

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

КАФЕДРА ИНЖЕНЕРНОЙ ЭКОЛОГИИ И ХИМИИ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ И ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ
ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ
В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ЗАЩИТА НАСЕЛЕНИЯ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВСЕХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
ДНЕВНОЙ И ЗАОЧНОЙ ФОРМ ОБУЧЕНИЯ*



Брест 2024

УДК 355.586(07)

Методические указания предназначены для оперативной оценки устойчивости хозяйственных объектов к воздействию ударной волны и теплового излучения при взрывах газопаровоздушных смесей в открытом пространстве. На основе зависимостей, приведенных в табличной форме в «Методике прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте». (РД 52.04.253-90), авторами получены аналитические выражения, позволяющие вести расчеты с высокой точностью, не прибегая к интерполяции.

Приведены примеры расчетов.

Составители: В. Н. Босак, доцент
Н. В. Левчук, доцент
А. П. Головач, ст. преподаватель

Рецензенты: Е. В. Добрунов, директор ОАО «Брестжилпроект»
А. И. Пинчук, доцент, к. ф. м. н., доцент кафедры физики БрГТУ

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость работы хозяйственного объекта в чрезвычайной ситуации (ЧС) – это способность предприятия предупреждать возникновение производственных аварий и катастроф, противостоять воздействию поражающих факторов ЧС, предотвращать или ограничивать материальный ущерб, угрозу жизни и здоровью персонала и проживающего вблизи населения, а также восстанавливать нарушенное производство в минимальный срок при получении слабых и средних разрушений или нарушении связей по поставкам.

Оценка устойчивости хозяйственного объекта к воздействию ударной волны и теплового излучения при взрывах газопаровоздушных смесей может осуществляться методами математического моделирования.

Цель моделирования – прогнозирование условий функционирования объекта и его состояния в период ЧС. По результатам расчетов проводится анализ возможности функционирования объекта, выявляются его наиболее уязвимые места, планируются мероприятия по повышению устойчивости объекта и восстановлению производства в случае получения слабых и средних разрушений.

1 ВЗРЫВЫ

1.1 Общие сведения

Взрыв – процесс мгновенного высвобождения большого количества энергии в ограниченном объеме вследствие быстрого превращения вещества. В результате взрыва вещество превращается в сильно нагретый газ с очень большим давлением, который, мгновенно расширяясь, создает ударное воздействие на окружающие тела. Ударная волна, осколочное поле и тепловой импульс являются поражающими факторами взрывов.

Ударная волна – распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью тонкая переходная область в газе, жидкости или твердом теле, в которой происходит скачкообразное увеличение давления, плотности, температуры и скорости движения вещества. Фронт ударной волны – движущаяся поверхность раздела между сжатой и невозмущенной средой.

Осколочное поле – совокупность летящих обломков взрывного устройства, технологического оборудования, строительных деталей и т. д. Важнейшие параметры, характеризующие его поражающее действие – это количество осколков и их кинетическая энергия.

Тепловой импульс – количество тепловой энергии, приходящееся на единицу площади фронта ударной волны. В дальнейшем речь будет идти об ударной волне, возникающей в атмосфере при взрывах вблизи поверхности земли. Важнейшими параметрами такой ударной волны являются избыточное давление во фронте, скоростной напор и продолжительность фазы сжатия.

Избыточное давление – это разность между максимальным давлением во фронте ударной волны и атмосферным давлением.

Скоростной напор – это динамическая нагрузка, создаваемая потоком газов, следующим за фронтом ударной волны. Существенное влияние на преграду скоростной напор оказывает при давлении свыше 50 кПа. Скоростной напор обладает метательным действием и может отбросить различные предметы на значительные расстояния.

С момента прихода ударной волны в определенную точку пространства давление там резко повышается до максимального, а затем снижается до атмосферного и ниже атмосферного. **Фаза сжатия** – это период времени, когда давление в данной точке пространства выше атмосферного. **Фаза разрежения** соответствует периоду времени, когда давление в данной точке пространства ниже атмосферного. Ударная волна вызывает разрушения объектов, как в фазе сжатия, так и в фазе разрежения.

1.2 Взрывы газопаровоздушных смесей в открытом пространстве

Взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС) образуют класс объемных взрывов. Они могут происходить как в замкнутом, так и в открытом пространстве. Чаще всего возникают при утечке горючих газов или легкокипящих жидкостей из элементов оборудования, а также в емкостях для хранения и транспортировки легковоспламеняющихся и взрывчатых веществ. Частая причина таких взрывов – искра, в том числе из-за накопления статического электричества.

Наиболее опасны взрывы смесей углеводородных газов (этана, пропана, этилена, пропилена) с воздухом. При этом в зависимости от концентрации горючего вещества в ГПВС возможны два варианта развития ситуации: детонация и дефлаграционное (интенсивное) горение.

1.2.1 Детонация ГПВС

Детонация – это распространение со сверхзвуковой скоростью зоны быстрой экзотермической реакции, следующей за фронтом ударной волны. Ударная волна инициирует реакцию, сжимая и нагревая детонирующее вещество. Фронт ударной волны и зона реакции образуют в комплексе детонационную волну. Детонация в открытом пространстве возможна, если размер облака ГПВС превышает некоторое критическое значение, и если состав ГПВС близок к стехиометрическому, т. е. соотношение концентраций горючего вещества и кислорода в воздухе является оптимальным для протекания химической реакции окисления, сопровождающейся взрывом (см. таблицу 1).

В очаге взрыва ГПВС выделяют три круговые зоны: зону детонационной волны, зону действия продуктов взрыва и зону воздушной ударной волны.

Детонационная волна в газах – это ударная волна, сопровождаемая волной горения. Скорость распространения пламени равна скорости ударной волны и достигает 1700–2000 м/с. Избыточное давление в зоне детонационной волны является постоянным и составляет около 2 МПа. Температура горячих газов достигает 1500–3000° С.

Таблица 1 – Способность некоторых веществ к детонации [1]

Вещество	Объемная концентрация в воздухе, %	Минимальный диаметр облака ГПВС d_{min} , м
Ацетилен C ₂ H ₂	7,75-12,5	3,12
Водород H ₂	29,6	109,6
Пропан C ₃ H ₈	3,0-7,0	85,8
Пропилен C ₃ H ₆	3,5-8,5	58,5
Этан C ₂ H ₆	4,0-9,2	109,6
Этилен C ₂ H ₄	6,5-9,5	31,2
Метан CH ₄	9,4-12,3	398

Продукты взрыва – это расширяющиеся продукты детонации, чаще всего газы, образовавшиеся при взрывной реакции взаимодействия горючего вещества и кислорода воздуха. Давление во фронте ударной волны снижается от 1350 кПа на внутренней границе зоны до 315 кПа – на внешней.

Воздушная ударная волна – это область сжатого воздуха, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью во все стороны от центра взрыва. Она возбуждается расширяющимися продуктами детонации. По мере распространения воздушной ударной волны ее интенсивность убывает, скорость продвижения фронта уменьшается, и на значительных расстояниях от центра взрыва она вырождается в акустическую (звуковую) волну.

1.2.2 Расчет основных параметров детонации ГПВС в открытом пространстве [1]

Масса горючего вещества (M_D, m), перешедшего в атмосферу при разгерметизации емкости, определяется по формуле

$$M_D = M_B \cdot \vartheta, \quad (1)$$

где M_B – первоначальная масса горючего вещества в емкости, m ;

ϑ – коэффициент, учитывающий ту часть вещества, которая переходит в атмосферу при разгерметизации емкости. ϑ зависит от способа хранения продукта и принимается равным: **1** – для газов, хранящихся при атмосферном давлении, и сжатых газов; **0,5** – для газов, сжиженных под давлением и хранящихся при температуре окружающей среды; **0,1** – для газов, сжиженных охлаждением и хранящихся в теплоизолированных сосудах при низкой отрицательной температуре; **0,02–0,07** – при аварийном разливе легко воспламеняющихся жидкостей.

Объем образовавшегося полусферического облака ГПВС ($V_0, \text{м}^3$) определяется по формуле

$$V_0 = \frac{22,4 \cdot 10^5 \cdot M_D}{\mu \cdot C_{СТХ}}, \quad (2)$$

где μ – относительная молекулярная масса вещества (см. приложение 1);

$C_{СТХ}$ – объемная стехиометрическая концентрация горючего вещества в воздухе, наиболее благоприятная для возникновения детонации, % (см. приложение 1).

Диаметр ($d_0, \text{м}$) полусферического облака ГПВС определяется по формуле

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot V_0}{\pi}}. \quad (3)$$

Если полученное значение $d_0 \geq d_{min}$ (см. таблицу 1), то возникновение детонации в облаке ГПВС вполне вероятно.

Масса горючего облака ($m, \text{кг}$) определяется по формуле

$$m = \rho \cdot V_0, \quad (4)$$

где ρ – плотность единицы объема смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$ (см. приложение 1).

Тропиловый эквивалент (m_T , кг) наземного взрыва полусферического облака ГПВС определяется по формуле

$$m_T = \frac{2 \cdot m \cdot Q_B}{Q_T}, \quad (5)$$

где Q_B – теплота взрыва единицы массы смеси, МДж/кг (см. приложение 1);
 Q_T – теплота взрыва тротила, равная 4,184 МДж/кг.

Эффективное избыточное давление во фронте детонационной волны (ΔP_D , кПа) определяется по формуле

$$\Delta P_D = 2000 \cdot (\gamma - 1) \cdot Q_B \cdot \rho - P_0, \quad (6)$$

где γ – показатель адиабаты продуктов детонации (см. приложение 1);
 P_0 – стандартное атмосферное давление, равное 101,325 кПа.

Радиус действия детонационной волны (R_D , м) определяется по формуле

$$R_D = 10^a \cdot \sqrt[3]{m_T}, \quad (7)$$

где a – параметр, определяемый по формуле

$$R_D = 2,096 - \sqrt{3,144 + \frac{\lg\left(\frac{\Delta P_D}{P_0}\right)}{0,52}}. \quad (8)$$

Определение избыточного давления на расстояниях от эпицентра взрыва R больших R_D начинается с определения "приведенного" расстояния (R_{Π} , м/кг^{1/3}), которое рассчитывается по формуле

$$R_{\Pi} = \frac{R}{\sqrt[3]{m_T}}, \quad (9)$$

где R – расстояние от эпицентра взрыва до определенной точки на местности, м.

Затем находится «приведенное» давление P_{Π} по формуле

$$P_{\Pi} = 10^{0,65 - 2,18(\lg R_{\Pi} + 0,52(\lg R_{\Pi})^2)}. \quad (10)$$

Расчет избыточного давления во фронте ударной волны (ΔP_{Φ} , кПа) на расстояниях от эпицентра взрыва R больших R_D ведется по формуле

$$\Delta P_{\Phi} = P_0 \cdot P_{\Pi}. \quad (11)$$

Для оценки возможных последствий воздействия ударной волны на здания и сооружения определяют избыточное давление ($\Delta P_{\Phi K}$, кПа) по формуле

$$\Delta P_{\Phi K} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot P_0, \quad (12)$$

где K_1 – коэффициент ориентации объекта на центр возможного взрыва: равный 1,1 при неблагоприятной перпендикулярной ориентации наибольшей стены к направлению распространения ударной волны, равный 0,8 при расположении стен под углом $\sim 45^\circ$; равный 1 для промежуточных положений объекта, например, если направление распространения ударной волны перпендикулярно наименьшей стене (боковому фасаду) здания;

K_2 – коэффициент экранирования, учитывающий возможное затенение объекта соседними сооружениями: при наличии экранирующих построек, расположенных на линии распространения ударной волны на расстояниях менее 50 м от объекта, принимается равным 0,7–0,9 в зависимости от степени затенения; для всех остальных случаев равен 1;

K_3 – коэффициент перфорации (см. табл.2), отражающий влияние проемности стен здания β , определяемой по формуле

$$\beta = S_0/S_C, \quad (13)$$

где S_0 – площадь остекления, м²;

S_C – общая площадь поверхности стен, м².

Таблица 2 – Значения коэффициента K_3 для промышленных и гражданских зданий

Проемность β	0-0.3	0.3-0.5	0.5-0.7	Более 0.7
K_3	1.1	1	0.9	0.85

Примечание – Для других сооружений и объектов берется $K_3 = 1$.

Избыточное давление ударной волны, действующее на элементы, находящиеся внутри зданий и сооружений ($\Delta P_{ФП}$, кПа), определяется по формуле

$$\Delta P_{ФП} = \Delta P_{ФК} \cdot \Delta P_{СТ}, \quad (14)$$

где $C_{СТ}$ – коэффициент, учитывающий экранирующий эффект стен здания.

Таблица 3 – Значения коэффициента $C_{СТ}$

Характеристика материалов стен	Толщина стен, см	$C_{СТ}$
Панели из легких бетонов плотностью 700–1200 кг/м ³	10	0,9
	20–30	0,9
Кирпичная кладка плотностью 1800 кг/м ³	25–38	0,9
	64	0,85
Блоки из легких бетонов плотностью 700–1200 кг/м ³	0,95	0,85

Примечание – Для стенового заполнения из волнистой стали, стекла, легких деревянных элементов и асбестоцементных плит (шифера) берется $C_{СТ} = 1$.

1.2.3 Дефлаграционное горение ГПВС

Дефлаграция – это горение облака ГПВС, в ходе которого фронт реакции продвигается по горючей смеси благодаря процессам диффузии и теплопроводности со скоростью 100–300 м/с. Дефлаграция может приводить к возникновению ударной волны с максимальной величиной избыточного давления 20–100 кПа.

Дефлаграционное горение наблюдается в случае, если облако ГПВС переобогащено горючим компонентом по сравнению со стехиометрическим составом. Облако ГПВС при этом не детонирует, а интенсивно горит вокруг своей внешней оболочки, вытягивается и образует огненный шар. Предполагается, что вначале огненный шар имеет форму полусферы. Затем, по мере того как начинает проявляться действие подъемных сил на горячие газы, огненный шар всплывает, принимает сферическую форму и отрывается от земли. Если на земле есть разлившееся горючее вещество, то формируется ножка, соединяющая огненный шар и разлитие, при этом все огневое образование принимает характерную грибовидную форму. Чаще всего при этом вся масса горючего вещества быстро вовлекается в огненный шар и сгорает [2, 3].

Поражающее действие огненного шара определяется интенсивностью его теплового излучения, которое оценивают по величине теплового импульса.

1.2.4 Расчет основных параметров теплового излучения огненного шара

Предлагаемая методика расчета параметров теплового излучения огненного шара опирается на зависимости, приведенные в [1, 2]. Расчет параметров огненного шара ведется для единичной емкости. Зависимости, применяемые для расчета значений теплового импульса, падающего на объект, справедливы, если расстояние от эпицентра огненного шара до объекта (мишени) больше удвоенного радиуса огненного шара [1].

Радиус огненного шара (R_{III} , м) определяется по формуле

$$R_{III} = 27,5 \sqrt[3]{M_{III}}, \quad (15)$$

где M_{III} – масса горючего вещества в огненном шаре, т.

Время существования огненного шара (t_S , с) определяется по формуле

$$t_S = 3,8 \sqrt[3]{M_{III}}. \quad (16)$$

Мощность поверхностной эмиссии теплового излучения огненного шара (E , кВт/м) определяется по формуле

$$E = \frac{10^6 \cdot Q_C \cdot M_{III} \cdot \delta}{t_S \cdot S}, \quad (17)$$

где Q_C – теплота сгорания вещества, МДж/кг (см, приложение 1);

δ – доля теплового излучения в общем энерговыделении огненного шара принимается равной 0,3 [2];

S – площадь поверхности огненного шара, м.

Коэффициент F , учитывающий фактор удаленности объекта от емкости, определяется по формуле

$$F = \frac{R_{III}^2 \cdot R}{(R_{III}^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (18)$$

где R – расстояние от эпицентра огненного шара до объекта, при этом $R > 2R_{III}$, м.

Проводимость воздуха T_p определяется по формуле

$$T_p = 1 - 0,058 \cdot \ln R. \quad (19)$$

Импульс теплового излучения огненного шара, падающий на объект (Q , кДж/м) определяется по формуле

$$Q = E \cdot F \cdot T_p \cdot t_s. \quad (20)$$

2 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА К ВОЗДЕЙСТВИЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВАХ ГПВС

2.1 Действие ударной волны на людей и хозяйственные объекты

Ударная волна поражает незащищенных людей в результате непосредственного (прямого) и косвенного воздействия. При непосредственном воздействии ударной волны причиной поражения является избыточное давление (см. таблицу 4). При косвенном – люди поражаются обломками разрушенных зданий, осколками стекла и другими предметами, которые перемещаются под действием скоростного напора. Косвенное воздействие ударной волны возможно в зонах с избыточным давлением 3 кПа и более.

Таблица 4 – Степени поражения незащищенных людей в зависимости от значения избыточного давления во фронте ударной волны ΔP_{ϕ} [4]

Избыточное давление ΔP_{ϕ} , кПа	Поражения людей (травмы)	Характер поражения
20–40	Легкие	Легкая общая контузия организма, временное повреждение слуха, ушибы и вывихи конечностей
40–60	Средние	Серьезные контузии, повреждение органов слуха, кровотечение из носа и ушей, сильные вывихи и переломы конечностей
60–100	Тяжелые	Сильная контузия всего организма, повреждение внутренних органов и мозга, тяжелые переломы конечностей. Возможны смертельные исходы
свыше 100	Крайне тяжелые	Получаемые травмы очень часто приводят к смертельному исходу

Любой хозяйственный объект можно разделить на три составляющие:

- 1) здания и сооружения;
- 2) технологическое оборудование;
- 3) коммунально-энергетические сети (КЭС). При воздействии ударной волны они могут быть разрушены в различной степени. Разрушения делят на полные, сильные, средние и слабые.

Полные разрушения. В зданиях и сооружениях разрушены все основные несущие конструкции и перекрытия. Восстановление невозможно. Оборудование восстановлению не подлежит. На КЭС разрывы кабелей, разрушение значительных участков технологических трубопроводов, опор линий электропередач, Ориентировочный выход из строя элементов объекта (ущерб) составляет 90–100 %.

При **сильных разрушениях** ущерб составляет 50–90 %, при **средних** – 30–50 %, при **слабых** – 10–30 %. Подробная характеристика указанных степеней разрушения различных объектов приведена в приложении 4.

Поражение людей, находящихся в момент взрыва в зданиях, зависит от степени их разрушения.

Так, **при полных разрушениях** зданий находящиеся в них люди погибнут.

При сильных и средних разрушениях может выжить примерно половина людей, из которых значительная часть будет поражена в различной степени, многие могут оказаться под обломками конструкций, а также в помещениях с заваленными или разрушенными путями эвакуации. Они не могут быть спасены немедленно, поскольку требуется достаточное время для их поиска и освобождения из-под обломков разрушенных зданий.

При слабых разрушениях зданий гибель людей маловероятна. Однако часть из них может получить различные травмы и ранения при поражении летящими осколками разбитого стекла, обломками строительных конструкций, упавшим и опрокинутым оборудованием [4].

2.2 Порядок оценки устойчивости хозяйственного объекта к воздействию ударной волны

I. Выделение основных элементов объекта (цехов, производственных систем), от которых зависит функционирование объекта и выпуск продукции. Например, на машиностроительном заводе основными являются кузнечный, прессовый, механический и сборочный цеха, подъемно-транспортное оборудование, система энергоснабжения и т. д.

II. Определение предела устойчивости каждого цеха (элемента объекта) к воздействию ударной волны.

1. Выделяются и характеризуются основные элементы цеха, от которых зависит его функционирование: здание, технологическое оборудование, коммунально-энергетические сети.

2. Определяются степени разрушения элементов цеха в зависимости от избыточного давления ударной волны. Для этого по приложению 2 для каждого элемента, согласно его характеристике, находятся избыточные давления, при которых элемент получит слабые, средние и сильные разрушения. Степени разрушения элементов по шкале избыточных давлений показываются различной штриховкой или цветом (см, таблицу 8, с. 23).

3. Для каждого элемента цеха определяется **предел устойчивости к воздействию ударной волны** – минимальное избыточное давление, при котором элемент выходит из строя (теряет устойчивость). За предел устойчивости принимается нижняя граница диапазона избыточных давлений, при которых элемент получает средние разрушения. При этом возможно его восстановление и возобновление производства в короткие сроки.

4. Определяется **предел устойчивости цеха к воздействию ударной волны** ($\Delta P_{\text{Флим}}$, кПа) по минимальному пределу устойчивости входящих в его состав элементов. Цех рассматривается как система взаимосвязанных и взаимозависимых элементов, поэтому если хотя бы один из них теряет устойчивость, то ее утрачивает и весь цех. Таким образом, предел устойчивости цеха к воздействию ударной волны равен пределу устойчивости наиболее уязвимого элемента цеха.

Аналогично определяются пределы устойчивости к воздействию ударной волны всех основных цехов и производственных систем объекта.

III. Оценка устойчивости каждого цеха (элемента объекта) к воздействию ударной волны. По методике, приведенной в пп. 1.2.2 определяются избыточные давления ударной волны, действующие на основные элементы цеха.

Для каждого цеха сравниваются предел устойчивости $\Delta P_{\text{Фlim}}$ наиболее уязвимого элемента с избыточным давлением, действующим на этот элемент. Если окажется, что $\Delta P_{\text{Фlim}}$ больше, чем указанное избыточное давление, то цех устойчив к воздействию ударной волны, если же $\Delta P_{\text{Фlim}}$ меньше либо равен ему, то цех неустойчив. При этом для цехов, в которых постоянно находятся люди, необходимо учитывать степень поражения людей, находящихся как внутри здания, так и вблизи него. Устойчивым следует считать цех, если поражение людей отсутствует либо имеют место лишь легкие травмы.

IV. Заключение об устойчивости объекта к воздействию ударной волны. Если хотя бы один основной цех оказался неустойчивым к воздействию ударной волны, делается вывод о неустойчивости всего объекта в целом и предлагаются мероприятия по повышению устойчивости объекта. Объект считается устойчивым к воздействию ударной волны, если все основные цеха оказались устойчивыми к ее воздействию. Проведения мероприятий по повышению устойчивости объекта в этом случае не требуется.

V. Мероприятия по повышению устойчивости объекта к воздействию ударной волны. Данные мероприятия предлагаются для отдельных элементов объекта (цехов и производственных систем), которые оказались неустойчивыми к воздействию ударной волны. Главная их цель – защита людей, работающих в этих цехах. Поэтому **прежде всего необходимо предотвратить полные, сильные и средние разрушения зданий цехов**, т. е. такие разрушения, при которых могут серьезно пострадать люди. Затем следует попытаться избежать аналогичных разрушений технологического оборудования и КЭС.

1. Если при оценке устойчивости окажется, что элементы цеха получают **полные и сильные разрушения или не обеспечивается защита людей**, то целесообразно перенести емкость с взрывоопасным веществом на безопасное расстояние от цеха или уменьшить текущие запасы данного вещества, хранящиеся на территории объекта, до безопасного количества. Определяют указанные параметры, задавая избыточным давлением ударной волны ($\Delta P_{\text{Фy}}$), при котором элементы цеха сохраняют устойчивость и будет обеспечена защита людей. Последовательность расчета безопасного расстояния и безопасного количества взрывоопасного вещества – обратная по отношению к изложенной в пп. 1.2.2. При этом, если наиболее уязвимым элементом цеха является здание, то расчет начинают с формулы (12), если же необходимо обеспечить защиту людей и элементов цеха, находящихся внутри здания – с формулы (14), и, наконец, если требуется обеспечить защиту людей, находящихся вблизи цеха – с формулы (11).

2. Если при оценке устойчивости окажется, что элементы цеха получают **средние разрушения и защита людей обеспечивается**, то могут быть предусмотрены какие-либо мероприятия из указанных ниже.

Повышение устойчивости зданий и сооружений. Прежде всего, следует попытаться разместить емкость со взрывоопасным веществом так, чтобы здание было обращено к возможному направлению распространения ударной волны под углом 45° или своим боковым фасадом. Следует избегать углов на фасаде здания, направленных уступом внутрь и обращенных к источнику взрыва [3].

Кроме того, устойчивость зданий и сооружений к воздействию ударной волны может повышаться устройством дополнительных каркасов, рам, контрфорсов, подкосов, опор для уменьшения пролета несущих конструкций и их упрочнения. Кирпичные здания и здания с железобетонным каркасом могут усиливаться металлическим каркасом (внешним или внутренним). На несущие железобетонные конструкции может наращиваться дополнительный слой железобетона. Низкие сооружения для повышения их прочности частично обсыпаются грунтом. Для повышения устойчивости полуподвальных этажей зданий обсыпка производится до уровня пола первого этажа. Для кровли лучше использовать рифленое железо [3, 4].

Чтобы исключить косвенные поражения людей в здании при воздействии ударной волны, целесообразно заменять обычное остекление окон на ударопрочный поликарбонатный пластик или на ударопрочное бесколочное стекло. Двери в зданиях необходимо навешивать таким образом, чтобы ударная волна прижимала дверь к раме [3].

Высотные сооружения (трубы, вышки, башни, колонны) закрепляются оттяжками, рассчитанными на нагрузки, создаваемые скоростным напором ударной волны. Защита емкостей для хранения легковоспламеняющихся жидкостей и аварийно химически опасных веществ осуществляется заглублением их в грунт или обвалованием, а увеличение их механической прочности – установкой ребер жесткости [4].

Защита технологического оборудования предусматривает прочное закрепление станков на фундаментах, устройство для наиболее ценного и уникального оборудования стальных защитных кожухов, камер, навесов и козырьков.

Для повышения устойчивости коммунально-энергетических сетей их следует либо заглублять в грунт, либо размещать на низких эстакадах и обваловывать. Прочность открытых трубопроводов на высоких эстакадах можно увеличить постановкой ребер жесткости и хомутов, соединяющих 2–3 трубопровода в один пучок [4].

3 ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ ГПВС

3.1 Действие теплового излучения на людей и хозяйственные объекты

Поражающее действие теплового излучения при дефлаграционном горении ГПВС определяется поглощенной тепловой энергией, которая нагревает облучаемый объект. Люди, попавшие в пределы огненного шара, умрут мгновенно, а на более дальних расстояниях могут получить ожоги различной тяжести (см. таблицу 5).

При воздействии теплового излучения на территории хозяйственных объектов могут возникать пожары. В зависимости от разрушений, полученных при воздействии ударной волны, это могут быть пожары в завалах, сплошные и отдельные пожары. Пожары в завалах характерны для полных и сильных разрушений зданий и сооружений. Сплошные и отдельные пожары могут возникать при слабых и средних разрушениях, а также при отсутствии повреждений зданий и сооружений.

Таблица 5 – Характеристика ожогов открытых участков тела человека в зависимости от теплового импульса Q [4]

Степень ожога	$Q, \text{кДж/м}^2$	Характер поражения	Последствия ожогов для людей
I	100–200	Покраснение, припухлость и болезненность кожи	Не теряют работоспособность и не нуждаются в специальном лечении. Ожоги заживают быстро
II	200–400	Образование на коже пузырей, наполненных жидкостью	Как правило, теряют работоспособность и нуждаются в лечении
III	400–600	Полное разрушение кожного покрова по всей его толщине, образование язв	Нуждаются в пересадке кожи и длительном лечении
IV	более 600	Омертвление подкожной клетчатки, мышц и костей, обугливание	Нуждаются в длительном лечении. Возможен смертельный исход

Участок пожара в завалах охватывает элемент объекта (цех), который получил сильные или полные разрушения при наличии сгораемых материалов. Характеризуется сильным задымлением и продолжительным (свыше 2-х суток) горением в завалах. При этом выделяются продукты неполного сгорания и токсичные вещества.

Участок сплошного пожара охватывает более двух ближайших друг к другу элементов объекта, в каждом из которых возникли пожары. При этом охваченные огнем объекты образуют замкнутый контур (кольцо), что затрудняет тушение каждого из них в отдельности.

Участок отдельного пожара охватывает элемент объекта (цех), в котором возник пожар, при этом допускается, что лишь в одном из ближайших к нему зданий и сооружений также возник пожар.

К факторам, оказывающим влияние на возникновение и распространение пожаров на хозяйственных объектах, относятся: огнестойкость зданий и сооружений; степень пожарной опасности производства; плотность застройки; метеоусловия; разрушения, полученные зданиями и сооружениями (если пожар возникает в результате взрыва или сопровождается взрывами).

Огнестойкость зданий и сооружений определяется возгораемостью их элементов и пределами огнестойкости основных конструкций. Все строительные материалы по возгораемости делятся на три группы: негораемые (бетон, кирпич, керамика, сталь), трудногораемые (утеплители из минеральной ваты, оштукатуренная или пропитанная огнестойкими составами древесина), сгораемые (древесина, пластики).

Предел огнестойкости строительной конструкции – это время в часах от начала воздействия огня на конструкцию до образования в ней сквозных трещин либо до достижения температуры 200°C на поверхности, противоположной воздействию огня, либо до потери конструкцией несущей способности (до обрушения). Предел огнестойкости свыше 1 ч имеют конструкции из камня, кирпича, бетона; около 0,25 ч – стальные.

Различают пять степеней огнестойкости зданий и сооружений:

I и **II** – основные конструкции выполнены из негораемых материалов, причем аналогичные конструкции у зданий I степени имеют больший предел огнестойкости;

III – несущие стены выполнены из несгораемых материалов, а перекрытия и перегородки – сгораемые и трудносгораемые (многоэтажные здания с каменными стенами и деревянными оштукатуренными перекрытиями и одноэтажные каменные здания с деревянными перекрытиями);

IV – деревянные оштукатуренные здания;

V – деревянные неоштукатуренные здания.

Наиболее опасны здания и сооружения III, IV, V степени огнестойкости. Ориентировочное время развития пожара до полного охвата здания огнем: для четырех-пятиэтажного здания II степени огнестойкости – 3–4 ч; для III – не более 1,5 ч; для IV и V – не более 1 ч.

Пожарная опасность производства определяется технологическим процессом, используемыми материалами (веществами) и готовой продукцией. По взрывной и пожарной опасности производственные объекты подразделяются на категории: А, Б, В, Г, Д.

Категория А – производства, связанные с применением веществ, воспламенение или взрыв которых может произойти при воздействии воды или кислорода воздуха; жидкостей с температурой вспышки паров 28°C и ниже; горючих газов, нижний предел взрываемости которых 10 % и менее объема воздуха (т. е. взрыв возможен, если в объеме воздуха содержится до 10 % горючих газов). К этой категории относятся цеха обработки и применения металлического натрия и калия, склады бензина и баллонов с горючими газами, бензиоэкстракционные цехи, водородные станции.

Категория Б – производства, связанные с применением жидкостей с температурой вспышки паров от 28 до 120°C и горючих газов, нижний предел взрываемости которых более 10 % объема воздуха, а также производства, где выделяются и переходят во взвешенное состояние горючие волокна или пыль. Например, цеха приготовления и транспортировки угольной пыли и древесной муки, цеха сахарной пудры, цеха обработки синтетического каучука, мазутное хозяйство ТЭС.

Категория В – производства, связанные с применением твердых сгораемых веществ, а также жидкостей с температурой вспышки паров свыше 120°C . К этой категории относятся лесопильные и деревообрабатывающие цеха, цеха текстильной и бумажной промышленности, швейные и трикотажные фабрики, склады топливно-смазочных материалов, открытые склады масла и масляное хозяйство ТЭС, гаражи.

Категория Г – производства, связанные с обработкой несгораемых материалов в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, а также производства, связанные со сжиганием твердого или газообразного топлива. Например, литейные, плавильные, кузнечные и сварочные цеха, цеха горячей прокатки металла, котельные и главные корпуса ТЭС.

Категория Д – производства, связанные с обработкой несгораемых веществ в холодном состоянии. К ним относятся цеха холодной обработки металлов, насосные и водоприемные устройства, градирни, углекислотные и хлораторные установки.

Наиболее опасны в пожарном отношении производства категории А и Б.

Здесь возможен почти мгновенный охват огнем всех элементов объекта. Для объектов категорий В, Г, Д возможность возникновения отдельных пожаров зависит от степени огнестойкости зданий, а распространение огня и образование сплошных пожаров от плотности застройки.

Плотность застройки (P_3 , %) – это отношение суммарной площади $S_{\text{п}}$, занимаемой всеми зданиями и сооружениями на объекте, к общей площади территории объекта $S_{\text{т}}$. Плотность застройки определяется по формуле

$$P_3 = \frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{т}}} \cdot 100 . \quad (21)$$

При плотности застройки до 7 % пожары практически не распространяются. При увеличении плотности застройки, увеличивается вероятность распространения пожара. Участки отдельных пожаров могут перерасти в сплошные пожары при следующих сочетаниях огнестойкости зданий и плотности застройки:

- здания I и II степени огнестойкости и P_3 более 30 %;
- здания III степени огнестойкости и P_3 более 20 %;
- здания IV и V степени огнестойкости и P_3 более 10 %.

Плотность застройки косвенно характеризует расстояния между зданиями и, следовательно, вероятность переноса огня с одного здания на другое (см. таблицу 6).

Таблица 6 – Вероятность распространения пожара [5]

Расстояние между зданиями, м	0	5	10	15	20	30	40	50	70	90
Вероятность распространения пожара, %	100	87	65	47	27	23	9	3	2	0

На пожарную обстановку значительное влияние оказывают **метеоусловия**. При сухой погоде и скорости ветра 3–5 м/с скорость распространения пожара: для зданий II и III степени огнестойкости – 60–120 м/ч; для зданий IV и V степени огнестойкости – 120–300 м/ч. При увеличении скорости ветра до 10–20 м/с скорость распространения пожара увеличивается в 2–3 раза.

3.2 Порядок оценки устойчивости хозяйственного объекта к воздействию теплового излучения

I. Определяются площади каждого здания и сооружения и территории хозяйственного объекта, используя план объекта.

II. Определяется плотность застройки по формуле (21).

III. Определяется категория пожарной опасности производства и степень огнестойкости зданий и сооружений. Для этого изучаются их характеристики, указанные в исходных данных.

IV. Определение предела устойчивости каждого цеха (элемента объекта) к воздействию теплового излучения.

1. В здания цеха выявляются сгораемые элементы конструкций, сгораемое оборудование, сгораемые материалы и вещества, используемые в производстве. Определяются величины тепловых импульсов, вызывающих их возгорание (см. приложение 5).

2. Определяется предел устойчивости цеха к воздействию теплового излучения Q_{lim} по минимальному тепловому импульсу, вызывающему возгорание в цехе.

Аналогично определяются пределы устойчивости к воздействию теплового излучения всех основных цехов и производственных систем объекта.

V. Оценка устойчивости каждого элемента объекта (цеха) к воздействию теплового излучения. Определяется величина теплового импульса в районе цеха при дефлаграционном горении облака ГПВС по методике, изложенной в пп.1.2.4.

Для каждого цеха сравниваются предел устойчивости Q_{lim} с ожидаемым тепловым импульсом в районе цеха Q . Если окажется, что $Q_{lim} > Q$, то цех устойчив к воздействию теплового излучения, если же $Q_{lim} \leq Q$ – неустойчив. При этом для цехов, в которых постоянно находятся люди, необходимо учитывать степень поражения людей, находящихся как внутри здания, так и вблизи него. Устойчивым следует считать цех, если поражение людей отсутствует, либо имеют место лишь ожоги I степени (см. таблицу 6).

VI. Заключение об устойчивости объекта к воздействию теплового излучения. Если хотя бы один основной цех оказался неустойчивым к воздействию теплового излучения, делается вывод о неустойчивости всего объекта в целом. В противном случае объект считается устойчивым к воздействию теплового излучения.

VII. Определяют зону пожаров, в которой окажется каждый цех (элемент объекта), исходя из категории пожарной опасности производства, плотности застройки, степени огнестойкости здания и степени его разрушения, а также, учитывая наличие очагов возгорания в соседних зданиях и степень их разрушения.

VIII. Определяют вероятность распространения пожара на незатронутые огнем элементы объекта (см. таблицу 7), скорость продвижения огня с учетом метеоусловий и возможность перерастания участков отдельных пожаров в сплошной пожар.

IX. Мероприятия по повышению устойчивости объекта к воздействию теплового излучения и уменьшения вероятности распространения пожара. Данные мероприятия предлагаются для отдельных цехов и производственных систем, которые оказались неустойчивыми к воздействию теплового излучения.

Если в результате расчета окажется, что цех будет полностью обхвачен огнем либо в нем возникнут многочисленные очаги возгорания, либо не обеспечивается защита людей, целесообразно перенести емкость с горючим веществом на безопасное расстояние ($R_B, м$) [2], которое определяют по формуле

$$R_B = 5,5 \cdot R_{III} \quad (22)$$

Для повышения устойчивости зданий и сооружений к воздействию теплового излучения и уменьшению вероятности распространения пожаров можно предусматривать: замену мягкой кровли на асбоцементную или металлическую; замену деревянных оконных рам и переплетов на металлические; обивку деревянных дверей кровельной сталью по асбестовой прокладке.

4 ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Пример 1. На территории машиностроительного завода находится емкость, в которой содержится сжиженный под давлением пропан массой $M_B = 60$ т. Принимаем следующий сценарий событий для математического моделирования.

В результате аварийной утечки в атмосферу перешла часть содержимого емкости. Искра из выхлопной трубы проезжавшего автомобиля привела к детонации газозадушной смеси (ГВС). При этом емкость с пропаном полностью разрушилась, произошел мгновенный выброс и дефлаграционное сгорание оставшейся части пропана с образованием огненного шара.

Необходимо провести оценку устойчивости к воздействию ударной волны и теплового излучения механического цеха, расположенного на расстоянии $R = 250$ м от центра взрыва. За центр взрыва условно принимаем геометрический центр емкости с пропаном.

Цех ориентирован перпендикулярно к направлению распространения ударной волны своим боковым фасадом. Затенение цеха соседними зданиями отсутствует. Люди, работающие в цехе, одеты в спецодежду из темной хлопчатобумажной ткани.

Таблица 7 – Краткая характеристика цеха

Здание	из сборного железобетона, с панелями из легкого бетона толщиной 20 см. Площадь остекления (проемность стен здания) 32 % ($\beta = 0,32$)
Технологическое оборудование	Станки металлообрабатывающие – тяжелые и средние
КЭС	Электросеть кабельная наземная
Характер производства	Холодная обработка металла
Возгораемые материалы	Кровля мягкая; двери и оконные рамы деревянные, окрашенные в темный цвет; изоляция кабеля

I Оценка устойчивости цеха к воздействию ударной волны.

1. Массу пропана (M_D), перешедшего в атмосферу при разгерметизации емкости, определяем по формуле (1)

$$M_D = M_B \cdot 9 = 60 \cdot 0,5 = 30 \text{ т.}$$

2. Объем образовавшегося полусферического облака ГВС (V_0) определяем по формуле (2)

$$V_0 = \frac{22,4 \cdot 10^5 \cdot M_D}{\mu \cdot C_{СТХ}} = \frac{22,4 \cdot 10^5 \cdot 30}{44,09 \cdot 4,03} = 378202,3 \text{ м}^3$$

3. Диаметр (d_0) полусферического облака ГВС определяем по формуле (3)

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot V_0}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot 378202,3}{3,14}} = 113,1 \text{ м}$$

Полученное значение $d_0 > d_{\min}$ (см. таблицу 1, с. 5). Таким образом, возникновение детонации в облаке ГВС вполне вероятно, а принятый в условии задачи сценарий событий оправдан.

4. Массу горючего облака (m) определяем по формуле (4)

$$m = \rho \cdot V_0 = 1,315 \cdot 378202,3 = 497336,0 \text{ кг.}$$

5. Тротильный эквивалент (m_T) наземного взрыва полусферического облака ГВС определяем по формуле (5)

$$M_T = \frac{2 \cdot m \cdot Q_B}{Q_T} = \frac{2 \cdot 497336,0 \cdot 2,801}{4,184} = 665888,2 \text{ кг.}$$

6. Эффективное избыточное давление во фронте детонационной волны (ΔP_D) определяем по формуле (6)

$$\Delta P_D = 2000 \cdot (\gamma - 1) \cdot Q_B \cdot \rho - P_0 = 2000 \cdot (1,257 - 1) \cdot 2,801 \cdot 1,315 - 101,325 = 1791,9 \text{ кПа.}$$

7. Параметр α определяем по формуле (8)

$$\alpha = 2,096 - \sqrt{3,144 + \frac{\lg\left(\frac{\Delta P_D}{P_0}\right)}{0,52}} = 2,096 - \sqrt{3,144 + \frac{\lg\left(\frac{1791,9}{101,325}\right)}{0,52}} = -0,258.$$

8. Радиус действия детонационной волны (R_D) определяем по формуле (7)

$$R_D = 10^\alpha \cdot \sqrt[3]{m_T} = 10^{-0,258} \cdot \sqrt[3]{665888,2} = 48,2 \text{ м.}$$

Расстояние до цеха $R=250$ м больше R_D . Таким образом, цех не попал в зону детонационной волны.

9. "Приведенное" расстояние до цеха (R_{Π}) определяем по формуле (9)

$$R_{\Pi} = \frac{R}{\sqrt[3]{m_T}} = \frac{250}{\sqrt[3]{665888,2}} = 2,863 \text{ м/кг}^{1/3}.$$

10. "Приведенное" давление (P_{Π}) определяем по формуле (10)

$$P_{\Pi} = 10^{(0,65 - 2,18 \cdot \lg R_{\Pi} + 0,52 \cdot (\lg R_{\Pi})^2)} = 10^{(0,65 - 2,18 \cdot \lg 2,863 + 0,52 \cdot (\lg 2,863)^2)} = 0,579.$$

11. Избыточное давление во фронте ударной волны (ΔP_{Φ}) в районе цеха определяем по формуле (11)

$$\Delta P_{\Phi} = P_0 \cdot P_{\Pi} = 101,325 \cdot 0,579 = 58,7 \text{ кПа.}$$

12. Избыточное давление ударной волны, действующее на здание цеха ($\Delta P_{\Phi K}$), определяем по формуле (12)

$$\Delta P_{\Phi K} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \Delta P_{\Phi} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 58,7 = 58,7 \text{ кПа.}$$

13. Избыточное давление ударной волны, действующее на элементы, находящиеся внутри здания цеха ($\Delta P_{\Phi \Pi}$), определяем по формуле (14)

$$\Delta P_{\Phi \Pi} = \Delta P_{\Phi K} \cdot C_{CT} = 58,7 \cdot 0,9 = 52,8 \text{ кПа.}$$

14. По данным приложения 2 (с. 32) составим таблицу для оценки устойчивости к воздействию ударной волны всех основных элементов цеха (здания, технологического оборудования и КЭС).

Таблица 8 – Оценка устойчивости механического цеха к воздействию ударной волны

Элементы цеха	Степень разрушения при ΔP_{Φ} , кПа							$\Delta P_{\Phi_{lim}}$, кПа	Примечание
	0	10	20	30	40	50	60		
Здание: из сборного железобетона								20	Предел устойчивости цеха к воздействию ударной волны 20 кПа
Технологическое оборудование: Станки тяжелые Станки средние								40 25	
КЭС: Электросеть кабельная наземная								30	

Примечание – 1. $\Delta P_{\Phi_{lim}}$ – предел устойчивости элементов цеха к воздействию ударной волны (см. с. 11-12). 2. Избыточное давление, действующее на элементы цеха, показано жирной вертикальной чертой. 3. Степени разрушений элементов цеха:

- слабые, - средние, - сильные.

Анализ данных таблицы 8. Согласно данным приложения 4, в результате воздействия ударной волны в здании цеха возможна значительная деформация несущих железобетонных конструкций, будет разрушена большая часть перекрытий и стен, возникнут сплошные завалы. Станки средние могут быть опрокинуты и полностью разрушены. Станки тяжелые могут быть смещены с фундаментов и опрокинуты, возможна деформация их основных деталей и повреждение электропроводки. Кабельная наземная электросеть получит множественные разрывы. Возможны вторичные разрушения оборудования и КЭС, вследствие обрушения большей части перекрытий и стен здания.

Восстановление элементов цеха. Станки тяжелые могут быть восстановлены, если они не получат сильных разрушений в результате обрушения большей части перекрытий и стен здания.

Из всех элементов цеха здание имеет наименьший предел устойчивости к воздействию ударной волны и является наиболее уязвимым элементом цеха. Предел устойчивости здания к воздействию ударной волны, равный 20 кПа, является пределом устойчивости цеха. Согласно расчету, он оказался меньше избыточного давления ударной волны, действующего на здание.

Анализ поражения людей. Незащищенные люди, находящиеся на расстоянии 250 м от эпицентра взрыва, в том числе, вблизи механического цеха, могут получить травмы средней тяжести (см. таблицу 4, с. 10). Из находящихся в цехе людей сразу может погибнуть примерно половина, так как большая часть перекрытий и стен здания будет разрушена, и образуются сплошные завалы.

Оставшиеся в живых могут быть погребены под завалами и поражены в различной степени обломками строительных конструкций, осколками разбитого стекла, упавшим и опрокинутым оборудованием (см. с. 11).

Вывод.

Механический цех является неустойчивым к воздействию ударной волны. Требуются мероприятия по повышению устойчивости цеха.

II Оценка устойчивости цеха к воздействию теплового излучения.

15. Согласно условию задачи, масса пропана (M_{III}), образовавшая огненный шар, равна

$$M_{III} = M_B - M_D = 60 - 30 = 30 \text{ т.}$$

16. Радиус огненного шара (R_{III}) определяем по формуле (15)

$$R_{III} = 27,5 \cdot \sqrt[3]{M_{III}} = 27,5 \cdot \sqrt[3]{30} = 85,45 \text{ м.}$$

Расстояние до цеха $R = 250$ м больше удвоенного радиуса огненного шара $2 \cdot R_{III} = 2 \cdot 85,45 = 170,9$ м, что позволяет вести расчет по методике, изложенной в пп. 1.2.4.

17. Считаем, что огненный шар имеет сферическую форму. Площадь поверхности огненного шара (S) равна

$$S = 4 \cdot \pi \cdot R_{III}^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 85,45^2 = 91709,4 \text{ м}^2.$$

18. Время существования огненного шара (t_s) определяем по формуле (16)

$$t_s = 3,8 \cdot \sqrt[3]{M_{III}} = 3,8 \cdot \sqrt[3]{30} = 11,8 \text{ с.}$$

19. Мощность поверхностной эмиссии теплового излучения огненного шара (E) определяем по формуле (17)

$$E = \frac{10^6 \cdot Q_C \cdot M_{III} \cdot \delta}{t_s \cdot S} = \frac{10^6 \cdot 46,44 \cdot 30 \cdot 0,3}{11,8 \cdot 91709,4} = 386,2 \text{ кВт/м}^2.$$

20. Коэффициент F , учитывающий фактор удаленности цеха от емкости, определяем по формуле (18)

$$F = \frac{R_{III}^2 \cdot R}{(R_{III}^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{85,45^2 \cdot 250}{(85,45^2 + 250^2)^{3/2}} = 0,099.$$

21. Проводимость воздуха (T_P) определяется по формуле (19)

$$T_P = 1 - 0,058 \cdot \ln R = 1 - 0,058 \cdot \ln 250 = 0,68.$$

22. Импульс теплового излучения огненного шара (Q), падающий на здание цеха, определяется по формуле (20)

$$Q = E \cdot F \cdot T_P \cdot t_s = 386,2 \cdot 0,099 \cdot 0,68 \cdot 11,8 = 306,8 \text{ кДж/м}^2.$$

23. Пользуясь данными приложения 5 (с. 35), составим таблицу для оценки устойчивости цеха к воздействию теплового излучения.

Таблица 9 – Оценка устойчивости механического цеха к воздействию теплового излучения

Степень огнестойкости здания	Степень пожарной опасности производства	Возгораемые элементы (материалы) в цехе и их характеристики	Тепловой импульс, вызывающий возгорание элемента цеха, кДж/м ²	Предел устойчивости цеха к тепловому излучению Q_{lim} , кДж/м ²	Тепловой импульс в районе цеха Q , кДж/м ²	Разрушения здания цеха	Зона пожаров, в которой может оказаться цех*
II	Д	Кровля мягкая	580	250	306,8	сильные	участок пожара в завалах
		Двери и оконные рамы деревянные, окрашенные в темный цвет	250				
		Изоляция кабеля	250				

Примечание – Зона пожаров, в которой может оказаться цех, определяется с учетом анализа обстановки, сложившейся в результате взрыва в соседних зданиях и сооружениях.

Анализ данных таблицы 9. В результате воздействия теплового излучения огненного шара в цехе могут воспламениться деревянные двери и оконные рамы, окрашенные в темный цвет, изоляция кабеля. Мягкая кровля не пострадает. Однако, если очаги возгорания не будут быстро ликвидированы, возможно ее воспламенение и горение в завалах.

Из всех возгораемых элементов цеха двери, оконные рамы и изоляция кабеля имеют наименьший предел устойчивости к воздействию теплового излучения и являются наиболее уязвимыми элементами цеха. Их предел устойчивости к воздействию теплового излучения, равный 250 кДж/м², является пределом устойчивости цеха. Согласно расчету, он оказался меньше теплового импульса в районе цеха.

Анализ поражения людей. Незащищенные люди, находящиеся на расстоянии 250 м от эпицентра взрыва, в том числе вблизи механического цеха, получат ожоги второй степени открытых участков тела (см. таблицу 5, с. 15) и на них будет гореть спецодежда (см. приложение 5). Люди внутри здания цеха, оказавшиеся под непосредственным воздействием теплового излучения, получат ожоги второй степени открытых участков тела, и на них будет гореть спецодежда. В затененных участках цеха и в завалах люди от воздействия теплового излучения огненного шара не пострадают. Возможно их поражение при горении возгораемых материалов цеха (ожоги, удушье и отравление токсичными продуктами горения).

Вывод

Механический цех является неустойчивым к воздействию теплового излучения. Требуется мероприятия по повышению устойчивости цеха.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается устойчивость работы хозяйственного объекта в чрезвычайной ситуации?
2. Что такое взрыв? Назовите поражающие факторы взрывов.
3. Что такое ударная волна?
4. Основные параметры ударной волны, возникающей в атмосфере, при взрывах вблизи поверхности земли.
5. Дайте определение детонации и опишите данный процесс. При каких условиях возможна детонация ГПВС в открытом пространстве?
6. Опишите процесс дефлаграционного горения ГПВС.
7. Воздействие ударной волны на людей.
8. Степени разрушения хозяйственных объектов при воздействии ударной волны.
9. Характер поражения людей, находящихся в момент взрыва в зданиях.
10. Что такое предел устойчивости элемента цеха к воздействию ударной волны?
11. Как определяется предел устойчивости цеха к воздействию ударной волны?
12. Назовите способы повышения устойчивости хозяйственных объектов к воздействию ударной волны.
13. В чем заключается воздействие скоростного напора ударной волны на элементы хозяйственных объектов?
14. Действие теплового излучения огненного шара на людей.
15. Характер возможных пожаров на хозяйственных объектах при взрывах ГПВС.
16. Назовите факторы, влияющие на возникновение и распространение пожаров на хозяйственных объектах.
17. От чего зависит степень огнестойкости зданий и сооружений?
18. Что такое предел огнестойкости строительной конструкции?
19. Степени огнестойкости зданий и сооружений.
20. Чем определяется пожарная опасность производства?

6 ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Характеристика газопаровоздушных смесей [1, 2, 7]

Горючий компонент	ρ , кг/м ³	Q_B , МДж/кг	Q_C , МДж/кг	γ	μ	$C_{стх}$, %
Газовоздушные смеси						
Аммиак NH ₃	1,180	2,370	18,59	1,248	17,03	19,72
Ацетилен C ₂ H ₂	1,278	3,387	49,00	1,259	26,04	7,75
Бутан C ₄ H ₁₀	1,328	2,776	45,78	1,270	58,12	3,13
Бутилен C ₄ H ₈	1,329	2,892	45,36	1,260	56,11	3,38
Винилхлорид C ₂ H ₃ Cl	1,400	2,483	19,20	1,260	62,49	7,75
Водород H ₂	0,933	3,425	119,71	1,248	2,02	29,59
Дивинил C ₄ H ₆	1,330	2,962	45,20	1,260	54,09	3,68
Метан CH ₄	1,232	2,763	50,00	1,256	16,04	9,45
Оксид углерода CO	1,280	2,930	10,10	1,256	28,01	29,59
Пропан C ₃ H ₈	1,315	2,801	46,44	1,257	44,09	4,03
Пропилен C ₃ H ₆	1,314	2,922	45,78	1,259	42,08	4,46
Этан C ₂ H ₆	1,250	2,797	47,46	1,257	30,07	5,66
Этилен C ₂ H ₄	1,285	3,010	47,25	1,259	28,05	6,54
Паровоздушные смеси						
Ацетон C ₃ H ₆ O	1,210	3,112	28,55	1,259	58,08	4,99
Бензол C ₆ H ₆	1,350	2,937	41,17	1,261	78,12	2,84
Гексан C ₆ H ₁₄	1,340	2,797	44,94	1,261	86,18	2,16
Дихлорэтан C ₂ H ₄ Cl ₂	1,490	2,164	10,57	1,265	98,97	6,54
Диэтиловый эфир C ₄ H ₁₀ O	1,360	2,840	33,86	1,261	74,12	3,38
Ксилол C ₈ H ₁₀	1,355	2,830	40,80	1,259	106,17	1,96
Метанол CH ₄ O	1,300	2,843	19,93	1,253	32,04	12,3
Пентан C ₅ H ₁₂	1,340	2,797	45,36	1,258	72,15	2,56
Толуол C ₇ H ₈	1,350	2,843	41,53	1,260	92,14	2,23
Циклогексан C ₆ H ₁₂	1,340	2,797	43,83	1,248	84,16	2,28
Этанол C ₂ H ₆ O	1,340	2,804	26,80	1,256	46,07	6,54

Примечание – 1. Теплота сгорания вещества (Q_C) принята из условия, что одним из конечных продуктов горения является водяной пар (низшая теплота сгорания). **2.** Плотность единицы объема ГПВС (ρ) и показатель адиабаты продуктов детонации (γ) приведены для стехиометрического состава смесей.

Приложение 2

Величины избыточных давлений ударной волны $\Delta P_{\text{ф}}$, кПа, вызывающие разрушения объектов различной степени [1, 4]

№	Наименование объекта	Разрушения		
		слабые	средние	сильные
1	2	3	4	5
1 Производственные, административные здания и сооружения				
1	Массивное промышленное здание с металлическим каркасом и крановым оборудованием грузоподъемностью 25–50 т	20–30	30–40	40–50
2	То же с крановым оборудованием грузоподъемностью 60–100 т	20–40	40–50	50–60
3	Бетонное или железобетонное здание антисейсмической конструкции	25–80	80–150	150–200
4	Здание с легким металлическим каркасом или бескаркасной конструкции	10–20	20–30	30–50
5	Здание металлическим каркасом и бетонным заполнением с площадью остекления около 30 %	10–20	20–30	30–40
6	Здание с металлическим каркасом и сплошным хрупким заполнением стен и крыши	10–20	20–30	30–40
7	Многоэтажное железобетонное здание с большой площадью остекления	8–20	20–40	40–90
8	Здание из сборного железобетона	10–20	20–30	30–60
9	Одноэтажное здание с металлическим каркасом и стеновым заполнением из волнистой стали	5–7	7–10	10–15
10	То же, с крышей и стеновым заполнением из волнистой стали	7–10	10–15	15–25
11	Кирпичное бескаркасное здание с перекрытием (покрытием) из железобетонных сборных элементов одно- или многоэтажное	10–20	20–35	35–45
12	То же, с перекрытием (покрытием) из деревянных элементов одно- или многоэтажное	8–15	15–25	25–35
13	Здание фидерной или трансформаторной подстанции из кирпича или блоков	10–20	20–40	40–60
14	Складское кирпичное здание	10–20	20–30	30–40
15	Легкий склад-навес с металлическим каркасом и шиферной кровле	10–25	25–35	35–50
16	Склад-навес из железобетонных элементов	20–35	35–70	70–100
17	Административное многоэтажное здание с металлическим или железобетонным каркасом	20–30	30–40	40–50
18	Кирпичное малоэтажное (1-2 этажа)	8–15	15–25	25–35
19	Кирпичное многоэтажное (3 этажа и более)	8–12	12–20	20–30
20	Деревянный дом	6–8	8–12	12–20
21	Затворы плотин	20–70	70–100	>100
22	Остекление обычное	0,5–1	1–1,5	1,5–3
23	Остекление из армированного стекла	1–1,5	1,5–2	2–5
2 Некоторые виды технологического оборудования				
1	Станки тяжелые	25–40	40–60	60–70
2	Станки средние	15–25	25–35	35–45
3	Станки легкие	6–12	12–15	15–25
4	Станки с ЧПУ	10–20	20–30	30–40
5	Робототехника	8–20	20–40	40–50

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
6	Краны и крановое оборудование	20–30	30–50	50–70
7	Подъемно-транспортное оборудование	20–50	50–60	60–80
8	Кузнечно-прессовое оборудование	50–100	100–150	150–200
9	Электродвигатели мощностью до 2 кВт, открытые	20–40	40–50	50–80
10	То же, герметичные	30–50	50–70	70–80
11	Электродвигатели мощностью от 2 до 10 кВт, открытые	30–50	50–70	70–80
12	То же, герметичные	40–60	60–75	75–110
13	Электродвигатели мощностью 10 кВт и более, открытые	50–60	60–80	80–120
14	То же, герметичные	60–70	70–80	80–120
15	Трансформаторы от 100 до 1000 кВт	20–30	30–50	50–60
16	Трансформаторы блочные	30–40	40–60	–
17	Генераторы на 100-300 кВт	30–40	40–60	–
18	Открытые распределительные устройства	15–25	25–35	–
19	Масляные выключатели	10-20	20–30	–
20	Контрольно-измерительная аппаратура	5–10	10–20	20–30
21	Электронно-вычислительные машины	5–10	10–15	15–20
22	Магнитные пускатели	20–30	30–40	40–60
23	Стеллажи	10–25	25–35	35–50
3 Коммунально-энергетические сооружения и сети				
1	Газгольдеры и наземные резервуары для ТСМ и химических веществ	15–20	20–30	30–40
2	Подземные металлические и железобетонные резервуары	40–50	50–100	100–200
3	Частично заглубленные резервуары	30–50	50–80	80–100
4	Наземные металлические резервуары и емкости	20–40	40–70	70–90
5	Деревянные заглубленные хранилища стойчатой конструкции	20–40	40–60	60–100
6	Открыто расположенное оборудование артезианских скважин	70–110	110–130	130–170
7	Водонапорные башни	10–20	20–40	40–60
8	Котельные и регуляторные станции в кирпичных зданиях	7–13	13–25	25–35
9	Металлические вышки сплошной конструкции	20–30	30–50	50–70
10	Трансформаторные подстанции закрытого типа	30–40	10–15	15–20
11	Тепловые электростанции	10–15	15–20	20–25
12	Паровые котлы (парогенераторы)	50–70	70–100	100–150
13	Градири из монолитного железобетона	30–40	40–60	60–80
14	Дымовые трубы	60–80	80–90	90–120
15	На наземных помещениях	30–40	40–60	60–80
16	Компрессоры тяжелые	70–80	80–90	90–100
17	Компрессоры средние	40–60	60–70	70–80
18	Распределительные устройства и вспомогательные сооружения электростанций	30–40	40–60	60–80
19	Кабельные подземные линии	200–300	300–600	600–1000
20	Кабельные наземные линии	10–30	30–50	50–60
21	Воздушные линии высокого напряжения	20–50	50–80	80–120
22	Воздушные линии низкого напряжения	20–60	60–100	100–160
23	То же, на деревянных опорах	20–40	40–60	60–100
24	Силовые линии электрифицированных железных дорог	30–50	50–70	70–120
25	Подземные стальные сварные трубопроводы диаметром до 350 мм	600–1000	1000–1500	1500–2000

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
26	То же, диаметром свыше 350 мм	200–350	350–600	600–1000
27	Подземные чугунные и керамические трубопроводы на раструбах, асбестоцементные на муфтах	200–600	600–1000	1000–2000
28	Трубопроводы, заглубленные на 20 см	150–200	200–350	350–500
29	Трубопроводы наземные	20–30	30–50	50–80
30	Трубопроводы на металлических и железобетонных эстакадах	20–30	30–40	40–50
31	Смотровые колодцы и задвижки на сетях коммунального хозяйства	200–400	400–600	600–1000
4 Средства транспорта, строительная техника, мосты, плотины, аэродромы				
1	Грузовые автомобили и автоцистерны	20–30	30–55	55–65
2	Легковые автомобили	10–20	20–30	30–50
3	Автобусы и автомашины с кузовами автобусного типа	15–20	20–45	45–55
4	Гусеничные тягачи и тракторы	30–40	40–80	80–100
5	Землеройные дорожно-строительные машины	50–110	110–140	140–250
6	Шоссейные дороги с асфальтовым и бетонным покрытием	120–300	300–1000	1000–2000
7	Железнодорожные цистерны	30–50	50–70	70–80
8	Вагоны товарные деревянные	15–30	30–35	35–40
9	Цельнометаллические вагоны крытые	35–60	60–90	90–150
10	Железнодорожные пути	100–150	150–200	200–300
11	Металлические мосты с пролетами 30-45 м	50–100	100–150	150–200
12	То же, с пролетами 100 м и более	40–80	80–100	100–150
13	Мосты железнодорожные с пролетами 20 м	50–60	60–110	110–130
14	То же, с пролетами до 10 м	50–100	100–350	350–380
15	Деревянные мосты	40–60	60–110	110–130
16	Бетонные плотины	1000–2000	2000–5000	> 5000
17	Земляные плотины шириной 80-100 м	150–700	700–1000	> 1000
18	Взлетно-посадочные полосы	300–400	400–1500	1500–2000

**Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x
для предметов различной формы [4]**

Форма предмета	C_x	Направление движения воздуха	
Параллелепипед	0,85	Перпендикулярно короткой грани	
	1,3	Перпендикулярно длинной	
Куб	1,6	Перпендикулярно грани	
Пластина квадратная	1,45	Перпендикулярно пластине	
Диск	1,6	Перпендикулярно диску	
Цилиндр с отношением высоты к диаметру (h/d):		Перпендикулярно оси цилиндра	
	h/d = 1		0,4
	h/d = 4		0,43
h/d = 9	0,46		
Сфера	0,25	Не имеет значения	
Полусфера	0,3	Параллельно плоскости основания	
Пирамида	1,1	Параллельно плоскости основания	
Пирамида усеченная	1,2–1,3	Параллельно плоскости основания	

Характеристика степеней разрушений различных объектов [4]

Разрушения	Характеристика разрушений	Восстановительные работы
1	2	3
1 Производственные, административные и жилые здания		
Слабые	Разрушены заполнения дверных и оконных проемов, кровля, часть внутренних перегородок. Отдельные пожары	Средний восстановительный ремонт силами объекта
Средние	Разрушены главным образом несущие конструкции (внутренние перегородки, легкие стены, кровля, окна, двери). Возможны трещины в наружных стенах и вывалы в отдельных местах. Перекрытия и подвалы не разрушены. Местные завалы. Возможны сплошные пожары	Капитальный восстановительный ремонт с использованием сохранившихся основных конструкций
Сильные	Значительные деформации несущих конструкций, разрушена большая часть перекрытий, стен. Сплошные завалы. Возможны пожары в завалах	Восстановление нецелесообразно, так как сводится к новому строительству с использованием отдельных сохранившихся конструкций
2 Промышленное технологическое оборудование		
Слабые	Повреждение шестерней и передаточных механизмов, обрыв маховиков и рычагов управления. Разрыв приводных ремней, смещение с фундаментов	Мелкий ремонт с заменой поврежденных частей. Восстановление возможно без полной разборки
Средние	Опрокидывание станков, деформация основных деталей, повреждение электропроводки, КИПиА	Капитальный ремонт с заменой поврежденных элементов
Сильные	Деформация станин, трещины в основных деталях. Инерционное разрушение КИПиА и электронной аппаратуры	Ремонт и восстановление нецелесообразны. Уцелевшие детали и узлы могут быть использованы как запчасти
3 Сооружения и сети коммунального хозяйства		
Слабые	Частичные повреждения стыков труб, контрольно-измерительных приборов и верхней части стенок смотровых колодцев. В отдельных местах обрыв воздушных линий электропередач (ЛЭП), повреждение изоляции и креплений кабеля наземных ЛЭП	Замена поврежденных элементов
Средние	Разрыв и деформация труб в отдельных местах, повреждение стыков. Выход из строя КИПиА. Повреждение отстойников, фильтров и баков. Деформация отдельных опор ЛЭП, разрыв кабелей наземных ЛЭП в отдельных местах	Капитальный ремонт с заменой поврежденных элементов
Сильные	Значительная деформация и повреждение большей части труб, разрушение отстойников, фильтров, насосных станций. Повреждение арматуры. Падение и деформации опор линий электропередач. Множественные разрывы кабелей наземных ЛЭП	Восстановление невозможно

Продолжение таблицы

1	2	3
4 Газгольдеры, резервуары для нефтепродуктов и сжиженных газов		
Слабые	Небольшие вмятины на оболочке, деформации трубопроводов, повреждение запорной арматуры	Средний ремонт с заменой поврежденных элементов
Средние	Смещение на опорах, сильная деформация оболочек и подводящих трубопроводов, повреждение арматуры	Капитальный ремонт с заменой поврежденных элементов
Сильные	Срыв с опор, опрокидывание, разрушение и деформация оболочек, обрыв трубопроводов и запорной арматуры	Использование и восстановление невозможно
5 Железнодорожный и автомобильный транспорт, инженерная техника, крановое и подъемно-транспортное оборудование		
Слабые	Частичное разрушение и деформация обшивки и крыши, повреждение стекол кабин, фар и приборов	Средний ремонт с заменой поврежденных элементов
Средние	Разрушение кузовов, крытых вагонов, повреждение кабин и наружного оборудования, срыв дверей, разрыв трубопроводов системы питания, охлаждения и смазки	Капитальный ремонт с заменой поврежденных элементов
Сильные	Опрокидывание, срыв отдельных частей, Сильные общая деформация рамы, разрушение кабины, кузова, грузовой платформы, срыв и повреждение радиаторов, крыльев, подножек, наружного оборудования двигателя.	Использование и восстановление невозможно
6 Мосты и эстакады		
Слабые	Небольшая деформация второстепенных элементов. Грузоподъемность практически не уменьшается	Средний ремонт с заменой поврежденных элементов
Средние	Разрушение и деформация отдельных важных элементов, повреждение промежуточных опор. Частичное разрушение поперечных связей. Снижение грузоподъемности на 50 %	Движение по мосту и использование эстакад невозможно. Требуется капитальный ремонт с заменой поврежденных элементов
Сильные	Смещение с опор и сильная деформация пролетного строения, повреждение промежуточных опор, разрушение поперечных связей	Восстановление сводится к новому строительству

Возгорание материалов от теплового излучения [5, 6]

Наименование горючих материалов	Тепловой импульс, кДж/м ²	
	Воспламенение, обугливание	Устойчивое горение
Бумага: – газетная	–	125–200
– черная	–	125
– белая	330–420	630–750
Сухое сено, солома, стружка	330–500	710–840
Хвоя, опавшая листва	420–580	750–1200
Хлопчатобумажная ткань:		
– темная, обтирочный материал	250–400	580–670
– цвета хаки	330–420	670–1000
– светлая	500–750	840–1500
Конвейерная прорезиненная ткань	500–630	1250–1700
Вискозные материалы	125	250–335
Дерматин	200–340	420–690
Обивка сидений автомобилей	1250–1450	2100–3300
Брезент: – палаточный	420–500	630–840
– окрашенный в белый цвет	1700	2500
Стружка деревянная	126	209
Древесина сухая (ель, сосна):		
– окрашенная в темный цвет	250–420	840–1250
– сухая некрашеная	500–670	1700–2100
– окрашенная в белый цвет	1700–1900	4200–6300
Кровля мягкая (толь, рубероид)	580–840	1000–1700
Черепица красная	840–700	
Сукно серое, кожа тонкая коричневая	–	620–1260
Резина автомобильная, изоляция кабеля	250–420	630–840

ЛИТЕРАТУРА

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учеб. пособие : в 3-х кн. / В. А. Котляревский, К. Е. Кочетков, А. А. Носач [и др.]. – М. : АСВ, 1995. – Кн. 1 и 2. – 168 с.
2. Маршалл, В. Основные опасности химических производств. – М. : Мир, 1989. – 672 с.
3. Взрывные явления. Оценка и последствия : в 2-х Т. ; пер с англ. / У. Бейкер, П. Кокс, Б. Уэстайн [и др.]; под ред. Я. Б. Зельдовича, Б. Е. Гельфанда. – М. : Мир, 1986.
4. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения : справочник / под ред. Г. П. Демиденко. – Киев : Вища школа, 1987. – 256 с.
5. Защита населения и объектов народного хозяйства в чрезвычайных ситуациях : учебник для вузов / А. Г. Богданов, С. В. Бондарев, В. Н. Колобков, М. И. Постник ; под ред. М. И. Постника. – Минск : Университетское, 1997. – 278 с.
6. Атаманюк, В. Г. Гражданская оборона : учебник для вузов / В. Г. Атаманюк, Л. Г. Ширшев, Н. И. Акимов ; под ред. Д. И. Михайлика. – М. : Высш. шк., 1986. – 207 с.
7. Демидов, П. Г. Горение и свойства горючих веществ / П. Г. Демидов, В. А. Шандыба, П. П. Щеглов. – М. : Химия, 1981. – 272 с.

Учебное издание

Составители:

*Босак Виктор Николаевич
Левчук Наталья Владимировна
Головач Анна Петровна*

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ И ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ
И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВАХ
ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ
В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

*ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ЗАЩИТА НАСЕЛЕНИЯ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВСЕХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ
ДНЕВНОЙ И ЗАОЧНОЙ ФОРМ ОБУЧЕНИЯ*

Ответственный за выпуск: Босак В. Н.
Редактор: Винник Н. С.
Компьютерная вёрстка: Соколюк А. П.
Корректор: Северянина А. Г.

Подписано в печать 22.11.2024 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 1,86. Уч. изд. л. 2,0. Заказ № 1155. Тираж 30 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.