases} p_1 + \frac{\gamma_1 + 1}{4} \frac{(u_2 - u_1)^2}{v_1} + \\ + \sqrt{\frac{\gamma_1 \cdot p_1 (u_2 - u_1)^2}{v_1} + \frac{(\gamma_1 + 1)^2 (u_2 - u_1)^4}{16v_1^2}} \text{ при } u_2 \geq u_1, \\ p_1 \left(1 + \frac{(u_2 - u_1)(\gamma_1 - 1)}{2\sqrt{\gamma_1 \cdot p_1 \cdot v_1}} \right)^{2\gamma_1/(\gamma_1 - 1)} \text{ при } u_2 < u_1; \end{cases} \quad (39)$$

$$v_2 = \begin{cases} v_1 - \frac{(u_2 - u_1)^2}{p_2 - p_1} \text{ при } u_2 \geq u_1, \\ v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/\gamma_1} \text{ при } u_2 < u_1; \end{cases} \quad (40)$$

$$\frac{\omega}{v_2} = \frac{u_2 + \omega - u_3}{v_3}; \quad (41)$$

$$p_2 + \frac{\omega^2}{v_2} = p_3 + \frac{(u_2 + \omega - u_3)^2}{v_3}; \quad (42)$$

$$\frac{\gamma_1 \cdot p_2 \cdot v_2}{\gamma_1 - 1} + \frac{\omega^2}{2} + Q = i_3 + p_3 \cdot v_3 + \frac{(u_2 + \omega - u_3)^2}{2}; \quad (43)$$

$$p_4 = p_3 + \frac{(u_3 - u_4)c_3}{v_3}. \quad (44)$$

Используются следующие индексные обозначения k для параметров в окрестности фронта горения: исходная смесь ($k = 1$), исходная смесь после распространения по ней волны от фронта ($k = 2$), продукты горения после распространения по ним волны от фронта ($k = 3$), продукты горения ($k = 4$).

Данная система уравнений записана в системе отсчета, где ТВС в облаке изначально покоилась.

Неизвестными являются переменные: $p_2, v_2, u_2, p_4, u_4, v_4, i_4$. Для расчета i_3 система замыкается уравнением состояния продуктов горения.

Значения $p_1, v_1, u_1, p_3, u_3, v_3, i_3$ считаются известными при расчете $p_2, v_2, u_2, p_4, u_4, v_4, i_4$.

Необходимые для расчетов дефлаграции параметры γ_3 и Q берутся из справочных данных или решении термодинамической задачи нахождения параметров смеси при постоянном давлении и энтальпии (НР-задача). Скорость движения дефлаграции определяется из видимой скорости, задаваемой согласно пункту 25, которая равна $\omega + u_2$.

В результате решения этих уравнений совместно с соотношениями (32)–(35) получаются как пространственно-временные распределения давления, так и временные зависимости давления в отдельных точках.

Описанный подход может применяться для оценки скорости нарастания давления и параметров падающих волн в замкнутых объемах. Для этого детонация или дефлаграция ТВС рассматриваются в ограниченном объеме помещения, и система уравнений (32)–(35) рассматривается без оттока или с частичным оттоком газа за пределы помещения.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1
к Руководству по безопасности
«Методика оценки последствий
аварийных взрывов топливно-воздушных
смесей», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «26» ноября 2022 г. № 412

Список сокращений и обозначений

В Руководстве используются следующие обозначения и сокращения:

ВКПР	верхний концентрационный предел распространения пламени;
НКПР	нижний концентрационный предел распространения пламени;
ТВС	топливно-воздушная смесь;
c_k	скорость звука в k -ой области ($k = 1$ – область с начальным на каждый момент времени состоянием исходной/непрореагировавшей смеси, $k = 2$ – область с состоянием исходной/непрореагировавшей смеси после прохождения волны давления от фронта энерговыделения (имеется только при расчете дефлаграции), $k = 3$ – область с конечным состоянием смеси прореагировавшей на фронте, $k = 4$ – область с промежуточным (после прохождения волны давления от фронта энерговыделения) состоянием смеси, прореагировавшей на фронте (имеется только при расчете дефлаграции)), м/с;
c_0	скорость звука в воздухе, м/с;
c_g	концентрация горючего вещества в облаке ТВС, кг/м ³ ;
$c_{ст}$	стехиометрическая концентрация вещества в смеси с воздухом, кг/м ³ ;
$D_{сj}$	скорость детонационной волны, м/с;
E	эффективный энергозапас ТВС, Дж;
i	удельная внутренняя энергия, Дж/кг;
i_k	удельная внутренняя энергия в k -ой области (подробнее о значении индекса k см описание переменной c_k), Дж/кг;
I^*	коэффициент уравнения;
I	импульс волны давления, Па·с;
I_+	импульс фазы сжатия падающей волны давления, Па·с;
I_-	импульс фазы разрежения падающей волны давления, Па·с;
$I_{г+}$	импульс фазы сжатия отраженной волны давления, Па·с;
$I_{г-}$	импульс фазы разрежения отраженной волны давления, Па·с;
I_x	безразмерный импульс фазы сжатия;
K	коэффициент уравнения;
k	коэффициент уравнения;

K_i	декремент затухания;
K_r	декремент изменения давления в отраженной волне;
m	лагранжева массовая координата, $\text{кг}\cdot\text{м}^{\alpha-1}$;
M_r	масса горючего вещества в облаке ТВС, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, определяется по пространственно-временному распределению ТВС в пределах воспламенения, при необходимости с учетом ограниченных размеров пространственных областей с загромождением видов 1–4, а также с учетом возможного объединения этих областей, кг;
p	давление, Па;
p_k	давление в k -ой области (подробнее о значении индекса k – в описании переменной c_k), Па;
P^*	коэффициент уравнения;
ΔP	избыточное давление падающей волны, Па;
ΔP_+	амплитуда падающей волны давления, Па;
ΔP	избыточное давление падающей волны, Па;
ΔP_{r+}	амплитуда отраженной волны давления, Па;
ΔP_{r-}	амплитуда отраженной волны разрежения, Па;
P_0	атмосферное давление, Па;
P_x	безразмерное давление;
r	расстояние от центра облака ТВС, м;
R_x	безразмерное расстояние от центра облака ТВС;
$R_{кр}$	пороговое значение величины R_x ;
u	скорость, м/с;
u_k	скорость в k -ой области (подробнее о значении индекса k – в описании переменной c_k), м/с;
v	удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$;
v_k	удельный объем в k -ой области (подробнее о значении индекса k – в описании переменной c_k), $\text{м}^3/\text{кг}$;
V_r	скорость видимого фронта пламени, м/с;
$Q_{с/}$	удельная теплота реакции во фронте волны энерговыделения (детонации, дефлаграционной волны), Дж/кг;
q_r	удельная теплота сгорания газа, Дж/кг;
t	время процесса, с;
β	корректировочный параметр, характеризующий фугасные свойства ТВС;
$\lambda_{пар}$	параметрическое расстояние;
α	коэффициент, равный 1, 2, 3 в плоской, осесимметричной и сферически симметричной геометриях случаях соответственно;
γ	показатель адиабаты;
γ_k	показатель адиабаты в k -ой области (подробнее о значении индекса k – в описании переменной c_k);
ρ_k	плотность в k -ой области (подробнее о значении индекса k – в описании переменной c_k) $\text{кг}/\text{м}^3$;

σ	степень расширения продуктов сгорания;
τ_+	длительность фазы сжатия, с;
τ_-	длительность фазы разрежения, с;
τ_{r+}	длительность отраженной волны давления, с;
τ_r	длительность отраженной волны давления, с;
ω	скорость дефлаграционного фронта (волны горения) относительно покоящейся исходной смеси, м/с.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2
к Руководству по безопасности
«Методика оценки последствий
аварийных взрывов топливно-воздушных
смесей», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «26» ноября 2022 г. № 412

Термины и определения

Авария – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ (статья 1 Федерального закона от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»).

Взрыв – неконтролируемый быстропротекающий процесс выделения энергии, связанный с физическим, химическим или физико-химическим изменением состояния вещества, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям, обусловленными резким динамическим повышением давления, возникновением ударной волны, волны сжатия.

Детонация – распространение взрыва (волны энерговыделения) по заранее перемешанной ТВС, обусловленное прохождением ударной волны со сверхзвуковой скоростью, обеспечивающей быструю химическую реакцию.

Детонация (детонация) Чэпмена-Жуге – стационарный самоподдерживающийся режим детонации, при котором скорость оттока продуктов от фронта равна скорости звука.

Дефлаграция (горение) – процесс распространения зоны (фронта) химических превращений (волны энерговыделения) по ТВС с дозвуковой скоростью. Передача энергии от зоны реакции в направлении движения фронта горения происходит за счет теплопередачи и диффузии.

Ударная волна – распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью в газе, жидкости или твердом теле тонкая переходная область (фронт), в которой происходит резкое увеличение давления, плотности и скорости (в данном документе термин ударные волны/воздушные ударные волны используется и в отношении волн сжатия, последние характеризуются не скачкообразным, одномоментным (как в ударной волне), а растянутом во времени нарастанием давления; такой подход обусловлен отсутствием в данном документе рассмотрения характера нарастания давления в волне).

Топливо-воздушная смесь – смесь газов и/или парокapельных и/или твердых/пылевых сред с воздухом, способная к воспламенению и горению в дефлаграционном или детонационном режиме.

Ограниченность пространства – наличие в пространстве крупных (сопоставимых по размеру с облаком) зданий, сооружений, конструкций, установок и особенностей рельефа, ограничивающих распространение облака ТВС, а также отток продуктов горения, и способствующих отражению и циркуляции в пространстве волн давления при взрыве облака.

Загроможденность пространства - наличие в пространстве на пути горения облака мелких и средних (наименьший размер которых меньше характерных размеров облака) элементов конструкций, растений, способных привести к ускорению горения.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3
к Руководству по безопасности
«Методика оценки последствий
аварийных взрывов топливно-воздушных
смесей», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «28» ноября 2022 г. № 412

Рисунки и таблицы

Таблица № 1

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс 1		Класс 2		Класс 3		Класс 4	
Особо чувствительные вещества		Чувствительные вещества		Среднечувствительные вещества		Слабочувствительные вещества	
(Размер детонационной ячейки менее 2 см)		(Размер детонационной ячейки от 2 до 10 см)		(Размер детонационной ячейки от 10 до 40 см)		(Размер детонационной ячейки больше 40 см)	
	В		β		β		β
Ацетилен	1,1	Акрилонитрил	0,67	Ацетальдегид	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Акролеин	0,62	Ацетон	0,65	Бензол	0,88
Водород	2,73	Бутан	1,04	Бензин	1	Декан	1
Гидразин	0,44	Бутилен	1	Винилацетат	0,51	Дизтопливо	1
Изопропилнитрат	0,41	Бутадиен	1	Винилхлорид	0,42	o-дихлорбензол	0,42
Метилацетилен	1,05	1,3-пентадиен	1	Гексан	1	Додекан	1
Нитрометан	0,25	Пропан	1,05	Генераторный газ	0,38	Керосин	1
Окись пропилена	0,7	Пропилен	1,04	Изооктан	1	Метан	1,14
Окись этилена	0,62	Сероуглерод	0,32	Метиламин	0,7	Метилбензол	1
Этилнитрат	0,3	Этан	1,08	Метилацетат	0,53	Метилмеркаптан	0,53
		Этилен	1,07	Метилбутилкетон	0,79	Метилхлорид	0,12
		ШФЛУ (Широкая фракция легких углеводородов)	1	Метилпропилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметиловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92
		Метилбутиловый эфир	—	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтиловый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этилбензол	0,90
		Диизопропиловый эфир	0,82	Метиловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		

Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
Особо чувствительные вещества	Чувствительные вещества	Среднечувствительные вещества	Слабочувствительные вещества
(Размер детонационной ячейки менее 2 см)	(Размер детонационной ячейки от 2 до 10 см)	(Размер детонационной ячейки от 10 до 40 см)	(Размер детонационной ячейки больше 40 см)
	V	β	β
		Амиловый спирт	-
		Изобутиловый спирт	0,79
		Изопропиловый спирт	0,69
		Циклогексан	1
		Этил формиат	0,46
		Этилхлорид	0,43
		Сжиженный природный газ	1
		Кумол	0,84
		Печной газ	0,09
		Циклопропан	1
		Этиламин	0,8

Таблица № 2

Экспертная таблица для определения режима взрывного превращения

Класс горючего вещества	Вид окружающего пространства			
	1	2	3	4
	Ожидаемый диапазон скорости взрывного превращения			
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

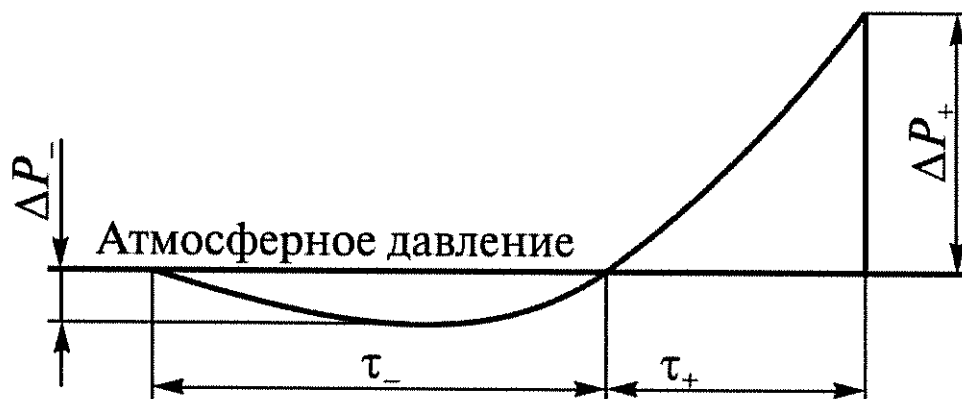


Рис. ПРИЛОЖЕНИЕ № -1. Характерный профиль ударной волны при взрыве ТВС

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4
к Руководству по безопасности
«Методика оценки последствий
аварийных взрывов топливно-воздушных
смесей», утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «28» ноября 2022 г. № 412

**Примеры расчетов последствий аварийных взрывов
топливно-воздушных смесей**

Пример 1

В результате аварии на автодороге, проходящей по открытой местности, в безветренную погоду произошел разрыв автоцистерны, содержащей 8 т сжиженного пропана. Для оценки максимально возможных последствий принято, что в результате выброса газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевозившееся в цистерне. Средняя концентрация пропана в образовавшемся облаке составила около 140 г/м^3 . Расчетный объем облака составил 57 тыс. м^3 . Воспламенение облака привело к возникновению взрывного режима его превращения. Требуется определить параметры воздушной ударной волны (избыточное давление и импульс фазы сжатия) на расстоянии 100 м от места аварии.

Решение

Сформируем исходные данные для дальнейших расчетов:

- тип топлива – пропан;
- агрегатное состояние смеси – газовое;
- температура окружающей среды $T = 288 \text{ К}$;
- концентрация горючего в смеси $c_r = 0,14 \text{ кг/м}^3$;
- стехиометрическая концентрация пропана с воздухом $c_{ст} = 0,075 \text{ кг/м}^3$;
- масса горючего вещества в облаке, участвующая в создании поражающих факторов взрыва, $M_r = 8 \text{ 000 кг}$;
- удельная теплота сгорания топлива $q_r = 4,64 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$;

- окружающее пространство – слабо загроможденное (вид 4).

Определяем эффективный энергозапас ТВС E . Так как $c_r > c_{ст}$, следовательно:

$$E = M_r \cdot q_r \cdot c_{ст}/c_r = 2 \cdot 8000 \cdot 4,64 \cdot 10^7 \cdot 0,075/0,14 = 3,977143 \cdot 10^{11}.$$

Исходя из классификации веществ в таблице № 1 приложения № 3 к Руководству определяем, что пропан относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества). Геометрические характеристики окружающего пространства согласно условию задачи и пункту 10 Руководства относятся к виду 4 (слабо загроможденное и свободное пространство). По экспертной таблице режима взрывного превращения № 2 приложения № 3 к Руководству определяем ожидаемый режим взрывного превращения облака ТВС – дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 150 до 200 м/с. Для проверки режима рассчитываем скорость фронта пламени по соотношению (п. 25):

$$V_r = k_1 \cdot M_r^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192 \text{ м/с.}$$

Полученная величина меньше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

Для заданного расстояния $r = 100$ м рассчитываем безразмерное расстояние R_x :

$$R_x = r/(E/P_0)^{1/3} = 100/(3,9771 \cdot 10^{11}/101325)^{1/3} = 0,63394.$$

Рассчитываем параметры взрыва при скорости горения 200 м/с. Для вычисленного безразмерного расстояния по соотношениям (10) и (11) определяем величины P_{x1} и I_{x1} :

$$\begin{aligned} P_{x1} &= (V_r/C_0)^2 (\sigma - 1)/\sigma \cdot (0,83/R_x - 0,14/R_x^2) = \\ &= 200^2/340,0256^2 \cdot 6/7(0,83/0,63394 - 0,14/0,40188) = 0,284953; \\ I_x &= (V_r/C_0) (\sigma - 1)/\sigma \cdot (1 - 0,4 \cdot (\sigma - 1) \cdot V_r/\sigma \cdot C_0) \times \\ &\times (0,06/R_x + 0,01/R_x^2 - 0,0025/R_x^3) = (200/340,0256)((7 - 1)/7) \times \\ &\times (1 - 0,4 \cdot (200/340,0256)((7 - 1)/7))(0,06/0,63394 + \\ &+ 0,01/0,40188 - 0,0025/0,25477) = 0,04416. \end{aligned}$$

Так как ТВС – газовая, величины P_{x2} , I_{x2} рассчитываем по соотношениям (6) и (7):

$$P_{x2} = \exp(-0,9278 - 1,5415 \cdot \ln(R_x) + 0,1953 \cdot \ln(R_x)^2 - 0,0285 \cdot \ln(R_x)^3) = 0,83368;$$

$$I_{x2} = \exp(-3,3228 - 1,3689 \cdot \ln(R_x) - 0,9057 \cdot \ln(R_x)^2 - 0,4818 \cdot \ln(R_x)^3) = 0,05834.$$

Согласно соотношению (12) определяем окончательные значения P_x и I_x :

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = \min(0,284953, 0,83368) = 0,284953.$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}) = \min(0,04416, 0,05834) = 0,04416.$$

Из найденных безразмерных величин P_x и I_x вычисляем согласно соотношениям (12) и (13) искомые величины избыточного давления и импульса фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 100 м от места аварии при скорости горения 200 м/с:

$$\Delta P = 28873 \text{ Па.}$$

$$I = I_x \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 = 2076 \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

Используя полученные значения ΔP и I , находим в Руководстве по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах», утвержденном приказом Ростехнадзора от 3 ноября 2022 г. № 387 (далее – «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»):

$$Pr_1 = 6,09, Pr_2 = 4,47, Pr_3 = -10,76, Pr_4 = 3,05, Pr_5 = -2,54$$

(при расчете Pr_3 предполагается, что масса человека 70 кг).

Согласно связи вероятности поражения с пробит-функцией находим, что вероятность повреждений производственных зданий равна 86%, вероятность разрушений производственных зданий составляет 30%, а также вероятность разрыва барабанных перепонки у людей равна 3%. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

На рисунке 4-1 приложения № 4 к Руководству приведены зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС.

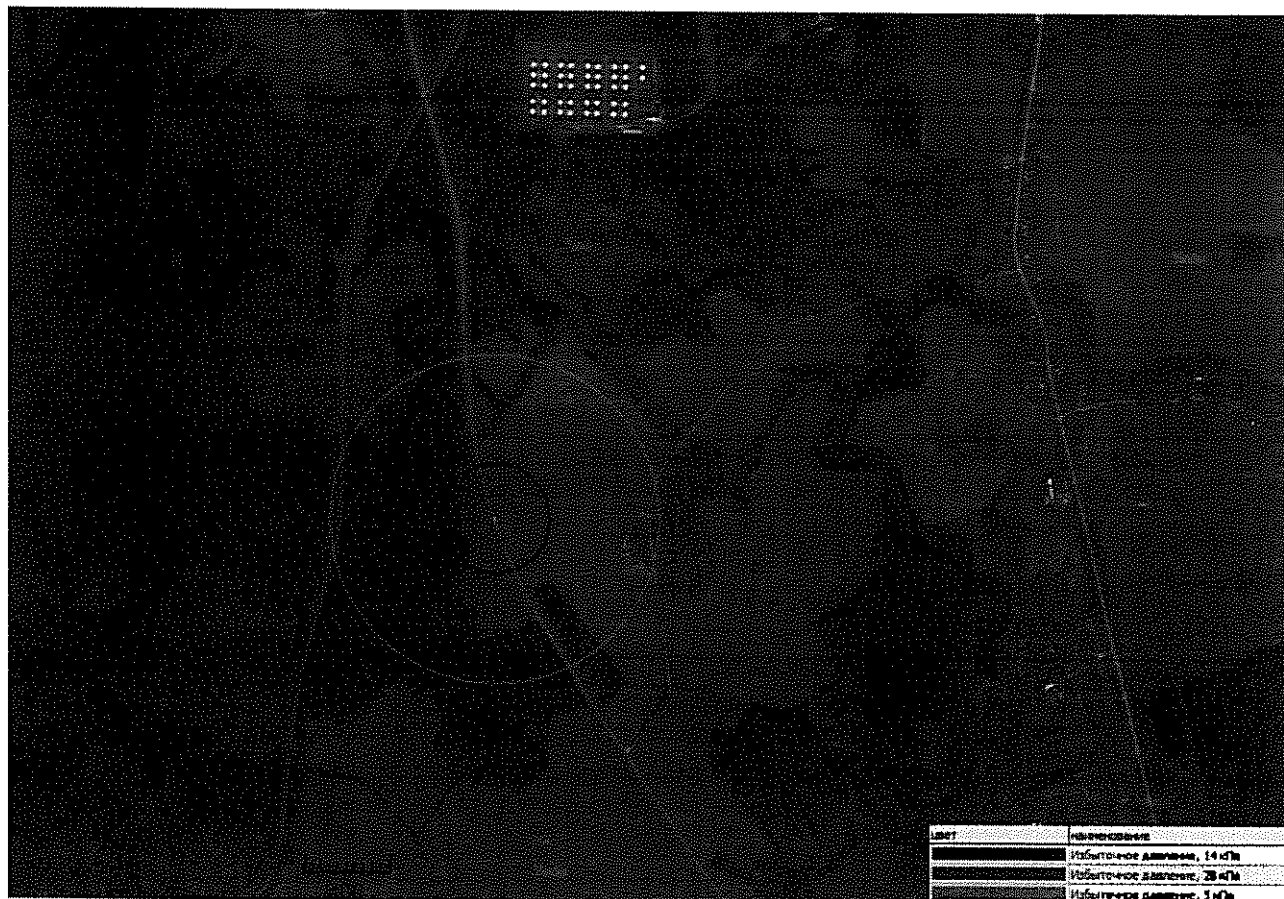


Рис. 4-1. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

Пример 2

В результате внезапного раскрытия обратного клапана в пространство, загроможденное подводными трубопроводами, выброшен газообразный этилен, во взрывоопасных пределах оказалось 100 кг этилена. Рядом с загазованным объектом на расстоянии 150 м находится помещение цеха. Концентрация этилена в облаке равна 70 г/м^3 . Требуется определить степень поражения здания цеха и находящегося в нем персонала при взрыве облака ТВС.

Решение

Сформируем исходные данные для дальнейших расчетов:

- горючий газ – этилен;
- агрегатное состояние смеси – газовое;
- температура окружающей среды $T = 288 \text{ К}$;
- концентрация горючего в смеси $c_r = 0,07 \text{ кг/м}^3$;
- стехиометрическая концентрация этилена с воздухом $c_{ст} = 0,077 \text{ кг/м}^3$;
- масса топлива, содержащегося в облаке, $M_r = 100 \text{ кг}$;

- удельная теплота сгорания горючего газа $q_r = 4,72 \cdot 10^7$ Дж/кг;
- окружающее пространство – загроможденное.

Находим эффективный энергозапас горючей смеси E . Так как $c_r < c_{ст}$, следовательно,

$$E = 2 \cdot M_r \cdot q_r = 2 \cdot 100 \cdot 4,72 \cdot 10^7 = 9,44 \cdot 10^9.$$

Исходя из классификации веществ в таблице №1 приложения №3 к Руководству определяем, что этилен относится ко второму классу опасности (чувствительные вещества). Геометрические характеристики окружающего пространства согласно условию задачи и пункта 14 Руководства относятся к виду 1 (наличие длинных труб, полостей, каверн). По таблице №2 приложения №3 к Руководству определяем диапазон ожидаемого режима взрывного превращения облака ТВС – первый, что соответствует детонации.

Для заданного расстояния 150 м определяем безразмерное параметрическое расстояние $\lambda_{пар}$:

$$\lambda_{пар} = 100 \cdot r / E^{1/3} = 100 \cdot 150 / (9,44 \cdot 10^9)^{1/3} = 7,097.$$

По соотношениям для падающей волны (15)–(22) находим:
амплитуда фазы сжатия:

$$\begin{aligned} \Delta P_+ &= \exp(0,375 - 1,8894 \cdot \ln(\lambda_{пар}) + 0,2605 \cdot \ln(\lambda_{пар})^2 - \\ &- 0,0285 \cdot \ln(\lambda_{пар})^3) P_0 = \exp(0,375 - 1,8894 \cdot \ln(7,097) + \\ &+ 0,2605 \cdot \ln(7,097)^2 - 0,0285 \cdot \ln(7,097)^3) P_0 = 7978 \text{ Па} \end{aligned}$$

при $P_0 = 101325$ Па;

амплитуда фазы разрежения:

$$\Delta P_- = 2042 \text{ Па};$$

длительность фазы сжатия:

$$\begin{aligned} \tau_+ &= 10^{-5} \cdot E^{1/3} \cdot \exp(0,106 + 0,448 \cdot \ln(\lambda_{пар}) + 0,26 \cdot \ln(\lambda_{пар})^2) = \\ &= 10^{-5} \cdot (9,4 \cdot 10^9)^{1/3} \cdot \exp(0,106 + 0,448 \cdot \ln(7,097) + 0,26 \cdot \ln(7,097)^2) = \\ &= 0,051 \text{ с} \end{aligned}$$

длительность фазы разрежения:

$$\tau_- = 0,128 \text{ с};$$

импульсы фаз сжатия и разрежения:

$$I_+ = E^{1/3} \cdot \exp(-0.681 - 0.9476 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) - 0,0108 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2) =$$

$$= (9,4 \cdot 10^9)^{1/3} \cdot \exp(-0.681 - 0.9476 \cdot \ln(7,097) - 0,0108 \cdot \ln(7,097)^2) =$$

$$= 160,2 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_- = 126,5 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Декремент затухания в падающей волне:

$$K_i = 0,889 - 0,356 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,105 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2 =$$

$$= 0,889 - 0,356 \cdot \ln(7,097) + 0,105 \cdot \ln(7,097)^2 = 0,595$$

Форма падающей волны с описанием фаз сжатия и разрежения в наиболее опасном случае детонации газовой смеси может быть описана соотношением:

$$\Delta P(t) = \Delta P \cdot \sin(\pi \cdot (t - \tau_+)/\tau_-) / \sin(-\pi \cdot \tau_+/ \tau_-) \cdot e^{-K_i t / \tau_+} =$$

$$= 7996 \cdot \sin(\pi \cdot (t - 0,051) / 0,128) / \sin(-\pi \cdot 0,051 / 0,128) \cdot e^{-0,595 \cdot t / 0,051}$$

С учетом использования полученных значений ΔP_+ и I_- в Руководстве по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» находим:

$$Pr_1 = 3,21, Pr_2 = 2,22, Pr_3 = -18,9, Pr_4 = 1,096, Pr_5 = -11,9$$

(при расчете Pr_3 предполагается, что масса человека 70 кг).

Вероятность повреждения производственных зданий равна 4%. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

По соотношениям для отраженной волны (23)–(31) находим:

амплитуда отраженной волны давления:

$$\Delta P_+ = 14347 \text{ Па};$$

амплитуда отраженной волны разрежения:

$$\Delta P_- = 17622 \text{ Па};$$

длительность отраженной волны давления:

$$\tau_+ = 0,054 \text{ с};$$

длительность отраженной волны разрежения:

$$\tau_- = 0,192 \text{ с};$$

импульсы фаз сжатия и разрежения отраженной волны:

$$I_+ = 309,4 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

$$I_- = 287,7 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Декремент затухания в отраженной волне:

$$\begin{aligned} K_l &= 0,978 - 0,554 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}}) + 0,26 \cdot \ln(\lambda_{\text{пар}})^2 = \\ &= 0,978 - 0,554 \cdot \ln(7,097) + 0,26 \cdot \ln(7,097)^2 = 0,89 \end{aligned}$$

Форма отраженной волны при взаимодействии со стенкой:

$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= \Delta P \cdot \sin(\pi \cdot (t - \tau_+)/\tau_-) / \sin(-\pi \cdot \tau_+/\tau_-) \cdot e^{-K_l t/\tau_+} = \\ &= 14339 \cdot \sin(\pi \cdot (t - 0,054)/0,192) / \sin(-\pi \cdot 0,054/0,192) \cdot e^{-0,89 \cdot t/0,054} \end{aligned}$$

С учетом использования полученных значений ΔP_+ и I_- по Руководству по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»:

$$Pr_1 = 4,54, Pr_2 = 3,32, Pr_3 = -15,4, Pr_4 = 1,99, Pr_5 = -8,86.$$

Вероятность повреждений производственных зданий равна 32% и вероятность разрушений производственных зданий равна 6%, вероятность разрыва барабанных перепонок у людей равна 0,1%. Вероятности остальных критериев поражения близки к нулю.

На рисунке 4-2 приложения № 4 к Руководству приведены зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС.

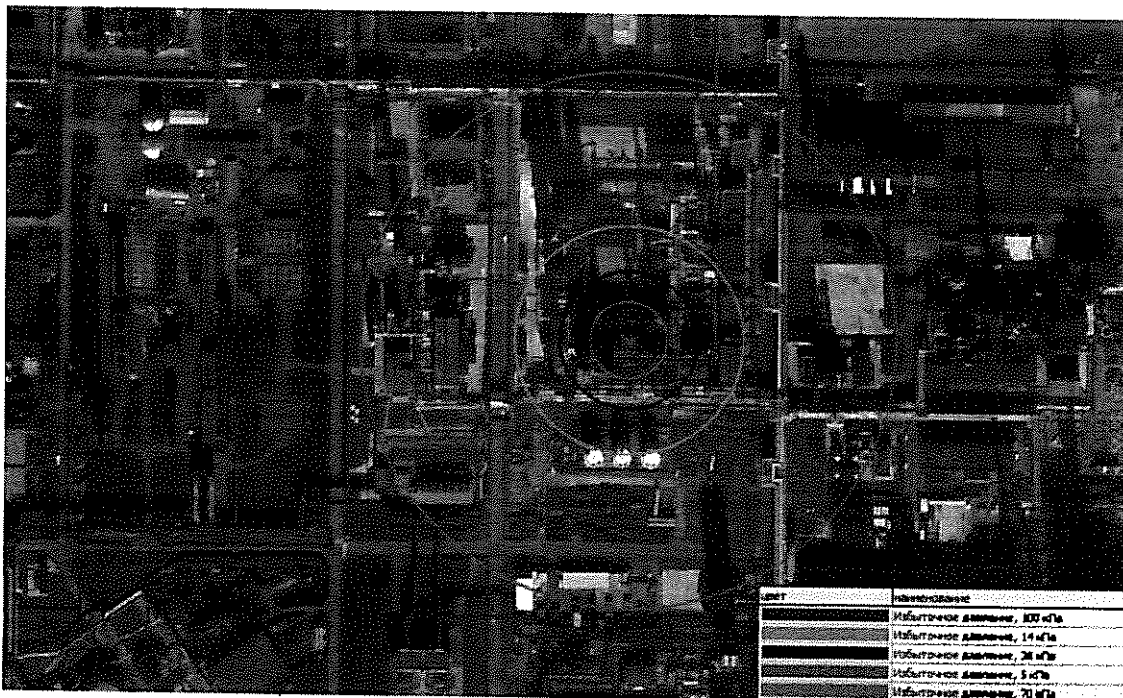


Рис. 4-2. Зоны распространения ударной волны при взрыве ТВС

Пример 3

В резервуаре емкостью 2000 м^3 находится пропан в виде газа при температуре окружающей среды $+ 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении в 2 атмосферы. Резервуар расположен на товарно-сырьевой базе в равнинной местности (шероховатость поверхности – $0,0075 \text{ м}$). Происходит разгерметизация емкости, диаметр отверстия – 100 мм .

Метеоусловия: скорость ветра $3,2 \text{ м/с}$, класс устойчивости атмосферы – Е, ветер – южный.

Рядом с местом выброса находятся области различного загромождения: область с наличием полузамкнутых объемов, образуемых технологическим оборудованием (область № 1, вид загромождения – 2, размеры области $27 \times 15 \times 7 \text{ м}$), область с отдельно стоящими технологическими установками (область № 2, вид загромождения – 3, размеры области: длина-ширина-высота $27 \times 7 \times 7 \text{ м}$), область резервуарного парка (область № 3, вид загромождения – 3, размеры области $10 \times 20 \times 8 \text{ м}$). Остальное окружающее пространство слабо загромождено (вид загромождения – 4). Расположение областей загромождения друг относительно друга, а также относительно места аварийного выброса приведено на рисунке 4-3.

Требуется определить зоны смертельного поражения человека избыточным давлением на фронте ударной волны 120 кПа при взрыве облака ТВС с учетом наличия различных загроможденных областей.

Решение

Сформируем исходные данные для дальнейших расчетов:

- горючий газ – пропан;
- агрегатное состояние смеси – газовое;
- удельная теплота сгорания горючего газа $q_r = 4,64 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$;
- окружающее пространство – слабо загроможденное;
- стехиометрическая концентрация пропана с воздухом $c_{ст} = 0,075 \text{ кг/м}^3$.

Согласно пункту 18.1 проводятся расчеты дрейфа облака ТВС и образующейся в результате зоны НКПР. Поскольку выброс продолжается

длительное время, то в атмосфере может сформироваться протяженное облако ТВС. Расчеты зоны НКПР выполняются по методике Руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». В результате расчета зона НКПР имеет форму, показанную на рисунке 4-3 в момент достижения зоны НКПР максимальных размеров.

В соответствии с пунктом 18.2 выполняется анализ возможности рассмотрения областей загромождения по отдельности. Для этого в различных частях облака, должна отсутствовать детонации. Наличие детонации определяется исходя из класса чувствительности горючего (пропан по таблице № 1 относится к второму классу горючих веществ – чувствительные вещества), а также из вида загромождения окружающего пространства. В соответствии с таблицей № 2 детонация для веществ второго класса чувствительности реализуется только для вида окружающего пространства № 1 (трубы, полости, каверны). Области с таким загромождением отсутствуют по условию задачи. Таким образом, детонационный режим горения в облаке ТВС не будет реализовываться, и области загромождения могут быть рассмотрены по отдельности.

По таблице № 2 приложения № 3 к Руководству определяем диапазон ожидаемого режима взрывного превращения облака ТВС: для области 1 – второй; для областей 2 и 3 – третий.

Согласно пункту 18.3 области загромождения, которые располагаются на расстоянии меньше критического, должны объединяться. Для выявления необходимости объединения областей загромождения определяется максимальное расстояние между областями загромождения, при котором области могут рассматриваться обособленными: области 1 и 2 вида 2: $0,5 \cdot 27 = 13,5$ м; для области 3: $0,5 \cdot 20 = 10$ м. Определяется также минимальное расстояние, при котором области необходимо объединять: для области 1 и 2 $0,25 \cdot 27 = 6,75$ м; для области 3: $0,25 \cdot 20 = 5$ м.

Расстояние между областью 3 и областями 1 и 2 составляет ≥ 15 м, поэтому область 3 допустимо рассматривать обособленно (выделенная область 1). Размер выделенной области 2 принимается по размеру области 3: $10 \times 20 \times 8$ м.

Расстояние между областями 1 и 2 составляет 5 м, что меньше минимального, поэтому эти области объединяются в одну с учетом пространства между этими областями. Суммарный размер объединенной области (выделенная область 2) составляет $27 \times 27 \times 7$ м. Вид загромождения такой объединенной области 2 принимается по наихудшему виду загроможденности среди области, т.е. виду 2.

Согласно пункту 11 допускается не рассматривать гибель людей от волнового действия взрыва при горении облаков ТВС в слабозагроможденном пространстве. Таким образом, в данной задаче необходимо рассмотреть два варианта взрыва облака ТВС: в выделенной области 1 и в выделенной области 2.

С учетом пункта 18.4 определяется масса во взрывоопасных пределах в каждой из выделенных областей и в облаке в целом. Расчет выполняется по методике Руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». Масса во взрывоопасных пределах во всем облаке составляет 98 кг, в выделенной области 1 – $M_{г1} = 3$ кг, в выделенной области 2 – $M_{г1} = 18$ кг.

Согласно пункту 18.5 определяется эффективный энергозапас в выделенных областях. Концентрация пропана в облаке принимается равной стехиометрической концентрации $c_{ст}$, что соответствует получению консервативных результатов расчета параметров взрыва облака ТВС. Расчет выполняется по формуле (1).

$$\text{Выделенная область 1: } E = M_{г1} \cdot q_{г} = 3 \cdot 4,64 \cdot 10^7 = 13,92 \cdot 10^7 \text{ Дж};$$

скорость фронта пламени составляет 300 м/с.

$$\text{Выделенная область 2: } E = M_{г2} \cdot q_{г} = 18 \cdot 4,64 \cdot 10^7 = 83,16 \cdot 10^7 \text{ Дж};$$

скорость фронта пламени составляет 500 м/с.

Определяются максимальные значения избыточных давлений на фронте ударной волны для каждой выделенной области по формулам (6), (10) и (12-13).

Выделенная область 1:

$$P_{x1} = (V_r/C_0)^2 (\sigma - 1)/\sigma \cdot (0,83/R_x - 0,14/R_x^2) = \\ = 300^2/346^2 \cdot 6/7(0,83/0,34 - 0,14/0,1156) = 0,9142;$$

$$P_{x2} = \exp(-0,9278 - 1,5415 \cdot \ln(R_x) + 0,1953 \cdot \ln(R_x)^2 - \\ - 0,0285 \cdot \ln(R_x)^3) = 2,7136;$$

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = 0,7927$$

$$\Delta P = P_x \cdot P_0 = 80,3 \text{ кПа}$$

Таким образом, в выделенной области 1 избыточное давление не достигает значения 120 кПа.

Выделенная область 2:

$$P_{x1} = (V_r/C_0)^2 (\sigma - 1)/\sigma \cdot (0,83/R_x - 0,14/R_x^2) = \\ = 500^2/346^2 \cdot 6/7(0,83/0,34 - 0,14/0,1156) = 2,2018;$$

$$P_{x2} = \exp(-0,9278 - 1,5415 \cdot \ln(R_x) + 0,1953 \cdot \ln(R_x)^2 - \\ - 0,0285 \cdot \ln(R_x)^3) = 2,7136;$$

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}) = 2,2018$$

$$\Delta P = P_x \cdot P_0 = 223,1 \text{ кПа}$$

В выделенной области 2 реализуются избыточные давления, при которых возможно смертельное поражение человека. Радиус зоны поражения 120 кПа может быть определен с использованием метода дихотомии и формул (6), (10) и (12-13) и составляет 14 м.

В соответствии с пунктом 18.8 для выделенной области 2 определяется центр взрыва как центр масс горючего в выделенной области во взрывоопасных пределах по методике Руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ». Для выделенной области 2 оцененные координаты центра взрыва показаны на рисунке 4-4.

Указанная задача также может быть решена и без учета переменной загроможденности окружающего пространства. В этом случае согласно пункту 17 рассматривается взрыв целого облака. Загроможденность в облаке полагается как наихудшая загроможденность в пределах облака, т.е. второго вида (сильно

загроможденное пространство). Аналогично определяется эффективный энергозапас в облаке ТВС, скорость фронта пламени и радиус зоны поражения:

$$E = M_r \cdot q_r = 99 \cdot 4,64 \cdot 10^7 = 459,36 \cdot 10^7 \text{ Дж};$$

скорость фронта пламени составляет 500 м/с.

радиус зоны поражения 120 кПа составляет 24 м, который отсчитывается от центра масса облака ТВС.

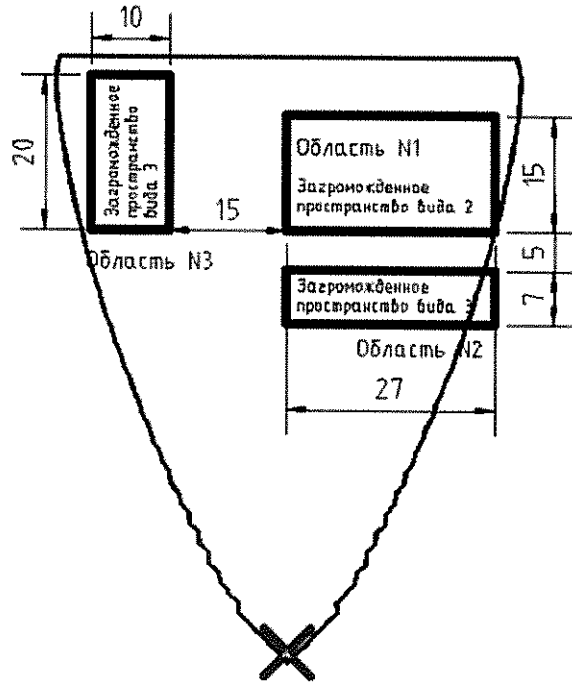


Рис. 4-3. Области загромождения \square , источник выброса \times и зона НКПР \bigcirc в момент достижения облаком ТВС наибольших размеров

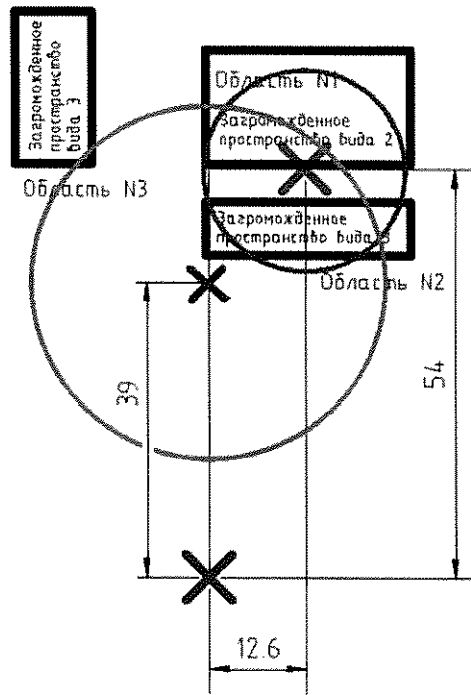


Рис. 4-4. Зоны поражения при взрыве облака ТВС

Условные обозначения:

- зона поражения 120 кПа при взрыве в выделенной области 2;
- зона поражения 120 кПа при взрыве всего облака у условиях сильной загроможденности;
- × центр взрыва в выделенной области 2;
- × центр взрыва всего облака ТВС;
- × источник выброса.