

Г.Г. Орлов

**ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫЕ
КОНСТРУКЦИИ
ДЛЯ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ**



Г.Г. Орлов

ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

Москва
Стройиздат
1987

ПОГАЩЕНО

Орлов Г.Г. Легкосбрасываемые конструкции для взрывозащиты промышленных зданий. — М.: Стройиздат, 1987. — 200 с.: ил.

Рассмотрены причины, приводящие к взрывам горючих смесей внутри зданий. Изложен метод определения нагрузок, действующих на ограждающие конструкции при взрыве, и способ установления требуемой площади легкобрасываемых конструкций и их конструктивные решения, а также области их эффективного применения. Приведена методика экономической оценки эффективности принимаемого варианта легкобрасываемых конструкций для взрывозащиты зданий.

Для научных и инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских организаций.

Табл., ил. 101, список лит.: 95 назв.

Печатается по решению секции литературы по строительной физике и строительным конструкциям редакционного совета Стройиздата.

Рецензент: канд. техн. наук В.М.Панарин (ЦНИИпромзданий).

О 3202000000 — 244
047 (01) — 87 88 — 87

© Стройиздат, 1987

Предисловие

В Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986--1990 годы и на период до 2000 года отмечается, что "Высшей целью экономической стратегии партии был и остается неуклонный подъем материального и культурного уровня жизни народа. Реализация этой цели в предстоящем периоде требует ускорения социально-экономического развития, всемерной интенсификации и повышения эффективности производства на базе научно-технического прогресса". Успешной реализации решений XXVII съезда КПСС будет способствовать увеличение числа построенных и введенных в строй промышленных и гражданских объектов. Благодаря этому значительно возрастет благосостояние народа. В перспективе предстоит огромный созидательный труд строителей по реконструкции и техническому перевооружению предприятий на базе внедрения новых высокоэффективных технологических процессов и оборудования.

В этих условиях большое значение приобретает сохранение создаваемых народом материальных ценностей от различного рода потерь, в том числе и от аварийных взрывов горючих смесей в производственных помещениях, что представляет собой важную народнохозяйственную задачу.

Взрывы вызывают не только прямые материальные убытки, связанные с разрушением строительных конструкций, технологического оборудования, но и не исключают травматизм и гибель людей в результате их поражения в основном обрушающимися конструкциями. Проблема защиты людей, оборудования и зданий строительными методами от взрывов горючих смесей внутри помещений имеет не только большое экономическое значение, но и социальное.

Взрывозащита промышленных зданий решается в основном по двум направлениям. Основным направлением является исключение возможности возникновения взрыва. В тех случаях, когда это сделать с достаточной степенью надежности не представляется возможным, предусматривается защита зданий и сооружений строительными методами — применением легкосбрасываемых конструкций в наружном ограждении зданий с целью снижения нагрузок, действующих на ограждающие конструкции.

Обеспечение взрывозащиты промышленных зданий требует комплексного подхода к решению данной проблемы по оценке работы как легкосбрасываемых конструкций в условиях взрыва, так и основных конструкций зданий взрывоопасных производств.

Наиболее важной задачей, требующей особого внимания при решении проблемы взрывозащиты, является определение требуемой площади легкосбрасываемых конструкций, исходя из допускаемой в помещении величины максимального избыточного давления, возникающего в аварийной ситуации при взрыве горючих смесей с учетом объема помещения, степени заполнения его горючей смесью, вида горючей смеси и концентрации горючего в ней, степени интенсификации процесса взрывного горения в помещении, конструктивных особенностей легкосбрасываемых и основных конструкций.

Решение проблемы сводится к тому, чтобы в результате проектирования зданий для взрывоопасных производств их конструктивное и компоновочное решения были такими, чтобы в случае взрыва внутри помещения повреждения были минимальными.

В нашей стране выполнена определенная работа по совершенствованию проектирования, строительства и эксплуатации зданий взрывоопасных производств. Отличительной особенностью возведения зданий взрывоопасных производств является реализация требований Госстроя СССР о научном обосновании технических решений, направленных на взрывозащиту объектов народного хозяйства и обеспечение безопасности людей. Не случайно, что в решении поставленной проблемы увеличилась роль научных и проектных организаций.

Ведущая роль в решении вопросов взрывозащиты промышленных зданий принадлежит проблемной научно-исследовательской лаборатории *разрушения строительных конструкций при объемных взрывах* и отраслевой лаборатории *взрывобезопасности промышленных зданий и сооружений* при МИСи им. В.В.Куйбышева. В решении данной проблемы активное участие принимают институты Госстроя СССР: ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко, ЦНИИпромзданий, Госхимпроект, а также ВНИИПО и ВИПТШ МВД СССР. Руководящая роль в создании нормативных документов в области взрывозащиты принадлежит Главтехнормированию Госстроя СССР.

В книге сделана попытка обобщить имеющийся материал по вопросу взрывозащиты промышленных зданий и изложить метод, позволяющий производить комплексную оценку эффективности строительных мероприятий, направленных на обеспечение взрывозащиты зданий взрывоопасных производств при дифференцированном учете факторов для определения величины и характера нагрузок, возникающих при взрывном горении газозо-воздушной смеси, действующих на ограждающие конструкции при использовании легкосбрасываемых конструкций (ЛСК), располагаемых как в вертикальных, так и горизонтальных ограждениях сооружения с учетом конструктивных решений и параметров горючих смесей. Приведенный материал позволяет оптимизировать объемно-планировочные и конструктивные решения по проектированию промышленных зданий взрывоопасных производств.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВ

1.1. ПРИЧИНЫ ВЗРЫВОВ ВНУТРИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Статистические данные свидетельствуют о том, что ущерб от взрывов в производственных зданиях во всем мире остается довольно большим и имеет тенденцию ежегодно увеличиваться. Этому способствует интенсификация и концентрация производств, повышение их энерговооруженности, введение новых веществ, взрывоопасные свойства которых подчас недостаточно изучены. Так, в США в период с 1900 по 1953 г. зарегистрировано 1100 взрывов (в среднем около 21 взрыва в год), с 1951 по 1960 г. — 243 взрыва (в среднем 24 взрыва в год) [71, 91].

По данным американского страхового общества, на предприятиях страны в настоящее время ежегодные убытки составляют около 75 млн. дол. По сведениям национальной ассоциации по борьбе с пожарами США в 1970 г. материальный ущерб, причиненный взрывами и пожарами в американской промышленности, превысил 138 млн. дол. [64, 69, 84]. В Японии за период с 1968 по 1971 г. было зарегистрировано 4575 смертельных несчастных случаев, происшедших в результате взрывов и пожаров в различных отраслях промышленности. По данным английской национальной ассоциации противопожарной защиты, общие потери в результате производственных взрывов составили только в 1958 г. около 100 млн. дол. [77].

Взрывы чаще всего происходят в химической, нефтехимической, газовой, пищевой, энергетической и некоторых других отраслях промышленности, которые связаны с горючими газами, легко воспламеняющимися парами горючих жидкостей, взрывоопасными пылями.

Для производственных зданий, где возможны взрывы горючих смесей, наряду с мерами по их предотвращению принимаются меры по защите людей, оборудования и строительных конструкций в случае возникновения взрыва внутри помещения. Такое положение объясняется тем, что образование взрывоопасных концентраций происходит так быстро, что обслуживающий персонал, как правило, не в состоянии предотвратить взрыв.

Большая скорость распространения пламени и высокая температура, создающаяся при взрыве горючих смесей в помещении, приводят к резкому повышению давления внутри здания, разрушению элементов оборудования и строительных конструкций и остановке производства. Часто в результате взрывов большое количество людей теряют трудоспособность, а иногда и гибнут.

Многолетний анализ аварий, происходящих на предприятиях химической и нефтехимической промышленности в нашей стране и за рубежом, показывает, что большая часть аварий связана с образованием и взрывом парогазовых смесей, 1/2 часть которой приходится на производственные помещения и открытые установки. Несмотря на оснащение производственных объектов самыми современными средствами взрывозащиты, предотвращение взрывов не всегда представляется возможным. Основной ущерб производству

и в том числе обслуживающему персоналу наносится за счет разрушения строительных конструкций.

Из проанализированных 136 аварий, происшедших в различное время на предприятиях химической и нефтехимической промышленности, 86 аварий (взрывы в закрытых системах) вызваны неисправностью блокировок и приборов, 24 аварии (взрывы в наружных установках) произошли из-за отсутствия сигнализаторов взрывоопасных газов и соответствующих средств локализации выбросов газов в атмосферу, т.е. 110 взрывов можно было предотвратить, поэтому знание причин, которые приводят к аварийным взрывам, позволят заранее предусмотреть необходимые меры, направленные на предотвращение взрывов или их локализацию в производственных помещениях.

Отсутствие или ненадежность соответствующих средств противаварийной защиты от загазованности ведут к взрывам газов в рабочих помещениях и на открытых установках. На основании проведенного анализа актов расследования аварий, результатов обследований производств, материалов, опубликованных в печати, установлено следующее:

- 1) причины аварий эксплуатируемого оборудования;
- 2) выявлены основные элементы оборудования, являющиеся источниками образования взрывоопасных смесей в помещении;
- 3) распределены взрывы в зависимости от источников воспламенения газовой смеси;
- 4) сделана оценка взрывов по разрушающему воздействию на строительные конструкции и оборудование.

Причины взрывов в производственных помещениях приведены в табл. 1.1.

При эксплуатации взрывоопасных производств источником образования взрывоопасной среды в помещении является, как правило, технологическое оборудование. Знание элементов оборудования, которые наиболее часто являются источниками создания горючей среды, необходимо для разработки профилактических мероприятий по предупреждению взрывов и выбору методов защиты.

Например, горючие газы, находящиеся в технологическом оборудовании, в результате его разрушения могут попасть в производственное помещение. При повреждении корпуса аппарата или срыве крышки возможен мгновенный выброс горючего газа в помещение и образование взрывоопасной концентрации смеси за несколько секунд. При разрыве трубопровода происходит утечка горючей смеси, и в результате возможно образование взрывоопасной концентрации в помещении в течение нескольких минут. При медленной утечке газа, например через запорную арматуру, взрывоопасная смесь образуется в период времени, которого вполне достаточно для приведения в действие вытяжной вентиляции и других противопожарных и противовзрывных мер защиты. В каждом конкретном случае количество газа, попавшего в атмосферу помещения, может быть определено с некоторым допущением, если известен аппарат или группа аппаратов, которые относятся к вероятным источникам аварийного образования взрывоопасной смеси.

При эксплуатации взрывоопасных производств наибольшее количество взрывов происходит в результате нарушения правил

Т а б л и ц а 1.1. Распределение взрывов внутри производственных помещений по причинам

Причины взрывов	Отношение количества взрывов по годам, %		
	1960—1964	1965—1969	1970—1980
Некачественно выполненный монтаж технологического оборудования	8	6,8	4,9
Неисправность контрольно-измерительной аппаратуры	9,2	5,8	7,5
Ошибки, допущенные в проектной документации	4,2	6,8	8,5
Дефекты в элементах оборудования	3,6	5,8	6,6
Неисправность элементов основного технологического оборудования	6,2	8,8	2,5
Ошибки в разработке технологического режима	2	1,9	2,6
Нарушение правил безопасности эксплуатации технологического оборудования	32,3	29,1	27,1
Некачественно выполненный профилактический ремонт оборудования	10,5	13,8	14,3
Нарушение правил ремонта оборудования	14,3	11,6	12,8
Коррозия стенок элементов оборудования и трубопроводов	3,5	7,7	4,2
Другие причины	6,2	1,9	9

безопасной эксплуатации производства и некачественно выполненных профилактических ремонтов оборудования, а также из-за несовершенства принятых решений в проектной документации и дефектов в элементах оборудования (15,1%). Часто причиной значительного числа аварий (12,4%) является некачественно выполненный монтаж технологического оборудования и неисправность контрольно-измерительной аппаратуры.

При оценке взрывоопасности производства необходимо также учитывать элементы оборудования, являющиеся источниками образования горючей смеси (табл. 1.2).

Чаще всего образование взрывоопасной смеси происходит из-за неудовлетворительной работы запорной, регулировочной аппаратуры и фланцевых соединений трубопроводов, поэтому время между профилактическими осмотрами и ремонтами запорной арматуры и стыков трубопроводов должно быть сокращено, профилактические осмотры и ремонты должны проводиться по специальным графикам.

Из актов происшедших аварий установлено, что взрывам с полным разрушением строительных конструкций предшествуют значительные повреждения емкостей, технологических колонн, компрессоров, насосов, трубопроводов, запорной арматуры, фланцевых соединений и образование в производственном помещении значительных объемов горючих смесей взрывоопасных концентраций.

Т а б л и ц а 1.2. Источники образования взрывоопасных смесей в производственных помещениях

Наименование элементов технологического оборудования, являющихся источником образования горючих смесей	Отношение количества взрывов по годам %		
	1950—1964	1965—1969	1970—1980
Емкости и резервуары	8,6	6,8	5,2
Технологические колонны	12,7	10,6	9,3
Компрессоры	6	9,7	11,2
Конденсаторы	8,6	7,8	6,2
Кубы	1,5	1,9	1,6
Насосы	2,5	2,9	4,2
Регенераторы	—	1,9	1,5
Технологические печи	—	1,9	—
Скрубберы	4,5	4,9	6,1
Смесители	1,5	1,9	3,4
Трубопроводы	3,2	3,9	7,6
Фланцевые соединения трубопроводов	16,2	14,5	12,3
Запорная и регулировочная арматура	8,7	12,6	10,8
Прочие	5,9	4	11,7
Неустановленные или неуказанные в документации	20,1	14,7	8,9

При расследовании аварий трудно установить действительный источник воспламенения взрывоопасной смеси. В имеющихся материалах по аварийным взрывам в большинстве случаев указывается вероятный источник воспламенения, что в значительной мере затрудняет разработку обоснованных профилактических мероприятий. Наиболее вероятные источники воспламенения, установленные на основании изучения материалов расследования аварий, приведены в табл. 1.3.

Анализ причин взрывов показывает, что чаще всего причиной взрыва является открытый огонь (22,1%), самовоспламенение при взаимодействии продукта с кислородом воздуха (15,7%), наличие нагретых поверхностей технологического оборудования (14,2%). Причиной взрывов может служить неисправность электрического оборудования (18,5%), искровые разряды статического электричества и соударение и трение металла о металл (7,5%).

Воспламенение горючей системы становится возможным только тогда, когда количество энергии, сообщенное системе (или частично объему), является достаточным, чтобы реакция горения могла дальше продолжаться и распространяться. Наиболее распространенным тепловым источником является электрическая искра. Воспламеняющая способность искры зависит от минимального объема газа, который она может нагреть до температуры воспламенения.

В канале электрического разряда развивается температура порядка $10\,000^{\circ}\text{C}$, значительно превосходящая $T_{\text{воспл}}$. Для воспламенения горючей смеси газов или паров горючих жидкостей с воздухом достаточно нагреть $0,5\text{--}1\text{ мм}^3$ этой смеси до температуры самовоспламенения. Открытое пламя вызывает во всех случаях воспламенение горючих газов и паровоздушных смесей так как температура открытого пламени (больше 1000°C) всегда превышает температуру самовоспламенения газов и паров ($120\text{--}700^{\circ}\text{C}$).

Т а б л и ц а 1.3. Источники воспламенения взрывоопасных смесей в производственных помещениях

Источники воспламенения	Отношение количества взрывов по годам, %		
	1950–1964	1965–1969	1970–1980
Открытый технологический огонь	12,8	19,4	15,8
Открытый огонь при ремонтных работах	4,2	3,9	6,3
Искры, возникающие при электросварочных работах	4,4	3,9	3
Искры, возникающие при соударениях и трении металла о металл	7,2	5,8	5
Искры в электрооборудовании и от короткого замыкания в электрооборудовании	6,7	5,8	8,5
Искры при разрядах статического электричества	2	1	2,5
Нагретые поверхности технологического оборудования	10,2	10,7	14,2
Самовоспламенение при взаимодействии продукта с кислородом воздуха	20,1	19,4	15,7
Прочие	3,8	2,9	6,7
Неустановленные или неуказанные в документации	28,6	27,2	22,3

а количество выделяемой теплоты всегда больше, чем это требуется для нагрева 1 мм³ газовой смеси.

В промышленности при работе с электрическим током может произойти образование искры и дуги, в результате чего возможно воспламенение горючих смесей газов, паров и пылей с воздухом. Искры, образующиеся при разрядах статического электричества, характеризуются незначительной силой тока (тысячные доли миллиампера), но уже при сравнительно невысокой разности потенциалов способны воспламенить большую часть горючих газов и пылей. От электрических дуг горючие смеси воспламеняются во всех случаях. Однако при напряжении до 1,5 В и силе тока до 40 мА, например, смесь метана или бензина с воздухом не воспламеняется. Таким образом, воспламеняющая способность электрических искр и дуг прежде всего зависит от количества энергии, которую могут они передать горючему веществу.

Минимальное количество энергии, необходимое для воспламенения бензина или паров других жидкостей, составляет 0,15 мДж, для водорода и ацетилена — 0,01 мДж. Для воспламенения смеси метана с воздухом нужна искра, обладающая энергией примерно 3,8 мДж.

Искры, возникающие в результате трения или удара, по сравнению с электрическими искрами представляют меньшую опасность, так как энергия этих искр, как правило, меньше, энергии электрических искр. Искры, возникающие при ударе (стали о сталь или камень), более опасны, чем искры, образующиеся при трении, так как при ударе происходит также нагрев и передача энергии газу в точке соприкосновения соударяющихся тел.

Искры, возникающие при трении стали, представляют собой небольшие кусочки металла (диаметром 0,1—0,5 мм), оторванные при механическом воздействии, частично окисленные и нагретые до весьма высокой температуры. Долгое время считалось, что температура поверхности частиц, открываемых при истирании, определяется твердостью истираемого материала, поэтому искробезопасное оборудование нужно изготавливать из мягких металлов. Однако исследования показали, что некоторые мягкие металлы могут в определенных условиях давать взрывоопасные искры и наоборот существуют твердые сплавы, которые при истирании дают немногочисленные искры, не обладающие поджигающим свойством наиболее взрывчатых смесей. Способность металлов и сплавов к опасному искрообразованию обуславливается в первую очередь их химической природой а не твердостью.

Распределение взрывов по разрушающему воздействию на строительные конструкции и оборудование приведены в табл. 1.4, из которой видно, что большинство взрывов сопровождается частичным или полным разрушением строительных конструкций и оборудования. Это свидетельствует о важности рассматриваемой проблемы и необходимости профилактических мероприятий, в первую очередь, по предупреждению возникновения взрывов как внутри производственных объемов, так и от воздействия взрыва на оборудование и строительные конструкции.

Анализируя воздействие взрыва на строительные конструкции и оборудование, можно сделать следующие выводы:

1. Взрывы при которых отсутствуют признаки разрушения оборудования и строительных конструкций зданий, носят, как правило, локальный характер. Это взрывы незначительной интенсивности внутри технологического оборудования или небольших локальных объемов горючих смесей образовавшихся в результате проникания незначительных объемов газов, паров или пылей через неплотности в запорной арматуре, трубопроводах.

2. Взрывы с частичным разрушением оборудования и строительных конструкций возникают как внутри оборудования, так и в объеме помещений, а величина разрушений зависит от типа горючей смеси, ее объема и концентрации. При взрывах внутри технологического оборудования небольшие разрушения конструкции происходят в местах ударов разлетающихся частей оборудования. Разрушения в этом случае проявляются в виде сквозных отверстий или деформаций участков конструкций в местах воздействия ударяющихся частей элементов оборудования.

3. Большинство взрывов происходит с частичным или полным разрушением строительных конструкций и оборудования. К полному разрушению строительных конструкций и оборудования приводят, как правило, взрывы внутри оборудования с большими объемами горючих продуктов.

4. При взрывах горючих смесей в производственном помещении разрушение строительных конструкций происходит значительно быстрее, чем при взрывах внутри технологического оборудования. Чаще всего разрушаются ограждающие конструкции в виде остекления, а из основных несущих элементов железобетонные конструкции разрушаются чаще по сравнению с металлическими.

Т а б л и ц а 1.4. Классификация взрывов по разрушающим воздействиям на конструкции и оборудование

Разрушающее воздействие взрыва на строительные конструкции	Распределение взрывов по годам, %			
	1950–1960	1960–1964	1965–1969	1970–1980
Взрывы внутри помещений без разрушения строительных конструкций и оборудования	25	32	36,9	39,8
С частичным разрушением строительных конструкций и оборудования	57,5	59,5	54,3	48,7
С полным разрушением строительных конструкций и оборудования	17,5	6,1	3,9	6,2
С частичным разрушением строительных конструкций соседних зданий	—	2,4	4,9	5,3

5. При взрыве наружных установок в соседних зданиях внутри помещений наблюдается разрушение в основном облегченных ограждающих конструкций — остекления, дверей, ворот. Характер и величина разрушения зависят от интенсивности взрыва и расстояния от места взрыва.

1 2. ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ГАЗО-, ПАРО- И ПЫЛЕВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Взрываемость газо-, паро- и пылевоздушных смесей химических веществ является одним из основных исходных данных при выборе метода защиты строительных конструкций зданий и сооружений, технологического оборудования, электроаппаратуры, средств автоматизации и транспорта, приборов контроля и сигнализации, противоаварийных средств, вентиляционных систем и других способов защиты.

Взрывоопасные смеси, как правило, состоят из горючих газов, паров или пылей различных химических веществ и воздуха.

Для разработки эффективных и экономически обоснованных технических средств предупреждения аварий (взрывов) и мер защиты в случае их возникновения, необходимо правильно определить параметры взрывоопасных смесей химических веществ с воздухом, применяемых в промышленности, оценить их взрывопожароопасность и знать методы расчета параметров. Обычно при оценке взрывной опасности веществ применяются не все параметры, а только основные, которые достаточно полно характеризуют вещества.

Взрывоопасность горючих газов характеризуется температурой самовоспламенения и областью воспламенения, т.е. концентрационными пределами воспламенения. Минимальная концентрация горючих газов в воздухе, при которой возможно ее воспламенение от определенного теплового источника, называется нижним концент-

рационным пределом воспламенения. Максимальная концентрация горючих газов в воздухе, выше которой воспламенение ее невозможно от теплового источника любой мощности, называется верхним концентрационным пределом воспламенения. Взрывоопасность вещества тем больше чем ниже нижний и выше верхний пределы воспламенения и чем ниже температура самовоспламенения. К числу основных параметров взрыва следует отнести температуру горения, давление, скорость распространения фронта пламени, а также объем взрывоопасной смеси, участвующей в процессе взрывного горения.

Теплота, выделившаяся при горении, идет на нагрев продуктов сгорания, и температура продуктов сгорания при весьма незначительных потерях теплоты в связи со скоротечностью процесса будет близка к теоретически вычисленной. Теоретическая температура взрыва газовых смесей колеблется в широких пределах и может быть вычислена по формуле:

$$Q = W_1 C_1 t_v + W_2 C_2 t_v + \dots + W_n C_n t_v. \quad (1.1)$$

где $W_1, W_2, \dots, W_n$ — количество отдельных компонентов продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{кг}$ или $\text{м}^3/\text{м}^3$; $C_1, C_2, \dots, C_n$ — теплоемкость компонентов продуктов сгорания, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ или $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{град})$; Q — теплота сгорания $\text{кДж}/\text{кг}$ или $\text{кДж}/\text{м}^3$.

Произведения $C_1 t_v, C_2 t_v$ и т.д. представляют собой количество теплоты, необходимое для нагревания единицы объема или массы продуктов сгорания от 0 до $t_{\text{взр}}, ^\circ\text{C}$ при постоянном объеме. Это количество теплоты называется теплосодержанием продуктов сгорания.

Зная температуру продуктов сгорания, можно определить давление при взрыве в замкнутом объеме по формуле:

$$P_v = P_0 t_v / t_0 m / n, \quad (1.2)$$

где t_v, t_0 — температура продуктов сгорания и начальная температура смеси $^\circ\text{K}$; P_v, P_0 — давление при взрыве и начальное давление смеси, кПа ; m, n — соответственно число молей смеси продуктов сгорания после взрыва и число молей до взрыва.

При взрыве газоздушных смесей в замкнутых объемах величина давления изменяется в зависимости от концентрации смеси. Так, в смесях с нижним пределом воспламенения количество выделяемой теплоты незначительно, поэтому и давление при взрыве не превышает 30–45 кПа . С увеличением концентрации горючего в смеси растет и давление взрыва. Наибольшее давление соответствует смеси с концентрацией горючего, несколько превышающей стехиометрическую. При дальнейшем повышении концентрации горючего давление взрыва понижается и на верхнем пределе становится таким же, как и на нижнем.

Пример Вычислить давление при взрыве смеси окиси углерода с воздухом, если $P_0 = 10^2 \text{ кПа}$; $t_0 = 293 \text{ К}$; $t_v = 2416 \text{ К}$

Решение. Находим число молекул до и после взрыва:
 $2\text{CO}_2 + \text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2 = 2\text{CO}_2 + 3,76 \text{ N}_2$ ($m = 5,76$; $n = 6,76$).

Определяем давление при взрыве.
 Подставляя имеющиеся данные в приведенную выше формулу, получим:

$$P_v = \frac{10^2 \cdot 2416}{293} \cdot \frac{5,76}{6,76} = 7 \cdot 10^2 \text{ кПа.}$$

Расчеты показывают, что давление в замкнутом объеме при взрыве газо- и паровоздушных смесей при стехиометрической концентрации достигает от $7 \cdot 10^2$ до $10 \cdot 10^2$ кПа, а при взрывах пылевоздушных смесей от $4 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^2$ кПа.

Для расчета нижнего (НП) и верхнего (ВП) пределов воспламенения отдельных видов горючих веществ можно использовать следующие эмпирические формулы [58]:

$$\begin{aligned} \text{НП} &= 100 / [1 + (N - 1) 4,76], \% (\text{об.}) \text{ или} \\ \text{НП} &= M / [(N - 1) 4,76 V_t], \text{ г/л;} \\ \text{ВП} &= 4 \cdot 100 / (4 + 4,76 N), \% (\text{об.}) \text{ или} \\ \text{ВП} &= 4 M / (4 + 4,76 N) V_t, \text{ г/л,} \end{aligned}$$

где N — число грамм-атомов кислорода, участвующих в сгорании одного моля горючего; V_t — объем одного моля газа при начальной температуре смеси, л; M — масса одного моля горючего компонента смеси.

Для сложной газопаровоздушной смеси известного состава пределы воспламенения можно подсчитать по формуле:

$$P = 100 / \left(\frac{C_1}{n_1} + \frac{C_2}{n_2} + \dots + \frac{C_n}{n_n} \right), \quad (1.3)$$

где P — предел воспламенения (нижний или верхний), % (об.); $C_1, C_2, \dots, C_n$ — концентрация горючих компонентов в горючей части смеси; причем $C_1 + C_2 + \dots + C_n = 100\%$ (об.); $n_1, n_2, \dots, n_n$ — соответствующие пределы воспламенения чистых компонентов смеси, % (об.).

При вычислении пределов в концентрациях по массе заменяют соответствующие величины горючих компонентов процентами по массе.

Взрывоопасность паровоздушных смесей определяется температурными условиями. Опасность вспышки паров некоторых легко-воспламеняющихся жидкостей может возникнуть при изменении температуры окружающей среды.

Температура вспышки характеризует наименьшую температуру, при которой образующиеся над поверхностью вещества (пар) способны вспыхивать в воздухе от внешнего источника теплоты без перехода в процесс горения. Температура самовоспламенения — это нижний предел температуры вещества, при котором оно воспламеняется без внешнего источника теплоты. Температурные пределы воспламенения газов и паров соответствуют нижнему или верхнему концентрационным пределам воспламенения. Их учитывают при расчетах безопасных температурных режимов для закрытых технологических аппаратов с жидкостями, работающих при атмосферном давлении. Безопасной в отношении образования взрывоопасных паровоздушных смесей считается температура вещества на 10°C ниже нижнего температурного предела воспламенения или на 15°C выше верхнего предела.

Нижним температурным пределом взрываемости называется температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров в воздухе в замкнутом объеме достигает такой величины, при которой смесь способна воспламениться, если поднести к ней источник зажигания. Концентрация паров жидкости при нижнем

температурном пределе соответствует нижнему концентрационному пределу воспламенения.

Верхним температурным пределом взрываемости называется температура жидкости, при которой концентрация ее насыщенных паров в воздухе в замкнутом объеме составляет такую величину, при которой смесь еще способна воспламениться при поднесении к ней источника зажигания. При более высокой температуре жидкости образуется смесь насыщенных паров с воздухом, не способная воспламениться. Концентрация паров при верхнем температурном пределе соответствует верхнему концентрационному пределу воспламенения.

Температурные пределы можно пересчитать в концентрационные по следующим формулам, % [51]:

$$\text{НП} = P_1 \cdot 100 / P_{\text{атм}}; \quad \text{ВП} = P_2 \cdot 100 / P_{\text{атм}}, \quad (1.4)$$

где НП — нижний концентрационный предел, % (об.); ВП — верхний концентрационный предел, % (об.); P_1 и P_2 — давление насыщенных паров при температурах, соответствующих нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения; $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление.

Технологические операции, связанные с нагревом жидкостей выше температур вспышки паров, относят к числу взрывоопасных. Так, любой процесс, связанный с нагревом высококипящих жидкостей (например, нефтепродуктов, растительных масел) до температуры выше 250°C , следует относить к взрывоопасным, так как температура нагрева при таких режимах (250°C) близка к температуре самовоспламенения паров этих жидкостей. Заметное влияние на область воспламенения газовых смесей оказывает замена одних компонентов смеси другими.

При оценке взрывной опасности жидкостей в закрытых емкостях и аппаратах рекомендуется пользоваться температурными пределами воспламенения, а в условиях производственных помещений или на воздухе, где могут образовываться взрывоопасные газоздушные смеси, необходимо учитывать и концентрационные пределы воспламенения.

Температуру вспышки можно найти, подсчитав по формуле [51] соответствующее ей давление паров:

$$P_t = P_{\text{атм}} / [1 + (N - 1) 4,76], \quad (1.5)$$

где $P(t)$ — давление паров, соответствующее температуре вспышки; $P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; N — число грамм-атомов кислорода, участвующее в сгорании одного моля жидкости.

Давление, соответствующее температуре вспышки, можно вычислить по формуле:

$$P_{\text{всп}} = P_{\text{общ}} / 8M, \quad (1.6)$$

где $P_{\text{всп}}$ — давление паров при температуре вспышки; $P_{\text{общ}}$ — давление смеси паров с воздухом; M — число молей кислорода, необходимое для горения одного моля горючей смеси.

Зная давление паров, по соответствующим номограммам или таблицам определяют температуру вспышки. Термин "температура вспышки" относят обычно к жидкостям. Однако некоторые твердые вещества (камфара, нафталин, фосфор и др.), заметно испа-

ряющиеся при нормальных условиях, также характеризуются температурой вспышки.

Взрывоопасность пылевоздушных смесей характеризуется температурой самовоспламенения и нижним концентрационным пределом воспламенения. Минимальная температура, при которой пыль загорается в стандартном приборе, разработанном ВНИИПО, принимается за температуру самовоспламенения.

Минимальную концентрацию, при которой пыль способна (в стандартном приборе) воспламениться и распространять горение по всей массе, называют нижним концентрационным пределом воспламенения. Нижний предел воспламенения (взрываемости) является определяющим параметром, характеризующим степень опасности пыли.

Нормами строительного проектирования пыли подразделяются на пожароопасные, имеющие нижний концентрационный предел взрываемости выше 65 г/м^3 , и взрывоопасные, имеющие нижний предел взрываемости менее 65 г/м^3 .

Взрывоопасные пыли делятся на два класса: с нижним пределом взрываемости до 15 г/м^3 — I класс, с нижним пределом более 15 г/м^3 — II класс. Пожароопасные пыли делятся также на два класса: с температурой воспламенения до 250°C — III класс и с температурой воспламенения выше 250°C — IV класс.

Верхние концентрационные пределы взрываемости пыли обычно достаточно велики и достичь их в производственных помещениях практически невозможно.

Взрывы пылевоздушных смесей (ПВС) в промышленности происходят сравнительно редко. Однако значительные разрушения, вызываемые взрывами пыли, а также большое число пылеобразующих процессов обуславливают необходимость принятия мер, предупреждающих образование пыли взрывоопасной концентрации и аварий, в производственных помещениях.

Концентрационные пределы воспламенения пылей не являются постоянными и зависят от дисперсности, влажности, содержания летучих, зольности, температуры источника воспламенения и других показателей.

Мелкодисперсная пыль характеризуется большей удельной поверхностью, чем крупнодисперсная, большей химической активностью, более низкой температурой самовоспламенения, меньшей величиной нижнего предела воспламенения и большей областью воспламенения.

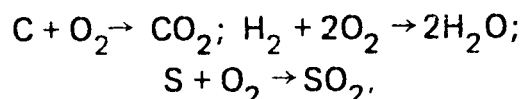
Скорость реакции горения возрастает с увеличением удельной поверхности пыли. Так, 500 г угля сгорают на воздухе в течение нескольких минут, 500 г пыли того же состава и в тех же условиях могут взорваться, т.е. сгореть в доли секунды.

С увеличением влажности воздуха и сырья, из которого образуется пыль, уменьшается концентрация пыли в воздухе и возможная мощность взрыва. При увеличении скорости движения воздуха в помещении обычно уменьшается дисперсность пыли и увеличивается ее концентрация в воздухе, что повышает вероятность взрыва. Температура самовоспламенения большинства горючих пылей находится в пределах $700\text{--}900^\circ\text{C}$; температура самовоспламенения некоторых веществ значительно ниже (для сажи 360°C).

Для оценки давления, возникающего при взрыве ПВС внутри помещения (при объемном взрыве) необходимо установить количество пыли, которое может участвовать в образовании взрывоопасного пылевоздушного облака, режим горения ПВС (скорость распространения пламени), температуру горения ПВС и степень расширения продуктов взрывного горения.

Для установления режима горения ПВС внутри помещения, температуры горения ПВС и степени расширения продуктов взрывного горения необходимы следующие исходные данные: химический состав ПВС, количество газифицированных летучих, тепловой эффект реакции горючих продуктов сгорания и объем взрывоопасной пылевоздушной смеси, участвующей в реакции. В случае необходимости а также для уточнения категории производства по взрывоопасности устанавливается объем ПВС на нижнем концентрационном пределе взрываемости.

Стехиометрическая концентрация пыли C определяется по суммарным стехиометрическим уравнениям. Например, для угольной пыли эти уравнения имеют вид:



исходя из горючих компонентов в составе угольной пыли.

Количество кислорода X_O , необходимое для полного сгорания угольной пыли, равно:

$$X_O = X_C + X_H + X_S,$$

где X_C , X_H , X_S — количество кислорода, необходимое для полного сжигания соответственно углерода, водорода и серы, входящих горючими компонентами в состав угля.

Учитывая, что в воздухе содержится 21% кислорода, количество воздуха, необходимое для полного сгорания угольной пыли, равно:

$$X_v = \frac{\rho}{21} 100, \quad (1.7)$$

где ρ — плотность воздуха при нормальных условиях.

Стехиометрическая концентрация (C) на 1 кг пылевоздушной смеси составит г/м³

$$C = 1000/X_v. \quad (1.8)$$

Для предотвращения развития взрыва пылевоздушных смесей и уменьшения разрушающего действия такого взрыва на пылепроводах и аппаратах (дюкерах, мельницах, сепараторах) устанавливают разрывные мембраны, быстродействующие отсекающие задвижки, а также устройства для подачи в пылепроводы инертных газов (диоксида углерода или водяного пара).

Опасность взрыва аэрозвесей определяется нижним пределом воспламенения, периодом индукции и температурой самовоспламенения; опасность воспламенения аэрозвеси — температурой воспламенения и способностью к самовозгоранию.

1.3. АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ ОТ ВЗРЫВОВ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Технические решения по защите зданий от взрывов сводятся к устройству в наружном ограждении здания проемов с заполнением легкоразрушающимися или легкоскрывающимися конструкциями. Это позволяет ограничить величину давления взрыва в здании за счет выхода горючей смеси и продуктов взрыва через образующиеся проемы. В результате этого предотвращается разрушение основных несущих и ограждающих конструкций, а также технологического оборудования. При проектировании зданий взрывоопасных производств необходимо учитывать защиту от разрушающего действия взрыва, это требует разработки соответствующих нормативных документов как у нас в стране, так и за рубежом, на основе имеющегося, хотя и незначительного, объема проведенных исследований в этой области. В Советском Союзе требования к проектированию таких зданий регламентируются строительными нормами и правилами (СНиП), отраслевыми нормами, правилами устройства электротехнических установок (ПУЭ), правилами устройства взрывозащитного и рудничного электрооборудования (ПИБРЭ). В нормах и правилах излагаются основные положения по проектированию, монтажу и эксплуатации технологического оборудования и строительных конструкций.

В целях предупреждения возникновения взрыва к технологическому оборудованию предъявляются особые требования в отношении размещения элементов оборудования, герметичности стыков, устройству предохранительных приспособлений. Нормами в некоторых случаях предусматривается размещение основного оборудования на открытых площадках.

Проектирование легкобрасываемых наружных ограждающих конструкций (ЛСК) является единственным способом, применяемым в практике строительства для защиты зданий от взрыва внутри помещения. В строительных нормах большинства зарубежных стран за основной показатель характеризующий общую площадь ЛСК в ограждении конкретного здания, принят коэффициент сброса $K_{сбр}$, равный отношению площади ЛСК к объему взрывоопасного помещения $F_{лек}/V_n$.

В отечественных строительных нормах (СНиП II-90-81) имеются указания о том, что площадь проемов должна составлять не менее 5 м^2 на 100 м^3 объема помещения с взрыво- и взрывопожароопасными производствами категорий А и Е и не менее 3 м^2 на 100 м^3 объема помещения с взрывопожароопасными производствами категории Б. При этом к легкобрасываемым конструкциям, рекомендуемым для заполнения проемов, относятся: оконные переплеты, остекленные обычным оконным стеклом, двери, распашные ворота, фонарные переплеты, конструкции из асбестоцементных, алюминиевых и стальных листов с легким утеплителем, а также легкобрасываемые конструкции поверхностной плотностью не более 120 кг/м^2 покрытия.

В отраслевых нормах строительного проектирования при определении площадей ЛСК рекомендуется исходить из типа горючего вещества, взрывоопасная концентрация которого может образоваться в данном помещении [14]. Устройство сбросных проемов реко-

мендуется в зданиях категорий А, Б и Е, площадь которых по отношению к площади пола должна составлять не менее 15% при наличии в производственных помещениях водорода, ацетилена, этилена и других веществ плотностью меньше единицы. Во всех других случаях площадь проемов должна составлять не менее 5% площади пола. Имеются рекомендации по использованию в качестве противовзрывных устройств технологических проемов в перекрытиях в пределах 5—20% от площади перекрытия [13].

В зарубежных странах вопросам нормирования по проектированию зданий взрывоопасных производств уделяется также значительное внимание.

В США Комитет по стандартам рекомендует максимально использовать ослабленные проемы, самооткрывающиеся оконные переплеты, облегченные панели, остекление. При этом обращается внимание на способы крепления стекла в переплетах, применение переплетов поворотного типа. В глухих переплетах рекомендуется легкое закрепление стекол или закрепление глухих переплетов в проемах при помощи малопрочных анкеров с предварительной надрезкой стекол снаружи.

Защищаемые сооружения в зависимости от конструктивного решения подразделяются на тяжелые, средние и легкие. К тяжелым конструкциям отнесены такие, которые выдерживают 1/20 максимального давления взрыва, к средним — 1/50 максимального давления, а к легким — 1/100 этого давления. За максимальное давление взрыва принимается давление, равное 700 кПа. Тогда при взрыве внутри помещения давление для тяжелых конструкций при вскрытии проемов в ограждении допускается до 35 кПа.

Национальным бюро стандартов США рекомендованы временные нормы площадей ЛСК для зданий, в которых могут образоваться различные взрывоопасные смеси в зависимости от степени их опасности.

В Руководстве по сбросу давления при взрывах, разработанном в США, изложены основные требования сброса давления при взрывах пыли, газов и паров легковоспламеняющихся жидкостей. Так, например, нормами рекомендуются следующие площади легкосбрасываемых конструкций в зданиях объемом более 700 м³, когда взрывоопасная концентрация может образоваться не во всем объеме помещения, а в какой-то части его, в зависимости от: вида ограждающих конструкций, м²/100 м³

для тяжелых бетонных стен	4,1	
для легкоармированных железобетонных или		
деревянных конструкций	4,1—5,4	
для легких конструкций	5,4—6,5	
от степени взрывоопасности веществ		
слабая взрываемость (зерновые пыли)	0,32	
средняя взрываемость (угольная пыль, синтетические		
смолы, цинковая пыль и др.)	6,5	
повышенная взрывоопасность (пары растворителей,		
красок и лаков, пыль алюминия, магния и др.)	22	
чрезвычайно повышенная опасность (ацетон, газолин,		
древесный спирт, ацетилен, водород и др.)		рекомендуется максимальное допустимое соотношение

Из приведенных данных видно, что нормирование площадей легкосбрасываемых устройств в США основывается на максималь-

Т а б л и ц а 1.5. Классификация взрывов в ГДР

Характер взрыва	Максимальное давление	Скорость нарастания давления, Н/ (с·см ²)
Вспышка (слабый взрыв)	До $1,33 \cdot 10^4$ Н/м ²	До 10
Взрыв	Несколько атмосфер	" 100
Детонация (чрезвычайно сильный взрыв)	Очень высокое давление	Свыше 1000

но допустимом взрывном давлении с учетом конструктивного решения здания. Причем, требуемая величина удельной площади ЛСК несколько выше, чем в отечественных нормах.

Американским Национальным бюро стандартов [96] *NBS* рекомендуются следующие величины $K_{сбр}$ в зависимости от природы взрывоопасной смеси:

Взрывоопасная смесь	Отношение площади ЛСК к объему помещения, м ² /100 м ³
Газы взрывоопасные	22
Метан	15,5
Ацетон (для снижения давления), кПа:	
до 100	6 3
" 70	11,4
" 34	22
" 30	25

В США Комитетом по защите от промышленных взрывов для зданий объемом более 700 м³ с взрывоопасным оборудованием, заключенным в большей части помещения, независимо от их капитальности, рекомендуются максимально возможные величины $K_{сбр}$, но не менее 21,4 м²/100 м³ [105].

Известно, что взрывы по своему разрушающему воздействию на строительные конструкции бывают слабые (в виде хлопка), сильные и чрезвычайно сильные. Естественно, что и конструктивное решение зданий для этих случаев не может быть одинаковым. В зарубежных нормах имеются примеры классификации взрывов. В ФРГ выпущен специальный стандарт [33], классификация взрывов дана в нормах ГДР (табл. 15).

Британская заводская инспекция требует, чтобы величина $K_{сбр}$ составляла 17 м²/100 м³ в зданиях, в которых возможны медленные взрывы, и 33 м²/100 м³ при сильных взрывах (водород, ацетилен).

Рекомендации Канадских норм строительного проектирования по выбору $K_{сбр}$ (табл. 16) основываются на максимальном давлении взрыва и капитальности здания.

Зарубежные и отечественные нормативные требования предусматривают некоторую дифференциацию в части определения площадей элементов ЛСК с учетом взрывоопасности горючей смеси и капитальности зданий. В основу норм положены некоторые экспериментальные данные и результаты обследований, имевших место взрывов в производственных помещениях. Нормами не предусматривается расчет основных конструкций на действие взрывных нагрузок.

Т а б л и ц а 1.6. Требуемая площадь ЛСК в зависимости от допускаемого давления в объеме

Максимальное давление взрыва горючей смеси в замкнутом объеме, кПа	Отношение площади ЛСК к объему помещения $K_{сбр}$, м ² /100 м ³		
	тяжелые железобетонные конструкции	легкие железобетонные конструкции	легкие конструкции
До 210	4,1	5,04	6,5
210–420	5,04	6,5	9,4
Свыше 420	6,5	9,4	—

Анализ аварий в зданиях со взрывоопасными производствами показал, что остекление является эффективным противовзрывным устройством. Однако в отдельных случаях при взрывах внутри помещений, несмотря на выполнение нормативных требований, происходило разрушение основных конструкций. Так, помимо разрушения остекления наблюдается полный и частичный отрыв переплетов от оконных проемов. Отбрасываемые в сторону переплеты травмируют людей, наносят повреждения технологическим установкам и конструкциям зданий.

Это подтверждает тот факт, что в приведенных как отечественных так и зарубежных нормах, не учитывается физический процесс протекания взрыва внутри производственного помещения и изменение его параметров, способствующих увеличению нагрузок на конструкции здания. Учитывается только величина максимального давления при выборе площади ЛСК и градации взрывов на сильные и слабые без объяснения этих терминов, которые не могут служить достаточным обоснованием величины $K_{сбр}$. В нормах не оговорены также требования, предъявляемые к самим ЛСК, их оптимальные размеры, масса и прочность, величина нагрузки, при которой они должны вскрываться. Принятие единой величины $K_{сбр}$ безотносительно к общему объему помещения приводит к тому, что для зданий небольшого объема указанная норма оказывается заниженной, а для зданий большого объема – завышенной. Указанные недостатки существующих нормативных положений являются следствием неучета особенностей течения взрыва горючих смесей в условиях, приближенных к производственным. Поэтому для разработки конструктивных решений по защите зданий от взрывов предварительно необходимо дать оценку взрывоопасности конкретного производственного процесса, размещаемого в здании с тем, чтобы в дальнейшем установить величину и характер нагрузок, действующих на ограждающие конструкции, при использовании конкретных элементов ЛСК.

1.4. ОЦЕНКА ВЗРЫВООПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА

В процессе проектирования необходимо знать, к какой группе взрывоопасности относится данное производство, это определяет выбор метода защиты зданий. Ошибки, допущенные в установлении взрывоопасности производства приводят в свою очередь к ошибкам при выборе конструктивно-планировочных решений,

от которых во многом зависят последствия разрушающего действия взрыва горючих смесей внутри помещения. Нередки случаи, когда при оценке взрывоопасности производства проектные организации не всегда находят правильное решение, а это приводит в процессе пуска и эксплуатации производства к дополнительным затратам на исправление допущенных ошибок, а иногда и к авариям.

Исходя из свойств материалов и веществ и условий их применения или обработки, строительными нормами и правилами (СНиП II-90-81) все производства и склады по взрыво- и пожароопасности делятся на шесть категорий, которые обозначают следующим образом: *А* и *Б* – взрывопожароопасные; *В*, *Г* и *Д* – пожароопасные, *Е* – взрывоопасные.

Прежде, чем приступить к оценке взрыво- и взрывопожароопасности проектируемого производства, необходимо проанализировать и обосновать возможность образования смеси взрывоопасной концентрации при нормальных условиях работы, нарушении параметров технологического режима, создания аварийных ситуаций (при утечке газов, паров, выбросе жидкостей или пылей).

Категорию взрыво- и пожароопасности производств устанавливают в соответствии с нормами СНиП II-90-81 и "Указаниями по определению категории производств по взрывной, взрывопожароопасной и пожарной опасности" СН 463-74. В дополнение к СНиП и СН 463-74 разработана "Методика оценки взрывопожароопасности производственных предприятий Министерства химической промышленности", в которой содержатся рекомендации по определению категории производств расчетными методами. Согласно СН 463-74 и разработанной методики, к производствам категорий *А*, *Б* и *Е* можно отнести, не выполняя расчетов:

производства, в которых не менее половины производственной площади занято рабочими столами, или под отдельные рабочие процессы, технология которых связана с использованием веществ, перечисленных в СНиП для категорий *А*, *Б* и *Е*;

производства, в которых образуются вещества, способные взрываться или загораться при взаимодействии с кислородом воздуха, водой или друг с другом.

Категорию следует определять по стадиям технологического процесса с учетом взрыво- и пожароопасности применяемых и образующихся веществ. При размещении различных стадий одного производства в разных помещениях категорию взрыво- и взрывопожароопасности определяют отдельно. Если в одном помещении размещены производства или стадии, отнесенные к различным категориям, то следует руководствоваться соответствующими указаниями СНиП II-90-81.

Если вероятность аварийной ситуации в течение года менее 10^{-6} , то производство не относится к взрыво- или взрывопожароопасной категории. В этом случае категория производства определяется свойствами обращающихся в производстве веществ, за исключением их взрывоопасности.

Определение категории производств, связанных с обращением горючих газов и жидкостей, производится исходя из того, могут ли указанные вещества образовать в производственном помещении

взрывоопасные смеси, превышающие 5% свободного объема помещения.

К взрывопожароопасной категории *А* отнесены производства, связанные с применением веществ, способных взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом; горючих газов, нижний предел воспламенения которых равен 10% и менее по отношению к объему воздуха; жидкостей с температурой вспышки паров до 28°C включительно, при условии, что указанные газы и жидкости могут образовывать взрывоопасные смеси, превышающие 5% объема помещения. К этой категории можно отнести, например, производства сероуглерода, эфира, ацетона и др.

К взрывопожароопасной категории *Б* отнесены производства, связанные с применением горючих газов, нижний предел воспламенения которых более 10% по отношению к объему воздуха; жидкостей с температурой вспышки паров от 28 до 61°C включительно; жидкостей нагретых в условиях производства до температуры вспышки и выше; горючих пылей или волокон, нижний предел воспламенения которых равен 65 г/м³ и менее, при условии, что эти газы, жидкости и пыли могут образовывать взрывоопасные смеси, превышающие 5% объема помещения. К производствам этой категории можно отнести, например, аммиачные компрессорные, размольные мельницы.

К пожароопасной категории *В* отнесены производства, связанные с применением жидкостей с температурой вспышки паров выше 61°C; горючих пылей или волокон; нижний предел воспламенения которых более 65 г/м³; веществ, способных гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом; твердых сгораемых веществ и материалов. К таким производствам относятся цехи регенерации смазочных масел, насосные станции для перекачки жидкостей с температурой вспышки паров выше 120°C и др.

К категории *Г* отнесены производства, связанные с применением негорючих (несгораемых) веществ и материалов в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистой теплоты, искр или пламени; твердых, жидких или газообразных веществ, которые сжигаются или утилизируются в качестве топлива. К категории *Г* можно отнести котельные, литейные и мартеновские цехи.

К категории *Д* отнесены производства, связанные с применением негоряемых веществ и материалов в холодном состоянии. К этой категории относится большинство предприятий строительной индустрии.

К категории *Е* отнесены производства, связанные с применением горючих газов без жидкой фазы и взрывоопасной пыли в таком количестве, при котором могут образовываться взрывоопасные смеси, превышающие 5% объема помещения, в котором по условиям технологического процесса возможен только взрыв (без последующего горения); веществ, способных взрываться (без последующего горения) при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом. К этой категории относится, например, производст-

во чистых металлов методом электролиза, а также восстановление металлов в среде водорода.

Склады и наружные технологические установки в зависимости от обращающихся в них веществ подразделяют на те же категории, что и производства.

Обычно категории взрывопожароопасности производств или указаны в нормах технологического проектирования или в специальных перечнях производств, которые составляются и утверждаются министерствами. При отсутствии таких нормативных документов категория взрывопожароопасности производств устанавливается технологами проектирующей организации. При этом значительную трудность составляет определение образования взрывоопасной газо-, паро- или пылевоздушной смеси в 5% объема помещения. Расчетный объем взрывоопасной смеси определяют, исходя из следующих предпосылок:

а) предполагается, что происходит авария одного из аппаратов, при которой в помещение может поступить наибольшее количество наиболее опасного вещества;

б) все содержимое аппарата выходит наружу, при этом часть продукта удаляется в аварийные емкости системой слива;

в) одновременно может происходить утечка продуктов из питающих трубопроводов в течение времени, необходимого для их отключения: при автоматическом отключении — 2 мин, при ручном — 15 мин;

г) с поверхности разлившегося продукта происходит испарение с площади, равной площади зеркала жидкости, а при свободном разливе, исходя из условия, что один метр смесей и растворов, содержащих до 70% растворителей, разливается на 0,5 м², а остальных жидкостей — на 1 м² пола помещения;

д) происходит испарение жидкости из открытых в нормальных условиях емкостей, а также со свежеекрашенных поверхностей;

е) длительность испарения жидкости или сжиженного газа принимается до их полного испарения, но не более одного часа;

ж) возможность образования взрывоопасной среды определяется достижением нижнего концентрационного предела воспламенения вещества с учетом коэффициента запаса, равного 1,5;

з) в расчет принимается свободный объем производственного помещения, т.е. объем, не занятый аппаратами, оборудованием и строительными конструкциями.

Расчетный объем взрывоопасной смеси $V_{см}$, в котором поступивший в помещение продукт может образовать взрывоопасную концентрацию на нижнем пределе воспламенения, определяют по формуле

$$V_{см} = 1,5 E/C, \quad (1.9)$$

где 1,5 — коэффициент запаса; E — количество вещества, поступившего в помещение, из технологического оборудования, г, которое определяется по формуле:

$$E = E_a + E_T + E_{и},$$

где E_a — количество вещества, поступившего из аппарата, г; E_T — количество вещества, поступившего из трубопроводов, г; $E_{и}$ — количество вещества, поступившего в результате испарения, г; C — нижний концентрационный предел воспламенения вещества, г/м³.

Определение категории производств, опасных по взрыву горючих газов и паров жидкостей, производят в такой последовательности:

определяют объем, в котором вышедший из аппарата и испарившийся продукт может образовать взрывоопасную концентрацию на нижнем пределе воспламенения с учетом коэффициента безопасности, равного 1,5;

устанавливают свободный объем производственного помещения с учетом заполнения объема оборудованием;

определяют процент заполнения свободного объема помещения в зависимости от величины расчетного объема взрывоопасной смеси;

если расчетный объем газовой смеси превышает 5% свободного объема помещения, то производство относится к взрыво- или взрывопожароопасной категории;

находят время испарения продукта в таком количестве, при котором образуется взрывоопасная смесь для заполнения 5% объема помещения, которое определяется по формуле:

$$T_{и} = 0,18 V_{п} C / K_{и} P F \sqrt{M}, \quad (1.10)$$

где 0,18 — суммарный коэффициент, учитывающий неравномерность распределения паров, надежность и размерность величин; $V_{п}$ — свободный объем помещения, м³; C — нижний концентрационный предел воспламенения вещества, г/м³; $K_{и}$ — коэффициент учитывающий влияние скорости и температуры потока над поверхностью испарения; P — давление паров, принимаемое по температуре, равной средней арифметической температуре поверхности жидкости и воздушной среды помещения, Па; F — площадь испарения жидкости, м²; M — молекулярная масса продукта, г.

При определении времени образования взрывоопасной паровоздушной смеси по формуле без учета аварийной вентиляции принимается, что воздушная среда в зоне испарения неподвижна и коэффициент $K=1$.

При учете влияния аварийной вентиляции на условия воздухообмена в помещении скорость движения воздуха в зоне испарения должна приниматься по расчету, но не более 1 м/с, а значение коэффициента по таблице 1.7.

Эффективность работы аварийной вентиляции при оценке взрывопожароопасности производств следует учитывать, если она обеспечена автоматическим пуском и электроснабжением по первой категории надежности. В этом случае величина свободного объема помещения умножается на коэффициент n (табл. 1.7), определяемый по формуле:

$$n = at + 1,$$

где a — кратность воздухообмена, создаваемая аварийной вентиляцией; t — продолжительность аварии, ч.

Если время образования взрывоопасной паровоздушной смеси в 5%-м объеме помещения менее 1 ч, рассматриваемое производство должно быть отнесено к категории взрывопожароопасных. Если установлено, что взрывоопасная газо- или паровоздушная смесь не может образоваться в объеме, превышающем 5% объема помещения или время ее образования более 1 ч, категорию производства определяют, исходя из свойств веществ, обрабатывающих

Т а б л и ц а 1.7. Значение коэффициента n

Скорость воздушного потока в помещении, м/с	Значение коэффициента n при температуре воздуха в помещении, °С				
	10	15	20	30	35
0	1	1	1	1	1
0,1	3	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1	10	8,7	7,7	5,6	4,6

ся в производстве, за исключением их взрывоопасности. В этом случае часть объема помещения, где не исключается возможность образования взрывоопасных смесей, должна считаться взрывоопасной.

Если в производстве выделяется пыль, нижний концентрационный предел воспламенения которой равен 65 г/м^3 и менее, то производство, как правило, следует относить к взрывопожароопасной категории *Б*.

При определенных условиях указанные производства можно не относить к категории *Б*, если:

расчетом обосновано, что максимально возможное количество взвешенной в воздухе и осевшей пыли недостаточно для образования взрывоопасной пылевоздушной смеси в 5% объема помещения;

в помещении производятся лишь эпизодические ручные операции по пересыпанию твердых сыпучих материалов (взвешивание реактивов, приготовление растворов, расфасовка продовольственных товаров).

К взрывоопасным производствам категории *Е* следует относить производства, указанные в табл. 1 СНиП II-90-81, при условии, что в помещении отсутствуют другие горючие вещества, кроме газов, или их количество не превышает величины, способной создать тепловую нагрузку $420\,000 \text{ кДж}$ на любом участке пола помещения площадью 10 м^2 .

Если технологический процесс в основном связан с обработкой негорючих веществ и материалов, но на отдельных неизолированных от остального производства участках обращаются горючие вещества (например, станки с использованием масла для гидроприводов и охлаждения и др.), то данное производство не относится к категории *В* при условии оборудования участка устройствами против распространения пожароопасных веществ (поддоны, бортики перегородки и др.) или же стационарными установками тушения пожаров.

1.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Величина и характер изменения давления на строительные конструкции обуславливается интенсивностью взрывного горения. Численное значение степени интенсификации взрывного горения α правомерно определять как отношение максимальной скорости

распространения пламени в данных конкретных условиях протекания взрывного горения к скорости распространения идеально гладкого (невозмущенного) его фронта.

При аварийных взрывах в производственных зданиях и сооружениях процесс распространения фронта пламени газоздушных смесей (ГВС) может интенсифицироваться за счет присущего пламени явления гидродинамической неустойчивости, непрерывного движения воздуха и горючей смеси, наличия на пути пламени различных препятствий, а также проемов в ограждающих конструкциях. Интенсификация взрывного горения проявляется в ускорении распространения фронта пламени, что может привести к увеличению как скорости нарастания давления, так и его максимального значения. При скоростях распространения пламени, превышающих местную скорость звука, нагрузка на строительные конструкции определяется в виде параметров ударных и детонационных волн, что в свою очередь ведет к необходимости создания принципиально иных конструктивных решений по обеспечению взрывозащиты зданий и сооружений. Поэтому скорость распространения пламени является одним из важнейших параметров взрывного горения по оценке величины и характера нагрузок, действующих на строительные конструкции.

Замечено, что перемещение пламени при объемном горении с постоянной скоростью составляет редкое исключение [57]. В подавляющем большинстве случаев, особенно в производственных условиях, любые искривления фронта пламени, вызываемые движением его несгоревшей ГВС или наличием внешних возмущающих факторов, приводят к увеличению площади его поверхности, что влечет за собой рост массовой скорости сгорания ГВС и возникает ускоренное распространение пламени. Наличие же подобных и подчас весьма эффективных внешних возмущающих факторов в объемах производственных помещений практически неизбежно. В объемах этих помещений, достигающих десятков и даже сотен тысяч кубических метров, начинает проявляться действие конвективных потоков еще несгоревшей ГВС, искривляющее первоначальную форму пламени и тем самым увеличивающее видимую скорость его распространения, а открывающиеся в процессе горения проемы вызывают эффект "вытягивания" пламени, что еще более усиливает искривление его поверхности, вызванное действием свободной конвекции. Кроме того, в объемах зданий и сооружений взрывоопасных производств на формирование поверхности фронта пламени будет влиять наличие технологического оборудования, внутренних строительных конструкций (колонны и связи по ним, фермы, монтажные площадки и др.), вызывающее турбулизацию пламени и тем самым приводящее к дополнительной интенсификации взрывного горения. В связи с этим для определения величины и характера изменения нагрузки на ограждающие конструкции в процессе взрывного горения внутри производственных помещений необходимо правильно оценивать его фактическую степень интенсификации в каждом конкретном случае.

К настоящему времени теоретические работы по оценке степени интенсификации взрывного горения ГВС в объемах, близких к производственным, отсутствуют. С этой целью выполнен ряд экспери-

ментальных исследований. Поэтому имеется возможность проанализировать результаты экспериментальных работ для оценки влияния различных факторов на интенсификацию взрывного горения ГВС в том числе: преград, устанавливаемых на пути распространения пламени по ГВС; вскрывающихся проемов в наружном ограждении опытных камер и предварительного возмущения ГВС; оценить возможность интенсификации горения ГВС в отсутствии каких-либо возмущающих факторов.

Интенсификация взрывного горения спокойной ГВС в *отсутствии внешних возмущающих факторов* определялась экспериментально [60, 75]. Опыты [60] проводились в стальной цилиндрической камере с внутренним диаметром 2 и длиной 1,5 м при центральном зажигании метано-, пропано- и этиленовоздушных смесей стехиометрической концентрации слабой электрической искрой.

После прохождения пламенем 15–30 см на его гладкой поверхности появляются ячейки, выпуклости и вогнутости. Одновременно с появлением ячеистой структуры пламени его видимая скорость распространения увеличивалась приблизительно в 2 раза, т.е. коэффициент интенсификации $\alpha \approx 2$. Это объясняется лишь присущей фронту пламени гидродинамической неустойчивости, так как внешние возмущающие пламя или ГВС факторы отсутствовали: в объеме камеры не было препятствий; действие пристеночной турбулентности на формирование ячеистой структуры пламени исключается, поскольку пламя теряет устойчивость по прохождении всего лишь 5% пути от точки воспламенения смеси до стенок камеры; распространение пламени происходило практически при постоянном атмосферном давлении.

Аналогичные результаты получены в исследованиях [75], проводившихся в полусферическом объеме 2000 м³ с радиусом 10 м и центральным зажиганием на уровне пола смесей метана и окиси этилена с воздухом стехиометрической концентрации. Замечено, что уже через 0,1 с поверхности пламени становилась ячеистой, при этом скорость его распространения увеличивалась так же, как и в работе [60], приблизительно в 2 раза.

Таким образом, в наиболее простых экспериментальных условиях взрывного горения исходной спокойной ГВС при постоянном атмосферном давлении интенсификация горения зависит только от гидродинамической неустойчивости пламени и проявляется в двукратном увеличении видимой скорости его распространения.

Влияние конвективного подъема большого очага пламени при горении смеси CH_4 и воздуха на процесс интенсификации взрывного горения исследовалось в сферическом объеме 70 м³, ограниченном тонкой резиновой оболочкой. Опыты проводились при атмосферном давлении с центральным зажиганием смеси [60]. Согласно кинограмме, начало конвективного подъема очага пламени отмечается через 0,3 с от момента зажигания, т.е. когда радиус сферического пламени достигает 1 м. Распад относительно правильной сферической формы пламени начинается при его радиусе 2,5 м. Конвективный подъем при таком радиусе составляет 0,7 м, а скорость подъема пламени плавно возрастает и достигает величины 3 м/с. На начальном этапе взрывного горения, начиная с радиуса пламени 5 см, на его поверхности, как это отмечалось и в рассмотренных выше работах, появлялись ячейки и одновременно проис-

ходило увеличение видимой скорости распространения пламени. Результаты крупномасштабных экспериментов [22] позволяют предположить, что при аварийных взрывах ГВС внутри объемов производственных площадей, в которых радиус пламени может достигать 10 и более метров, на первоначально образовавшуюся ячеистую структуру пламени позже накладываются искривления, вызванные действием свободной конвекции, что должно приводить к интенсификации взрывного горения.

Количественное изменение интенсификации взрывного горения ГВС за счет действия свободной конвекции можно оценить, используя результаты более масштабных экспериментов, полученных при горении пропана и окиси этилена в смеси с воздухом в полусферическом объеме, равном 2000 м³ [75]. В этих опытах радиус полусферического пламени достигает 10 м. Эта величина уже реальна для производственных помещений. По прохождении этого расстояния видимая скорость распространения пламени достигала для смеси пропана с воздухом 11 м/с, а для смеси окиси этилена с воздухом 23,5 м/с, т.е. $\alpha \approx 4$.

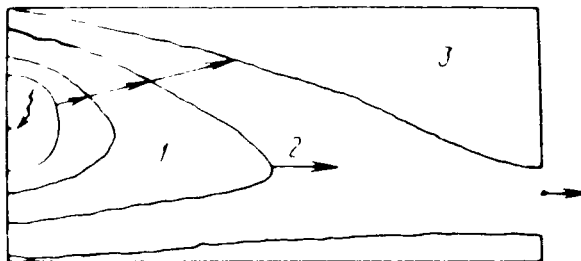
Анализ экспериментальных результатов [60, 75], полученных в опытных объемах 11, 70 и 2000 м³, показывает, что так называемый масштабный фактор оказывает существенное влияние на физический механизм процесса взрывного горения и в частности на его интенсификацию. Так, при взрывном горении ГВС в камере объемом 11 м³ действие свободной конвекции еще не успевает проявляться, поскольку, как было выявлено в исследованиях, при горении ГВС в объеме 70 м³ начало конвективного подъема зафиксировано лишь для сферического пламени двухметрового диаметра. Однако даже результаты этих крупномасштабных опытов не позволяют оценить численное значение α за счет действия свободной конвекции. И только по результатам опытов [75], проводившихся в объеме 2000 м³, было установлено, что конвективный подъем пламени и омывание его поверхности конвективными потоками исходной ГВС увеличивает α еще в 2 раза и, таким образом, общая степень интенсификации с учетом возникающей на ранней стадии взрывного горения гидродинамической неустойчивости нормального пламени $\alpha \approx 4$.

Следует отметить, что свободная конвекция начинает играть значительную роль в ускорении взрывного горения, когда диаметр пламени достигает более 5 м. Давление в объемах производственных помещений может достигать значений, при которых происходит разрушение остекления, вскрытие легкобрасываемых элементов, дверей, ворот и при образовании в наружном ограждении помещений проемов, "вытяжной" эффект которых приводит к еще большему искривлению поверхности пламени, происходит дальнейшая интенсификация взрывного горения.

Влияние открытых проемов в наружном ограждении опытных камер на степень интенсификации взрывного горения проявляется уже в камерах объемом до 1 м³. Это хорошо видно на кинокадрах [95] взрывного горения этилено-воздушной смеси в камере объемом 0,58 м³ при центральном воспламенении ГВС. В начальный период взрывного горения в течение приблизительно 0,015 с момента воспламенения фронт пламени имеет правильную сфери-

Рис.1.1. Схема искривления (вытягивания) фронта пламени при взрывном горении в опытной камере объемом 34 м³

1 — продукты сгорания;
2 — мгновенное положение фронта пламени;
3 — холодная смесь



ческую форму. Затем наблюдается вытягивание пламени в сторону проема, и его форма изменяется от сферической до эллипсоидной. Правда, в небольших лабораторных камерах при максимальном изменении фронта площадь эллипсоидного пламени превышает площадь сферического пламени более чем в 1,1–1,2 раза. При этом видимая скорость распространения пламени, а следовательно, и интенсификация взрывного горения также возрастает всего лишь в 1,2 раза, т.е. в этих условиях $\alpha \leq 1,2$.

В то же время, как показали результаты крупномасштабных экспериментов [90], открытые проемы могут оказывать гораздо более сильное влияние на механизм ускорения взрывного горения. Степень ускорения фронта пламени при наличии проемов в разных случаях различна и зависит от геометрии и размеров опытной камеры, положения открытых проемов относительно источника зажигания. Установлено, что наиболее опасным случаем протекания взрывного горения является такой, когда источник воспламенения смеси находится у торцевой глухой стенки камеры, противоположной стенке с отверстием. В этом случае возникающее искривление и послойная турбулизация фронта пламени играют доминирующую роль в возникновении интенсификации взрывного горения (рис. 1.1). Для этих условий предлагается следующая схема ускорения распространения [90]. После воспламенения полусферический фронт пламени вытягивается в направлении открытого проема, что ведет к незначительному росту скорости его распространения, $\alpha \leq 1,2$. Поскольку плотность исходной ГВС приблизительно в 7 раз превышает плотность газообразных продуктов взрывного горения, то, начиная с момента перекрытия пламенем всей площади проема, скорость истечения газов увеличивается приблизительно в 2,6 раза по сравнению со скоростью истечения исходной холодной ГВС. Столь резкое увеличение скорости истечения газового потока через проем генерирует сильную турбулентность по поверхности пламени, что в свою очередь ведет к ускорению выделения тепловой энергии и, следовательно, к интенсификации взрывного горения. В некоторых опытах значение α превышало 10.

Для теоретического описания математической модели ускоряющегося пламени была предложена зависимость между ускорением dU_n/dt пламени в результате вытягивания и турбулизации его поверхности и скоростью $U_{ис}$ истекающей через проем ГВС:

$$dU_n/dt \sim U_{ис}. \quad (1.11)$$

где U_n — скорость распространения пламени.

Таким образом, в расчетной модели ускоряющегося пламени принимается, что ускорение его распространения благодаря вытяги-

ванию и турбулизации поверхности фронта пропорционально скорости истечения ГВС через проемы.

В подобных исследованиях, проводившихся в цилиндрической камере длиной 3,5 м и диаметром 2 м с прямоугольным проемом площадью 1,36 м² в торцевой стенке, воспламенение пропано-воздушной смеси стехиометрической концентрации в предварительной серии опытов осуществлялось в центре камеры и у закрытого торца [2]. В этих экспериментах установлено возрастание величины максимального давления взрывного горения с 9 кПа при центральном воспламенении ГВС до 20 кПа при воспламенении ее у закрытого торца. При этом и сама картина изменения давления при воспламенении у закрытого торца камеры сложнее, чем при центральном воспламенении ГВС. В этих условиях кривая "давление—время" имеет четыре максимума вместо двух на кривой "давление—время", соответствующей распространению пламени от центрального источника воспламенения ГВС.

Проведенные опыты со всей очевидностью показывают, что наиболее интенсивное взрывное горение ГВС в свободных от препятствий удлиненных объемах (исключение, вероятно, составляют лишь объемы, близкие к кубической и сферической формам) имеет место при воспламенении смеси у закрытого торца, когда фронт пламени проходит максимально возможный путь, равный всей длине объема камеры (помещения).

Степень интенсификации взрывного горения в объемах с препятствиями устанавливались в результате как лабораторных, так и натурных экспериментальных исследований, в которых имитировались аварийные взрывы ГВС. Эти исследования позволяют утверждать что наличие разного рода препятствий на пути распространяющегося пламени является основным фактором, влияющим на ускорение взрывного горения и его катастрофические последствия. Из экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, следует выделить исследования, приведенные в работах [68, 79, 65, 93].

Так, в опытном объеме кубической формы, представляющем собой каркас со стороной, равной 60 см, обтянутый тонкой бумагой, последовательно воспламенялись в центре основания каркаса [68] заранее перемешанные пропано-, этилено- и ацетиленовоздушные смеси. На основание каркаса устанавливались препятствия в виде трех полусферических проволочных сит радиусом 9, 14 и 18 см. Следует особо подчеркнуть необычность постановки и проведения этих экспериментов [68]. Дело в том, что весь процесс горения ГВС проходил при постоянном атмосферном давлении, поскольку непосредственно перед моментом воспламенения смеси бумага на сторонах каркаса разрывалась. В этих опытах было зафиксировано, что при прохождении пламени через повторяющиеся полусферические сита его скорость распространения монотонно возрастала, и в условиях взрыва наиболее быстрогорящей смеси ацетилена с воздухом скорость пламени после прохождения им всех трех сит превышала начальную скорость ламинарного фронта в 12 раз, т. е. $\alpha = 12$.

Степень интенсификации взрывного горения метановоздушной смеси стехиометрического состава при постоянном атмосферном давлении в зависимости от размеров, геометрии и количества препятствий изучалась в работе [79]. Взрывная камера состоит

из двух круглых параллельных стальных пластин радиусом 30,5 см, являющихся основаниями цилиндра и соединенными между собой по краям тремя стержнями-распорками. Боковой поверхностью цилиндрической камеры служила тонкая стальная лента, которая устанавливалась только на период создания ГВС и убиралась непосредственно перед моментом ее воспламенения. Источник воспламенения располагался в центре поверхности нижней пластины-основания. На этой же пластине монтировались препятствия в виде спиралей из медных и резиновых трубок, а также кольцевой перфорированной ленты. Таким образом, во всех опытах пламя из центра между двумя пластинами-основаниями свободно распространялось в радиальном направлении, проходя при этом через повторяющиеся препятствия. Видимая скорость пламени в отсутствие препятствий сразу после воспламенения составила 3,3 м/с, а при максимальном заполнении объема камеры препятствиями была зафиксирована наибольшая для всех опытов скорость распространения пламени, равная 130 м/с. Следовательно, максимальная степень интенсификации в этих опытах оказалась равной $\alpha = 130/3,3 = 39$. По результатам проведенных экспериментов сделаны следующие выводы: повторяющиеся препятствия ведут к ускорению распространения фронта пламени; при наличии на пути пламени повторяющихся препятствий скорость его распространения быстро возрастает до значений, которые могут привести к росту нагрузок, опасных для строительных конструкций зданий, оболочек технологических аппаратов и оборудования [79].

Правомерность первого вывода была вскоре подтверждена в ходе дальнейшего выполнения программы экспериментальных исследований, но на камере с радиусом пластин-основания, увеличенным до 61 см [79]. В этих опытах скорость распространения пламени метановоздушной смеси по прохождении расстояния в 61 см превышала скорость звука и составляла 400 м/с, что соответствует $\alpha = 400/3,3 \approx 121$. Однако в экспериментах во взрывной камере, представляющей собой трубу длиной 1,22 м прямоугольного поперечного сечения размером 12,7x20,3 см с горючей метановоздушной смесью стехиометрического состава в качестве препятствий на дне камеры по ее длине монтировались перегородки высотой 3,2; 5 и 7,6 см [65]. Воспламенение ГВС производилось у закрытого торца камеры, в то время как противоположный торец был полностью открытым. Установлено увеличение скорости распространения пламени ГВС при прохождении метрового участка камеры от точки воспламенения в условиях максимального заполнения объема повторяющимися препятствиями-перегородками (рис. 1.2). Из рис. 1.2 следует, что при прохождении пламенем повторяющихся препятствий скорость его распространения действительно постоянно увеличивается и достигает своего максимального значения в пределах измерений до 130 м/с. Поскольку измеренная скорость распространения пламени в объеме, свободном от препятствий, составляет ~ 2 м/с, то $\alpha = 130/2 = 65$.

Экспериментальные исследования по оценке интенсификации взрывного горения смесей 10%-й CH_4 и воздуха, 4%-й C_3H_8 и воздуха и 10%-й C_2H_2 и воздуха в процессе прохождения пламени через повторяющиеся препятствия в виде круглых деревянных стержней диаметром 1 см и высотой 9 см приведены в работе

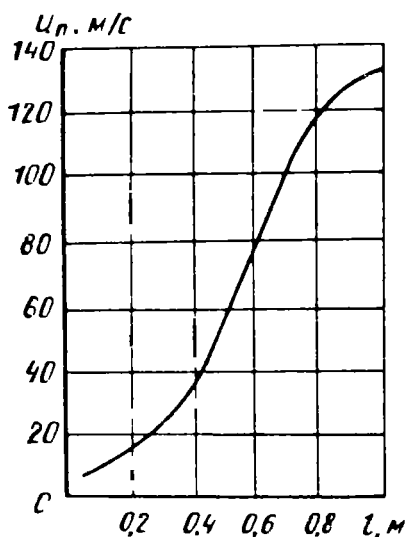


Рис. 1.2. Изменение скорости распространения пламени вдоль трубы

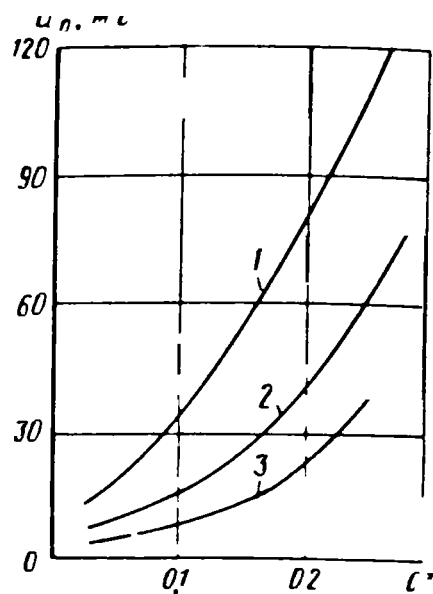


Рис. 1.3. Изменение скорости распространения пламени по горючей газовой смеси с различными реакционно-кинетическими свойствами

1 — 10%-я смесь C_2H_2 ;
2 — 4%-я смесь C_3H_8 ; 3 —
10%-я смесь CH_4

[93]. Каркас камеры состоит из двух деревянных квадратных пластин (верхняя и нижняя) размером в плане 60х60 см каждая в гнезда которых вставляются в коридорном порядке стержни препятствия на расстоянии 3 см друг от друга. Затем каркас помещался в середину взрывной камеры значительно большего размера заполненную ГВС, которая воспламенялась в центре нижней пластины каркаса. В этой работе убедительно показано, что в смесях с более высокими реакционно-кинетическими свойствами происходит и более быстрое увеличение скорости распространения пламени при прохождении им препятствий. Наиболее высокой реакционно-кинетической способностью в экспериментах обладала 10%-я смесь C_2H_2 и воздуха, вследствие чего еще невозмущенный фронт ее пламени распространялся со скоростью $U_{пл} = 13,5$ м/с, а 10%-я смесь CH_4 и воздуха обладала гораздо меньшей реакционно-кинетической способностью и поэтому имела $U_{пл} = 2,1$ м/с [106]. Это различие хорошо прослеживается на графике рис. 1.3. Из рис. 1.3 видно, что всего лишь на расстоянии 20 см от источника воспламенения $U_{пл}$ ацетиленовоздушной смеси более чем в 3 раза превышает $U_{пл}$ метановоздушной смеси при прочих равных условиях, и эти скорости составляют соответственно 80 и 25 м/с.

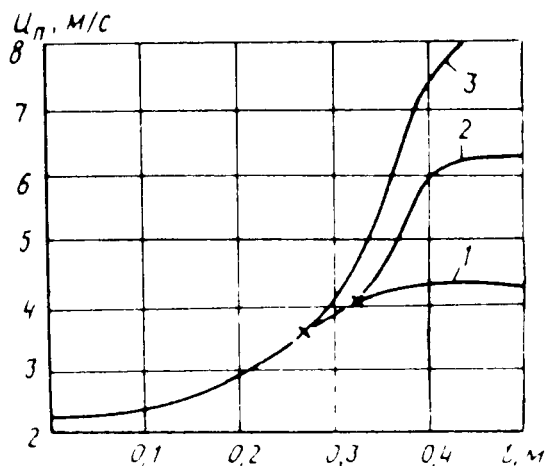
В условиях прохождения пламенем ГВС через n последовательных препятствий скорость распространения его фронта $U_{пл}$ после n -го препятствия предлагается определять по формуле [106].

$$U_{пл} = U_{пл, 1} (1 + K)^n \quad (1.12)$$

где $U_{пл, 1}$ — скорость распространения пламени до первого препятствия;
 K — коэффициент, зависящий от конфигурации взрывной камеры и степени

Рис. 1.4. Изменение скорости распространения пламени

1 — горение в свободном объеме;
2 — преграда (каркас) на пути фронта пламени;
3 — каркас с дополнительными стержнями (x — момент прохождения пламенем препятствия)



заполнения ее объема препятствиями. Для конкретных условий экспериментов $K = 0,6$. Следовательно, согласно предлагаемой формуле, при прохождении каждого нового препятствия скорость распространения пламени неуклонно возрастает, причем в степенной зависимости.

Из сравнения данных рассмотренных лабораторных экспериментов вытекает очевидный вывод об их несовместимости из-за сильного различия в конструкции камер (несмотря на незначительное различие объемов) и типов препятствий. Кроме того, механический перенос результатов отдельных экспериментов в малых опытных объемах на большие, соизмеримые с производственными, неправилен, поскольку процессы взрывного горения практически не поддаются физическому моделированию из-за невозможности точного воспроизведения газодинамической картины горения столь больших объемов ГВС в условиях частично открывающихся конструкций в наружном ограждении помещений, действия на очаг пламени конвективных подъемных сил и наличия крупноразмерных различной конфигурации реальных строительных и технологических конструкций и устройств. Вот почему выявление закономерностей протекания взрывного горения ГВС и в первую очередь степени его интенсификации в условиях, максимально приближенных к производственным, является первостепенной задачей для решения практических вопросов промышленной взрывобезопасности. С этой точки зрения особый интерес представляют результаты проведенных в последнее время как у нас в стране, так и за рубежом крупномасштабных полигонных экспериментов [6, 46, 3, 96, 73 80].

В целях изучения интенсификации взрывного горения ГВС в зависимости от вида препятствий на пути распространяющегося фронта пламени проводились опыты в стальной цилиндрической камере с внутренним диаметром 2 и длиной 3,5 м при центральном воспламенении горючей метановоздушной смеси слабой электрической искрой [6]. Для этого в камере монтировались два типа турбулизирующих устройств. Эти устройства представляли собой сварные металлические каркасы с ребрами из равнобоких уголков 63х5 мм и размером стороны 50 см. Для увеличения эффекта возмущения фронта пламени предусматривалось устройство на гранях каркаса дополнительных металлических стержней (полосы шириной 45 мм). Сам каркас монтировался в центре объема камеры таким образом, чтобы источник воспламенения находился

в его геометрическом центре. Распространяющийся фронт пламени фотографировался скоростной кинокамерой СКС-1М через оптическое стекло размером 1,1х1,2 м, вмонтированное в торец камеры. В другом торце был устроен прямоугольный проем размером 1,7х0,8 м, который закрывался на время проведения опытов листом черной бумаги. На рис. 1.4 кривая 2 имитирует процесс взрывного горения ГВС в объеме промышленного здания шириной 18, длиной 36 и сеткой колонн 6х6 м с воспламенением смеси в центре ячейки внутреннего ряда колонн. До момента соприкосновения поверхности пламени с элементами каркаса (колоннами) его фронт имеет сферическую форму и распространяется с видимой скоростью, характерной для горения в свободном от препятствий объеме (кривая 1 рис. 1.4). В дальнейшем, при обтекании ребер каркаса поверхность пламени дробится, искривляется, в результате чего общая площадь горения увеличивается, что и является причиной возрастания скорости распространения пламени в 1,5 раза. В условиях проведенного опыта устройство дополнительных металлических планок на сторонах каркаса играло роль вертикальных связей по колоннам, монтажных площадок и лестниц к ним. Этот более сложный тип препятствия приводил и к более сильной интенсификации взрывного горения, когда видимая скорость пламени увеличивалась до 8 м/с, т.е. более чем в 2 раза превышала величину $U_{пл}$, соответствующую распространению пламени в свободном от препятствий объеме. Данные киносъемки позволяют заключить, что повышение $U_{пл}$ происходит в полном соответствии с так называемым законом площадей, т.е.

$$U_{пл} = U_n \frac{F}{S},$$

где U_n — нормальная скорость горения, а F и S — площади поверхностей соответственно возмущенного (искривленного) и невозмущенного пламени [50].

Максимальное значение степени интенсификации взрывного горения за счет искривления фронта пламени в процессе обтекания им внешних препятствий в условиях проведенных опытов составило $\alpha = 4$ [5].

Продолжением ранее проведенных исследований явились эксперименты, проводившиеся в той же камере с целью установления влияния несплошных (сквозных) повторяющихся препятствий на ускорение взрывного горения пропановоздушной смеси в объемах промышленных печей [3]. Препятствиями служили последовательно расположенные вдоль камеры перегородки, пересекающие все ее поперечное сечение решетки из металлических крупных стержней диаметром 18 мм и размером стороны ячейки 12,5 см. Смесь воспламенялась электрической искрой на расстоянии 0,4 м от закрытого торца камеры.

Результаты экспериментов однозначно подтверждают выводы лабораторных исследований о непрерывном ускорении взрывного горения ГВС, т.е. возрастании его интенсивности в процессе прохождения пламенем повторяющихся препятствий [68, 79, 65, 93]. Это хорошо иллюстрируется графиком (рис. 1.5). Действительно, скорость распространения пламени монотонно увеличивается после прохождения очередной решетки-препятствия и достигает своего

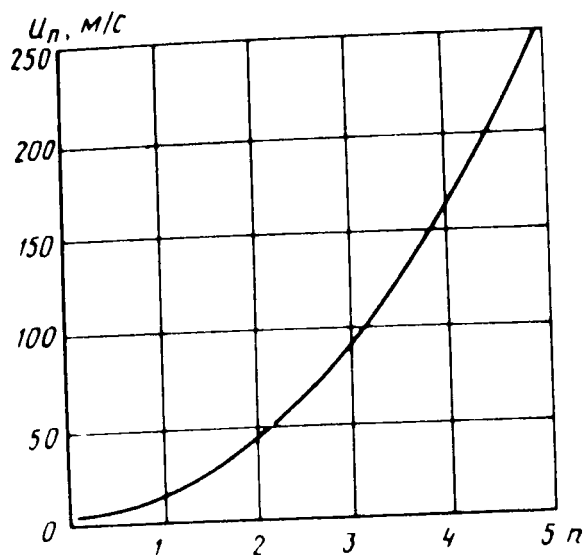


Рис. 1.5. Изменение скорости распространения фронта пламени $U_{пл}$ в зависимости от количества решеток n

максимума 250 м/с после пятой последней решетки. Более того, увеличивается также и прирост скорости $\Delta U_{пл}$ от препятствия к препятствию. Так, если $\Delta U_{пл}$ между первым и вторым препятствиями не превышало 30 м/с, между вторым и третьим — 40 м/с, то между последними — четвертым и пятым препятствиями $\Delta U_{пл}$ достигает уже 90 м/с. Поскольку измеренная в предварительной серии опытов скорость распространения невозмущенного фронта пламени оказалась равной 2,5 м/с, то $\alpha_{\max}$ в этих опытах равна 100.

Экспериментальные результаты дают основание предполагать, что и в больших производственных объемах, характеризующихся высокой степенью заполнения препятствиями, также возможно достижение как звуковых, так и больших скоростей распространения пламени, как это уже было зафиксировано, например, в лабораторных условиях [3, 79].

Наглядным подтверждением этому могут служить эксперименты по изучению взрывного горения пропан-бутановой газозудной смеси в топках паровых котлов [30]. При внутреннем объеме, равном 27,15 м³ модель топki парового котла, рис. 1.6, выполненная в натуральную величину и разделена металлическими перегородками на четыре отсека, имитирующих собственно топку 1, камеру догорания 2 и два отсека газоходов 3. В свою очередь газоходы были заполнены кипяильными трубками 4 диаметром 18 мм с шагом в продольном и поперечном направлениях 110 мм.

При столь высокой степени заполнения объема камеры препятствиями (сплошные перегородки и пучки кипяильных трубок) резко усложнилась газодинамическая картина и самого взрывного горения. На фотографиях, полученных с помощью скоростной киносъемки, видно, что после воспламенения ГВС пламя по мере распространения в пустом объеме топki 1 постепенно изменяет первоначальную полусферическую форму на вытянутую полуэллипсоидную, а затем на цилиндрическую, оканчивающуюся

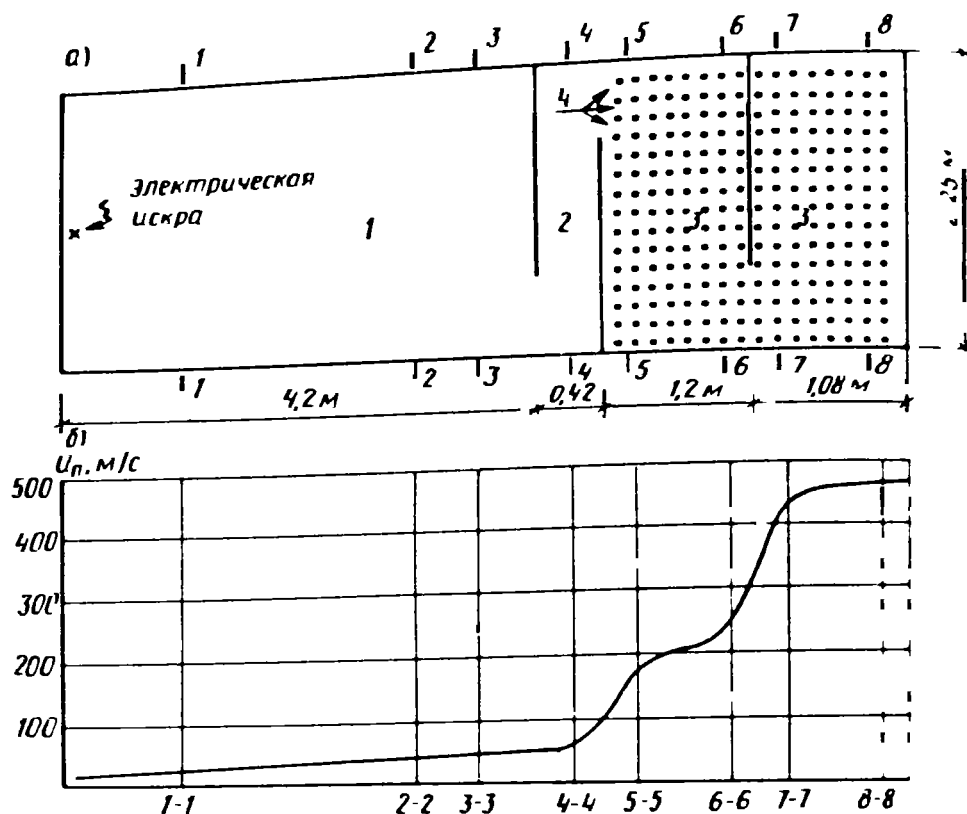


Рис. 1.6. Результаты исследования процесса взрывного горения в топке парового котла

а — схема взрывной камеры; 1 — топка котла; 2 — камера догорания; 3 — два отсека газохода; 4 — кипятильные трубки; б — скорость пламени в сечениях камеры 1-1 — 8-8

искривленным куполом. При этом скорость распространения пламени слабо увеличивается (см. рис. 1.6) до момента входа в камеру догорания (сечение 4-4). При прохождении камеры догорания за счет сужения перегородками скорость пламени резко возрастала и при входе в первый отсек газохода уже составляла $U_{пл} = 180 \text{ м/с}$ (сечение 5-5). Пучки кипятильных трубок первого отсека газоходов способствовали дальнейшей интенсификации взрывного горения ГВС что проявилось в увеличении значения $U_{пл}$ в сечении 6-6 еще на 60 м/с. Перетекание же пламени во второй отсек газоходов на расстояние всего лишь 0,5 м между сечениями 6-6 и 7-7 привело к самой сильной интенсификации взрывного горения в этих опытах — скорость распространения пламени на этом коротком участке пути увеличилась почти вдвое с 240 до 450 м/с. Последний после сечения 7-7 метровый отрезок пути пламя распространяется с этой максимальной постоянной скоростью, т.е. ряды кипятильных трубок после сечения 7-7 лишь поддерживают достигнутый уровень протекания взрывного горения пропан-бутановоздушной смеси.

Максимальная степень интенсификации взрывного горения ГВС $\alpha_{\text{макс}} \approx 140$ зафиксирована в начале второго отсека газоходов на расстоянии 6 м от источника воспламенения смеси.

Крупномасштабные эксперименты проводились в камере объемом 33,5 м³ при центральном воспламенении метановоздушной смеси стехиометрической концентрации [95]. В опытах исследовалось влияние сбросных проемов в ограждении камеры на снижении

максимального давления, развивающегося в процессе взрывного горения ГВС. Однако о степени интенсификации взрывного горения метановоздушной смеси можно судить по результатам отдельной серии экспериментов, когда в объем камеры помещалось различное технологическое оборудование. Правда, при этом не фиксировалась скорость распространения фронта пламени. Поэтому о степени интенсификации взрывного горения ГВС можно судить лишь по косвенным параметрам, например, по изменению максимального давления $P_{\text{макс}}$ при взрывном горении ГВС внутри камеры. Действительно, в свободном от оборудования объеме камеры с площадью сбросного проема 3 м^2 величина максимального избыточного давления $\Delta P_{\text{макс}}$ достигала 11 кПа , а при размещении внутри камеры технологического оборудования $\Delta P_{\text{макс}}$ увеличивалась до $15,6 \text{ кПа}$, что безусловно, хотя и косвенно, указывает на усиление интенсивности взрывного горения.

Изучение интенсификации взрывного горения ГВС при наличии на пути пламени повторяющихся препятствий было проведено в камере объемом 50 м^3 . Взрывная металлическая цилиндрическая камера имела длину 10 м и диаметр $2,5 \text{ м}$. Целью опытов являлось определение влияния повторяющихся препятствий на характер распространения пламени и развития давления при взрывном горении метановоздушной смеси концентрацией $9,5\%$. Один из торцов камеры в момент воспламенения смеси и в процессе ее горения был полностью открыт. Воспламенение смеси производилось плоским источником, расположенным у противоположного глухого торца камеры и перекрещивающим все ее поперечное сечение с тем, чтобы иметь возможность исследовать влияние препятствий на процесс взрывного горения с установившимся с момента воспламенения плоским фронтом пламени. Именно при таком источнике воспламенения возникают наиболее опасные взрывные эффекты. Препятствия представляли собой фанерные и металлические кольца толщиной 15 мм с внешним диаметром $2,5 \text{ м}$ и переменным внутренним диаметром.

На рис. 1.7 приведен график изменения скорости распространяющегося вдоль трубы пламени в условиях заполнения ее объема пятью кольцевыми препятствиями с внутренним диаметром $2,1 \text{ м}$, установленными друг от друга на расстоянии 2 м .

Относительно большие расстояния между отдельными препятствиями более реально отражают обстановку в производственных помещениях, в которых крайне редко может наблюдаться высокая степень заполнения объема препятствиями, характерная в основном для технологического оборудования, как это и имело место в работе [30]. В результате изменения масштабного фактора, другим стал и характер изменения скорости распространения пламени через (сквозь) повторяющиеся препятствия. Теперь значение $U_{\text{пл}}$ увеличивается не монотонно, как это наблюдалось в опытах на небольших лабораторных установках, а скачкообразно. При этом заметно некоторое сходство с результатами исследований [30] (см. рис. 1,6,б). По всей видимости, искривления фронта пламени, образующиеся при прохождении им кольцевого препятствия, на двухметровом пути до следующего препятствия успевают несколько снизиться, чем и объясняется уменьшение скорости пламени, прослеживаемое на графике рис. 1,6, например между

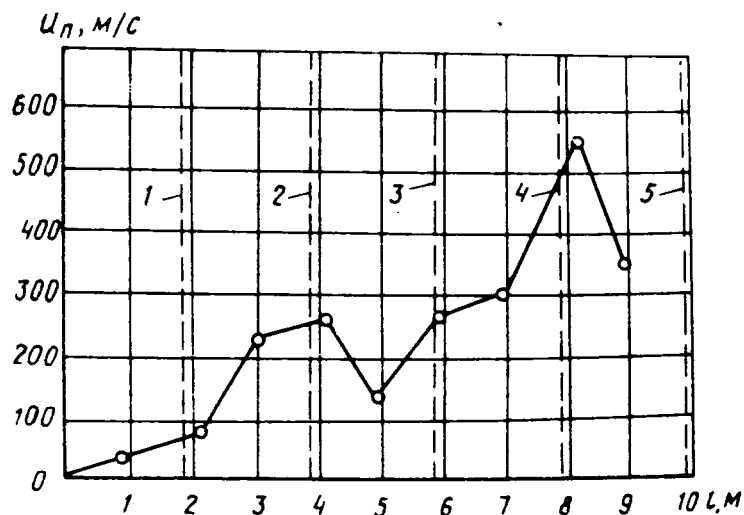


Рис. 1.7. Изменение скорости распространения фронта пламени $U_{пл}$ вдоль трубы в зависимости от заполнения ее кольцевыми препятствиями
1; 2; 3; 4; 5 – кольца

вторым и третьим препятствием. Тем не менее только в этих опытах после прохождения пламенем четырех кольцевых препятствий значение $U_{пл}$ достигло своего максимума, равного 550 м/с, а начиная с расстояния 7 м от глухого торца камеры перед фронтом пламени зафиксировано образование слабых ударных волн. Естественно, что в рассмотренных экспериментах степень интенсификации взрывного горения ГВС оказалась самой высокой, $\alpha \approx 162$.

По результатам анализа экспериментальных данных сделаны следующие выводы [80]: для больших объемов, заполненных газоздушными смесями, достигающими скоростей распространения пламени более 100 м/с, уже нельзя пренебрегать такими газодинамическими эффектами в процессе взрывного горения как сжимаемостью газовой смеси, неравномерностью распределения давления по трубе (у закрытого торца, в середине и у открытого торца камеры), образованием ударных волн; результаты экспериментов, проводившихся в лабораторных установках с проемами в ограждении, совершенно непригодны для оценки давления, развивающегося в процессе взрывного горения больших объемов ГВС при наличии на пути пламени разного рода повторяющихся препятствий.

В проводившихся экспериментах изучался механизм взрывного горения воздушных смесей метана, пропана и окиси этилена стехиометрического состава внутри полусферического каркаса 10-метрового радиуса и объемом 2000 м³ [75]. Сам каркас был смонтирован на бетонной площадке и обтянут тонкой полиэтиленовой пленкой. Воспламенение смеси осуществлялось в центре каркаса на уровне бетонного основания слабой электрической искрой. Для увеличения возмущения поверхности пламени в полусферу помещались одиночные препятствия в виде решетки, поставленной вертикально и повернутой плоскостью к источнику воспламенения, а также в виде конструкции, составленной из стальных блоков размером 5х15х15 см. Степень интенсификации взрывного горения всех используемых ГВС после прохождения пламенем препятствий

не превышала 4, как это было зафиксировано и при проведении опытов, описанных в работе [65].

Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что крупногабаритные отдельно стоящие препятствия в производственных помещениях, как правило, вызывают только искривления поверхности пламени в отличие от сильной ее турбулизации при взрывном горении ГВС в насыщенных препятствиями объемах технологических установок. При этом наличие отдельно стоящего препятствия на пути пламени ведет к временному повышению его скорости, после чего пламя как бы "забывает" о вызванных препятствием возмущениях: его форма и скорость распространения вновь становятся приблизительно теми же, что и до момента обтекания препятствия.

Изучение и обобщение приведенных результатов экспериментальных исследований, проводившихся как в лабораторных, так и в натурных полигонных условиях, позволяет сделать следующие выводы, необходимые для решения задач взрывозащиты зданий.

1. Наличие повторяющихся препятствий, в первую очередь в объемах технологических установок, ведет к возникновению и непрерывному усилению турбулизации горящей газозоудушной смеси, в результате чего увеличивается поверхность пламени, что и является причиной ускорения его распространения. В этих условиях степень интенсификации взрывного горения ГВС достигала высоких значений, а в некоторых случаях скорость распространения пламени превышала скорость звука в горючей газовой смеси, и процесс взрывного горения приобретал новый, качественно особый характер, когда впереди фронта пламени образуются ударные волны.

2. В зданиях со взрывоопасными производствами повторяющимися препятствиями являются колонны с установленными на них фермами и балками, а также установки технологических линий (насосы, компрессоры и др.). Например, в одноэтажном здании компрессорного отделения объемом $14\,600\text{ м}^3$ с наиболее часто встречающейся длиной 60 м и унифицированной габаритной схемой — пролет 18 м, высота до низа стропильной конструкции 10,8 м, при шестиметровом шаге колонн насчитывается 9 таких препятствий. Коэффициент перекрытия препятствиями поперечного сечения этого здания (отношение площади поверхности препятствий в сечении ко всей площади поперечного сечения) не превышает 0,2, в то время как во взрывной камере в работе [10], наиболее близко имитирующей подобную производственную обстановку, этот коэффициент равен 0,3, поэтому в этих зданиях следует ожидать значительно меньшую интенсификацию взрывного горения при общей схожести характера процесса его развития.

3. Принципиально иная картина процесса взрывного горения ГВС наблюдается с отдельно стоящим препятствием. Наличие отдельно стоящего препятствия на пути пламени ведет лишь к искривлению (без турбулизации) его поверхности и кратковременному периоду "местного" повышения скорости распространения пламени, после чего вызванные препятствием искривления поверхности пламени сглаживаются, а скорость распространения вновь снижается до значения, характерного для горения в свобод-

Т а б л и ц а 1.8. Опытные данные по определению интенсификации взрывного горения газовоздушных смесей при наличии препятствий на пути распространения фронта пламени

Условия проведения экспериментальных исследований	Объем опытной установки, м ³	Скорость ламинарного пламени, м/с	Отношение площади преграды к поперечному сечению установки f , м ² /м ³	Количество преград n	Коэффициент интенсификации α
Взрывное горение метановоздушной смеси стехиометрической концентрации при постоянном давлении [81]	0,007 0,011	3,3 3,3	0,5 0,67	7 14	22 39
Взрывное горение метановоздушной смеси при постоянном давлении [93]	0,032	2,1	0,31	10	16
Взрывное горение ацетиленовоздушной смеси стехиометрической концентрации при постоянном давлении [68]	0,216	13	0,4	3	12
Взрывное горение метановоздушной смеси стехиометрической концентрации при постоянном объеме [88]	0,477	3,3	0,2	12	12
Взрывное горение смеси 25%-го городского газа с воздухом в кубической камере с одной открытой стенкой площадью 1,95 м ² , закрываемой во время опытов [89]	2,8	2,5	0,2	1 3 3	1,7 2,5 3
Взрывное горение метановоздушной смеси в цилиндрической камере с отверстием в одном торце площадью 1,36 м ² [3]	11	2,2	0,04 0,05	1 1	3 4
Взрывное горение пропановоздушной смеси стехиометрической концентрации в цилиндрической камере с отверстием в одном торце площадью 1,36 м ² [3]	11	3	0,32	1 3	6 24
Взрывное горение пропановоздушной смеси стехиометрической концентрации в цилиндрической камере с отверстием в одном торце площадью 1,36 м ² [3]	11	3	0,07	3	16
Взрывное горение смеси 10%-го метана с воздухом в бетонном бункере шириной 3 м с открытым окном в одном из его торцов [87]	18	3	0,75	2	20

ном от препятствий объеме. Так, в проведенных опытах максимальная степень "местной" интенсификации взрывного горения ГВС равнялась 4, а усредненная за время полного сгорания ГВС $\alpha_{\text{ср}} \approx 3$.

4 Наименьшая интенсификация взрывного горения ГВС должна иметь место в относительно небольших производственных помещениях, близких по форме к кубу с минимальным заполнением объема препятствиями. Действительно, в помещениях по отбору проб газа, кислотных аккумуляторных и газоанализаторных, объем которых не превышает 500 м³ и которые практически свободны от крупногабаритных технологических установок, превалирующей причиной увеличения интенсивности взрывного горения может быть только неустойчивость нормального фронта пламени. Подтверждением этому предположению служат результаты опытов, проводившихся в свободных от препятствий объемах 70 и 2000 м³, в которых значение α в результате потери пламенем устойчивости не превышало 2.

Приведенные результаты изучения экспериментальных исследований по оценке интенсификации взрывного горения ГВС позволяют сделать заключение о том, что наибольший эффект ускорения фронта пламени имеет место при прохождении пламени через преграды, находящиеся на пути его распространения. При этом замечено, что основное влияние на интенсификацию горения оказывает как количество преград, так и их площадь, перекрывающая поперечное сечение объема, заполненного ГВС, причем степень заполнения различными объектами объема играет решающее значение. На определенном этапе взрывного горения с уменьшением площади пламени, приходящейся на единицу поверхности преград, наблюдается снижение скорости горения, и при достижении так называемого тушащего диаметра происходит полное его гашение [51].

Данные экспериментальных исследований, приведенные в табл. 1.8, были аппроксимированы с использованием вычислительной техники. В результате была получена эмпирическая зависимость для определения коэффициента интенсификации:

$$\alpha = 2 + \frac{U_n}{0,5} - [(+0,578 + 0,152n + 0,002n^2) + (5,719 + 0,689n + 0,012n^2) f + (-6,339 - 0,618n - 0,015n^2) f^2], \quad (1.13)$$

где α — коэффициент интенсификации взрывного горения ГВС; $f = F_{\text{пр}}/F_n$ — отношение площади преграды к поперечному сечению помещения; n — количество преград; U_n — нормальная скорость пламени, м/с.

Приведенная зависимость позволяет с учетом как количества объектов, находящихся на пути распространения пламени, так и их общей площади, перекрывающей свободный объем по отношению к площади его поперечного сечения, рассматриваемого нормально к направлению перемещения фронта пламени, устанавливать численные значения коэффициентов интенсификации α . По полученной зависимости построены графики (рис. 1.8) и значения α (табл. 1.9).

Таким образом, величина коэффициента интенсификации взрывного горения ГВС устанавливается в зависимости от вида продук-

Т а б л и ц а 1.9. Значения коэффициента интенсификации α в зависимости от количества преград n , находящихся на пути распространения пламени, и отношения проекции их площади $F_{пр}$ к площади поперечного сечения объема F_n для горючих газов с $U_H = 0,5$ м/с

$\alpha = F_{пр}/F_n$	Коэффициент интенсификации, α												
	количество преград, n												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,05	2,07	2,15	2,23	2,4	2,57	2,75	2,93	3,17	3,4	3,48	3,56	3,75	3,94
0,1	2,14	2,36	2,57	2,78	2,99	3,19	3,39	3,67	3,95	4,06	4,17	4,4	4,64
0,2	2,71	2,91	3,11	3,37	3,63	3,9	4,16	4,5	4,83	5	5,17	5,49	5,81
0,3	2,89	3,19	3,48	3,79	4,09	4,4	4,71	5,09	5,47	5,68	5,88	6,26	6,64
0,4	3,02	3,36	3,69	4,02	4,35	4,69	5,03	5,43	5,82	6,05	6,27	6,7	7,13
0,5	3,05	3,39	3,73	4,07	4,41	4,76	5,1	5,52	5,94	6,16	6,38	6,82	7,26
0,6	2,92	3,26	3,6	3,94	4,27	4,68	4,97	5,38	5,79	5,98	6,17	6,62	7,07

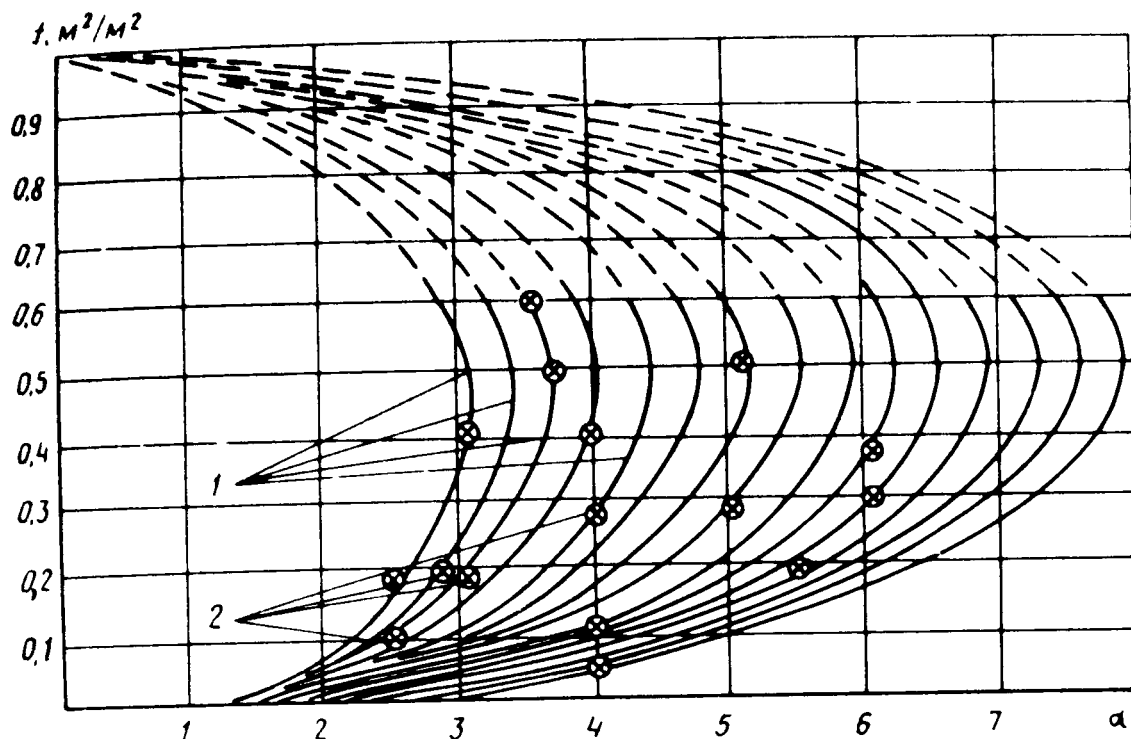


Рис. 1.8. Значения коэффициента интенсификации α в зависимости от скорости горения ГВС, количества объектов n , находящихся на пути распространения пламени, и отношения их проекции $F_{пр}$ к площади поперечного сечения объема F_v ($f = F_{пр}/F_v$)

1 — значение α по уравнению (1.13); 2 — опытные данные

та, площади и количества преград в виде строительных конструкций, технологического оборудования и других объектов, находящихся на пути распространения пламени. Если площадь и количество преград в отдельных частях помещения настолько различны, что это приводит к заметному изменению интенсификации горения, то объем помещения следует разделить на области в направлении, перпендикулярном длине помещения, и для каждой из них находить α . Полученные таким образом значения $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ используются для определения расчетной величины применительно к помещению в целом [41]

$$\alpha = \frac{\alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2 + \dots + \alpha_n V_n}{V_n}, \quad (1.14)$$

где $V_1, V_2, \dots, V_n$ — соответственно объемы областей, на которые был разбит объем помещения; $V_n = V_1 + V_2 + \dots + V_n$.

При наличии опытных данных применительно к конкретным условиям тех или иных взрывоопасных производств значения α целесообразно принимать в соответствии с этими данными.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА НАГРУЗОК, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ВЗРЫВНОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

2.1. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА НАГРУЗОК

Одной из основных задач в общей проблеме взрывобезопасности является умение определять возникающие нагрузки на ограждающие конструкции при взрыве горючих газо-, паро- и пылевоздушных смесей внутри помещения. Существующая теория горения, взрыва и детонации горючих смесей отвечает на вопросы, связанные с явлениями взрывного горения при течении таких процессов в трубах [10, 19, 20, 28]. Взрывы горючих смесей в больших объемах, соизмеримых с объемами промышленных зданий, изучены недостаточно. В связи с этим при решении практических задач защиты зданий взрывоопасных производств от разрушений при построении модели по определению величины и характера взрывных нагрузок, действующих на строительные конструкции, заведомо следует принимать такие исходные данные, которые позволят получать надежные результаты по обеспечению взрывозащиты.

Основная идея защиты промышленных зданий при взрыве горючих смесей внутри помещения заключается в обеспечении прочности и устойчивости несущих конструкций и разрушения или вскрытия специальных легкообрасываемых конструкций при минимальных нагрузках (импульс, давление). Таким образом, при решении практических задач взрывозащиты промышленных зданий и сооружений необходимо в одинаковой степени уметь подобрать площадь и параметры ЛСК для снижения возникающих нагрузок до безопасных величин и правильно рассчитать несущие конструкции на динамическую устойчивость при сохранении их несущей способности. Для этого необходимо определить нагрузки, возникающие при взрыве горючих смесей внутри помещений.

Задача по определению величины и характера нагрузок, действующих на ограждающие конструкции при взрывном горении газовоздушных смесей внутри объемов с отверстием решалась в работах [40, 46, 47, 48, 50].

Математическая модель, описывающая динамику сгорания ГВС в объеме с учетом истечения, основывалась на следующих допущениях:

1. После воспламенения взрывоопасной смеси пламя распространяется в виде сферы; все точки поверхности фронта пламени в любой момент времени находятся на одинаковом расстоянии от источника зажигания, т.е. не учитывается влияние потока газа, вытекающего из отверстия или нескольких отверстий на форму пламени; взаимодействие пламени со стенками замкнутого объема, а также формы объема на распространение пламени.

Сферическое пламя возникает при условии самопроизвольного его распространения в неограниченной невозмущимой среде. Практически такой вид распространения пламени наблюдается только в начальный момент времени при зажигании горючей смеси в замкнутых объемах любой формы. В сферических сосудах рас-

пространение пламени при зажигании в центре сохраняет сферическую форму до конца процесса [56]. Подобное распространение фронта пламени наблюдается в объемах, в которых отношение длины к наименьшему размеру поперечного сечения (ширины или высоты) близко к единице.

Предположение о сферической симметрии фронта пламени является обычным для помещений, размеры которых не сильно отличаются друг от друга [72]. Это приближение ограничено начальными стадиями горения, и его точность тем выше, чем меньше избыточное давление.

Помещения, в которых размещаются взрывоопасные производства, имеют форму, близкую к прямоугольной, где отношение длины к ширине имеет самое различное значение. Из проведенных экспериментов видно, что сферическая форма фронта пламени может быть ограничена объемами прямоугольной формы с такими геометрическими размерами сторон, когда меньшая из сторон равна или не более $1/3$ наибольшего геометрического размера помещения. Тогда с достаточной точностью можно принять, что площадь фронта пламени $S_f \approx 5 V_n^{2/3}$ (V_n — объем помещения).

2. До момента вскрытия отверстия в наружном ограждении повышение давления внутри помещения происходит как в замкнутом объеме. С момента вскрытия отверстия наряду с процессом горения ГВС внутри объема при определении давления учитывается истечение газа через образовавшиеся проемы. Процесс истечения газа рассматривается адиабатическим.

3. Поскольку взрывное горение рассматривается как процесс, при котором скорость распространения пламени меньше скорости звука в горючей среде, принимается, что процесс изменения давления на ограждающие конструкции будет квазистатическим, а давление одинаково во всех точках помещения.

Предположение о независимости давления в помещении от пространственных координат является общепринятым [62, 94] и справедливо при условии $U_n \epsilon / C_0 < 1$, т.е. скорость пламени меньше скорости звука, а также когда $a/C_0 < b/U_n \epsilon$ (a — больший размер помещения, b — меньший).

4. Основываясь на этих предпосылках, а также на экспериментальных результатах [28, 29], рассматривается задача сгорания газа как в сферическом, так и в ином другом объеме, с наличием вскрываемого отверстия. При этом расчет производится для двух случаев. В первом случае, когда через отверстие в среду с постоянным давлением P_0 поступает горючая смесь, а затем продукты горения, и втором — когда наблюдается процесс горения с учетом одновременного истечения продуктов сгорания и горючей смеси.

5. В работах [8, 9, 29] показано, что выражения, определяющие динамику сгорания газа в замкнутом объеме, могут быть рассмотрены по входящим в них термодинамическим параметрам: коэффициенту расширения продуктов сгорания ϵ , теплоемкости горючей смеси и продуктов сгорания. Важнейшими параметрами, определяющими динамику сгорания, являются коэффициент расширения и скорость пламени. Отношение теплоемкостей c_u/c_b оказывает относительно слабое влияние на время сгорания, но существенно влияет на скорость нарастания давления. Поэтому для начальной стадии горения при получении математической модели,

описывающей динамику сгорания газа в постоянном объеме с отверстием, без существенной потери точности можно допустить равенство $\gamma_u = \gamma_b$, что позволит упростить зависимости, описывающие динамику сгорания ГВС.

6. Изменение давления в объеме при сгорании газа является функцией доли сгоревшей смеси и скорости выгорания, равной произведению нормальной скорости распространения пламени по горючей среде на площадь ее поверхности. На первом этапе решения поставленной задачи вводится допущение, что фронт пламени после его деформирования сохраняет сферическую форму, а фактор турбулизации остается постоянным в течение взрыва после начала деформирования фронта пламени.

7. Увеличение скорости распространения пламени в процессе перемещения его внутри помещения или в момент разгерметизации проема учитывается с помощью введения коэффициента интенсификации (турбулизации) горения α .

Проведенные опыты по исследованию интенсификации процесса взрывного горения ГВС показали, что на изменение скорости перемещения фронта пламени помимо присущего ему явления неустойчивости будет влиять также наличие преград на пути его распространения и принудительного воздухообмена, при котором скорость распространения фронта пламени может увеличиваться по сравнению с условиями нормального горения (см. гл. 1).

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗРЫВНОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ И МГНОВЕННОМ ВСКРЫТИИ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Легкосбрасываемые конструкции по характеру работы в процессе взрывного горения ГВС можно разделить на две группы.

К первой группе относятся ЛСК, имеющие сравнительно небольшую массу и разрушающиеся практически мгновенно. При расчетах таких ЛСК представляется возможным пренебречь силами инерции, возникающими при движении ЛСК, а также считать, что вскрытие перекрываемых ими проемов происходит мгновенно. В связи с этим при определении величин давлений, возникающих при взрывном горении ГВС, можно считать, что с момента вскрытия ЛСК истечение газа из объема будет происходить через полностью открытое сечение проема. При достаточно большой площади образующихся проемов можно обеспечить снижение давления с момента вскрытия ЛСК.

Ко второй группе относятся ЛСК, при вскрытии которых нельзя пренебречь силами инерции. Для этих ЛСК характерным является относительно медленное вскрытие проемов в ограждающих конструкциях. В результате этого в начальный момент после вскрытия проемов независимо от их площади нагрузка при взрывном горении ГВС будет возрастать.

В настоящее время в качестве ЛСК широко применяется остекление. Глухое остекление по характеру разрушения может быть отнесено к первой группе ЛСК, а поворотные остекленные переплеты — ко второй. Наиболее характерными представителями второй группы ЛСК являются стеновые элементы, плиты покры-

тий. При применении ЛСК первой группы повышение давления до заданной величины может быть ограничено путем выбора необходимой площади.

Рассмотрим, во-первых, модель, когда из помещения вытекает сначала горючая смесь, а затем продукты горения и, во-вторых, модель с одновременным истечением продуктов сгорания и горючей смеси при наличии нескольких отверстий в наружном ограждении помещения.

При рассмотрении первой модели нетрудно заметить, что принятое упрощение ведет к некоторому завышению давления. Для создания второй модели, т.е. определения более точной величины и характера возникающей нагрузки при взрывах в помещениях необходимо ввести в разработанную первую модель уравнения, учитывающие истечение продуктов сгорания.

Прирост массы сгоревшей смеси на единицу времени можно представить в следующем виде:

$$dm_b/dt = S_f \rho_u U, \quad (2.1)$$

Для условия сохранения массы горючей смеси можно записать

$$\frac{dm_u}{dt} = \frac{d(\rho_u V_u)}{dt} = -S_f \rho_u U - \frac{dm_v}{dt}, \quad (2.2)$$

где dm_v/dt — поток массы, проходящей через отверстие $V_u + V_b = V$, V — объем помещения, равный

$$-\frac{dV_u}{dt} = \frac{dV_b}{dt} = S_f (R) \frac{dR}{dt}, \quad (2.3)$$

где m — масса; ρ_u, ρ_b — плотность; U — скорость горения; P — давление; S_f — площадь фронта пламени; V_n — объем помещения; R — радиус фронта пламени; γ_u, γ_b — показатели адиабаты; t — время; индекс "u" относится к горючей смеси, а индекс "b" — к продуктам сгорания.

Считаем, что продукты сгорания и исходная горючая смесь подчиняются уравнению адиабаты:

$$P \rho^{-\gamma} = \text{const}; \quad \frac{1}{\gamma P} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}; \quad (2.4)$$

$$\frac{dm_b}{dt} = \frac{d(\rho_b V_b)}{dt} = \rho_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \frac{d\rho_b}{dt}. \quad (2.5)$$

Подставив в уравнение (2.1) формулу (2.5), получим:

$$S_f \rho_u U = S_f \rho_b \frac{dR}{dt} + V_b \frac{\rho_b}{\gamma_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}; \quad (2.6)$$

$$-S_f \rho_u U = -S_f \rho_u \frac{dR}{dt} + \frac{V_u}{\gamma_b} \frac{\rho_b}{P} \frac{dP}{dt} + \frac{dm_v}{dt}. \quad (2.7)$$

После преобразования уравнений (2.6) и (2.7) получим:

$$\frac{dP}{dt} = \alpha P \left[\left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) U S_f - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt} \right] / \left(\frac{V_b}{\gamma_b} + \frac{V_u}{\gamma_u} \right); \quad (2.8)$$

$$\frac{dR}{dt} = \alpha U \frac{\rho_u}{\rho_b} \frac{1}{S_f} \frac{V_b}{\gamma_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (2.9)$$

Уравнения (2.8) и (2.9) описывают характер изменения давления на ограждающие конструкции помещения, а также координаты нахождения фронта пламени в зависимости от времени. Для того, чтобы решать приведенные уравнения необходимо установить значения следующих параметров: dm_u/dt — поток массы газа через отверстие, коэффициент расширения ρ_u/ρ_b , площадь фронта пламени $S_f(R)$ и объем продуктов горения $V_b(R)$, коэффициент α .

Поток массы газозвушной смеси через отверстие можно представить обычным уравнением для адиабатического истечения газа из замкнутого объема в среду с атмосферным давлением [75]

$$\frac{dm}{dt} = \mu S_{отв} \rho \left[\frac{\gamma P}{\rho} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \right]^{0.5} \quad (2.10)$$

для сверхзвукового течения

$$\frac{P}{P_0} > \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \approx P_c$$

$$\frac{dm_v}{dt} = \mu S_{отв} \left\{ \frac{2\gamma P \rho}{\gamma-1} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{0.5}, \quad (2.11)$$

для дозвукового течения, или в более удобном для дальнейшего использования в виде

$$\frac{dm_v}{dt} = \mu S_{отв} C_u \left[\left(\frac{2}{\gamma-1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{0.5}. \quad (2.12)$$

для $\frac{P}{P_0} < P_c$

$$\frac{dm_v}{dt} = \mu S_{отв} \rho_u C_u \left\{ \frac{2}{\gamma-1} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{0.5}. \quad (2.13)$$

где P_c — критическое давление, которое разделяет характер истечения таким образом, что при $P < P_c$ истечение из помещения дозвуковое, а при $P > P_c$ — сверхзвуковое; P_0 — давление в окружающей среде; C_u — скорость звука в ГВС, μ — коэффициент истечения. Для решения уравнений (2.10) и (2.11) необходимо установить отношения плотности свежей горючей смеси к плотности продуктов сгорания в зависимости от давления (коэффициента расширения).

Возникающие нагрузки в реальных помещениях, исходя из максимальной прочности ограждающих конструкций, не превышают 20 кПа (гл. 4). Покажем, как при этом изменится степень расширения продуктов горения. Для этого запишем уравнение адиабаты Гюгонио:

$$P_b/P_u \left(\chi - \frac{\rho_u}{\rho} + \frac{2\gamma_u Q}{c_u^2} \right) / \left(\chi \frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right). \quad (2.14)$$

где $\chi = (\gamma + 1) / (\gamma - 1)$; Q — тепловыделение на единицу массы ГВС

Для $\gamma_u = 1,4$; $\chi_u = 2,4/0,4 = 6$; для $\gamma_b = 1,25$ и $\chi_b = 2,25/0,25 = 9$.

Для потока импульса

$$P_u + \rho_u U^2 = P_b + \rho_b W^2 \text{ с учетом закона сохранения массы } W = \frac{\rho_u}{\rho_b} U, \text{ получим}$$

$$\begin{aligned} \frac{P_b}{P_u} = 1 - \frac{\rho_b \rho_u^2 U^2}{\rho_b^2 P_u} + \frac{\rho_u U^2}{P_u} = 1 - \frac{\rho_u \rho_u}{\rho_b P_u} U^2 + \frac{\rho_u}{P_u} U^2 = 1 + \\ + \frac{\rho_u}{P_u} U^2 \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_b}\right) = 1 + \gamma \frac{U^2}{C_u^2} \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_b}\right). \end{aligned} \quad (2.15)$$

Так как

$$\frac{P_b}{P_u} - 1 = \gamma \frac{U^2}{C_u^2} \left(1 - \frac{\rho_u}{\rho_b}\right) \text{ и } U \epsilon / C_u \ll 1, \quad (2.16)$$

то тем более $U^2 / C_u^2 \ll 1$, а это значит, что $P_b / P_u \approx 1$.

Таким образом, для газоздушных смесей

$$P_b / P_u \approx 1, \chi_u = 5-8; \chi_b = 8-12; \rho_u / \rho_b = 5-8.$$

Следовательно, в знаменателе уравнения (2.14) можно пренебречь единицей по сравнению с $\chi_b \frac{\rho_u}{\rho_b}$, а в числителе $\chi - \frac{\rho_u}{\rho_b}$ по сравнению с $\frac{2\gamma_u Q}{C_u^2}$.

Тогда получим

$$\chi_b \frac{\rho_u}{\rho_b} = \frac{2\gamma_u Q}{C_u^2}; \quad \frac{\rho_u}{\rho_b} = \frac{2\gamma_u Q}{\chi_b C_u^2}. \quad (2.17)$$

Возьмем отношение степени расширения при давлении P к степени расширения при атмосферном давлении P_0

$$\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right)_P / \left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right)_{P_0} \approx \frac{C_{u0}^2}{C_u^2}, \quad (2.18)$$

где C_{u0} — скорость звука в горючей смеси при атмосферном давлении.

Для адиабатического сжатия горючей смеси имеем:

$$\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right)_P / \left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right)_{P_0} = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (2.19)$$

Учитывая, что при взрывах горючих смесей в помещениях давление, как правило, ограничено 20 КПа, для $\gamma_u = 1,4$ получим

$$\left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right)_p / \left(\frac{\rho_u}{\rho_b}\right)_{p_0} = \left(\frac{1}{1,2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{1}{1,2}\right)^{\frac{0,4}{1,4}} = 0,95. \quad (2.20)$$

Таким образом, коэффициент расширения при взрывах горючих смесей в помещениях меняется в пределах 5% и при оценочных расчетах его можно считать постоянным и равным коэффициенту расширения при атмосферном давлении.

При определении возникающих нагрузок при взрывном горении газозооушной смеси внутри помещения следует учитывать истечение как взрывоопасной смеси, так и продуктов сгорания. Особенно это необходимо делать при расчете нагрузок на ограждающие конструкции в помещениях, имеющих форму, отличную от кубической, а также при наличии нескольких отверстий.

Если учесть, что истекают из объема и продукты сгорания, то вместо (2.5) можно записать

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{d(\rho_b V_b)}{dt} + \frac{dm_{vb}}{dt} = \rho_b \frac{dV_b}{dt} + V_b \frac{\rho_b}{\gamma_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} + \frac{dm_{vb}}{dt}, \quad (2.21)$$

тогда выражения (2.1), (2.3) и (2.5) дают

$$S_f \rho_u U \alpha = S_f \rho_b \frac{dR}{dt} + V_b \frac{\rho_b}{\gamma_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} + \frac{dm_{vb}}{dt}, \quad (2.22)$$

$$-S_f \rho_u U \alpha = -S_f \rho_u \frac{dR}{dt} + \frac{V_u}{\gamma_u} \frac{\rho_b}{P} \frac{dP}{dt} + \frac{dm_v}{dt}. \quad (2.23)$$

Из (2.6) и (2.7) имеем

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \left(\frac{V_b}{\gamma_b} + \frac{V_u}{\gamma_u} \right) = S_f U \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) - \left(\frac{1}{\rho_b} \frac{dm_{vb}}{dt} + \frac{1}{\rho_b} \frac{dm_{vu}}{dt} \right). \quad (2.24)$$

Итак, с учетом истечения продуктов сгорания уравнения (2.8) и (2.9) принимают следующий вид:

$$\frac{dP}{dt} = \alpha P \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) U S_f - \left(\frac{1}{\rho_b} \frac{dm_{vb}}{dt} + \frac{1}{\rho_b} \frac{dm_{vu}}{dt} \right) \left/ \left(\frac{V_b}{\gamma_b} + \frac{V_u}{\gamma_u} \right) \right.; \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} &= \frac{\alpha U \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} + \frac{\gamma_u}{\gamma_b} \frac{V_b}{V_u} \right)}{1 + \frac{\gamma_u V_b}{\gamma_b V_u}} + \frac{1}{S_f} \left(\frac{V_u V_b}{\gamma_u V_b + \gamma_b V_u} \right) \times \\ &\times \left(\frac{1}{\rho_u} \frac{dm_{vu}}{dt} - \frac{1}{\rho_b} \frac{dm_{vb}}{dt} \right). \end{aligned} \quad (2.26)$$

где dm_{vb}/dt — поток массы продуктов сгорания; dm_u/dt — поток массы исходной смеси.

Поток массы в дозвуковом режиме истечения определяется по формуле:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dm}{dt} = \mu S_{\text{отв}} C \left\{ \frac{2}{\gamma-1} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{0,5} \quad (2.27)$$

Таким образом, по аналогии с моделью, учитывающей сначала истечение горючей смеси из объема, затем продуктов сгорания, для модели, учитывающей одновременное истечение продуктов сгорания и несгоревшей смеси, уравнения (2.25), (2.26) и (2.27) со связями между S_f , V_b и R позволяют определить величину и характер возникающих нагрузок с учетом истечения как исходной ГВС, так и продуктов сгорания.

Нетрудно показать, что достаточно принять $S_{\text{отв}} = 0$, чтобы получить уравнения, описывающие динамику сгорания газа в замкнутом объеме.

Для того, чтобы установить величину $\frac{1}{\rho} \frac{dm}{dt}$ для продуктов сгорания и ГВС, необходимо задать значение μ , $S_{\text{отв}}$. В этом случае давление в помещении во всех точках принимается одинаковым, а показатели адиабаты γ_u и γ_b — по справочным данным. Независимо от вида и места установки ЛСК, коэффициент истечения при взрывах в помещениях может приниматься равным 0,8.

Скорость звука для продуктов сгорания равна:

$$c_b = \sqrt{\gamma_b \frac{p_b}{\rho_b}} = c_u \sqrt{\frac{\rho_u \gamma_b}{\rho_b \gamma_u}}, \text{ так как } p_b = p_u. \quad (2.28)$$

Площадь, через которую истекает газ, равна:

$$S_{\text{отв } u} = S_{\text{отв}} - S_{\text{отв } b}. \quad (2.29)$$

Это означает, что общая площадь потоков исходной взрывоопасной смеси S_u и продуктов сгорания S_b равна общей площади отверстий $S_{\text{отв}}$. К моменту подхода к отверстию пламени фронт его начинает вытягиваться в направлении отверстия, и продукты сгорания начинают истекать из отверстия раньше, чем заложено в схему расчета. Увеличение площади пламени за счет вытягивания может быть учтено подбором соответствующего коэффициента интенсификации горения, в связи с этим можно предположить следующую схему расчета. После зажигания ГВС до момента вскрытия ЛСК горение происходит в замкнутом объеме $S_{\text{отв } u} = S_{\text{отв } b} = 0$.

После вскрытия отверстия истекает свежая смесь: $S_{\text{отв } b} = 0$, $S_{\text{отв } u} = S_{\text{отв}}$. При достижении фронтом пламени отверстия начинается истечение продуктов сгорания.

Уравнения (2.25) и (2.27) описывают характер изменения давления на ограждающие конструкции, а также координаты нахождения фронта пламени в зависимости от времени для процесса, развивающегося в объеме сферической или близкой к кубической форме.

Для решения практических задач при использовании уравнений (2.25) — (2.27) необходимо задать конкретный вид функций

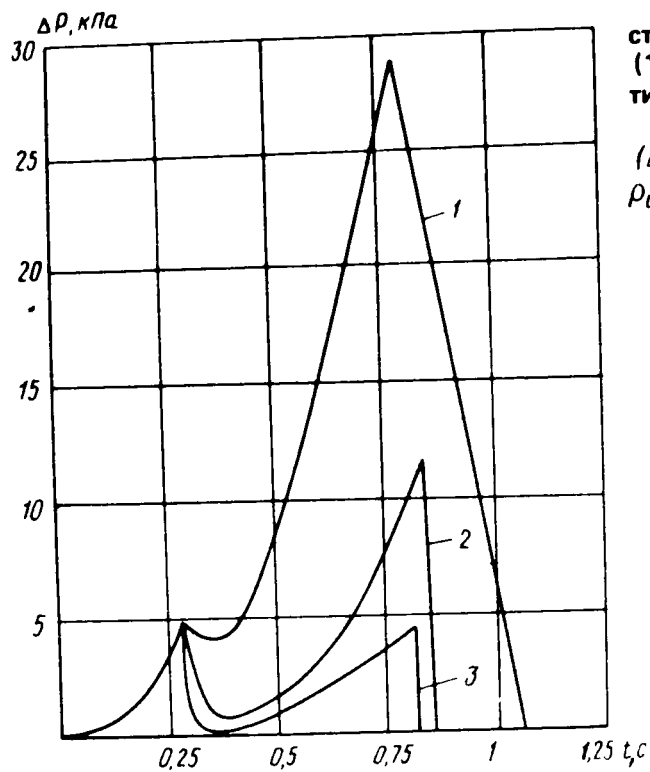


Рис. 2.1. Давление взрыва на стенке сферического объема (14 м³) при мгновенном вскрытии отверстия площадью
1 – 0,1; 2 – 0,3; 3 – 0,5 м²
($\Delta P = 5$ кПа; $U_H = 0,3$ м/с;
 $\rho_u/\rho_b = 6$; $\alpha = 2$)

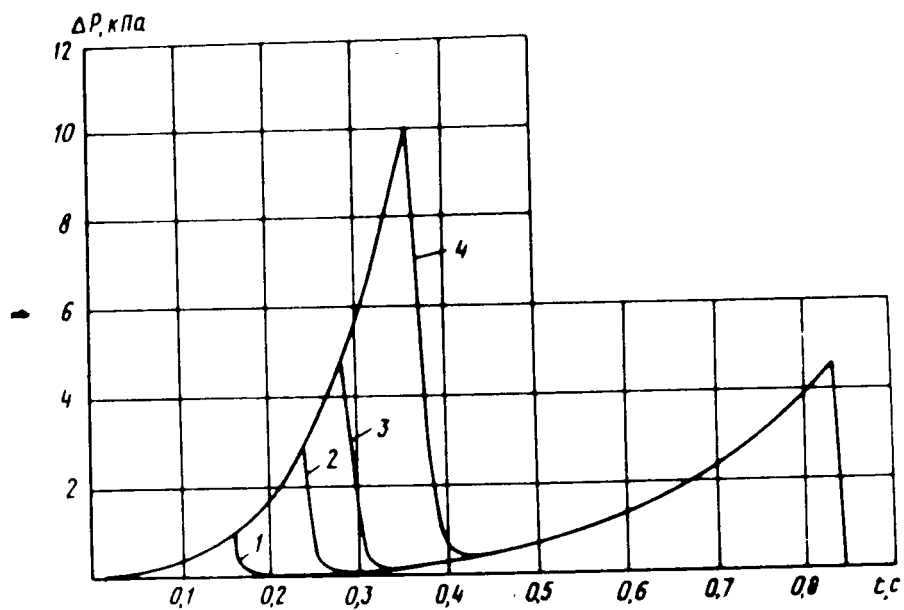


Рис. 2.2. Давление взрыва на стенке сферического объема (14 м³) при мгновенном вскрытии отверстия площадью 1 м² при ΔP равном
1 – 1; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10 кПа ($U_H = 0,3$ м/с; $\rho_u/\rho_b = 6$;
 $\alpha = 2$)

$S_f(R)$ и $V_b(R)$, т.е. функции для площади фронта пламени и объем сгоревшего газа в зависимости от координаты фронта пламени

Указанные функции для сферического сосуда при центральной зажигании имеют вид: $S_f(R) = 2\pi R^2$; $V_b(R) = 4/3\pi R^3$; при распространении в трубе диаметром D плоского фронта пламени

$$S_f(R) = \pi D^2/4; V_b(R) = \pi D^2 R/4.$$

Рис. 2.3. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при открытом отверстии площадью

1 – $0,03$; 2 – $0,05$; 3 – $0,07 \text{ м}^2/\text{м}^3$
 ($U_H = 0,45 \text{ м/с}$; $\rho_U/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

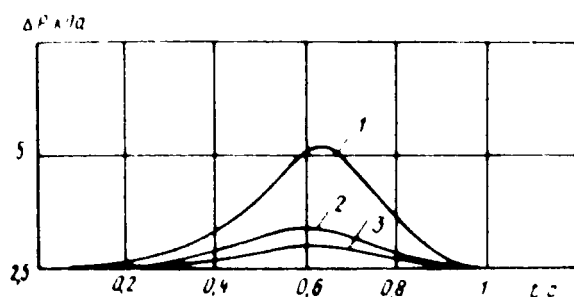


Рис. 2.4. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м^3 при открытом отверстии площадью

1 – $0,03$; 2 – $0,05$; 3 – $0,07 \text{ м}^2/\text{м}^3$
 ($U_H = 0,45 \text{ м/с}$; $\rho_U/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

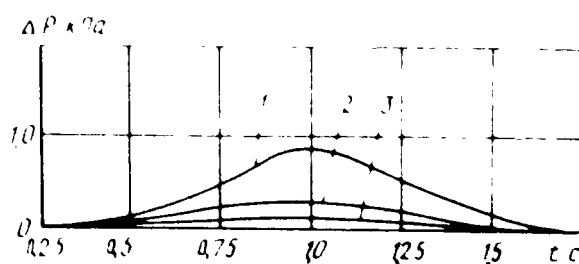
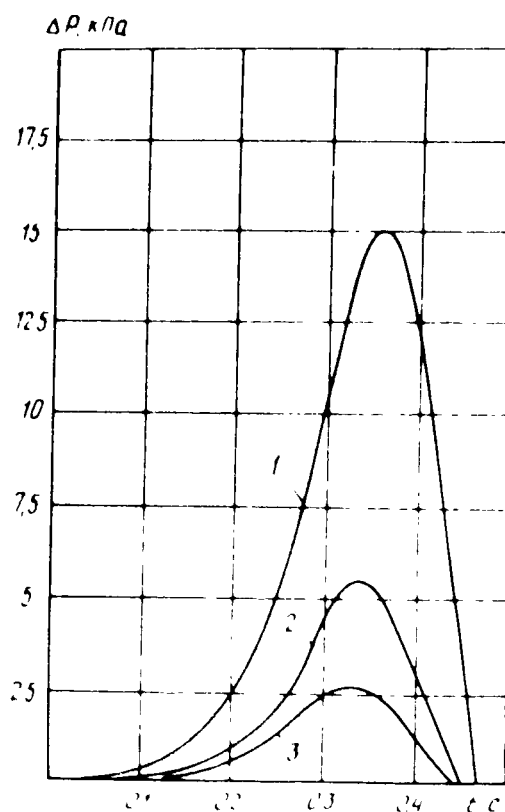


Рис. 2.5. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ при открытом отверстии площадью

1 – $0,03$; 2 – $0,05$; 3 – $0,07 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ($U_H = 0,45 \text{ м/с}$;
 $\rho_U/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

Для помещения, имеющего вытянутую форму $S_f(R) = ab$;
 $V_b(R) = a^2b$.

Для помещения по форме, близкого к кубу, например, куб с ребром a и источником зажигания, находящимся в центре куба $S_f(R)$ и $V_b(R)$ можно задать следующим образом. До соприкосновения со стенкой фронт пламени принимается сферическим, т.е. для $R < \frac{a}{2}$, где a – ребро куба.

$$S_f(R) = 4\pi R^2, V_b(R) = \frac{4}{3}\pi R^3.$$

Для $R > \frac{a}{2}$ $S_f(R)$ принимается равной площади части сферы радиуса R , которая находится внутри куба с ребром a ; $V_b(R)$ равен объему части сферы.

В качестве примера на основании уравнений (2.25) – (2.27) построены графические зависимости изменения характера и величины нагрузок, действующих на ограждающие конструкции в случае, когда отверстие вскрывается мгновенно или открыто до момента зажигания взрывоопасной смеси (рис. 2.1–2.5).

2.3. УЧЕТ НЕСФЕРИЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

Развитие пламени в объемах, имеющих вытянутую форму, например в трубах, показывает, что пламя постоянно изменяет свою сферическую форму, приближаясь к эллипсоиду вращения, если поджигание происходит в центре вытянутого объема или у торцевой стенки [31]. При этом осевая скорость фронта пламени постоянно увеличивается до тех пор, пока площадь поверхности пламени не достигнет максимума, а радиальная скорость постепенно уменьшается. Количественный расчет процесса изменения фронта пламени в вытянутых объемах невозможно произвести без введения определенных предположений и упрощений, так как он связан с вопросом о нестационарности развития поверхности пламени, на которой холодный газ, движущийся с постоянной скоростью, изменяющейся во времени и пространстве, переходит в продукты сгорания.

Для того, чтобы учесть изменение формы поверхности фронта пламени, по данным приведенных экспериментов, в объемах, имеющих вытянутую форму, можно произвести количественную оценку зависимости объема сгоревшей газовой смеси и поверхности фронта пламени во времени от изменения объема и поверхности фронта пламени сгорающей газовой смеси в равном объеме сферической формы [31].

Предположим, что в замкнутом сосуде отношение давления продуктов сгорания в объеме вытянутой формы и сферическом пропорционально отношению объемов продуктов сгорания (рис. 2.6)

$$\frac{\Delta P_v}{\Delta P_{сф}} \cong \frac{V_v}{V_{сф}} = \frac{4/3 \pi a^2 b}{4/3 \pi R_{сф}^3} = \frac{a^2 b}{R_{сф}^3}, \quad (2.30)$$

где V_v – объем продуктов сгорания в объеме вытянутой формы; $V_{сф}$ – объем продуктов сгорания в сферическом объеме; a и b – координаты фронта пламени в радиальном и осевом направлениях относительно места зажигания; $R_{сф}$ – радиус сферического фронта пламени до момента преобразования сферического пламени в поверхность, близкую к эллипсоиду вращения.

При $a = b = R_{сф}$ отношение объемов будет равно 1.

$$V_v/V_{сф} = R_1^3/R_{сф}^3. \quad (2.31)$$

Ввиду того, что изменение объема $R_{сф} \sim R^3$, а изменение R пропорционально времени протекания процесса t , то можно записать изменение радиуса сферы объема продуктов горения для эквивалентного объема сферической формы в моменты времени, соот-

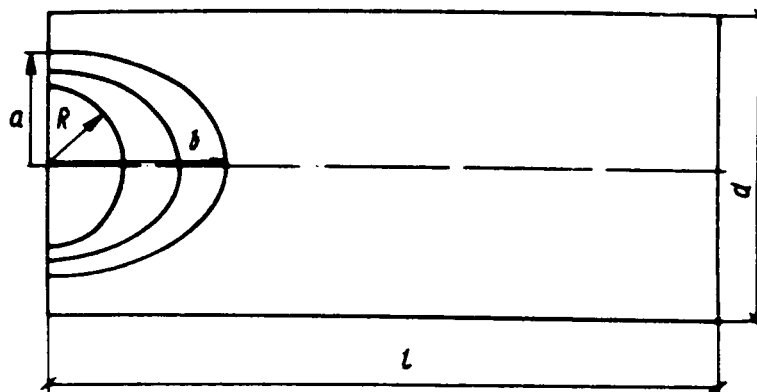


Рис. 2.6. Схема изменения поверхности фронта пламени в объеме вытянутой формы
 d — диаметр трубы; l — длина; R — радиус сферы (a, b — координаты фронта пламени)

ветствующие стробоскопическим снимкам пламени (рис. 2.7) в вытянутом сосуде в момент времени $t = t_1 = 1$; $R_{сф\ 1} = R_1$, где R_1 — радиус сферы, соответствующий первому снимку, когда пламя еще сохраняло свою сферичность. При $t = t_2 = 2$, $R_{сф} = 2R_1$, при $t = t_3 = 3$; $R_{сф} = 3R_1$ и т.д.

Давление, возникающее в камере, в момент времени t_1, t_2, t_3, t_4 можно записать как отношение объема продуктов горения в момент времени t_1, t_2, t_3, t_4 к объему, имеющему вытянутую форму:

$$\frac{\Delta P_v}{\Delta P_0} = \frac{4/3 \pi a^2 b}{2 \pi R_k^2 l_k} = \frac{0.666 a^2 b}{R_k^2 l_k} \quad (2.32)$$

но, так как диаметр камеры является постоянным, то

$$\frac{\Delta P_v}{P_0} = 0.0104 \frac{a^2 b}{l} \quad (2.33)$$

По экспериментальным данным получены значения отношения объемов и давлений в зависимости от времени, которые приведены в табл. 2.1.

На рис. 2.8 приведены зависимости $V_v/V_{сф}$ и $\Delta P/P_0$ от t , построенные по данным табл. 2.1. Для того, чтобы можно было пользоваться этими зависимостями для различных газовоздушных смесей, представим их относительно безразмерного времени t , равного соотношению t/t' , где t — текущее время, соответствующее давлению, возникающему в замкнутом сосуде, а t' — характерное время в опытном сосуде, выраженное соотношением:

$$t' = d/2 U_H \epsilon, \quad (2.34)$$

где $\epsilon = \rho_u/\rho_b$.

тогда

$$\bar{t} = \frac{t}{d/2 U_H \epsilon} = \frac{t}{t'} \quad (2.35)$$

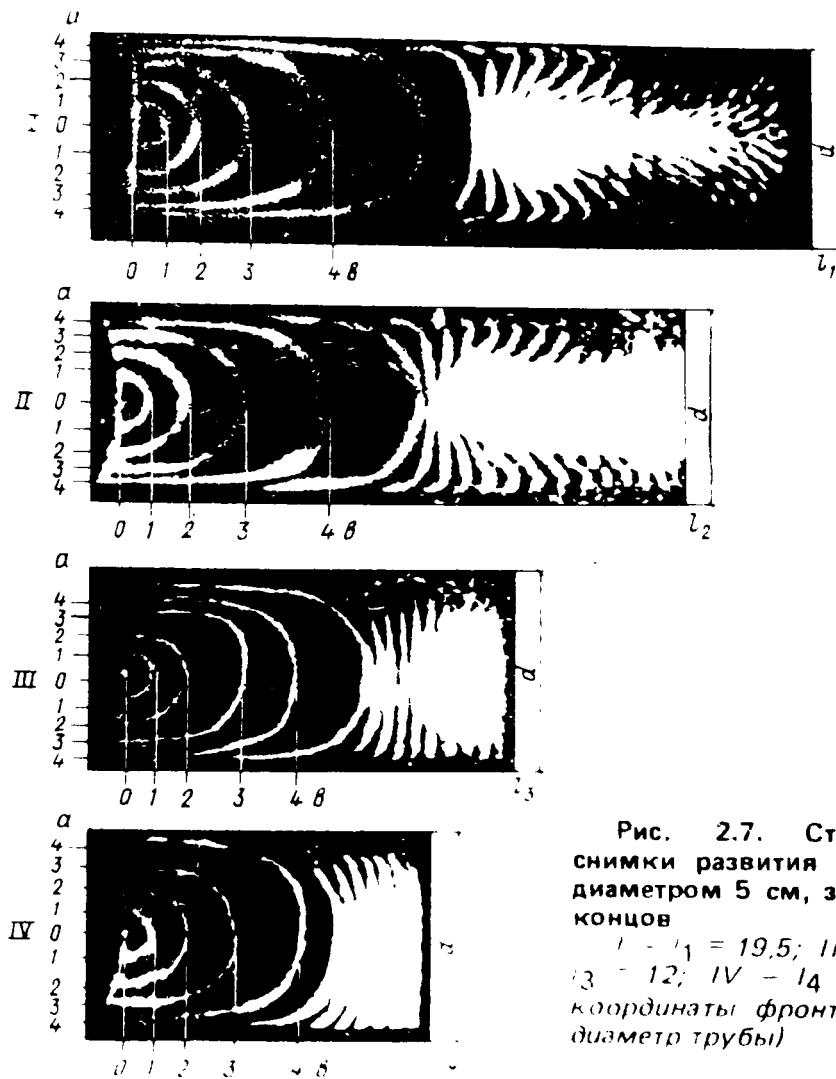
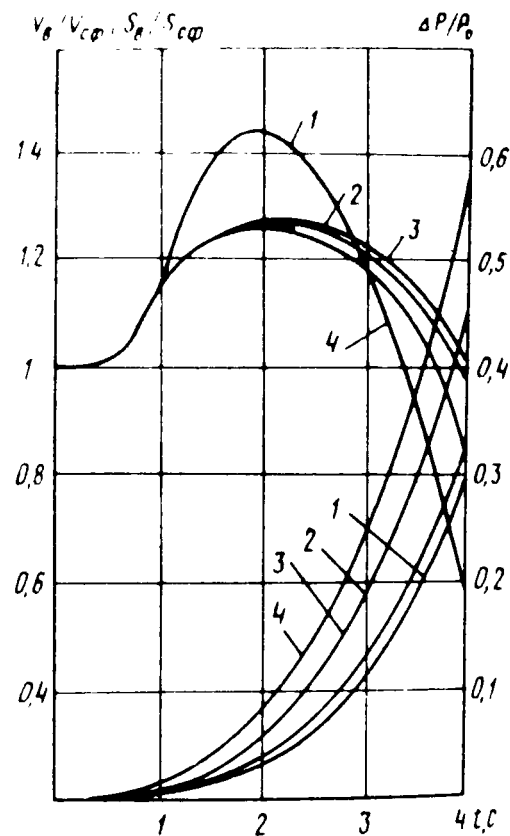


Рис. 2.7. Стробоскопические снимки развития пламени в трубе диаметром 5 см, закрытой с обоих концов

$l - l_1 = 19,5$; $II - l_2 = 17$; $III - l_3 = 12$; $IV - l_4 = 9,5$ см (a, b — координаты фронта пламени; d — диаметр трубы)

Рис. 2.8. Изменение отношений объемов продуктов сгорания в объеме вытянутой формы (V_B) к объему сферической формы ($V_{сф}$) и отношение их поверхностей $S_B/S_{сф}$ в зависимости от давления ΔP и времени t по экспериментальным данным (d — наименьшая сторона поперечного сечения объема; l — длина)

1 — $d/l_1 = 0,526$; 2 — $d/l_2 = 0,416$; 3 — $d/l_3 = 0,294$; 4 — $d/l_4 = 0,263$



Т а б л и ц а 2.1. Изменение соотношений объемов и давлений в зависимости от времени протекания процесса горения

t	a	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	R _{сф}	V _b /V _{сф}				ΔP/P ₀			
							l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
1	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	0,0067	0,0052	0,0035	0,0029
2	10	12	10	12*	12	10	1,2	1	1,2	1,2	0,064	0,041	0,033	0,028
3	13	21	21	24	22	15	1,05	1,05	1,2	1,1	0,191	0,148	0,099	0,88
4	16	32	33	38	33	20	1,02	1,05	1,21	1,05	0,44	0,352	0,271	0,2

Давление, возникающее при взрыве в замкнутом объеме, можно записать выражением

$$\frac{\Delta P_{\text{в}}}{P_0} = \frac{\Delta P_{\text{vb}}}{\epsilon} \frac{4/3 \pi (U_{\text{н}} \epsilon t)^3}{V_0} \quad (2.36)$$

Подставив в выражение (2.36) значение t из (2.35), получим:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P_{\text{cv}}}{3} \frac{4/3 \pi \left(U_{\text{н}} \epsilon \frac{\bar{t} d}{2 U_{\text{н}} \epsilon} \right)^3}{V_0} \quad (2.37)$$

где $V_0 = \frac{\pi d^2}{4} l$,

или
$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{P_{\text{cv}}}{3} \frac{2}{3} \frac{\bar{t}}{l} \frac{d}{l} \quad (2.38)$$

Учитывая, что отношение P_{cv}/ϵ является величиной, близкой к единице, выражение (2.38) можно записать в виде

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{2}{3} \frac{\bar{t}}{l} \frac{d}{l} \quad (2.39)$$

На основании экспериментов [31] получены опытные данные для труб с отношением диаметра к длине трубы d/l равным 0,526; 0,416; 0,294; 0,263, т.е. представляется возможным построить зависимость $\Delta P/P_0 = f(t)$ для различных значений d/l .

Выполненные расчеты сведены в табл. 2.2.

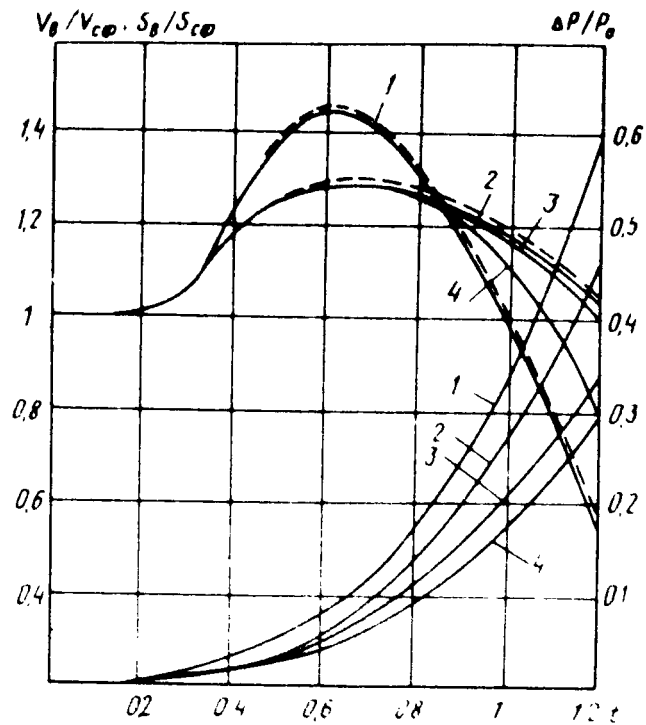
Т а б л и ц а 2.2. Изменение давления во времени в зависимости от отношения диаметра к длине трубы

t	$\Delta P/P_0$			
	$d/l_1 = 0,526$	$d/l_2 = 0,416$	$d/l_3 = 0,294$	$d/l_4 = 0,263$
0,1	0,00035	0,00027	0,000195	0,000175
0,3	0,0094	0,0075	0,0053	0,0047
0,5	0,0437	0,0346	0,0245	0,0219
0,8	0,179	0,142	0,1002	0,0896
1,0	0,35	0,277	0,196	0,175
1,2	0,605	0,478	0,338	0,302

С учетом полученных графических зависимостей $\Delta P/P_0 = f(t)$ построен соответствующий им график (рис. 2.9) $V_{\text{в}}/V_{\text{сф}} = f(\bar{t})$ с использованием зависимостей, изображенных на рис. 2.8. Полученный график дает возможность учитывать несферичность поверхности фронта пламени в объеме вытянутой формы по сравнению с эквивалентным сферическим объемом и использовать его для расчета нагрузок в помещениях, где отношение наименьшего размера помещения к его длине изменяется в пределах от 1/2 до 1/8. Таким образом, соотношение $V_{\text{в}}/V_{\text{сф}}$ является функцией времени $\bar{t}$.

Рис. 2.9. Изменение отношений объемов продуктов сгорания в объеме вытянутой формы (V_B) к объему сферической формы ($V_{сф}$) и отношение их поверхностей $S_B/S_{сф}$ в зависимости от ΔP и $\bar{t}$

1 - $d/l_1 = 0,526$; 2 - $d/l_2 = 0,416$; 3 - $d/l_3 = 0,294$; 4 - $d/l_4 = 0,263$



$$\frac{V_B}{V_{сф}} = f_1(\bar{t}), \quad (2.40)$$

$$V_B = V_{сф} f_1(\bar{t}), \quad (2.41)$$

или

$$V_{сф} = V_B / f(\bar{t}). \quad (2.42)$$

Выражение (2.41) можно подставить в уравнение (2.9) и (2.8) и, выразив поверхность фронта пламени через V_B , $S_f = \frac{3}{R} V_B$, получим

$$\frac{dP}{dt} = \alpha P \left[\left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) U V_{сф} f_1(\bar{t}) \frac{3}{R} - \frac{1}{\rho_u} \frac{dm_v}{dt} \right] \left(\frac{V_{сф} f_1(\bar{t})}{\gamma_b} + \frac{1 - V_{сф} f_1(\bar{t})}{\gamma_u} \right). \quad (2.43)$$

$$\frac{dR}{dt} = \alpha U \frac{\rho_u}{\rho_b} - \frac{R}{3} \frac{f_1(\bar{t})}{\gamma_b} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}. \quad (2.44)$$

Таким образом, используя экспериментальные данные, можно при выполнении расчетов учесть несферичность фронта пламени при определении величины и характера взрывных нагрузок.

2.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ХАРАКТЕРА НАГРУЗОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНЕРЦИОННЫХ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Допустим, что отверстие в наружном ограждении с взрывоопасным производством закрыто горизонтально лежащей плитой массой m . В тот момент, когда давление в помещении достигает величины $P_u = mg/S + P_0$, плита придет в движение.

Уравнение движения имеет вид

$$m\ddot{x} = [\bar{P}(t) - P_0] S - mg, \quad (2.45)$$

где x — высота поднятия плиты; S — площадь плиты; g — ускорение свободного падения; $\bar{P}(t)$ — усредненное давление на плиту:

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{S} \iint_S P(x, y, t) dx dy. \quad (2.46)$$

Уравнение Бернулли для газа, вытекающего из отверстия, имеет вид:

$$-dL = dE + \frac{dP}{\rho}. \quad (2.47)$$

Работа, производимая 1 кг газа при адиабатическом расширении, равна:

$$-L = E_k + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right], \quad (2.48)$$

где E_k — кинетическая энергия 1 кг вытекающего газа.

Тогда уравнение движения плиты примет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(mgx + \frac{m\dot{x}^2}{2} \right) + E_k G = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} \left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] G, \quad (2.49)$$

где G — секундный расход газа.

Оценим, какая часть энергии газа идет на движение плиты:

$$\frac{d}{dt} \left(mgx + \frac{m\dot{x}^2}{2} \right) = gm\dot{x} + m\ddot{x}\dot{x} = [\bar{P}(t) - P_0] \dot{x} S. \quad (2.50)$$

Так как P отличается от P_0 на несколько процентов, то

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] &= \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} \left[1 - \left(1 - \frac{P-P_0}{P} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \\ &= \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{P-P_0}{P} = \frac{P-P_0}{\rho}. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Тогда отношение той части энергии, которая идет на движение плиты к полной энергии расширяющегося газа можно записать в виде:

$$\frac{E_{пл}}{E_{полн}} = \frac{[\bar{P}(t) - P_0] \cdot \dot{x} S_{отв} \rho}{(P - P_0) G} \leq \frac{\dot{x}}{\omega}, \quad (2.52)$$

где ω — средняя скорость вытекающего газа.

Как показывают экспериментальные данные, скорость движения ЛСК значительно меньше скорости истечения газов. Следовательно, на движение ЛСК идет небольшая часть кинетической энергии. Поэтому для расчета потока газа из отверстия, закрытого инерционной легкобрасываемой конструкцией можно воспользоваться формулами (2.25) — (2.27), только в этом случае площадь отверстия в наружном ограждении помещения будет зависеть от типа, места расположения, размеров и массы ЛСК.

Для того, чтобы установить величину и характер изменения давления, возникающие при взрывах в помещениях, закрытых инерционными ЛСК, необходимо решать уравнения (2.25) — (2.27) совместно с уравнениями движения ЛСК. Для различных типов инерционных ЛСК эти уравнения будут иметь соответствующий им вид.

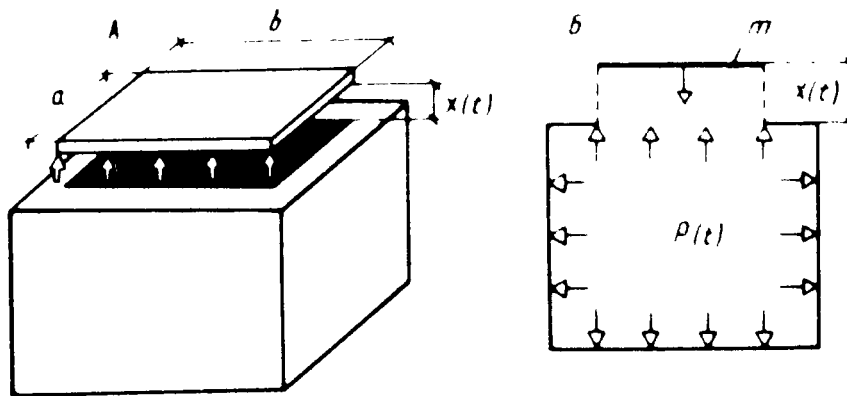


Рис. 2.10. Схема для определения нагрузок на ограждающие конструкции при расположении легкобрасываемого смещаемого элемента в покрытии

А — общий вид; Б — разрез (a, b — размеры плиты; $x(t)$ — перемещение; m — масса плиты)

Для ЛСК, которые представляют собой свободно опертые плиты, располагаемые в горизонтальном наружном ограждении помещения, уравнение движения плиты имеет вид (рис. 2.10):

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = [\bar{P}(t) - P_0] ab - mg. \quad (2.53)$$

Для смещаемых легкобрасываемых конструкций, расположенных в вертикальном ограждении помещения, уравнение движения плиты (рис. 2.11)

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = [\bar{P}(t) - P_0] ab. \quad (2.54)$$

Для поворотных легкобрасываемых конструкций с горизонтальным верхним шарниром уравнение движения имеет вид (рис. 2.12, а):

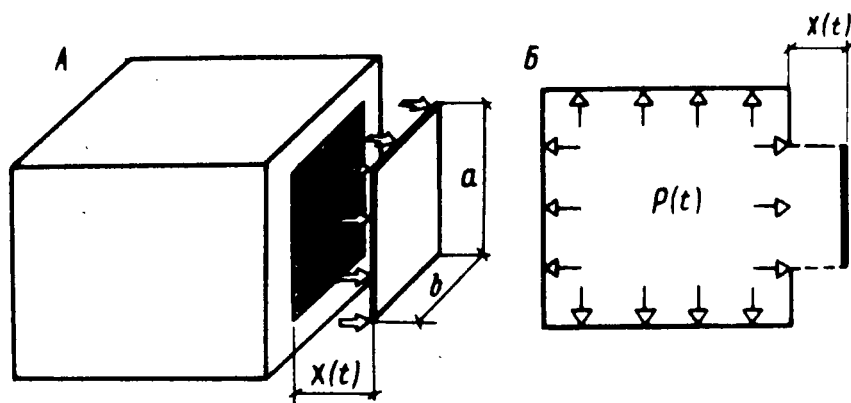


Рис. 2.11. Схема для определения нагрузок на ограждающие конструкции при расположении легкобрасываемого смещаемого элемента в вертикальном стеновом ограждении

А — общий вид; Б — разрез (a, b — размеры элемента; $x(t)$ — перемещение)

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -mg \frac{l}{2} \sin \varphi + [\bar{P}(t) - P_0] \frac{l^2 b}{2}. \quad (2.55)$$

Для поворотных легкобрасываемых конструкций с горизонтальным нижним шарниром уравнение движения запишется в виде, рис. 2.12, б:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = mg \frac{l}{2} \sin \varphi + [\bar{P}(t) - P_0] \frac{l^2 b}{2}. \quad (2.56)$$

Для поворотных ЛСК с боковым вертикальным шарниром уравнение движения имеет вид, рис. 2.12, в:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = [\bar{P}(t) - P_0] \frac{l^2 b}{2}, \quad (2.57)$$

где J — момент инерции массы плиты относительно оси вращения, l — высота поворотного элемента, b — ширина элемента, m — масса элемента, φ — угол раскрытия поворотных ЛСК.

Для решения уравнений (2.53) — (2.57) необходимо знать давление на вскрываемые элементы $P(t)$, создаваемое вытекающими газами на ЛСК. Эта величина в момент вскрытия равна давлению на ограждающие конструкции помещения и падает при дальнейшем вскрытии ЛСК.

В уравнениях (2.53) — (2.57) единственным параметром, который зависит от положения ЛСК, является $S_{\text{отв}}$. При выполнении числовых расчетов могут быть сделаны следующие допущения. Коэффициент истечения принимается постоянным. Площадь отверстия может быть задана следующим образом.

Для смещаемых ЛСК

$$S_{\text{отв}} = 2(a + b)x, \text{ если } 2(a + b)x < ab;$$

$$S_{\text{отв}} = ab, \text{ если } 2(a + b)x > ab,$$

где a и b — длина и ширина ЛСК, x — отклонение ЛСК от первоначального положения.

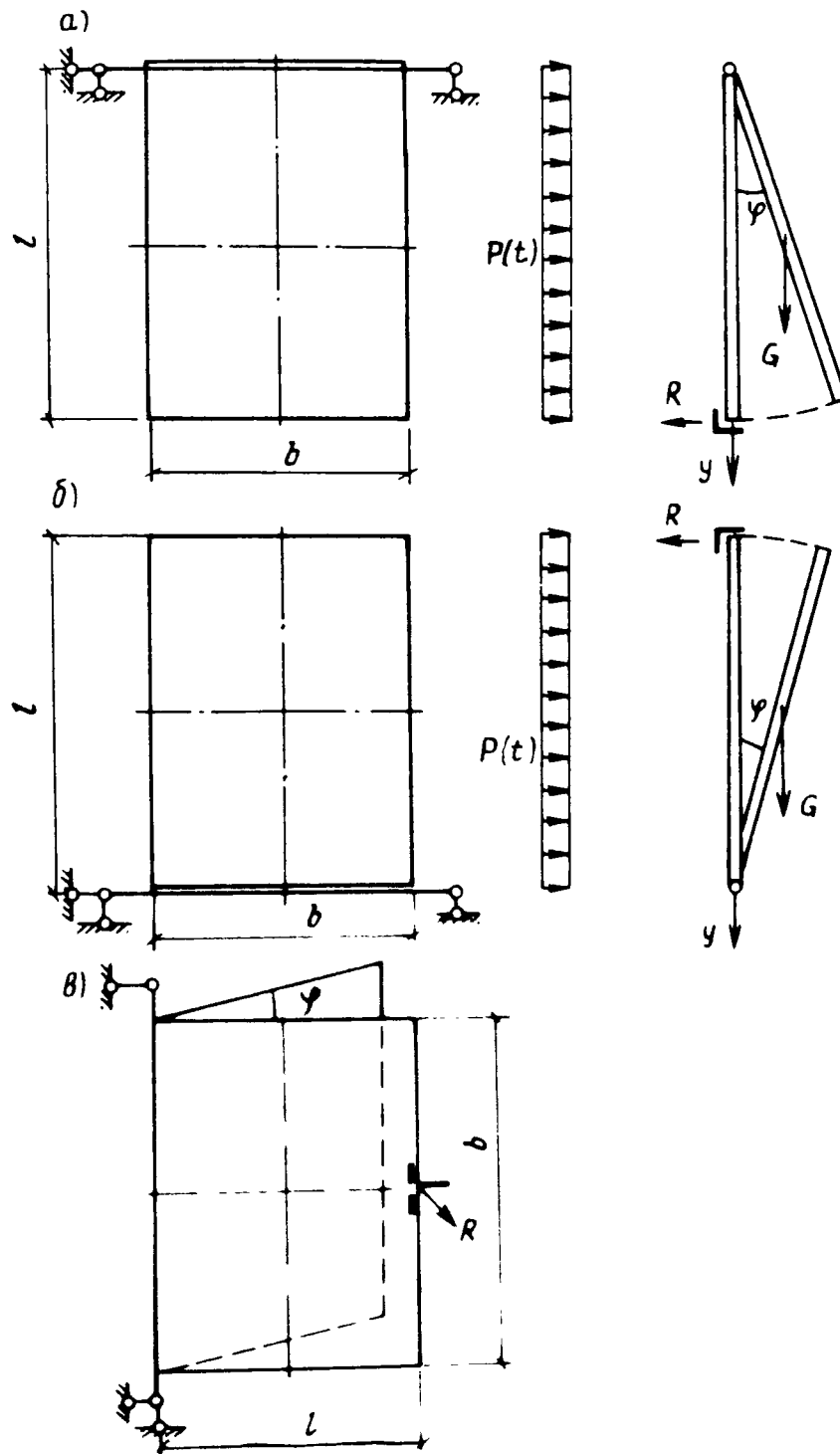


Рис. 2.12. Расчетные схемы для определения нагрузок на ограждающие конструкции при использовании поворотных легкобрасываемых элементов в вертикальном ограждении

а — с горизонтальным верхним шарниром; б — с горизонтальным нижним шарниром; в — с вертикальным шарниром (l, b — размеры поворотного элемента)

Для поворотных ЛСК

$$S_{\text{отв}} = l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2}, \text{ если } l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2} < bl$$

$$S_{\text{отв}} = bl, \text{ если } l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2} > bl,$$

где l — длина ЛСК, b — ширина, φ — угол раскрытия.

Выполненные эксперименты для оценки влияния инерционных ЛСК на характер и величину изменения давления на примере смещаемых ЛСК, располагаемых в горизонтальном и вертикальном ограждении, и поворотных ЛСК в вертикальном ограждении опытных объемов (1; 10; 14 м³), показали, что закон движения ЛСК важно знать только на начальном участке движения ЛСК. Так, смещаемые ЛСК оказывают влияние на изменение давления на ограждающие конструкции до момента, когда площадь вскрываемой ЛСК достигает площади отверстия в ограждении, т.е. $S_{\text{отв}} \geq ab$, когда $2(a + b) \geq ab$, а для поворотных $S_{\text{отв}} \geq bl$, когда $l^2 \sin \varphi + 2bl \sin \frac{\varphi}{2} \geq bl$. В дальнейшем движение ЛСК не оказывает заметного влияния на изменение давления в объеме.

При решении практических задач по определению величины и характера возникающего давления при взрывном горении ГВС внутри помещений с отверстиями, которые закрыты инерционными ЛСК (например, для дозвукового режима истечения газа из объема без учета одновременного истечения горючей смеси и продуктов сгорания), уравнения (2.8), (2.9) и (2.13) следует решать совместно с одним из уравнений, характеризующим закон движения ЛСК (2.53)–(2.57). При определении возникающих нагрузок с учетом одновременного истечения горючей смеси и продуктов сгорания через вскрывающееся отверстие следует уравнения (2.25), (2.26) и (2.27) решать с соответствующими уравнениями движения ЛСК.

На рис. 2.13–2.22 приведены зависимости $P = f(t)$, полученные при решении уравнений (2.25)–(2.27) с одним из уравнений движения ЛСК (2.53)–(2.57) при $U_n = 0,45$ м/с; $\rho_u/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$.

При определении возникающих нагрузок в рассматриваемых моделях как при применении безинерционных, так и инерционных ЛСК, предполагается, что вся площадь ЛСК при взрыве внутри помещения вскрывается одновременно.

Проведенные эксперименты по определению нагрузок, возникающих при вскрытии отверстия, закрытого элементами остекления, показывают, что имеется значительный разброс возникающих нагрузок, который зависит от ряда факторов. Например, использование в качестве ЛСК остекления, состоящего из определенного числа одинаковых по площади, толщине и схеме закрепления стекла, приводит к неодновременности их вскрытия. Это говорит о том, что при определении взрывных нагрузок необходимо вводить вероятностные показатели неодновременности вскрытия отдельных ЛСК.

К настоящему моменту имеются данные, которые позволяют при применении остекления в качестве легкобрасываемых элементов устанавливать относительную ожидаемую площадь вскрывающегося остекления [41] и на основании приведенного выше метода определить возникающие нагрузки на внутреннюю поверхность ограждающих помещений конструкций с учетом формы помещения (несферичности).

В качестве примера можно определить давление при взрыве пропановоздушной смеси $U_n = 0,4$ м/с, $\alpha = 2$ в помещении аналитической объемом 187 м³. В помещении имеется остекленный оконный проем площадью 10,8 м² (1,8x1,2x5). Остекление двойное, размеры пластин стекла 1,8x1,2 м, толщина стекла 4 мм.

Рис. 2.13. Давление на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при вскрытии легкобрасываемого элемента в покрытии площадью

1 — $0,07$; 2 — $0,05$; 3 — $0,03 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20; 50; 120 \text{ кг/м}^2$ ($U_H = 0,45 \text{ м/с}$; $\rho_U/\rho_B = 7,5$; $\alpha = 2$)

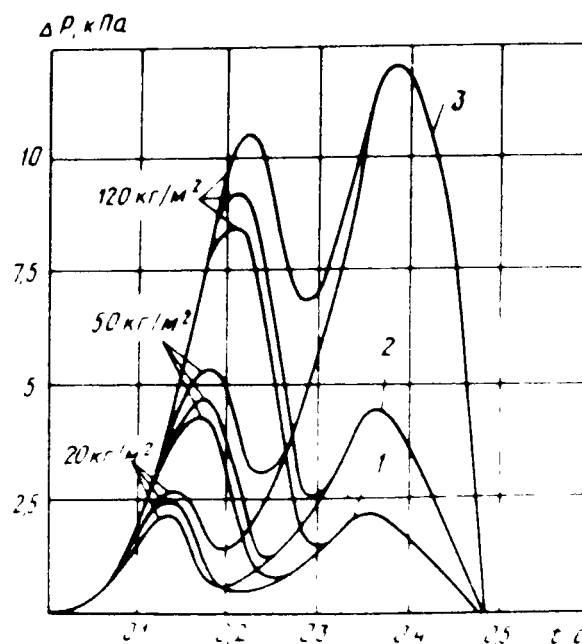
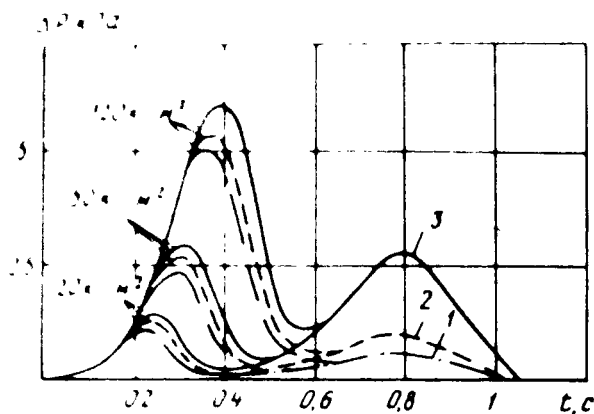


Рис. 2.14. Давление на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м^3 при вскрытии легкобрасываемых элементов в покрытии площадью

1 — $0,07$; 2 — $0,05$; 3 — $0,03 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20; 50; 120 \text{ кг/м}^2$ ($U_H = 0,45 \text{ м/с}$; $\rho_U/\rho_B = 7,5$; $\alpha = 2$)



ΔP, кПа

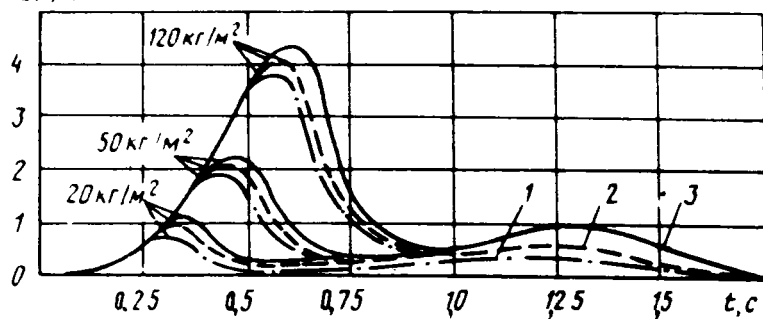


Рис. 2.15. Давление на ограждающие конструкции помещения объемом $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ при вскрытии легкобрасываемых элементов в покрытии площадью

1 — $0,07$; 2 — $0,05$; 3 — $0,03 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20; 50; 120 \text{ кг/м}^2$ ($U_H = 0,45 \text{ м/с}$; $\rho_U/\rho_B = 7,5$; $\alpha = 2$)

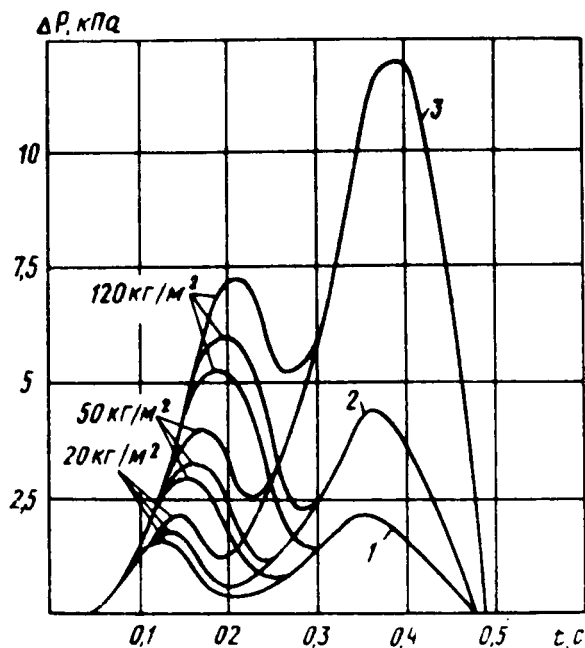


Рис. 2.16. Давление на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при вскрытии легкобрасываемых элементов в вертикальном ограждении площадью

1 — $0,07$; 2 — $0,05$; 3 — $0,03 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20; 50; 120 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_U/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

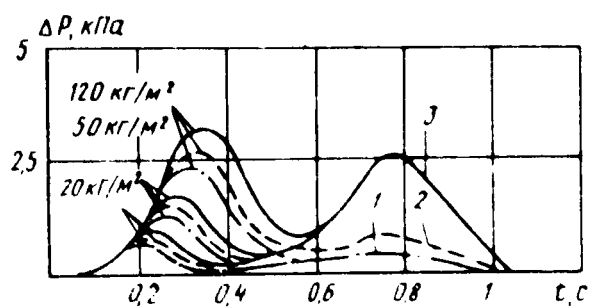


Рис. 2.17. Давление на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м^3 при вскрытии легкобрасываемых элементов в вертикальном ограждении площадью

1 — $0,07$; 2 — $0,05$; 3 — $0,03 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20; 50; 120 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_U/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

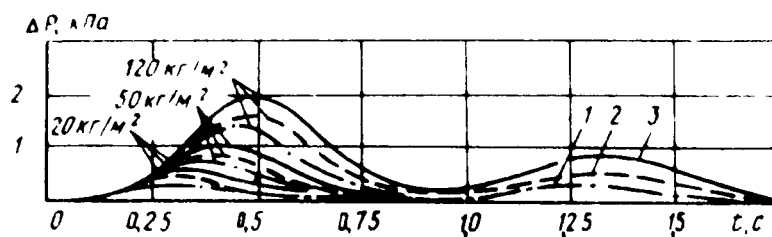


Рис. 2.18. Давление на ограждающие конструкции помещения объемом $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ при вскрытии легкобрасываемых элементов в вертикальном ограждении площадью

1 — $0,07$; 2 — $0,05$; 3 — $0,03 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20; 50; 120 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_U/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

Рис. 2.19. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при вскрытии поворотных элементов с горизонтальным верхним шарниром площадью

1 — $0,03$; 2 — $0,05$; 3 — $0,07 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью $m = 20 \text{ кг}/\text{м}^2$ (ΔR_p — давление, разрушающее запорное устройство, равное $0,5 \text{ кПа}$ ($U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_U/\rho_B = 7,5$; $\alpha = 2$)

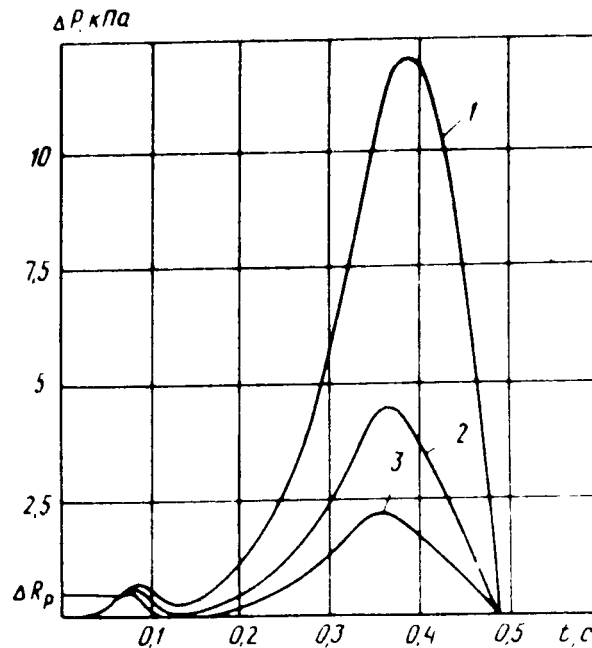


Рис. 2.20. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом 1000 м^3 при вскрытии поворотных элементов с горизонтальным нижним шарниром площадью

1 — $0,03$; 2 — $0,05$; 3 — $0,07 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20$; 50 ; $120 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($\Delta R_p = 0,5 \text{ кПа}$; $U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_U/\rho_B = 7,5$; $\alpha = 2$)

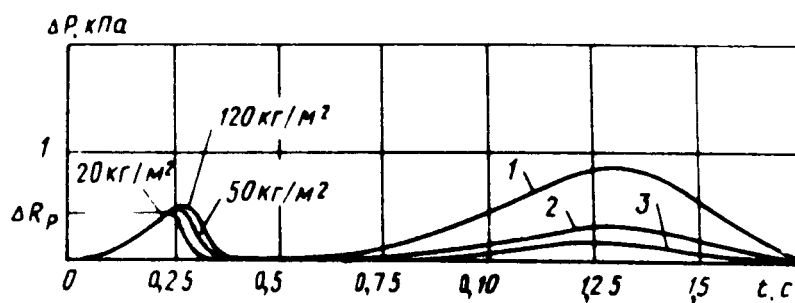
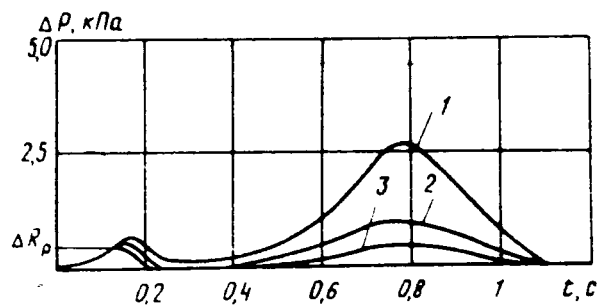


Рис. 2.21. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ при вскрытии поворотных элементов с горизонтальным нижним шарниром площадью

1 — $0,03$; 2 — $0,05$; 3 — $0,07 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью: $m = 20$; 50 ; $120 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($\Delta R_p = 0,5 \text{ кПа}$; $U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_U/\rho_B = 7,5$; $\alpha = 2$)

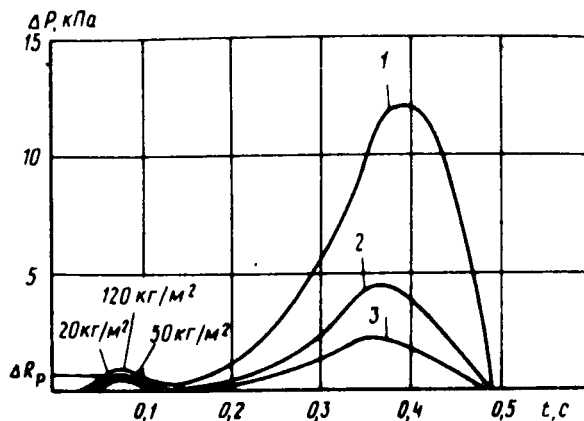


Рис. 22. Давление взрыва на ограждающие конструкции помещения объемом 100 м^3 при вскрытии поворотных элементов с вертикальным шарниром площадью

1 – 3; 2 – 5; 3 – $7 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и поверхностной плотностью $m = 20; 50; 120 \text{ кг}/\text{м}^2$ ($\Delta R_p = 0,5 \text{ кПа}$; $U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_u/\rho_b = 7,5$; $\alpha = 2$)

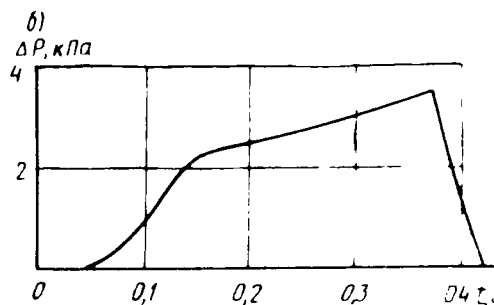
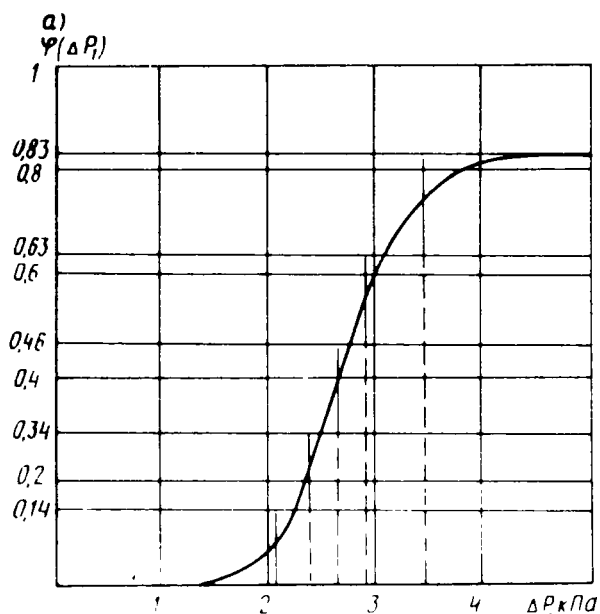


Рис. 2.23. Изменение давления в зависимости от площади вскрываемого остекления при взрыве пропановоздушной смеси в объеме 187 м^3

а – относительная площадь вскрываемого остекления $\psi(\Delta P)$ в зависимости от величины взрывной нагрузки; б – зависимость давление – время по уравнениям (2.25) – (2.27); площадь остекления $10,8 \text{ м}^2$ (пять стекол с размером $1800 \times 1200 \times 4 \text{ мм}$; $U_H = 0,45 \text{ м}/\text{с}$; $\rho_u/\rho_b = 6,5$; $\alpha = 2$)

Для принятого стекла относительная ожидаемая площадь вскрываемого остекления $\psi(\Delta P)$ в зависимости от давления приведена в табл. 2.3 (рис. 2.23).

Т а б л и ц а 2.3. Изменение площади вскрываемого остекления в зависимости от давления, возникающего в результате взрыва

$\psi(\Delta P)$	$\Delta P, \text{ кПа}$	$\psi(\Delta P)$	$\Delta P, \text{ кПа}$	$\psi(\Delta P)$	$\Delta P, \text{ кПа}$
0	1,4	0,14	2,25	0,75	3,11
0,005	1,65	0,29	2,5	0,76	3,5
0,01	1,75	0,45	2,75	0,79	3,75
0,02	1,9	0,6	3	0,82	4
0,06	2	0,71	3,25	0,825	4,25
				0,83	4,4

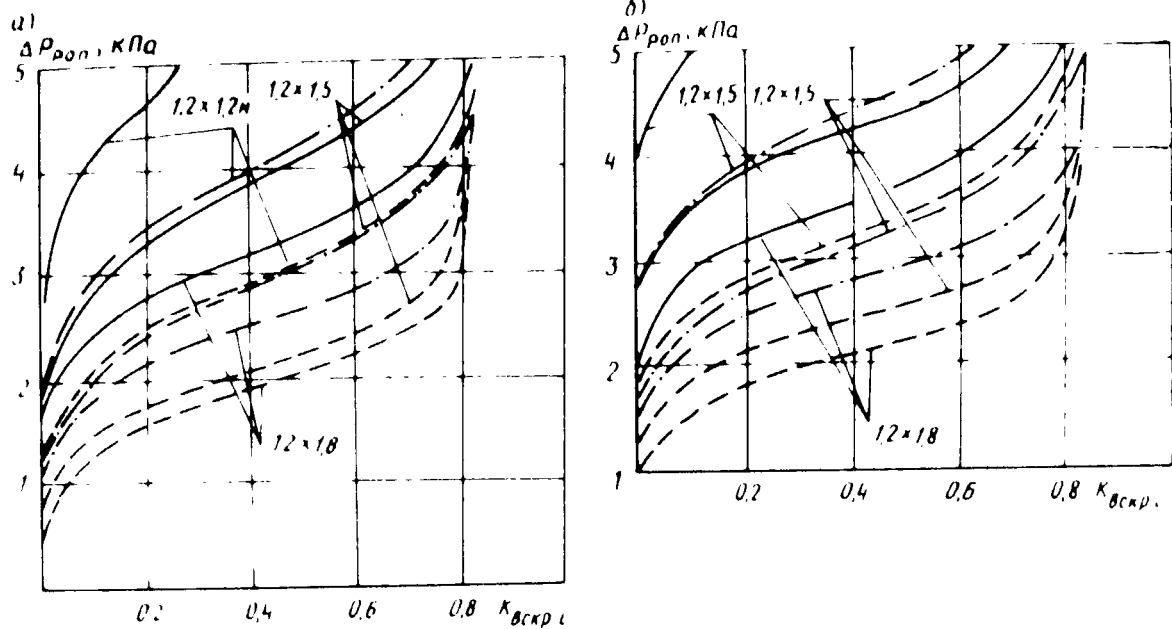


Рис. 2.24. Значения коэффициента $K_{вскр}$ при использовании в качестве ЛСК остекления в зависимости от допускаемого избыточного давления $\Delta P_{доп}$, кПа, площади пластин стекла и их толщины
 а — одинарное остекление; б — двойное остекление (— — 5 мм; - - - - 4 мм; - · - · - 3 мм)

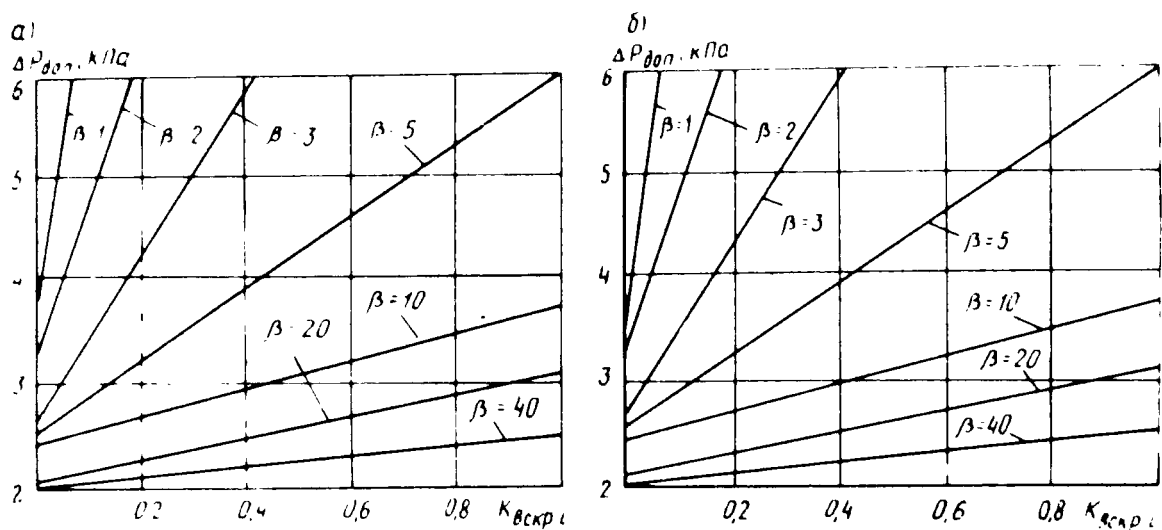


Рис. 2.25. Значение коэффициента $K_{вскр}$ для поворачивающихся конструкций при $\Delta P_{вскр} = 2$ кПа в зависимости от допускаемой величины избыточного давления $\Delta P_{доп}$, кПа, и величины $\beta = \sqrt[3]{V_n/\alpha U_n}$
 а — двухстворчатые ворота со створками размером 3,6x1,8 м и поверхностной плотностью $m = 60$ кг/м²; б — поворотные переплеты размером 1,8x1,2 м и поверхностной плотностью $m = 45$ кг/м²

На практике последовательность вскрытия элементов ЛСК и отказов отдельных из них может подчиняться определенным законам, которые могут быть введены в решаемую систему уравнений. Как правило, характер последовательности вскрытия ЛСК определяется реализацией последовательности распределения прочности элементов ЛСК или их креплений. По результатам иссле-

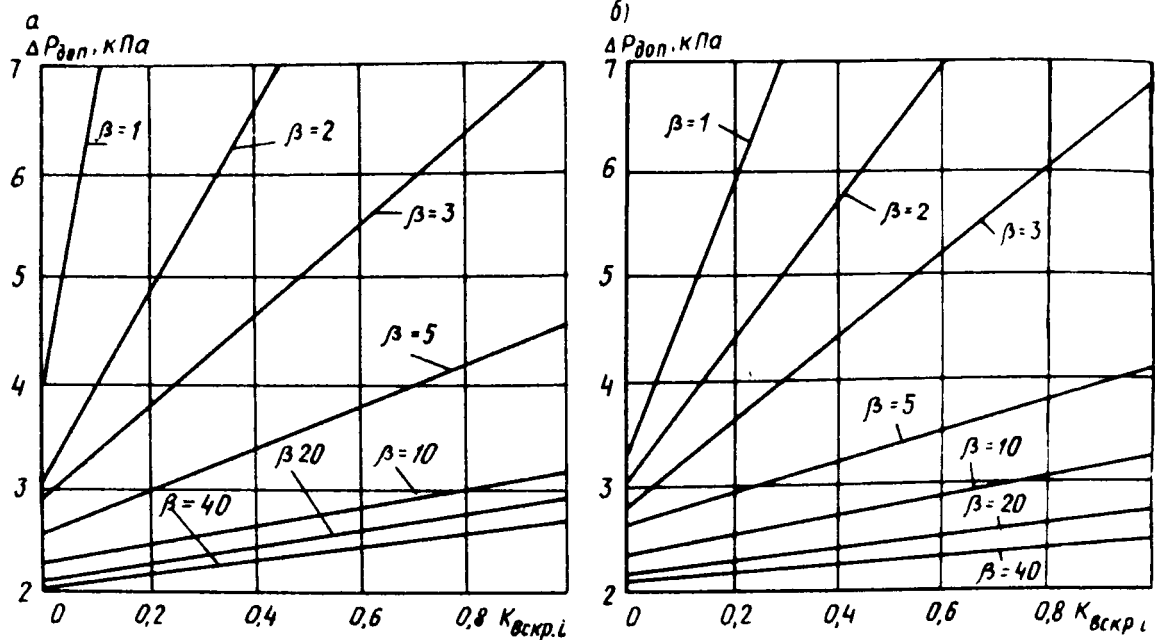


Рис. 2.26. Значения коэффициента $K_{вскр.i}$ для легкобрасываемых стеновых панелей при $\Delta P_{вскр} = 2$ кПа в зависимости от допускаемого избыточного давления $\Delta P_{доп}$, кПа, и величины $\beta = \sqrt[3]{V_n/\alpha U_H}$
 а — асбестоцементная панель размером 6х6 м и поверхностной плотностью $m = 100$ кг/м²; б — панель типа "сэндвич" размером 1,8х0,9 м и поверхностной плотностью $m = 60$ кг/м²

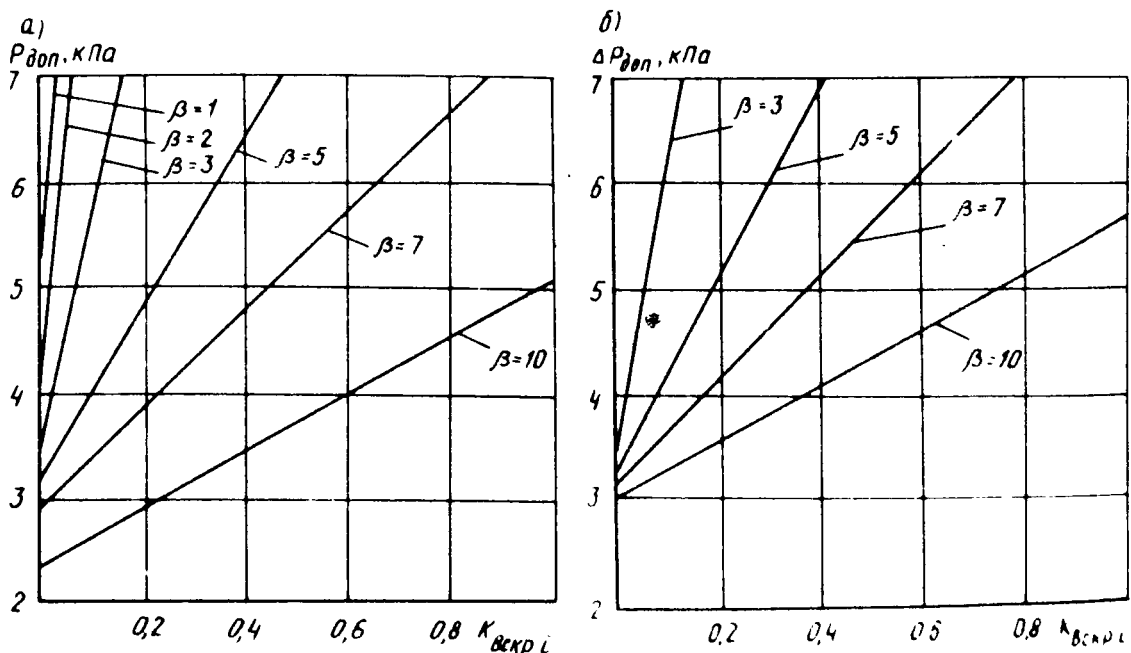


Рис. 2.27. Значения коэффициента $K_{вскр.i}$ для элементов легкобрасываемого покрытия в зависимости от допускаемого избыточного давления $\Delta P_{доп}$, кПа, и величины $\beta = \sqrt[3]{V_n/\alpha U_H}$
 а — панель размером 6х7,5 м и поверхностной плотностью $m = 100$ кг/м² при $\Delta P_{вскр} = 1,1$ кПа; б — панель размером 6х7,5 м и поверхностной плотностью $m = 100$ кг/м² при $\Delta P_{вскр} = 2$ кПа

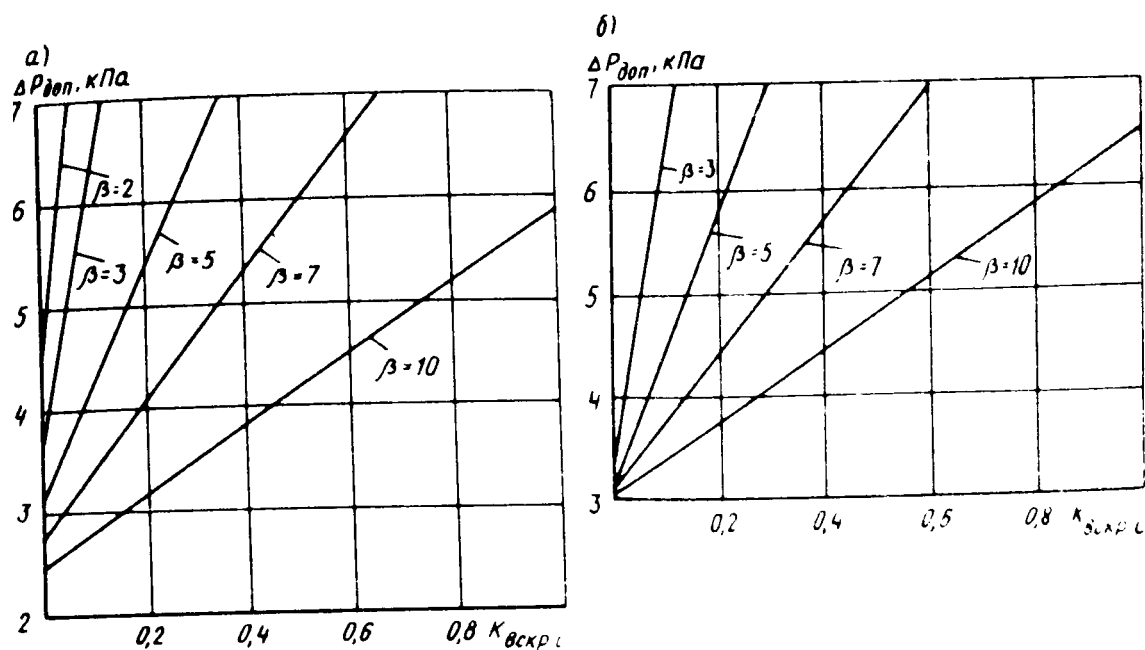


Рис. 2.28. Значения коэффициента $K_{вскр}$ для элементов легкобрасываемого покрытия в зависимости от допускаемой величины избыточного давления $\Delta P_{доп}$ и величины $\beta = \sqrt[3]{V_p/aU_H}$

а — панель размером 6x4,5 м и поверхностной плотностью $m = 100 \text{ кг/м}^2$ при $\Delta P_{вскр} = 2 \text{ кПа}$; б — панель размером 6x4,5 м и поверхностной плотностью $m = 100 \text{ кг/м}^2$ при $\Delta P_{вскр} = 1,1 \text{ кПа}$

дований, приведенных в работе [41], построены графические зависимости, характеризующие относительную площадь вскрывающихся проемов при использовании различных типов ЛСК (рис. 2.24—2.28). Тем не менее закономерность относительной ожидаемой площади вскрытия ЛСК целесообразно использовать по полученным экспериментальным результатам.

2.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Требуемая площадь ЛСК должна устанавливаться путем расчета, исходя из допускаемой в помещении величины максимального избыточного давления $\Delta P_{доп}$, возникающего в аварийных ситуациях при взрывном горении ГВС. Если возникающее в помещении наибольшее избыточное давление $\Delta P_{макс}$ не может быть снижено до величины $\Delta P_{доп}$, то в результате расчета при заданных видах и площади ЛСК устанавливается величина $\Delta P_{макс}$. При этом во всех случаях должна вычисляться скорость увеличения объема газа при его горении.

При проведении указанных расчетов должны учитываться следующие факторы: объем помещения и степень загазованности его горючей смесью; вид горючей смеси и концентрация горючего в ней; степень интенсификации процесса взрывного горения в помещении; конструктивные особенности ЛСК (размеры, масса, вид, способ крепления, закономерность вскрытия).

Скорость увеличения объема газа из-за его сгорания $aU_H S_{f_{макс}} \times (\rho_u/\rho_b - 1)$ не должна превышать объемной скорости истечения

газа при заданном $\Delta P_{\text{доп}}$, которая находится делением правой части уравнения (2.13) на ρ_u . Скорость выгорания ГВС максимальна тогда, когда площадь поверхности фронта пламени принимает максимальное значение $S_{f \text{ макс}}$.

Для дозвукового потока, принимая внешнее давление равным атмосферному, можно записать

$$a U_H S_{f \text{ макс}} \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) \sim \mu S_{\text{тр}} C_u \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_0}{P_{\text{доп}}} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{\text{доп}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{0.5} \quad (2.58)$$

следовательно

$$S_{\text{тр}} \geq a U_H \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} - 1 \right) S_{f \text{ макс}} \frac{1}{\mu C_u} \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{P_0}{P_{\text{доп}}} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_{\text{доп}}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\}^{-0.5} \quad (2.59)$$

Такой подход к определению необходимой площади отверстий в наружном ограждении помещения для случаев, когда ЛСК разрушается мгновенно или отверстие открыто до момента зажигания ГВС, возможен при учете объема смеси, которая вытесняется из объема помещения при $\Delta P_{\text{доп}}$. Так как в данном случае не учитывается перемешивание горючего газа с воздухом, выражение (2.59) дает несколько завышенное значение требуемой площади отверстия. Уравнение (2.59) для определения требуемой площади $S_{\text{тр}}^{V_n}$ ЛСК одного типа при полном заполнении объема помещения горючей смесью и заданной величине допускаемого избыточного давления в помещении можно представить в виде

$$S_{\text{тр}}^{V_n} = V_n^{2/3} U_H k \alpha / K_{\text{вскр}, i}, \quad (2.60)$$

где $S_{\text{тр}}^{V_n}$ — требуемая площадь ЛСК, м²; V_n — объем помещения, м³, определяемый в пределах внутренних поверхностей ограждающих конструкций за вычетом объема, занимаемого технологическим оборудованием, строительными конструкциями и т.п.; U_H — нормальная скорость горения взрывоопасной смеси, м/с, принимается по табл. 2.4 или по официальным справочным данным или данным министерств и ведомств; k — показатель давления взрыва, численное значение которого принимается в зависимости от $\Delta P_{\text{доп}}$ в помещении (табл. 2.5).

Т а б л и ц а 2.5. Значения показателя давления

$\Delta P_{\text{доп}}$, кПа	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	0,52	0,38	0,28	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09

α — коэффициент интенсификации горения, численное значение которого принимается по табл. 1.9; $K_{\text{вскр}, i}$ — коэффициент, учитывающий относительную площадь вскрывающихся проемов при использовании ЛСК одного типа, принимается по рис. 2.24–2.28.

Т а б л и ц а 2.4. Параметры горючих смесей

Наименование вещества	Стехиометрическая концентрация взрывоопасной смеси C , г/м ³	Максимальная степень расширения продуктов горения ρ_u/ρ_b	Нормальная скорость горения взрывоопасной смеси U_n , м/с
Акрилеин	140,8	8,1	0,66
Акрилонитрил	1250	8,2	0,46
Аммиак	155,03	7,35	0,1
Амилен	93,1	8	0,42
Ацетальдегид	151,6	8	0,41
Ацетилен	83,96	8,86	1,57
Ацетон	120,59	9,09	0,43
Бензол	88,53	8,17	0,47
I-Бутан	75,67	7,84	0,379
II-Бутан	90,1	8	0,37
Бутилен	94,2	8	0,43
Винилацетилен	93,7	8,7	0,81
Водород	24,81	6,86	2,67
Гексадекан	85,7	7,5	0,4
Н-Гексан	77,57	7,88	0,385
I-Гексан	87,1	7,6	0,45
I-Гексан	93,2	8,1	0,52
Гептан	78,11	7,84	0,424
I-Гептин	97,2	7,5	0,41
Дивинил	91,61	7,85	0,34
Диизопропил	91,4	8	0,35
Диметиловый эфир	134,1	7,7	0,49
Диэтиловый эфир	104,3	8,31	0,498
Изоамилен	84,7	8	0,44
Изобутан	90,1	8	0,34
Изобутилен	94,2	8	0,37
Изооктан	78,52	7,41	0,346
Изопентан	79,2	7,8	0,4
Изопрен	88,3	8,1	0,5
Изопропиламин	100,7	7,4	0,29
Изопропилбензол	51,6	7,6	0,38
Изопропилмеркаптан	114,3	7,8	0,33
Изопропиловый спирт	140	8	0,41
Изопропилхлорид	147,2	7,6	0,27
Ксилол	92,1	7,4	0,34
Метан	63,04	6,71	0,33
Метиловый спирт	163,72	6,87	0,57
Метилциклогексан	85,3	7,8	0,4
Метилэтилкетон	117,8	7,7	0,43
Неогексан	83	7,7	0,4
Неопентан	82,2	7,7	0,35
Окись пропилена	128,7	8,1	0,67
Окись углерода	344,68	6,75	0,45
Окись этилена	142,05	8,73	0,895
Пропан	73,94	7,71	0,455
Пропадиен	91,6	7,6	0,38
Пропилен	94,3	8,5	0,68
Пропианальдегид	128,8	8	0,5
Сероуглерод	207,28	7,18	0,59
Толуол	93,6	8	0,38
Фуран	134,8	8,2	0,62
Хлористый Н-Пропил	147,8	7,6	0,28
Циклобутан	84,5	8	0,61
Циклогексан	141,2	7,5	0,43
Циклогексен	88,1	7,8	0,43
Циклопентан	84,8	7,8	0,45

Наименование вещества	Стехиометрическая концентрация взрывоопасной смеси C , г/м ³	Максимальная степень расширения продуктов горения ρ_u/ρ_b	Нормальная скорость горения взрывоопасной смеси U_n , м/с
Циклопентадиен	92,1	7,7	0,42
Циклопропан	83,4	8,1	0,54
Этан	77,3	7,7	0,45
Этилацетат	152,5	7,3	0,37
Этилбензол	94,3	7,4	0,35
Этилен	76,37	8,11	0,74
Этиловый спирт	125,41	6,91	0,556

П р и м е ч а н и е. Характеристики веществ, не приведенных в таблице, следует принимать по официальным справочникам или данным министерств и ведомств.

При необходимости устройства в наружном ограждении помещения нескольких типов ЛСК требуемая их площадь при полном заполнении объема помещения взрывоопасной смесью устанавливается по формуле

$$S_{\text{тр}}^n = V_n^{2/3} U_n k \alpha / \sum_{i=1}^n m_i K_{\text{вскр } i}, \quad (2.61)$$

где n — количество элементов ЛСК, устраиваемых в наружном ограждении; m — доля площади проемов, перекрываемых ЛСК i -го типа.

Доля площади проемов, перекрываемых ЛСК i -го типа определяется выражением [41]

$$m_i = S_{\text{тр } i} / S_{\text{тр}}, \quad (2.62)$$

где $S_{\text{тр } i}$ — требуемая площадь ЛСК i -го типа.

При устройстве в наружных ограждениях помещения ЛСК одного типа ($i = 1$) $m_i = m_1 = 1$. Если в наружных ограждениях помещения устанавливается n -типов ЛСК, то $\sum_{i=1}^n m_i = 1$.

После задания значений m_i и определения по формуле (2.62) величины $S_{\text{тр}}$ требуемая площадь ЛСК i -го типа принимается равной

$$S_{\text{тр } i} = m_i S_{\text{тр}}. \quad (2.63)$$

При заданной площади ЛСК $n = 1$, требуемая площадь ЛСК n -го типа может определяться без предварительного задания значений m_i по формуле

$$S_{\text{тр } n} = \frac{V_n^{2/3} U_n k \alpha - \sum_{i=1}^n S_i K_{\text{вскр } i} / 0,8}{K_{\text{вскр } n}}, \quad (2.64)$$

где $S_{\text{тр } n}$ — требуемая площадь ЛСК i -го типа; S_i — заданная площадь ЛСК i -го типа; $K_{\text{вскр } n}$ — коэффициент $K_{\text{вскр } i}$ при $i = n$.

Зависимости (2.60; 2.61; 2.64) могут использоваться для проведения расчетов при наличии в наружных ограждениях помещения открытых проемов, для этого надо принять $K_{вскр} = 1$.

Чаще всего на практике имеют место случаи, когда горючая смесь может заполнить не весь объем помещения, а только часть его. Допустим, что в объеме помещения V_n ГВС занимает объем V_o . Если не учитывать обеднение смеси за счет перемешивания

с воздухом, то для случая, когда $V_o \frac{\rho_u}{\rho_b} \geq V_n$, площадь отверстия

можно определять по формуле (2.59). Для $V_o \frac{\rho_u}{\rho_b} < V_n$ в форму-

лу (2.59) следует поставить $S_{f, макс}$. Для объема, например, имеющего форму, близкую к кубической:

$$S_{f, макс}^{V_o} = 5 \left(V_o \frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^{2/3}; \quad (2.65)$$

тогда

$$S_{тр}^{V_o} = S_{тр}^{V_n} \left(\frac{\rho_u}{\rho_b} \right)^{2/3} \left(\frac{V_o}{V_n} \right)^{2/3}, \quad (2.66)$$

где $S_{тр}^{V_n}$ — площадь отверстия, обеспечивающего снижение давления до безопасной величины для полностью заполненного объема ГВС; V_o — объем взрывоопасной смеси в объеме помещения.

Для определения V_o может быть использована зависимость

$$V_o = Q/C, \quad (2.67)$$

где Q — количество поступившего в помещение горючего, образующего взрывоопасную смесь; C — массовая стехиометрическая концентрация вещества, принимается по табл. 2.4. Если $V_o \geq V_n$, то в расчете следует принимать $V_o = V_n$.

Приведенные формулы рекомендуется применять в том случае, когда линейные размеры помещения по ширине, высоте или длине не отличаются один от другого более, чем на порядок, а также в тех случаях, когда скорость пламени $U_n \leq 80$ м/с.

Требуемая площадь ЛСК устанавливается расчетом, исходя из допускаемой в помещении величины максимального избыточного давления $\Delta P_{доп}$, возникающего в аварийных ситуациях при взрывном горении ГВС. Если возникающее в помещении наибольшее избыточное давление не может быть снижено до величины $\Delta P_{доп}$, то в результате расчета при заданных видах и площади ЛСК устанавливается величина $\Delta P_{макс}$.

Пример. В помещении насосного отделения компрессорной в аварийной ситуации может образоваться пропановоздушная смесь. Необходимо определить требуемую площадь ЛСК, а также величину расчетных аварийных нагрузок.

Исходные данные. Расчетный объем помещения $V_n = 20\,000$ м³; площадь стен, которая может быть использована для устройства ЛСК, $S_{ст}^{ЛСК} = 600$ м²; площадь покрытия помещения $S_{пок}^{ЛСК} = 320$ м², степень загазованности помещения 8%.

В помещении находятся четыре аппарата, площадь которых к площади поперечного сечения свободного объема составляет 14%. Определим значения параметров, входящих в уравнение (2.66).

Для пропановоздушной смеси стехиометрической концентрации $U_H = 0,455$ м/с. По табл. 1.8 $\alpha = 3,5$. Плотность ГВС $\rho_u/\rho_b = 7,83$.

Задаваясь $\Delta P_{\text{доп}} = 2,5$ кПа, устанавливаем показатель давления $K = 0,23$ (см. табл. 2.5).

Для двойного остекления с размером стекла $1,2 \times 1,8$ м и $h = 3$ мм, $K_{\text{вскр}i} = 0,63$ (см. рис. 2.24, б).

Подставляя данные в уравнение (2.60), определим требуемую площадь двойного остекления для объема, полностью заполненного горючей смесью стехиометрической концентрации

$$S_{\text{тр}}^{V_p} = 20\,000^{2/3} \cdot 0,455 \cdot 0,23 \cdot 3,5 / 0,63 = 425,5 \text{ м}^2.$$

Для объема, частично заполненного взрывоопасной смесью, т.е. когда $V_p > V_o$, требуемая площадь двойного остекления для защиты здания от разрушения составит:

$$S_{\text{тр}}^{V_o} = 425,5 \cdot 7,83^{2/3} \cdot 0,08^{2/3} = 311,8 \text{ м}^2.$$

Полученная площадь остекления $S_{\text{тр}}^{V_o}$ при $\Delta P_{\text{доп}} = 2,5$ кПа значительно меньше $S_{\text{ЛСК}}^{\text{ст}} = 600 \text{ м}^2$. В связи с этим величина $\Delta P_{\text{доп}}$ может быть снижена или остекление может быть принято с меньшими размерами. Например, если двойное остекление с размером стекла $1,2 \times 1,8$ м и $h = 3$ мм заменить на стекло с размером $1,2 \times 1,5$ м и $h = 3$ мм, то $K_{\text{вскр}i} = 0,4$ (см. рис. 2.24), тогда

$$S_{\text{тр}}^{V_p} = \frac{425 \cdot 5 \cdot 0,63}{0,4} = 670,2 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{тр}}^{V_o} = 670,2 \cdot 7,83^{2/3} \cdot 0,08^{2/3} = 491,1 \text{ м}^2.$$

Таким образом, требуемая площадь ЛСК может быть определена путем рассмотрения нескольких вариантов, исходя как из заданных параметров взрывной нагрузки, так и из имеющихся вариантов элементов ЛСК.

ГЛАВА 3. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМОМУ ОГРАЖДАЮЩЕМУ КОНСТРУКЦИЯМ

В зданиях и помещениях с производствами категорий А, Б и Е необходимо устройство ЛСК. Эти конструкции должны размещаться в наружном ограждении помещений, в которых в аварийных условиях возможно взрывное горение образующихся горючих смесей. В качестве ЛСК рекомендуется использовать остекление помещений, облегченные стеновые панели, поворотные элементы заполнения оконных и дверных проемов, облегченные элементы, расположенные в покрытии.

Устройство легкобрасываемых конструкций в покрытии помещений необходимо предусматривать только тогда, когда площадь ЛСК в наружном стеновом ограждении недостаточна для снижения допускаемой величины давления, возникающего при взрыве горючих смесей.

Следует учитывать, что на величину давления при взрыве горючих смесей внутри производственного объема значительное влияние оказывают масса и площадь легкобрасываемых конструкций, прочность их крепления к основным конструкциям здания, место расположения ЛСК в наружном ограждении, объем взрывоопасного помещения и степень заполнения его взрывоопасными продуктами, а также параметры горения взрывоопасных смесей.

С учетом перечисленных параметров, влияющих на величину давления, при защите зданий ЛСК необходимо обеспечить их вскрытие при избыточном давлении в помещении $\Delta P_{\text{вскр}} \leq 2$ кПа, поверхностная плотность ЛСК не должна превышать 70 кг/м². Следует учитывать, что устройство проемов во внутренних стенах, перегородках или перекрытиях должно быть исключено, так как это может привести к значительному повышению давления как в помещении, где образовалась взрывоопасная смесь, так и в смежных с ним незагазованных помещениях.

Итак, при разработке элементов ЛСК необходимо гарантированное обеспечение их вскрытия или разрушения в начальной стадии взрыва при минимальных давлениях с целью ограничения давления взрыва на основные конструкции здания в пределах безопасных величин.

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Для оценки эффективности применения легкобрасываемых конструкций проведены экспериментальные исследования их работы в условиях, возникающих при взрыве ГВС. При этом эффективность работы ЛСК определялась в основном давлением, при котором происходило вскрытие или разрушение элементов ЛСК. Экспериментальную проверку работы прошли практически все элементы ЛСК, применяемые в настоящее время.

В качестве ЛСК для взрывозащиты промышленных зданий со взрывоопасными производствами широко используется остекление; применяются стекла толщиной 3, 4 и 5 мм, площадь в пределах от 0,6 до 2,5 м² при соотношении сторон от 1:1 до 3:1.

Данные экспериментов показывают, что величина давления, при которой происходит разрушение стекла, в значительной мере зависит от ее толщины. Так, например, при одной и той же площади стекла, равной 1 м², стекло толщиной 4 мм выдерживает давление в 1,9 раза большее, чем стекло толщиной 2 мм.

С увеличением соотношения сторон стекла от 1:1 до 3:1 при равной их площади и толщине разрушающая нагрузка возрастает в 1,3 раза. В частности, для стекла толщиной 3 мм и размером 0,36х1,08 м максимальное разрушающее давление составляет 22 кПа, а для стекла с размером 0,6х0,6 м — 16,5 кПа. Установлено, что наружное крепление стекла в переплетах снижает величину разру-

Т а б л и ц а 3.1. Экспериментальные величины нагрузок, разрушающих стекло

Размер стекла, мм	Давление, разрушающее стекло, кПа, в зависимости от толщины стекла, мм		
	2	3	4
1000x1000	1,2–2	1,3–2,5	1,42–3,8
800x800	3,3–5,5	4,9–6,5	5,3–7,2
600x600	11,6–14	10,5–16,5	12,1–16,8
400x400	15–20,6	16–23,4	16,4–25,1
500x1000	5,8–11	15,8–11	12–14,6
400x800	13,6–19	17,2–21	18,5–23,2
300x600	22,6–29,8	25–32,6	35,6–44
200x400	26,2–41	33,5–45,5	46–52
360x1080	14,5–21,1	15,2–22	17–26
270x810	25,4–32	24–38	28,5–39
100x300	36,6–58,4	39–61	42–66
750x625	—	—	8,8
975x750	—	—	6
1175x975	—	—	3,6
1080x1435	—	—	3,4
550x1435	—	—	8,9
1100x675	—	—	6,6

шающей нагрузки по сравнению со стеклом с внутренним креплением в 1,2 – 3 раза.

Результаты экспериментов по определению разрушающих нагрузок для стекла в условиях реальных конструктивных решений площадью от 1x1 до 0,1x0,3 м и толщиной от 2 до 4 мм, с соотношением сторон от 1:1 до 3:1 показывают, что разрушающие нагрузки изменяются от 1,2 до 66 кПа (табл. 3.1).

Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для определения разрушающих нагрузок для стекла с другими параметрами. Расчет производится по следующей формуле:

$$P_p = \frac{[\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}]}{0,684} \cdot \left(\frac{h}{b} \right)^2 \cdot \frac{(1 + \alpha)^2}{1 + 0,22\alpha^2}, \quad (3.1)$$

где P_p – разрушающая нагрузка; $[\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}]$ – предельное напряжение, определяемое по результатам испытаний стекол определенной толщины и размеров; h – толщина стекла; b – наименьшая сторона пластины стекла; α – отношение сторон пластины стекла.

Для квадратной пластины ($\alpha = 1$) соотношение для определения $[\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}]$ принимает вид:

$$[\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}] = \frac{P_p^*}{4,8} \left(\frac{h}{b} \right)^2, \quad (3.2)$$

где P_p^* – разрушающая нагрузка на квадратную пластину, определяемая по экспериментальным данным.

В табл. 3.2 приведены значения $[\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}]$, вычисленные по формуле (3.2).

По полученным экспериментальным значениям $[\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}]$ можно установить величины разрушающих стекло нагрузок P_p для плас-

Т а б л и ц а 3.2. Значения $\sigma_v^{пр}$, вычисленные по формуле (3.2)

Толщина пластины, стекла, мм	Давление, разрушающее стекло, кПа	Значения $[\sigma_v^{пр}]$, МПа
6,5	10	49,8
5	6,5	54
4	4,5	52
3	2,5	57,5
2	1,8	92,5

тин стекла различной толщины в зависимости от их площади (табл. 3.3).

Размеры стекла с соотношением сторон 1:1, при которых разрушающие нагрузки не превышают 3,8 кПа, приведены в табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.3. Изменение давления, разрушающего стекло, в зависимости от площади и толщины пластин стекла

Площадь пластин стекла, м ²	Давление, разрушающее стекло, кПа, в зависимости от толщины пластин стекла, мм				
	2	3	4	5	6
0,36	5	6,9	11,4	18	27,8
0,64	2,8	3,9	6,2	14,8	15,6
1	1,8	2,5	4	5,6	10
2,25	0,8	1,1	1,7	2,9	4,2
2,89	0,6	0,9	1,4	2,3	4

Т а б л и ц а 3.4. Изменение давления, разрушающего стекло с соотношением сторон пластин стекла 1:1

Толщина стекла, мм	Давление, разрушающее стекло $P^{ст}$, кПа, в зависимости от площади пластин стекла, м ²				
	0,8	1	1,2	1,5	2
3	3,5	2,5	2	1,8	1,1
4	—	3,8	3	2,3	1,8
5	—	—	—	3,8	3,1

Разрушающая стекло нагрузка с учетом соотношения сторон, согласно экспериментальным данным, равна:

$$P_p = K P_p^* \quad (3.3)$$

где P_p^* — разрушающая нагрузка для оконного стекла с соотношением сторон 1:1; K — коэффициент, зависящий от соотношения сторон пластин стекла, принимается следующий:

Отношение сторон пластин стекла	1:1	1:1,38	1:1,5	1:1,75	1:2	1:3
Коэффициент K	1	1,04	1,08	1,16	1,25	1,38

Т а б л и ц а 3.5. Сопоставление результатов разрушающих давлений, полученных экспериментальным путем, с расчетными

Размер стекла толщиной 4 мм	Разрушающее давление, кПа		Процент расхож- дения
	эксперименталь- ные данные	рассчитанное по формуле (3.1)	
1000x1000	3,8	4	5
800x800	7,2	6,25	13,2
600x600	16,8	10,9	35
400x400	25,1	25	3,8
500x1000	14,6	20	26,8
400x800	23,2	25	7,2
300x600	44	53	16,9
360x1080	26	30	13,3
270x810	39	51,5	24

Т а б л и ц а 3.6. Зависимость давления, возникающего в камере, от нагрузки, вызывающей разрушение стекла

Размер стекла толщиной 3 мм	Нагрузки, раз- рушающие стекло, кПа	Максимальное давление в каме- ре, кПа	Площадь ЛСК, м ² /м ³	
			фактичес- кая	расчетная
1000x1000	2,5	7	0,071	0,0735
800x800	6,5	13	0,045	0,0465
600x600	16,5	31	0,025	0,026
500x1000	11	19	0,0357	0,0355
400x800	21	38	0,022	0,023
300x600	32,6	90	0,012	0,015
360x1080	22	27	0,027	0,028
270x810	38	70	0,015	0,017

Сопоставление результатов, полученных по формуле (3.1), для стекла толщиной 4 мм, с экспериментальными данными приведены в табл. 3.5. По этим данным построены графики изменения максимальных значений разрушающих давлений P_p для квадратных стеклянных пластин различной толщины в зависимости от их площади (рис. 3.1). Пунктиром показаны экспериментальные зависимости, сплошной — теоретические, полученные по формуле (3.1). Из рис. 3.1 следует, что для стекла толщиной 4 мм наблюдается хорошее совпадение значений, полученных по зависимости (3.2), с экспериментальными данными. Для стекла толщиной 3 и 2 мм расхождение становится существенным. Это свидетельствует о том, что разрушение стекла толщиной менее 3 мм подчиняется другим закономерностям, характерным, например для гибких пластин.

Как свидетельствуют экспериментальные данные, максимальные величины давлений, возникающие в камере, зависят от нагрузки, вызывающей разрушение стекла, и от площади вскрываемой ЛСК. В табл. 3.6 приведены результаты экспериментов, полученные в опытной камере объемом 14 м³ при испытании стекла толщиной 3 мм, которые сопоставлены с данными, полученными по форму-

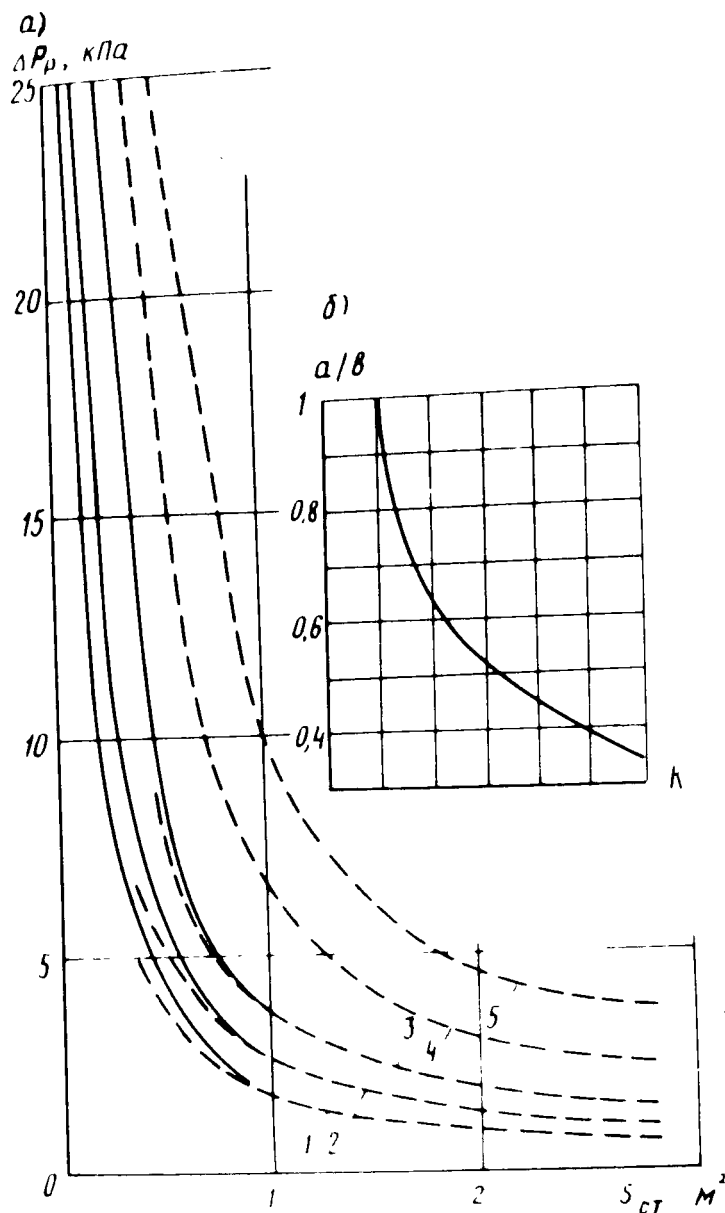


Рис. 3.1. Разрушающие стекло нагрузки ΔP_p в зависимости от толщины и площади $S_{ст}$ квадратных пластин стекла

а — для стекла толщиной: 1 — 2; 2 — 3; 3 — 4; 4 — 5; 5 — 6 мм; б — значения поправочного коэффициента для пластин с соотношением сторон a/b (— — экспериментальные; - - - - расчетные)

лам (2.8; 2.9; 2.13), для определения требуемой площади ЛСК (при $\rho_u/\rho_b = 6,8$; $U_n = 0,428$ м/с, $\alpha = 2,66$).

Из табл. 3.6 видно, что величины площадей ЛСК, установленные по зависимостям (2.8; 2.9; 2.13), хорошо согласуются с экспериментальными данными. Выражения (2.8; 2.9; 2.13) позволяют найти максимальное давление в объеме для заданной площади ЛСК при мгновенном ее вскрытии.

Оценивая результаты влияния глухого остекления на нагрузки при взрыве ГВС, можно сделать следующие выводы:

в зависимости от размеров стекла (толщины, площади, соотношения сторон) и схемы крепления пластин стекла в переплетах

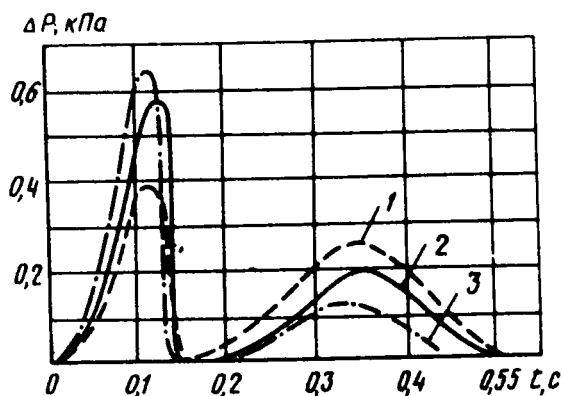


Рис. 3.2. Изменение давления во времени при взрыве пропановоздушной смеси в опытной камере объемом 1 м³ с отверстием, закрытым горизонтальной свободно лежащей пластиной с поверхностной плотностью m , кг/м², при взрыве газа концентрацией $C_{об}$, %

1 — $m = 16,5$, $C_{об} = 3,5$; 2 — $m = 33,3$, $C_{об} = 3,5$; 3 — $m = 16,5$, $C_{об} = 4,5$

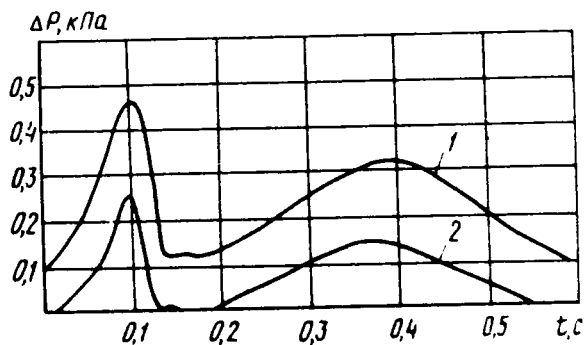


Рис. 3.3. Изменение давления во времени 3%-й пропановоздушной смеси в опытной камере объемом 1 м³

1 — на стенке камеры; 2 — на сбрасываемой пластине с поверхностной плотностью $m = 25,2$ кг/м²

(внутреннее или наружное) величина нагрузок, разрушающая стекло, может изменяться от 1,2 до 66 кПа;

стекло разрушается до момента, когда фронт пламени достигает поверхности стекла;

для обеспечения эффективного использования остекления в качестве ЛСК размеры их должны подбираться так, чтобы нагрузки, разрушающие стекло, не превышали допускаемых нагрузок на основные конструкции;

при отсутствии опытных данных величины нагрузок, разрушающие стекло, ориентировочно могут устанавливаться в соответствии с результатами экспериментальных исследований или определять по формуле (3.1);

при определении максимального давления взрыва ГВС внутри объема наряду с разрушающей нагрузкой необходимо учитывать общую площадь остекления.

Для взрывозащиты зданий используются смещаемые легко-сбрасываемые конструкции, располагаемые в вертикальном или горизонтальном наружном ограждении. Для оценки влияния инерционности вскрытия ЛСК были проведены эксперименты в опытных камерах объемом 1; 10; 14 и 300 м³.

При проведении экспериментов в опытной камере объемом 1 м³ площадь сбрасываемого элемента составляла 36,5х36,5 см, а поверхностная плотность его принималась равной 8,1; 16,5; 25,2 и 33,3 кг/м².

На рис. 3.2 приведена зависимость $\Delta P = f(t)$ при взрывном горении пропановоздушной смеси различной концентрации. В процессе проведения эксперимента на сбрасываемый элемент устанавливался датчик давления ДМН, с помощью которого фиксировалось изменение давления по мере перемещения сбрасываемого элемента (рис. 3.3). Зависимости максимального давления при взрывном го-

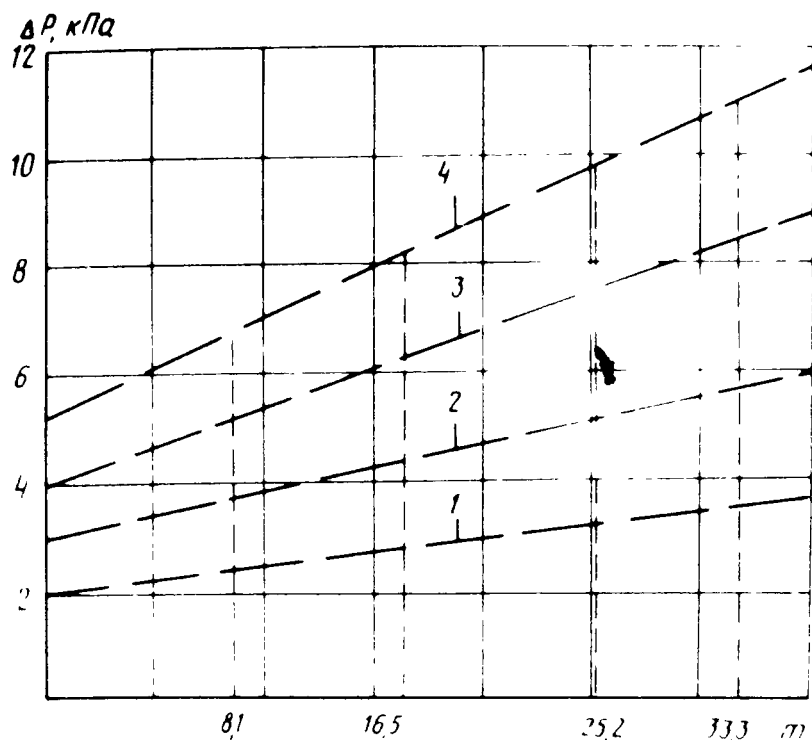


Рис. 3.4. Давление в опытной камере объемом 1 м^3 в зависимости от отверстия площадью $36,5 \times 36,5 \text{ см}$ в горизонтальной стенке, закрываемого пластиной с поверхностной плотностью: $m = 8,1; 16,5; 25,2; 33,3 \text{ кг/м}^2$, при взрыве пропановоздушной смеси концентрацией $C_{об}, \%$, соответственно
1 – 3; 2 – 3,5; 3 – 4; 4 – 4,5%

рении от массы пластины для различных концентраций пропановоздушной смеси приведены на рис. 3.4.

При проведении экспериментов в опытных камерах объемом 10 и 14 м^3 со смещаемыми легкобрасываемыми элементами, располагаемыми в покрытии, предусматривалось использование таких элементов, которые максимально были приближены по массе и размерам к типовым элементам, выпускаемым промышленностью, например элементы для заполнения отверстий в плитах ПК-01-118. С этой целью были приняты следующие размеры элементов ЛСК: $1 \times 1, 1 \times 2, 2 \times 2 \text{ м}$. Учитывая, что существующие нормы ограничивают поверхностную плотность ЛСК в 120 кг/м^2 , поверхностная плотность испытуемых элементов равнялась $50; 75; 100; 120; 150; 170; 190; 210$ и 250 кг/м^2 . Легкобрасываемые элементы укладывались в специальные обоймы, расположенные в покрытии камеры объемом 14 м^3 , соответствующие размерам испытуемых элементов. Результаты измерения давлений ЛСК при взрыве ГВС в опытной камере объемом 14 м^3 приведены в табл. 3.7.

Анализ данных, приведенных в табл. 3.7, показывает, что величина давления, развивающегося в опытной камере, существенно зависит от поверхностной плотности и в несколько меньшей степени от площади ЛСК. Так, например, при плите с поверхностной плотностью 250 кг/м^2 давление в камере по сравнению с такой же плитой, но с поверхностной плотностью 50 кг/м^2 возрастает в 10

Т а б л и ц а 3.7. Изменение экспериментального и расчетного давления взрыва в зависимости от поверхностной плотности ЛСК

Поверхностная плотность, кг/м ²	Максимальное давление взрыва, кПа		Время нарастания давления взрыва, мс	
	экспериментальное	расчетное	экспериментальное	расчетное
<i>Легкосбрасываемый элемент площадью 4 м²</i>				
20	1,1	1,2	125	118
50	2,3	2,6	130	120
75	3,2	3,8	150	140
100	4,9	5	165	160
120	6,7	7,6	183	180
150	9,2	11	200	192
170	12	14	216	200
190	16,5	17	250	210
210	20	20,2	255	218
250	24	27	263	235
<i>Легкосбрасываемый элемент площадью 2 м²</i>				
20	1,3	1,3	135	130
50	2,65	2,7	140	132
75	3,68	4,2	158	146
100	5,64	6,2	182	175
120	7,7	8,1	194	180
150	10,6	11,8	215	205
170	13,8	14,8	224	216
190	18,9	17,8	236	224
210	23	21,8	258	248
250	27,6	28,2	278	262
<i>Легкосбрасываемый элемент площадью 1 м²</i>				
20	1,4	1,4	140	135
50	3	3,1	145	142
75	4,1	4,9	165	158
100	6,4	6,8	185	176
120	8,7	11	205	198
150	11,9	12,8	220	202
170	15,6	15,8	242	219
190	21,4	19,1	260	238
210	26	23	280	265
250	31,2	32	290	272

раз (31,2 против 3 кПа); при плите — 250 кг/м² и площадью 2 и 4 м² давление по сравнению с плитами таких же площадей и поверхностной плотностью 50 кг/м² возрастает также в 10 раз. Изменение давления в зависимости от поверхностной плотности и площади ЛСК показано на рис. 3.5—3.7.

В проведенных экспериментах с плитой поверхностной плотностью 50 кг/м² и площадью 1 м² давление в опытной камере составило 3 кПа, следовательно, давление увеличивается по отношению к массе плиты в 6 раз. При плите площадью 4 м² давление увеличивается относительно массы плиты в 4,6 раза.

При оценке влияния нормативной массы ЛСК, ограниченной величиной 120 кг/м², установлено, что давление в объеме достигает 8,7 кПа при площади ЛСК 1 м² и 6,7 кПа при площади ЛСК 4 м².

Рис. 3.5. Характер изменения давления на стенки опытной камеры объемом 14 м^3 при взрывном горении 4,2%-й пропановоздушной смеси при вскрытии плиты в покрытии площадью 1 м^2 и поверхностной плотностью m

1 – 20; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100; 5 – 120; 6 – 150 кг/м^2
[— — — — экспериментальные;
— — — — расчетные (2.25; 2.26;
2.27; 2.53); $U_H = 0,428 \text{ м/с}$;
 $\rho_u/\rho_b = 6,8$; $\alpha = 2,66$]

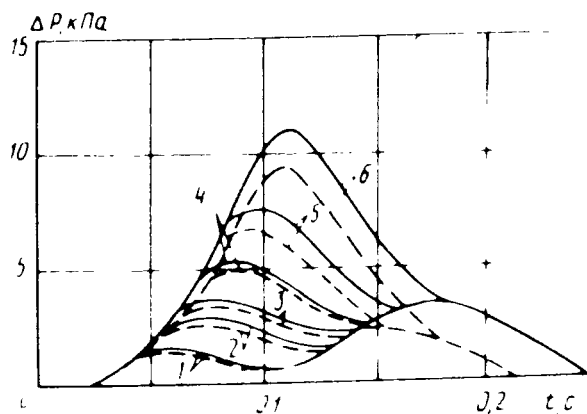


Рис. 3.6. Характер изменения давления на стенки опытной камеры объемом 14 м^3 при взрывном горении 4,2%-й пропановоздушной смеси при вскрытии плиты в покрытии площадью 2 м^2 и поверхностной плотностью m

1 – 20; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100; 5 – 120; 6 – 150 кг/м^2 ;
[— — — — экспериментальные;
— — — — расчетные (2.25; 2.26;
2.27; 2.53); $U_H = 0,428 \text{ м/с}$;
 $\rho_u/\rho_b = 6,8$; $\alpha = 2,66$]

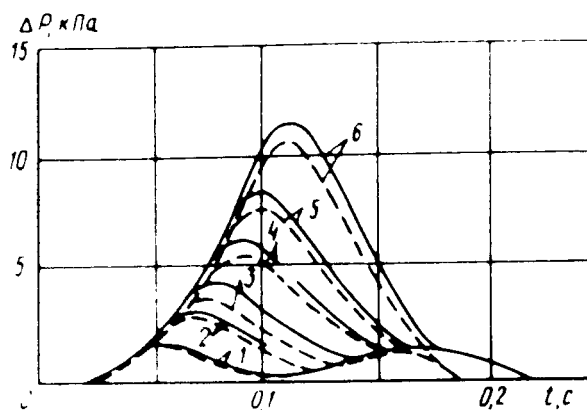
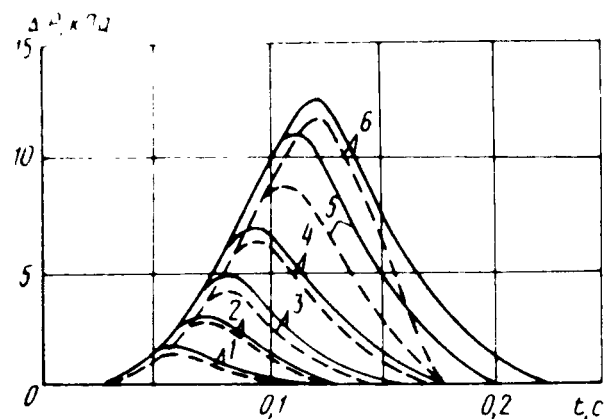


Рис. 3.7. Характер изменения давления на стенки опытной камеры объемом 14 м^3 при взрывном горении 4,2%-й пропановоздушной смеси при вскрытии плиты в покрытии площадью 4 м^2 и поверхностной плотностью m

1 – 20; 2 – 50; 3 – 75; 4 – 100; 5 – 120; 6 – 150 кг/м^2
[— — — — экспериментальные;
— — — — расчетные (2.25; 2.26;
2.27; 2.53); $U_H = 0,428 \text{ м/с}$;
 $\rho_u/\rho_b = 6,8$; $\alpha = 2,66$]



Приведенные результаты экспериментов свидетельствуют о том, что на изменение давления в камере оказывает влияние как масса ЛСК, так и площадь вскрываемого отверстия, табл. 3.8, рис. 3.5; 3.6; 3.7.

Как следует из рис. 3.5–3.7 и табл. 3.7, полученные зависимости (2.25), (2.26), (2.27) и (2.53) могут быть использованы для определения с достаточно высокой точностью нагрузок, возникающих при взрыве ГВС в помещении при устройстве ЛСК в покрытии.

В результате определения давления в объеме при устройстве ЛСК в покрытии можно сделать следующие выводы:

применение ЛСК в покрытии при значительном уменьшении их массы позволяет достичь значительного снижения давления при

Т а б л и ц а 3.8. Данные экспериментальных исследований влияния ковра мягкой кровли по ЛСК площадью 4 м² и поверхностной плотностью 120 кг/м² на давление в объеме опытной камеры

Ширина нахлестки, см	Количество слоев рубероида	Максимальное давление в опытной камере при наличии мягкой кровли из рубероида М-350, кПа
5	1	8,5
	2	10
	3	11,8
10	1	10,5
	2	12,5
	3	15
20	1	18,5
	2	31,2
	3	51,8

взрыве ГВС в помещении. Поэтому при проектировании ЛСК в покрытии следует максимально облегчить ЛСК;

полученные зависимости (2.25—2.27), (2.53) могут быть использованы для определения давления, возникающего внутри объема при применении смещаемых ЛСК.

Для оценки влияния мягкой кровли на величину возникающего давления элементы ЛСК принимались размером 2х2 м и поверхностной плотностью 120 кг/м², что соответствует требованиям СНиП II-90-81. Мягкая кровля состояла из одного, двух и трех слоев рубероида марки М-350. В целях получения сопоставимых результатов заполнение камеры объемом 14 м³ ГВС для осуществления взрыва проводилось точно так же, как и при испытании ЛСК в покрытии без мягкой кровли.

Полученные данные о величине максимального давления в камере в зависимости от количества слоев мягкой кровли и ширины нахлестки полотнищ приведены в табл. 3.8.

Сравнивая величины давлений, зафиксированные в опытной камере при устройстве рубероидного ковра мягкой кровли по элементам ЛСК поверхностной плотностью 120 кг/м², с данными, полученными без рубероидного ковра, можно сделать вывод, что при наличии только одного слоя рубероида и ширины нахлестки полотнищ 5 см давление в камере возрастает в 1,2 раза, а при ширине нахлестки 20 см — в 2,5 раза. При трех слоях мягкой кровли и ширине нахлестки 5 см давление в камере возрастает с 11,8 до 51,8 кПа, т.е. увеличивается по сравнению с ЛСК без рубероидного ковра в 1,6 и 7,2 раза.

Приведенные данные показывают, что наличие ковра мягкой кровли в большей степени влияет на развитие взрывных нагрузок в объеме, чем масса ЛСК. Кроме того, на величину давления оказывает влияние величина нахлестки полотнищ мягкой кровли.

В результате оценки влияния ковра мягкой кровли на давление взрыва ГВС в объеме установлено следующее:

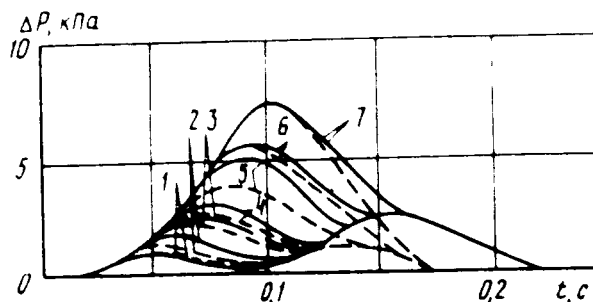
устройство мягкой кровли по ЛСК значительно снижает эффективность применяемых ЛСК в покрытии;

Т а б л и ц а 3.9. Экспериментальные и расчетные данные исследования смещаемых ЛСК в вертикальном ограждении

Поверхностная плотность ЛСК, кг/м ²	Максимальное давление, кПа				Расхождение между $P_{\text{макс}}$ эксперименталь- ным и расчет- ным, %
	экспериментальное		расчетное		
	$P_{\text{вск}}$	$P_{\text{макс}}$	$P_{\text{вск}}$	$P_{\text{макс}}$	
20	0,88	1,12	1	1,18	5,08
30	1,34	1,7	1,4	1,8	5,55
50	1,84	2,4	1,8	2	16,6
75	2,56	3,28	3	3,4	3,5
100	3,92	5,12	4,2	5,3	3,4
120	5,36	6,96	5,8	7,2	3,3
150	7,36	9,52	8	10,2	6,7

Рис. 3.8. Характер изменения давления на стенки опытной камеры объемом 14 м³ при взрывном горении 4,2%-й пропановоздушной смеси при вскрытии плиты в вертикальной стенке площадью 1 м² и поверхностной плотностью m

1 — 20; 2 — 30; 3 — 50; 4 — 75; 5 — 100; 6 — 120; 7 — 150 кг/м² [— — — экспериментальные; — — — расчетные (2.25; 2.26; 2.27; 2.54); $U_n = 0,428$ м/с; $\rho_u/\rho_b = 6,8$; $\alpha = 2$]



при устройстве мягкой кровли следует стремиться к минимально допустимому количеству слоев мягкой кровли и к минимальной величине стыков (нахлестки полотнищ);

ориентировочная оценка влияния ковра мягкой кровли на развитие давления взрыва ГВС в объеме может быть выполнена по данным табл. 3.8.

В вертикальном ограждении ЛСК выполняют в виде смещаемых и поворотных конструкций. Поворотные ЛСК выполняются с горизонтальным (верхним или нижним) или вертикальным (боковым) шарниром.

Смещаемые конструкции представляют собой плиты стенового ограждения. Для исследования принимались плиты площадью 1 м² и массой 20; 30; 50; 75; 100, 120 и 150 кг (табл. 3.9). Плиты устанавливались в проемы опытной камеры объемом 10 м³. Переплеты устанавливались в проем опытной камеры объемом 14 м³. Взрывы осуществлялись с пропановоздушной смесью при полном заполнении объема камер ГВС.

Как следует из табл. 3.9 и рис. 3.8, максимальное давление взрыва ГВС, полученное для аналогичных ЛСК, но расположенных в покрытии, выше давлений, зафиксированных при расположении смещаемых конструкций в вертикальном ограждении. Так, например, для ЛСК, расположенной в покрытии плотностью 120 кг/м², давление в объеме в 1,25 раза выше, чем при расположении аналогичной конструкции в вертикальном ограждении.

При изменении массы ЛСК в вертикальном ограждении от 50 до 150 кг давление в объеме изменяется от 2,4 до 9,52 кПа, при

Т а б л и ц а 3.10. Сравнение экспериментальных и теоретических исследований работы поворотных переплетов

Экспериментальное время достижения переплетом угла поворота на 5°, мс	Экспериментальное время достижения максимального давления, мс	Максимальное давление, кПа	
		P _{эксп}	P _{теор}
Поворотный переплет с вертикальным шарниром, запирающийся на замок, рассчитанный на усилие 0,5 кПа			
130 ± 9	150 ± 6	3,1	3,6
Поворотный переплет с вертикальным шарниром без замка			
35 ± 6	115 ± 8	1,6	1,8
Поворотный переплет с горизонтальным верхним шарниром, запирающийся на замок, рассчитанный на усилие 0,5 кПа			
135 ± 6	165 ± 5	4	4,2
Поворотный переплет с горизонтальным верхним шарниром без замка			
85 ± 8	115 ± 6	1,8	1,2

такой же массе ЛКС, располагаемых в покрытии, — от 3 до 11,9 кПа. Таким образом, при аналогичных конструктивных решениях смещаемые ЛСК в вертикальном ограждении эффективнее по сравнению с ЛСК в покрытии.

Сопоставление опытных данных с расчетными при испытании поворотных конструкций приведены в табл. 3.10. Величина расхождения между экспериментальными и расчетными данными показывает, что приведенные зависимости (2.25) — (2.27), (2.55) — (2.57) могут быть использованы для проведения оценочных расчетов по определению нагрузок при применении поворотных ЛСК в вертикальном ограждении.

Анализ результатов экспериментальных исследований по испытанию поворотных ЛСК показывает, что вскрытие переплета с горизонтальным (верхним) шарниром происходит при давлении до 4,2 кПа, когда переплет закрывается на замок, срабатывающий при давлении до 0,5 кПа. При испытании переплета с горизонтальным шарниром без замка давление в объеме достигает 1,8 кПа. При испытании переплетов с вертикальным (боковым) шарниром давление соответственно составляет 3,1 и 1,6 кПа, рис. 3.9.

Время давления взрыва внутри камеры до вскрытия переплетов, закрытых на замки, составляло 110—115 мс при переплете с вертикальным шарниром и 115—120 мс при переплетах с горизонтальным шарниром.

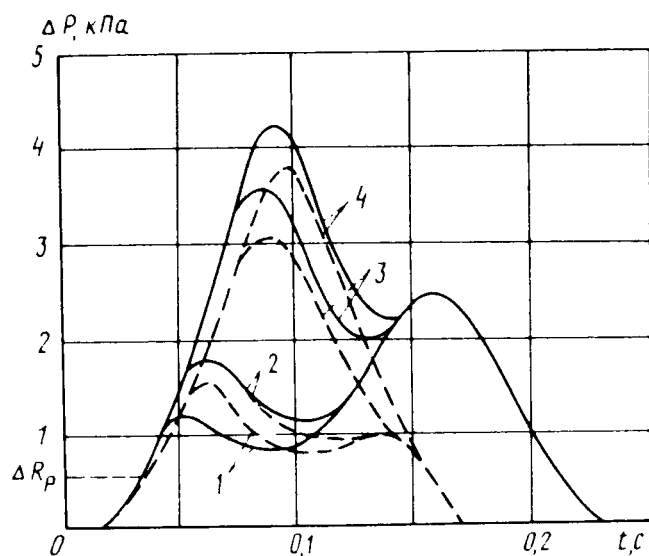
Переплеты вскрывались до того момента, когда фронт пламени достигал внутренней поверхности камеры.

С помощью скоростной киносъемки установлено, что время вскрытия переплета с вертикальным шарниром меньше, чем с горизонтальным (верхним) шарниром.

Переплеты с вертикальным шарниром достигали поворота на угол 90° за 120—140 мс, с горизонтальным шарниром за 130—150 мс с момента зажигания ГВС в опытной камере.

Рис. 3.9. Характер изменения давления на стенки опытной камеры объемом 14 м^3 при взрывном горении 4,2%-й пропановоздушной смеси при вскрытии поворотных переплетов площадью 1 м^2 и поверхностной плотностью $m = 20 \text{ кг/м}^2$

1 — с горизонтальным верхним шарниром; 2 — с вертикальным шарниром; 3 — с вертикальным шарниром и замком, $\Delta R_p = 0,5 \text{ кПа}$; 4 — с горизонтальным верхним шарниром и замком, $R_p = 0,5 \text{ кПа}$
 [— — — — экспериментальные; — — — — расчетные (2.25–2.27; 2.55–2.57); $U_H = 0,428 \text{ м/с}$; $\rho_u/\rho_b = 6,8$; $\alpha = 2,66$]



Время вскрытия переплетов от начала движения до достижения угла 90° с вертикальным шарниром составляло 70–80 мс, с горизонтальным шарниром — 80–90 мс.

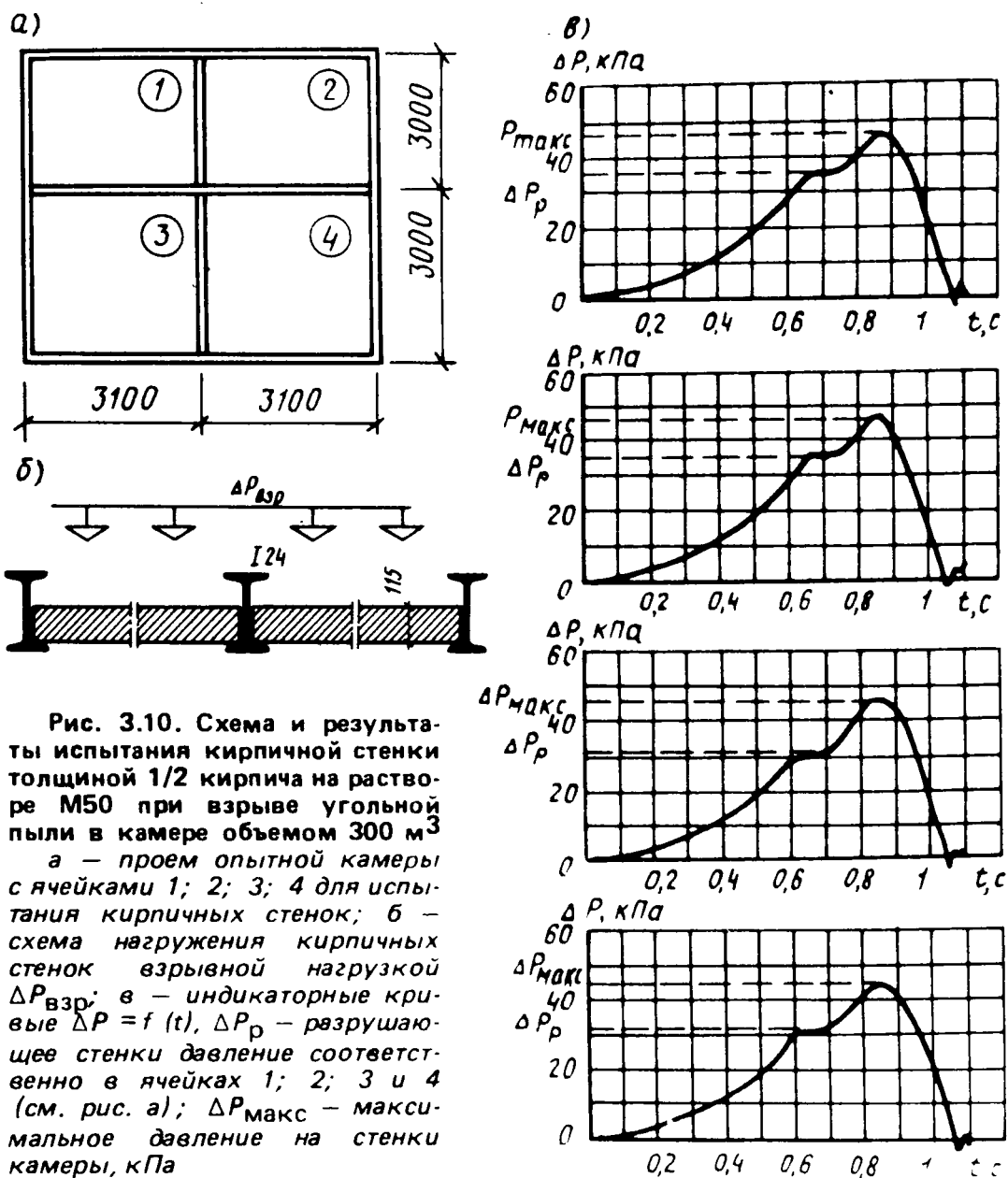
Использование прижимного замка, который срабатывает раньше, чем давление в камере достигает разрушающих стекло нагрузок, исключало разрушение стекла в момент вскрытия переплетов. Стекло разрушалось при вскрытии переплетов на максимальный угол, т.е. в результате механического удара переплета о стенку камеры.

В переплетах с горизонтальным шарниром разрушение стекла происходило при возвращении переплета в исходное положение, и оставшиеся стекла в переплете попадали внутрь камеры, что представляет дополнительную опасность для людей.

Поворотные ЛСК обеспечивают наиболее эффективное по сравнению со смещаемыми снижением давлений, возникающих внутри объема. Причем, наибольшую эффективность по снижению взрывных нагрузок обеспечивают поворотные переплеты с вертикальным (боковым) шарниром.

Вскрытие переплетов происходит без разрушения стекла. Разрушение стекла имеет место в результате ударов переплетов об ограждающие конструкции.

Серия экспериментальных испытаний натуральных образцов легкосбрасываемых конструкций проведена в опытной взрывной камере объемом 300 м^3 (ГДР). Опытная камера запроектирована и построена из монолитного железобетона с внутренним размером $6,6 \times 6,6 \times 6,6 \text{ м}$, она позволяет испытывать образцы или фрагменты стеновых легкосбрасываемых конструкций с размером $6,2 \times 5,4 \text{ м}$, устанавливаемых в обойму камеры вертикально. В покрытии камеры имеется 16 круглых разгрузочных отверстий площадью 1 м^2 каждое. Эти отверстия при необходимости могут быть открыты полностью или частично или полностью закрываться металлическими заглушками. При испытании натуральных ЛСК на нагрузку, развивающуюся при взрыве бурого угольной пыли концентрации 100 г/м^3 , в целях безопасности проведения эксперимента постоянно остав-



лялись открытыми перед моментом подачи искры зажигания два отверстия общей площадью 2 м².

Перед испытаниями элементов конструкций в проем камеры устанавливалась специальная обойма с размерами ячеек, соответствующими размерам натуральных элементов ЛСК. Так, при испытании кирпичных стенок толщиной 1/2 кирпича обойма была выполнена из двутавра №24 размером ячеек 3,1х3 и 3,1х2,4 м, в которые укладывался кирпич на растворе М50 (рис. 3.10). При испытании многослойных стеновых элементов ЛСК с размером 2,7х1 м обойма представляла собой фрагмент фахверка из двутавра с размерами, указанными на рис. 3.11.

Профилированное стекло при испытании устанавливалось в проем опытной камеры в обойму, выполненную из швеллера № 8. Схема расположения профилированного стекла и его крепление приведены на рис. 3.12. Испытанию было подвергнуто также армированное стекло толщиной 7 мм размером 1,32х0,75 м (рис. 3.13).

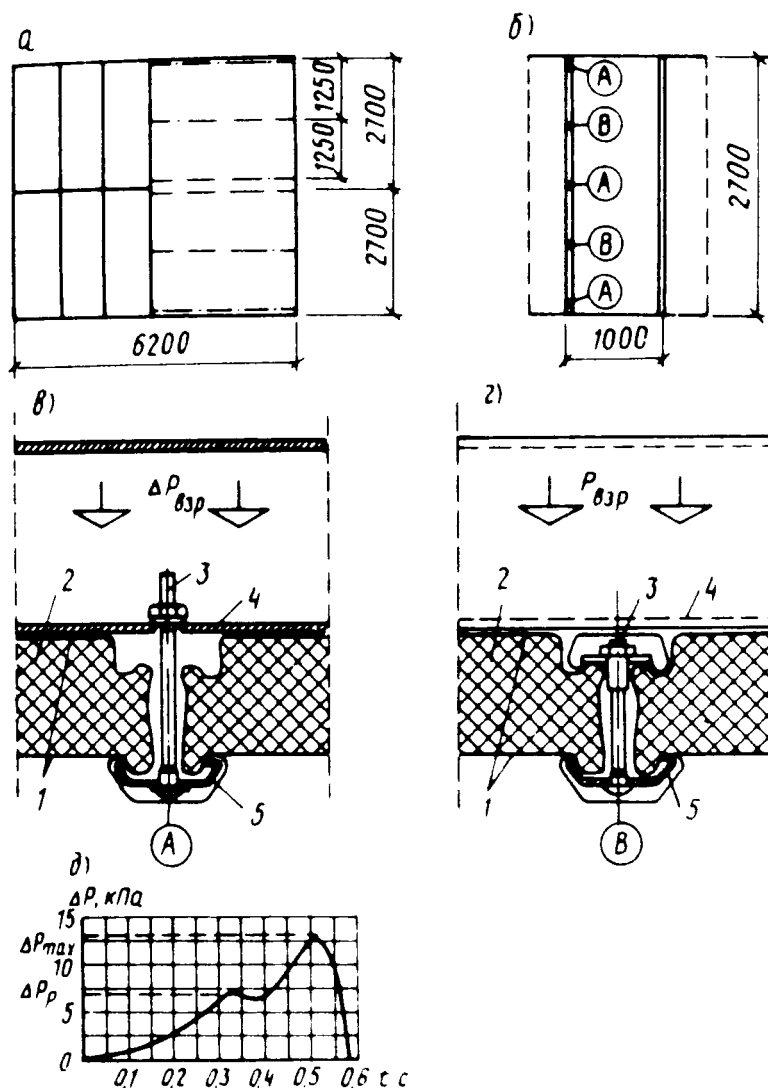


Рис. 3.11. Схема и результаты испытаний многослойных стеновых элементов с поверхностной плотностью $m = 20 \text{ кг/м}^2$ при взрыве угольной пыли в камере объемом 300 м^3

а — схема расположения испытуемых элементов в проеме опытной камеры; б — схема крепления стеновых элементов к каркасу А и между собой В; в — узел А крепления элемента к каркасу; г — узел В крепления стеновых элементов между собой; 1 — оцинкованные стальные листы; 2 — полиуретановый наполнитель; 3 — крепежный болт; 4 — элемент каркаса; 5 — шайба с надрезкой; д — индикаторная кривая $\Delta P = f(t)$, ΔP_p — разрушающее стеновой элемент давление; $P_{\text{макс}}$ — максимальное давление на стенки камеры

Во взрывной камере объемом 300 м^3 была испытана целая группа легких ограждающих конструкций, применяемых в основном для необогреваемых зданий, представляющих собой профилированные элементы в виде алюминиевых волнистых (рис. 3.14) и трапециевидных листов толщиной 1 мм с размером листа $5,4 \times 0,75 \text{ м}$ (рис. 3.15); волнистых листов из полимерного материала, усиленные стекловолокном, с размером листа $2,5 \times 1,097 \text{ м}$ (рис. 3.16), а также асбестоцементные листы (рис. 3.17). Испытанию были подвергнуты и поворотные стальные стеклянные переплеты, закрывающиеся на специальные замки (рис. 3.18).

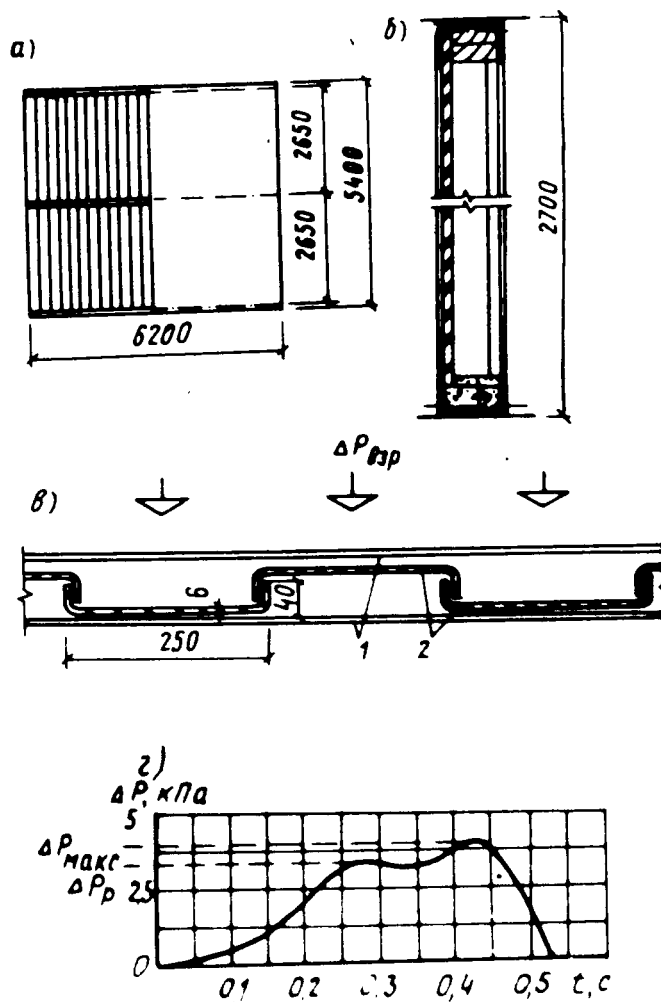


Рис. 3.12. Схема и результаты испытания профилированного стекла при взрыве угольной пыли в опытной камере объемом 300 м³
 а — схема расположения испытуемых элементов в проеме опытной камеры; б — схема крепления элементов профилированного стекла в проеме; в — схема расположения элементов профилированного стекла и распределение взрывной нагрузки $\Delta P_{взр}$; г — индикаторная кривая $\Delta P = f(t)$; 1 — элементы каркаса; 2 — профилированное стекло (ΔP_p — разрушающая профилированное стекло нагрузка; $\Delta P_{макс}$ — максимальное давление на стенки камеры)

Во всех проведенных экспериментах, как правило, наблюдалось два пика изменения давления разной величины. Это можно объяснить тем, что величина первого пика определялась нагрузкой, при которой происходило разрушение связей крепления ЛСК в обойме камеры. Величина и наличие второго пика нагрузки определялись как скоростью вскрытия ЛСК, так и площадью вскрываемого отверстия. Это предположение хорошо согласуется с результатами исследований проведенных расчетов по принятой методике.

По результатам выполненных натурных испытаний эффективности срабатывания различных элементов ЛСК, запроектированных для целого ряда предприятий взрывоопасных производств, следует отметить, что наиболее эффективными являются асбестоцементные и полимерные волнистые листы; алюминиевые листы волнистого и трапецидального профиля, а также профилированное стекло, которые вскрываются при нагрузке 2–2,5 кПа, но в даль-

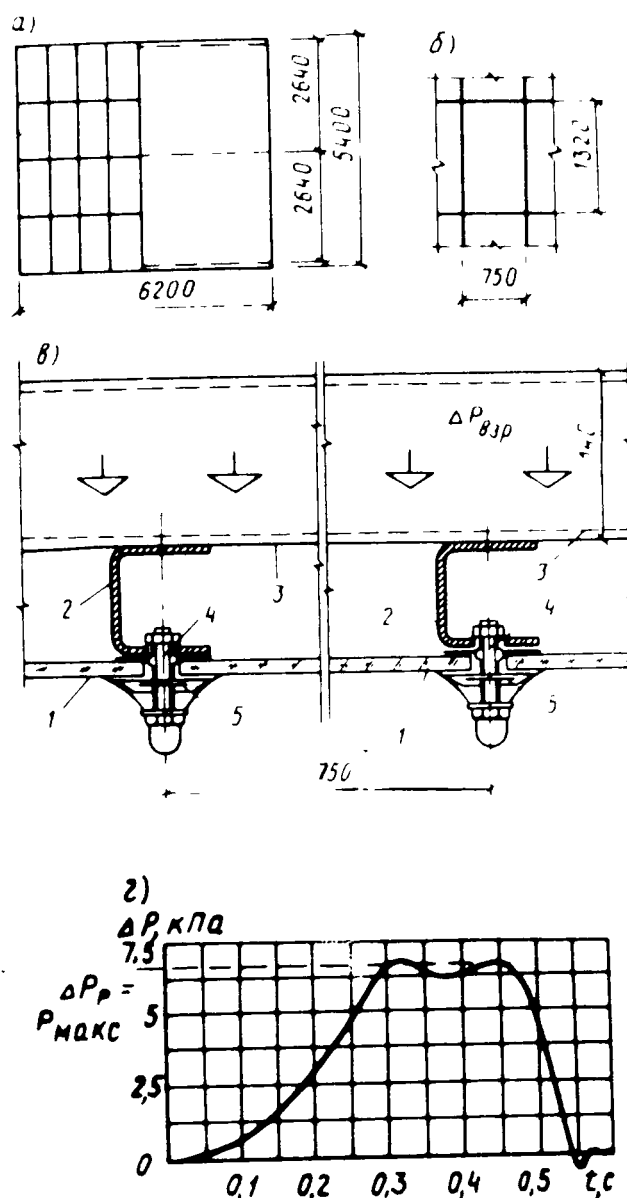


Рис. 3.13. Схема и результаты испытаний армированного стекла при взрыве угольной пыли в опытной камере объемом 300 м³

а — схема расположения испытываемых элементов в проеме камеры; б — размеры элемента армированного стекла; в — схема узлов крепления армированного стекла к каркасу и нагружения их взрывной нагрузкой $P_{взр}$; 1 — элемент стекла; 2 — фахверк; 3 — каркас; 4 — крепежный болт; 5 — шайба с надрезкой; г — индикаторная кривая $\Delta P = f(t)$ (ΔP_p — давление, разрушающее крепление стекла; $\Delta P_{\max}$ — максимальное давление на стенки камеры)

нейшем имеет место нарастание нагрузки, что, как известно, нежелательно при устройстве такого рода защиты.

При испытании многослойных легкобрасываемых элементов массой 20 кг основное внимание было уделено разрушению опорно-стержневых связей, с помощью которых крепились элементы ЛСК к каркасу здания. Величина нагрузки, при которой вскрываются элементы ЛСК, может регулироваться величиной надреза шайбы, с помощью которой удерживается (прижимается) панель к каркасу здания (рис. 3.19).

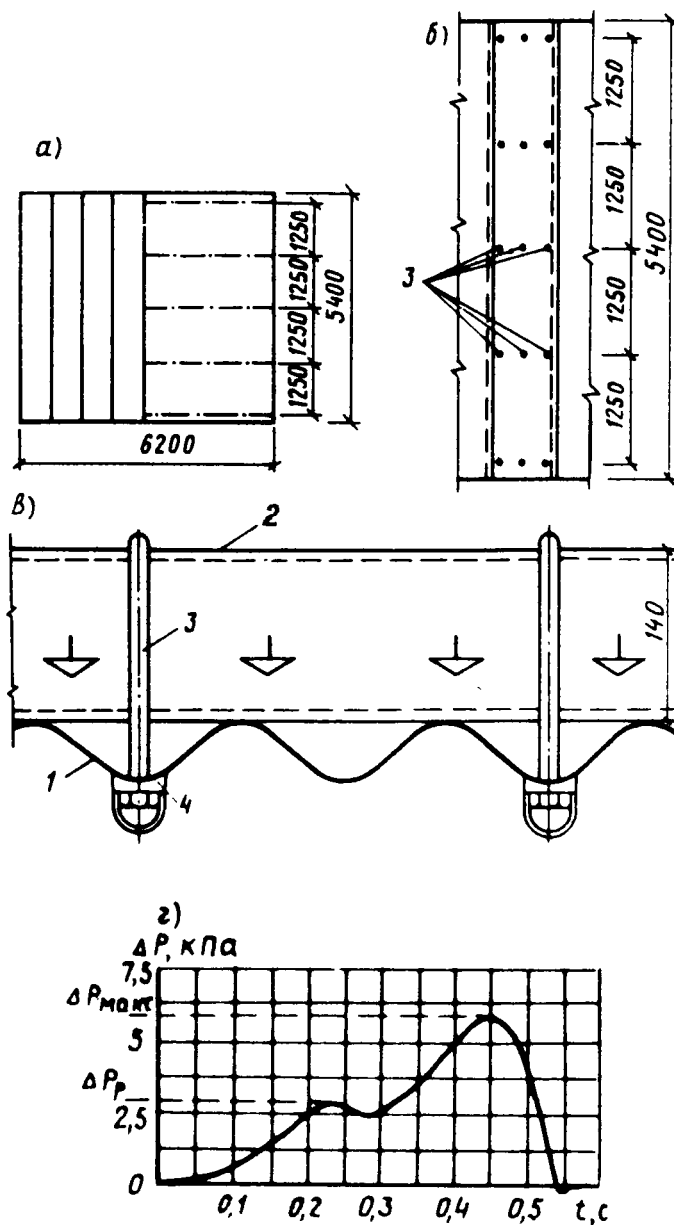


Рис. 3.14. Схема и результаты испытаний алюминиевых волнистых листов при взрыве пропановоздушной смеси в опытной камере объемом 300 м^3

а — схема расположения испытуемых элементов в проеме камеры; б — схема крепления алюминиевого листа к каркасу; в — схема узлов крепления элементов и нагружения их взрывной нагрузкой $P_{\text{взр}}$; 1 — алюминиевый волнистый лист; 2 — элемент каркаса; 3 — крепежный болт; 4 — шайба; г — индикаторная кривая $P=f(t)$ ($\Delta P_p=f(t)$ — разрушающая алюминиевый лист нагрузка; $\Delta P_{\text{макс}}$ — максимальное давление на стенки камеры)

В процессе испытания нагрузка в момент разрушения шайбы достигала 3,5–5,5 кПа. Эксперименты показывают, что использование такого способа крепления ЛСК может позволить ограничивать развивающиеся взрывные нагрузки безопасными величинами при тщательной заводской тарировке надрезов, проводимых на шайбах.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что параметры глухого остекления в целях обеспече-

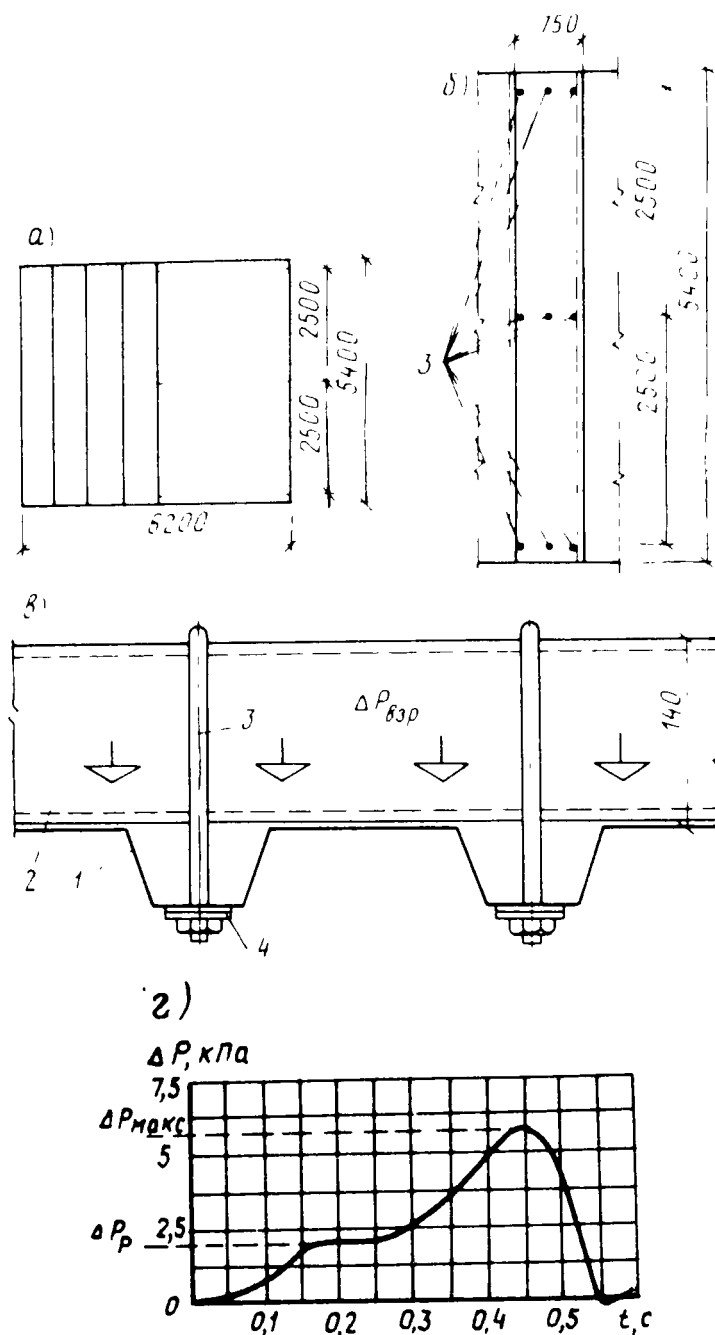


Рис. 3.15. Схема и результаты испытаний алюминиевых листов трапецидального профиля при взрыве угольной пыли в опытной камере объемом 300 м³

а — схема расположения элементов проема камеры; б — размеры испытываемого элемента и схема его крепления к каркасу; в — схема узлов крепления алюминиевых листов и нагружения их взрывной нагрузкой $\Delta P_{\text{взр}}$; 1 — алюминиевый лист трапецидального профиля; 2 — элемент каркаса; 3 — крепежный болт; 4 — шайба; г — индикаторная кривая $P = f(t)$ (ΔP_p — разрушающая алюминиевый лист нагрузка; $\Delta P_{\text{макс}}$ — максимальное давление на стенки камеры)

ния эффективного использования его в качестве ЛСК должны подбираться таким образом, чтобы разрушающие стекло нагрузки не превышали допускаемой величины на основные конструкции. При определении максимального давления взрыва ГВС внутри объема необходимо учитывать общую площадь остекления.

Эффективность смещаемых ЛСК существенно зависит от их массы и площади. Причем наличие первого пика давления в объеме

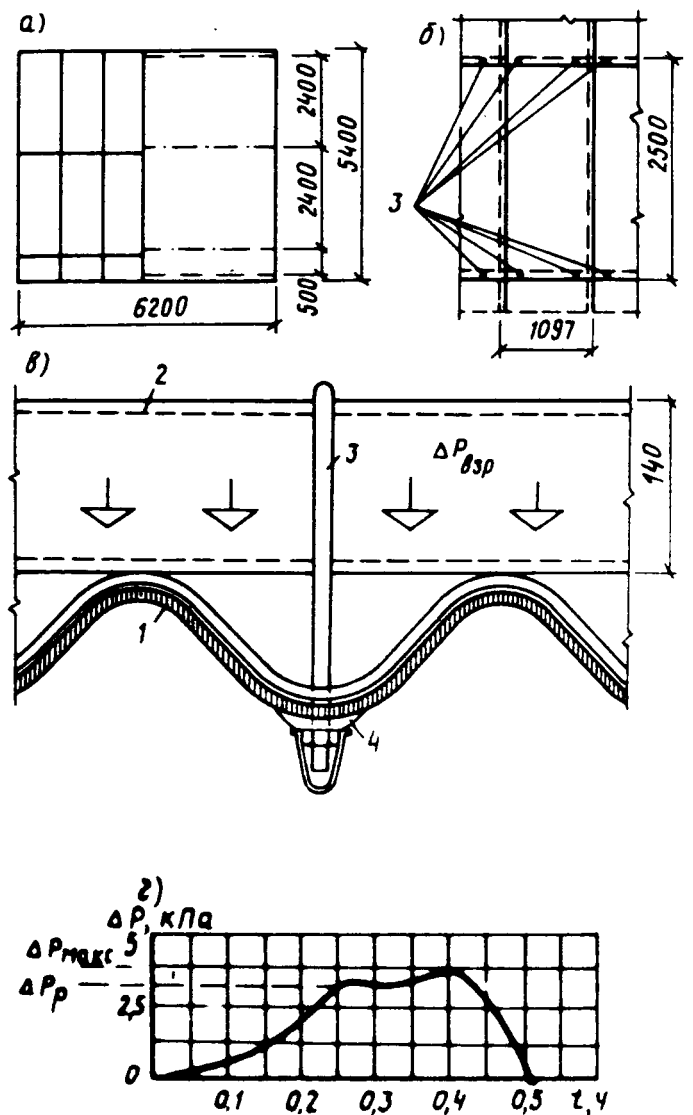


Рис. 3.16. Схема и результаты испытаний полимерных волнистых листов, усиленных стекловолокном, при взрыве угольной пыли в опытной камере объемом 300 м³

а — схема расположения элементов в проеме камеры; б — размеры испытываемого элемента и схема его крепления к каркасу; в — схема узлов крепления полимерных волнистых листов и распределения взрывной нагрузки $\Delta P_{взр}$; г — индикаторная кривая $P = f(t)$; 1 — полимерный волнистый лист; 2 — элемент каркаса; 3 — крепежный болт; 4 — шайба (ΔP_p — разрушающая полимерный волнистый лист нагрузка; $\Delta P_{макс}$ — максимальное давление на стенки камеры)

обусловливается конструктивным решением легкообрасываемого элемента (масса, схема заделки), а второго — площадью отверстия и ускорением горения. Увеличение массы сбрасываемых элементов в покрытии и в стеновом ограждении на изменение максимального избыточного давления внутри опытных объемов имеет нелинейную зависимость.

Из всех видов испытанных ЛСК наиболее эффективными являются ЛСК поворотного типа, выполненные в виде остекленных

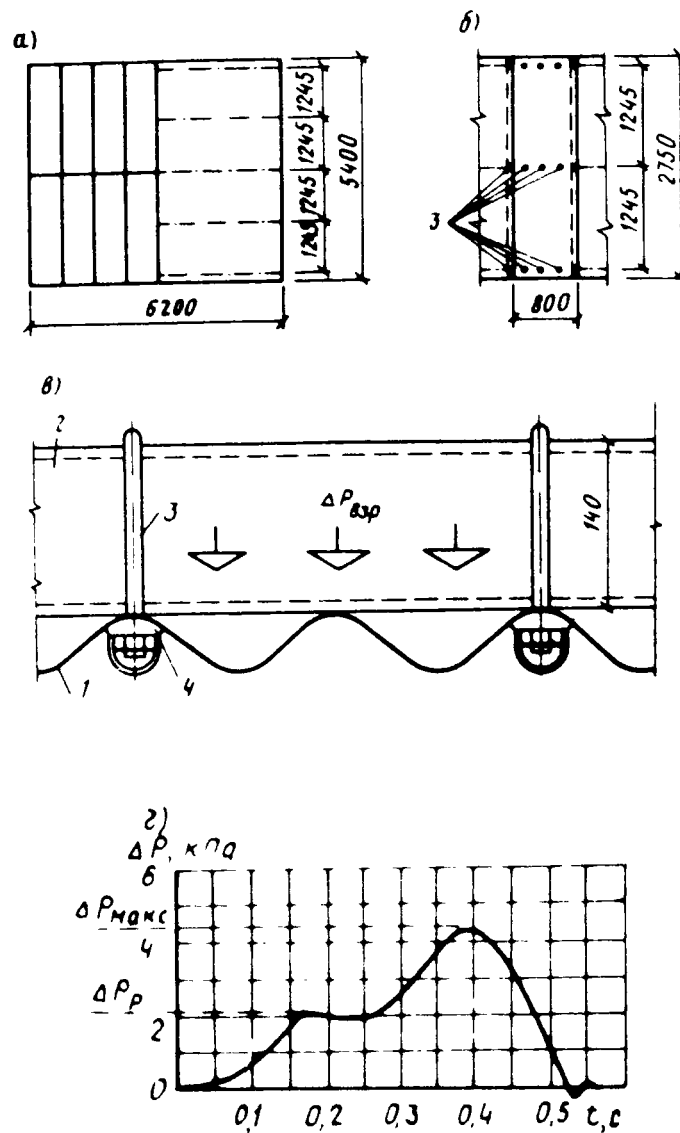


Рис. 3.17. Схема и результаты испытаний асбестоцементных волнистых листов при взрыве угольной пыли в опытной камере объемом 300 м^3

а — схема расположения элементов в проеме камеры; б — размеры испытываемого элемента и схема его крепления к каркасу; в — схема узлов крепления асбестоцементных волнистых листов и нагружения их взрывной нагрузкой $\Delta P_{взр}$; г — индикаторная кривая $P = f(t)$; 1 — асбестоцементный волнистый лист; 2 — элемент каркаса; 3 — крепежный болт; 4 — шайба (ΔP_p — разрушающая асбестоцементный волнистый лист нагрузка; $\Delta P_{макс}$ — максимальное давление на стенки камеры)

переплетов с вертикальным шарниром. В поворотных ЛСК стекло целесообразно заменять неразрушающимся материалом. При устройстве мягкой кровли следует настилать минимально допустимое количество слоев мягкой кровли.

Нагрузки, определяемые по уравнениям (2.25) — (2.27), (2.53) — (2.57), достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать указанные формулы для проведения расчетов при оценке применяемых ЛСК.

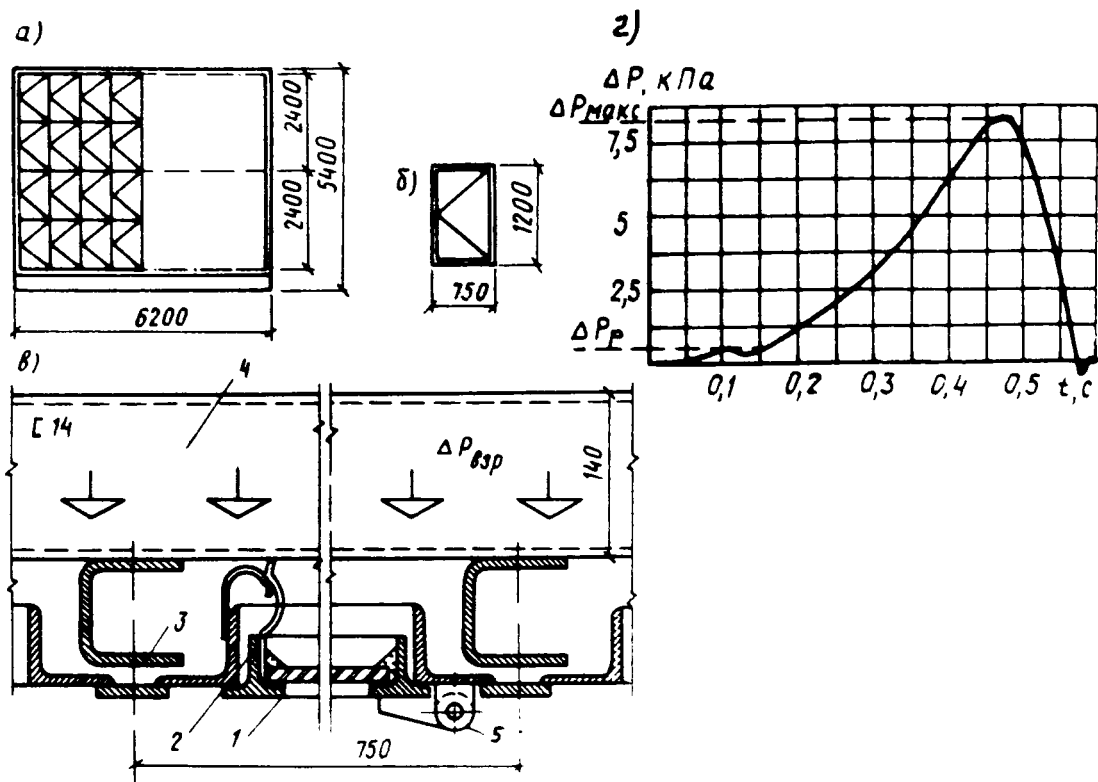


Рис. 3.18. Схема и результаты испытаний стальных поворотных переpleтов со стеклом толщиной 4 мм при взрыве угольной пыли в опытной камере объемом 300 м³

а — схема расположения элементов в проеме камеры; б — размеры элемента; в — схема крепления испытуемых поворотных элементов к каркасу и нагружение их взрывной нагрузкой $P_{взр}$; г — индикаторная кривая $P = f(t)$; 1 — поворотный элемент; 2 — замок; 3 — факхверк; 4 — элемент каркаса; 5 — шарнир (ΔP_p — разрушающая замок нагрузки; $\Delta P_{макс}$ — максимальное давление на стенки камеры)

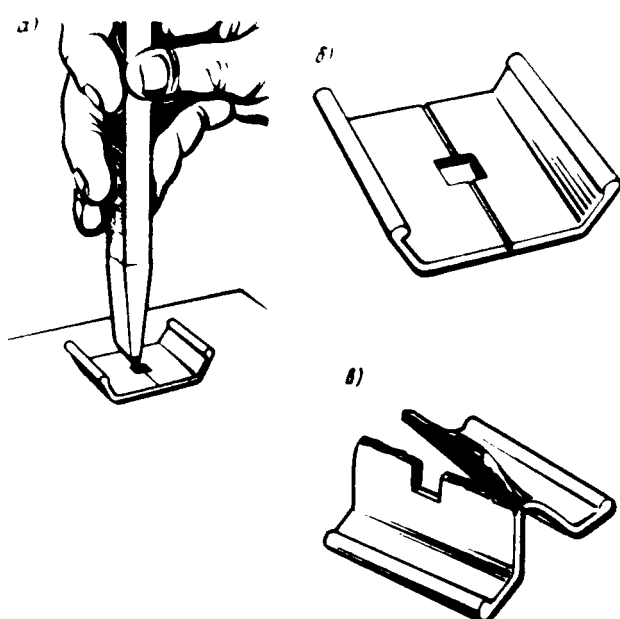


Рис. 3.19. Шайба для крепления легкобрасываемых элементов

а — ослабление сечения шайбы; б — шайба с надрезом; в — вид шайбы после срабатывания легкобрасываемых (стеновых) элементов

3.3. ПРИМЕНЕНИЕ ОСТЕКЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ЛЕГКОРАЗРУШАЮЩИХСЯ И ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Остекленные участки стен в настоящее время принято считать наиболее эффективными для снижения избыточного давления при взрыве внутри помещения горючих смесей по сравнению с другими конструктивными решениями.

В практике промышленного строительства наиболее широкое применение нашли стальные оконные панели серии 1.436-46.6, а в качестве остекления используются стекла толщиной 3; 4 и 5 мм размерами 1050x550, 1050x1100 и 1050x1700 мм. В практике проектирования широкое распространение получила серия 05-5067, размеры стекол 1700x675 и 1100x675 мм. В технических решениях также рекомендуется в качестве легкобрасываемого заполнения оконных проемов применять одинарное остекление толщиной 4 мм.

Эффективность остекления как легкобрасываемых элементов зависит во многом от геометрических размеров стекла и схемы его заделки. Имеющиеся опытные данные показывают, что стекло размером 500x600 мм и толщиной 3 мм разрушается при давлении свыше 4 кПа. Поэтому в ряде случаев при взрывах горючих смесей происходило разрушение и деформация переплетов и несущих конструкций, а остекление при мелком членении стекла разрушалось лишь частично. В табл. 3.11 приведены величины давлений, разрушающие стекло.

Если стекло рассматривается как легкоразрушаемый элемент при взрыве, то остекление рекомендуется принимать одинарное с применением стекол толщиной не более 4 мм, но не исключено использование двойного глухого остекления.

Для помещений с производствами категорий *А*, *Б* и *Е* допускается применение стальных оконных переплетов и механизмов открывания фрамуг только с учетом взрывоопасности. В случае применения других серий оконных переплетов и механизмов открывания должны быть предусмотрены все мероприятия, обеспечивающие предотвращение образования механических искр.

Для уменьшения давления, при котором разрушается глухое остекление, рекомендуется производить надрезку стекол со стороны, противоположной приложению давления взрыва. Установлено, что надрезка приводит к снижению несущей способности стекла от 1,5 до 4,2 раза. При этом снижение разрушающего давления зависит от качества стекла, усилия на стеклорез (3—4 кг) и качества стеклореза. Поэтому при защите зданий остеклением с надрезкой рекомендуется проводить проверку эффекта надрезов определенной партии стекол, например, на проектируемое здание, цех и т.д. На рис. 3.20 и 3.21 приведены рекомендуемые схемы надрезки стекол.

На рис. 3.21 приведено ослабленное крепление стекла, которое отличается от типового тем, что вместо деревянного штапика применяется резиновый уплотнитель и клямеры, работающие на изгиб, прибитые алюминиевым гвоздем ϕ 1,5 мм работающим на срез.

При необходимости применения стекол толщиной более 4 мм следует предусматривать ослабленное их крепление с применением

Т а б л и ц а 3.11. Разрушающее стекло давление, кПа

Размер стекла, мм	Толщина стекла, мм			
	2	3	4	5
1080x1435	—	$\frac{3,1-2,3}{-34}$	$\frac{3,5-2,6}{-20}$	$\frac{3,8-2,8}{-18}$
550x1435	$\frac{4,6-3,9}{17-14}$	$\frac{5,3-4,5}{14-11}$	$\frac{5,8-4,9}{12-16}$	$\frac{6,2-5,1}{10-7}$
1700x675	—	$\frac{4,4-3,9}{17-14}$	$\frac{4,9-4,3}{16-13}$	$\frac{5,3-4,6}{15-12}$
1100x675	—	$\frac{4,5-4}{16-13}$	$\frac{4,9-4,5}{15-12}$	$\frac{5,2-4,8}{14-12}$
975x625	$\frac{5-4,2}{17-14}$	$\frac{5,8-4,8}{15-12}$	$\frac{6,4-5,3}{13-11}$	$\frac{7-5,8}{12-11}$
1575x625	$\frac{4,4-3,8}{18-15}$	$\frac{5-4,3}{17-14}$	$\frac{5,6-4,75}{15-12}$	$\frac{6-5}{13-11}$
975x650	$\frac{4,8-3,9}{19-15}$	$\frac{5,5-4,4}{16-13}$	$\frac{5,8-4,9}{15-12}$	$\frac{6-5,2}{13-12}$
1575x650	$\frac{4,5-3,7}{20-17}$	$\frac{5-4,2}{18-15}$	$\frac{5,6-4,7}{16-13}$	$\frac{6-5}{14-12}$
975x750	—	$\frac{5-4,09}{17-14}$	$\frac{5-4,5}{16-13}$	$\frac{5,3-4,8}{16-12}$
1575x750	—	$\frac{3,5-2,6}{19-16}$	$\frac{4-3}{17-14}$	$\frac{4,4-3,3}{15-13}$
1575x1175	—	$\frac{1,8-1,4}{-26}$	$\frac{2-1,6}{25-22}$	$\frac{2,1-1,7}{21-18}$
1050x550	—	$\frac{4,6-4,2}{-}$	$\frac{5,8-5,2}{-}$	$\frac{6-5,2}{-}$
1100x1050	—	$\frac{2,5-3}{-}$	$\frac{3,6-4}{-}$	$\frac{4,8-4,2}{-}$
1050x1700	—	$\frac{1,5-2}{-}$	$\frac{2-2,5}{-}$	$\frac{2,8-4}{-}$

П р и м е ч а н и е. В числителе — разрушающее кратковременное давление, кПа, в знаменателе — наибольший прогиб при разрушении, мм.

кляммер, работающий на изгиб или алюминиевых гвоздей, работающих на срез.

При применении двойного остекления (любого размера стекла и любой толщины) панели устанавливают с выполнением ослабленного крепления, т.е. предполагается, что такие панели будут работать как легкобрасываемые конструкции. При применении ослабленных креплений должны быть учтены ветровые нагрузки, особенно для VI ветрового района СССР и сопротивление от применяемых герметичных прокладок.

Представляет интерес практика проектирования Госхимпроектом Госстроя СССР двойного остекления в качестве легкобрасываемых элементов. Детали крепления легкобрасываемого оконного заполнения проемов разработаны для четырех вариантов. Первый вариант предусматривает разрыв болта, ослабленного шейкой (рис. 3.22). Второй вариант рассчитан на разрушение ломающе-

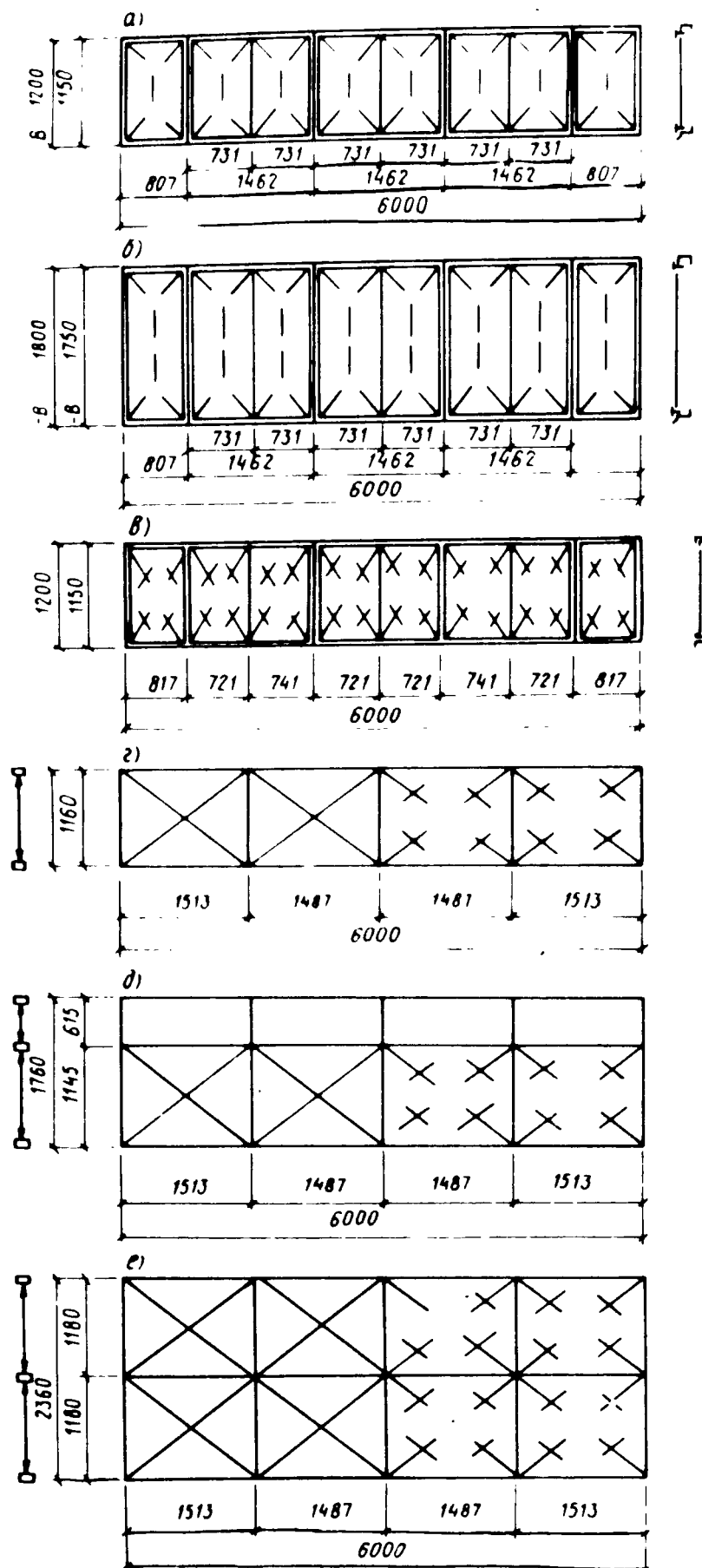


Рис. 3.20. Схема надрезки стекол в стальных переплетах с одинарным остеклением

а – ПГ 120-В; ПГ 115-В; ПО 120-В; ПО 115-В; б – ПГ 180-В; ПГ 175-В; ПО 180-В; ПО 175-В; в – ПГ 120А; ПГ 115А; г, д, е – стальные по серии 1.436-4 вып. 1, 1.ПОГ-6,0-1,2; 2-ПОГ-6,0-1,8; 3-ПОГ-6,0-2,4

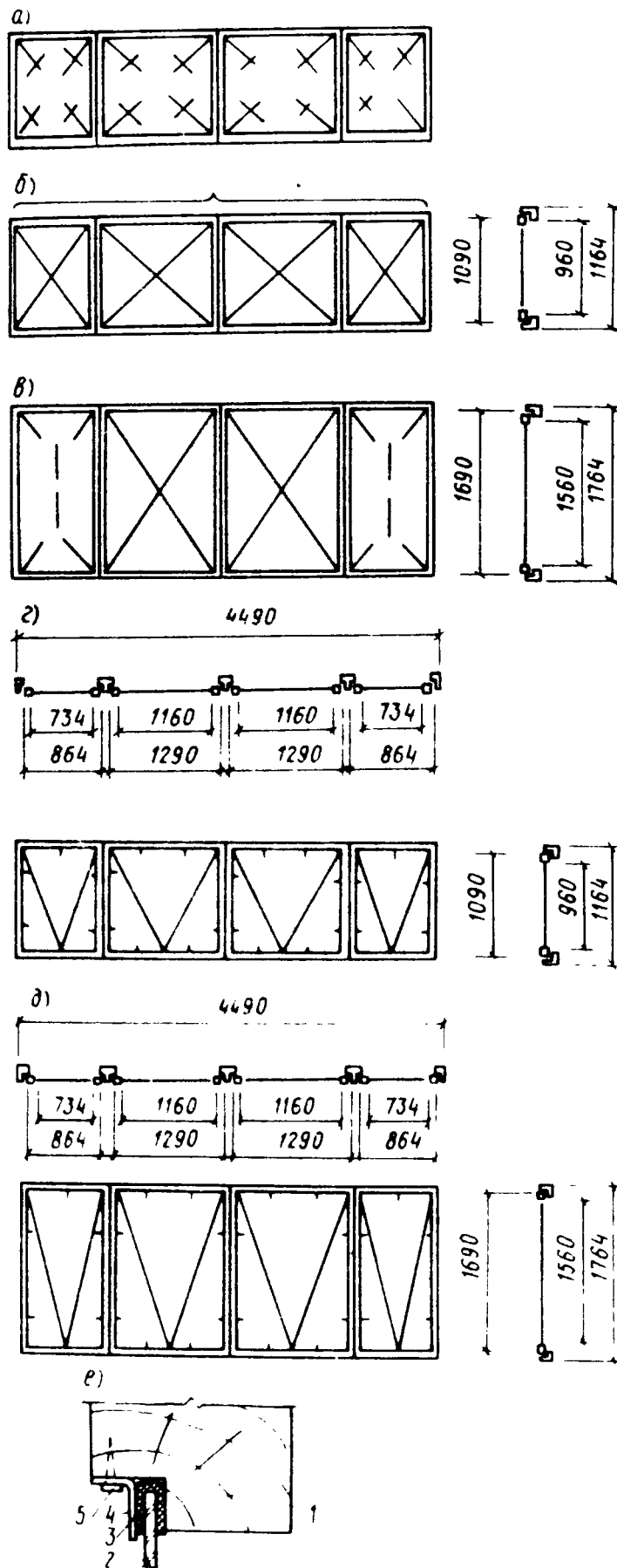


Рис. 3.21. Схемы надрезки стекол в деревянных переплетах с одинарным остеклением

а; б — Н5-124, Н9-174; в — Н6-124, Н10-174; г — Н5-124, Н9-174; д — Н6-124, Н10-174; е — деталь ослабленного крепления стекла; 1 — рама; 2 — стекло; 3 — резиновый уплотнитель; 4 — кляммер; 5 — гвоздь

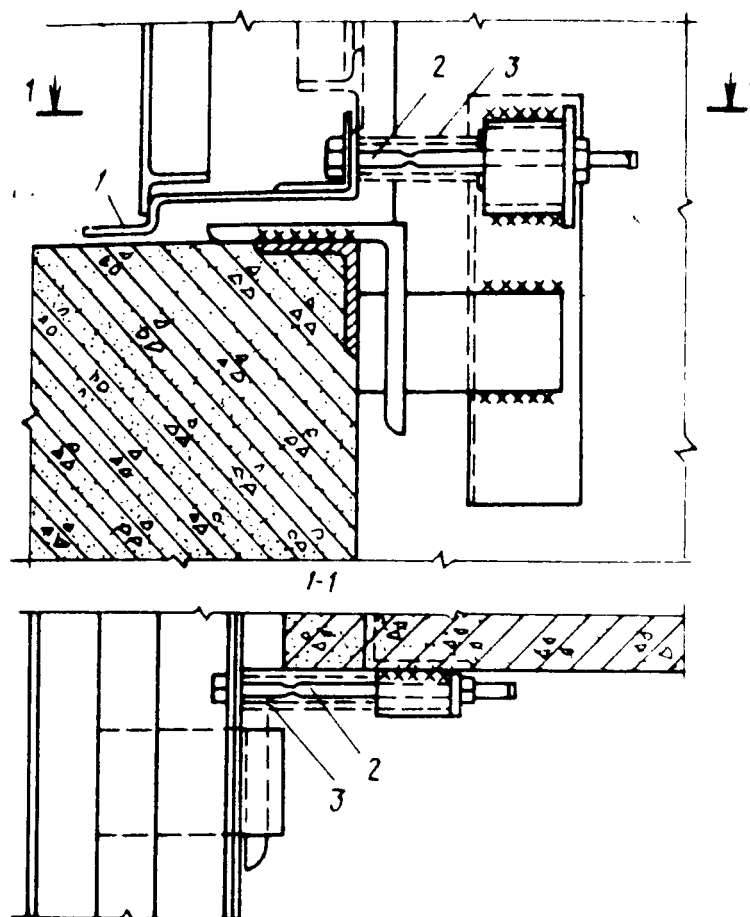


Рис. 3.22. Схема крепления легкобрасываемого оконного заполнения болтом $\phi 18$, ослабленного шейкой $\phi 8$

1 — оконное заполнение; 2 — болт; 3 — упорная гильза

гося элемента (рис. 3.23). Третий вариант рассчитан на отгиб концов стальной шпильки (рис. 3.24) и четвертый вариант — на выдергивание шурупов из деревянной бобышки (рис. 3.25). При разработке предлагаемых вариантов учитывались усилия от воздействия ветра для VI ветрового района СССР. При этом не учитывались усилия, которые могут возникнуть от заделки швов герметичными прокладками.

Кроме глухого остекления разработаны легкооткрывающиеся деревянные оконные переплеты серии 1-436-4 (рис. 3.26). Применение переплетов для легкооткрывающихся окон исключает устройство коробок. Переплет одинарный или двойной спаренный устанавливается на осях (см. рис. 3.26) и снабжается фиксаторами.

Другой вариант конструкции легкооткрывающихся окон с использованием переплетов предусматривает при вскрытии смещение оси вращения на $1/4$ размера проема, а также замену герметиков со стальными профилями в притворе на герметик из пористой резины или пенополиуретана.

Для заполнения оконных проемов в наружном ограждении зданий со взрывоопасными производствами следует рекомендовать окна серии 1.436.2-15 с переплетами из спаренных прямоугольных стальных труб. Окна с переплетами из спаренных стальных

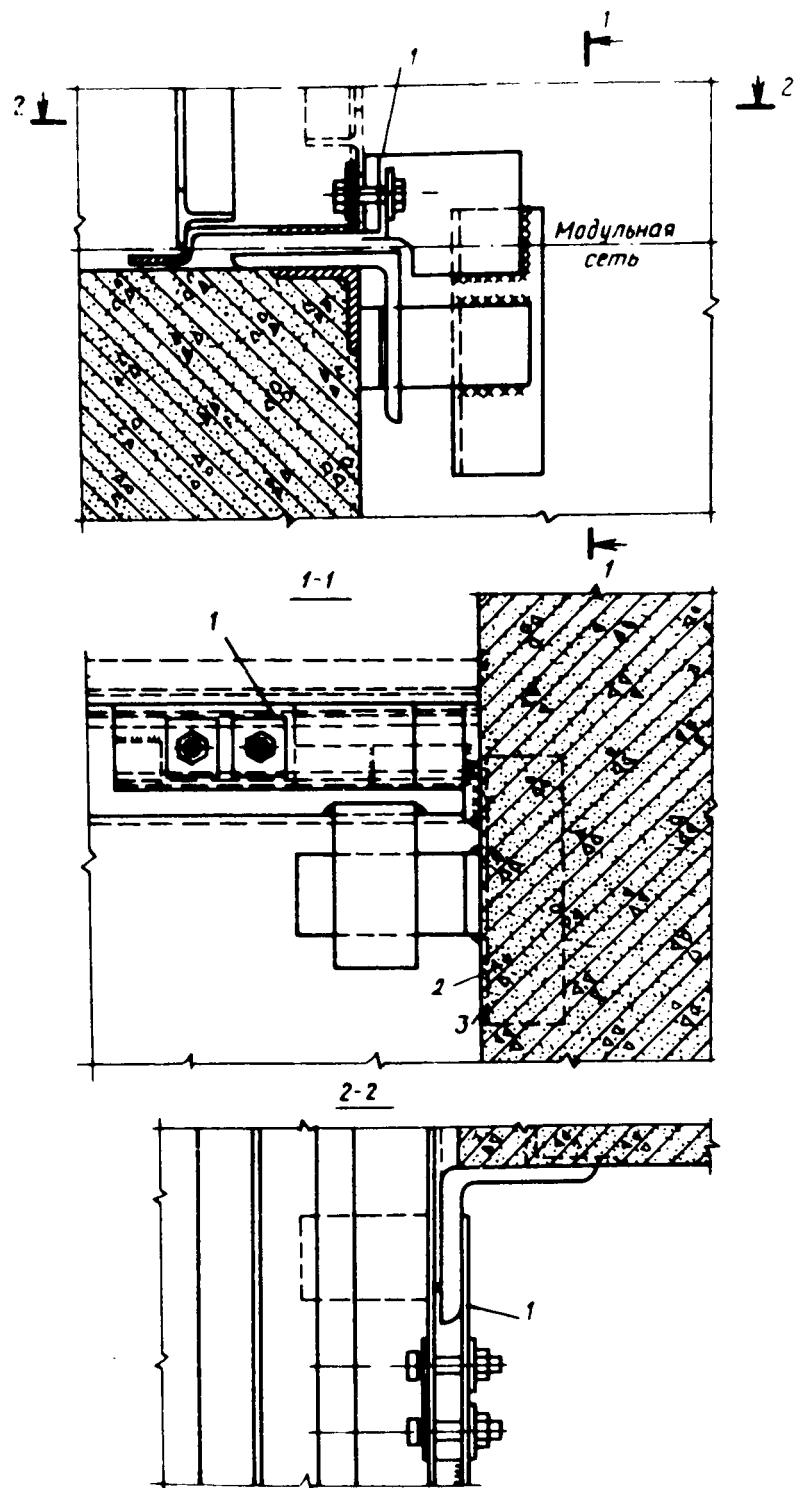


Рис. 3.23. Деталь крепления узла легкобрасываемого заполнения оконных проемов, предусматривающая разрушение ломающегося элемента
 1 — ломающийся элемент; 2 — закладная деталь; 3 — колонна

труб по серии 1.436.2-15 взаимозаменяемы с типовыми навесными стеновыми панелями и предназначены для заполнения оконных проемов как одним ярусом (при высоте проема от 0,6 до 2,4 м), так и несколькими ярусами при большей высоте оконного проема. В качестве легкобрасываемых конструкций для заполнения оконных проемов рекомендуется использовать следующие марки переплетов: ОСН 60.12; ОСР 60.18; ОСР 60.12; ОСР 60.18 с габа-

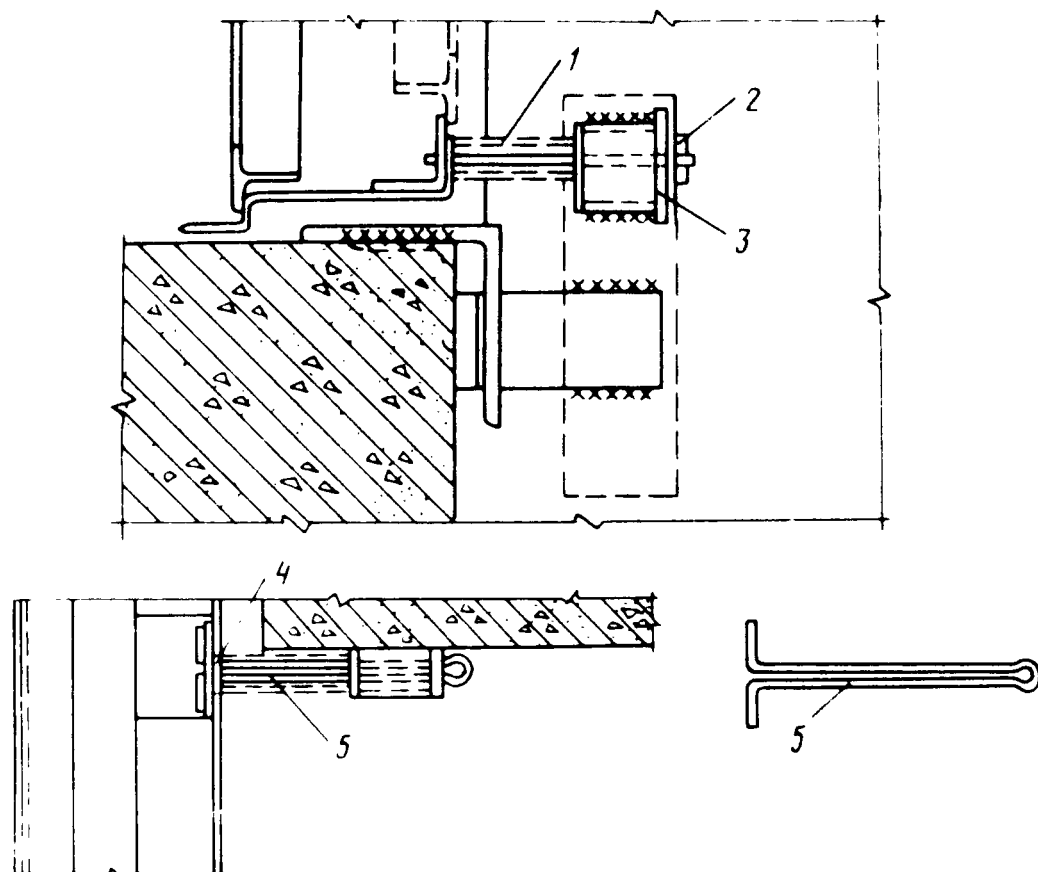


Рис. 3.24. Деталь крепления легкобрасываемого заполнения оконных проемов, предусматривающая отгиб концов стальной шпильки
1 — упорная гильза; 2 — упорный штырь; 3 — шайба; 4 — овальное отверстие для шпильки; 5 — стальная шпилька

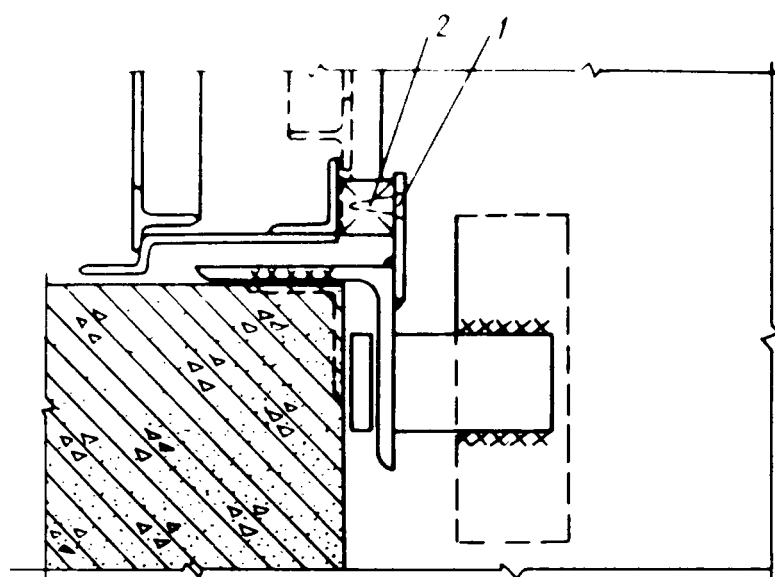
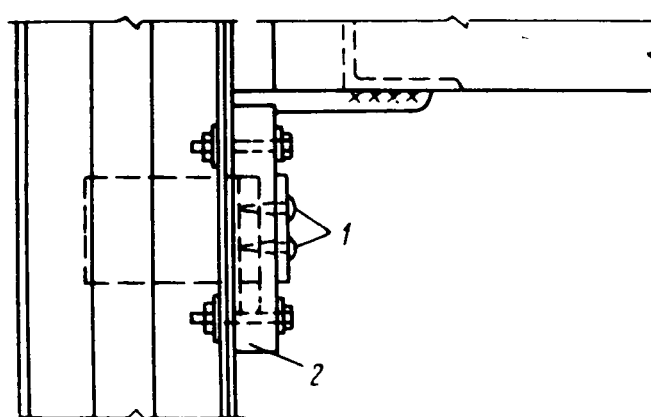


Рис. 3.25. Деталь крепления узла легкобрасываемого заполнения оконных проемов, предусматривающая выдергивание шурупов из деревянной бо-
бышки
1 — шурупы; 2 — деревянная бо-
бышка



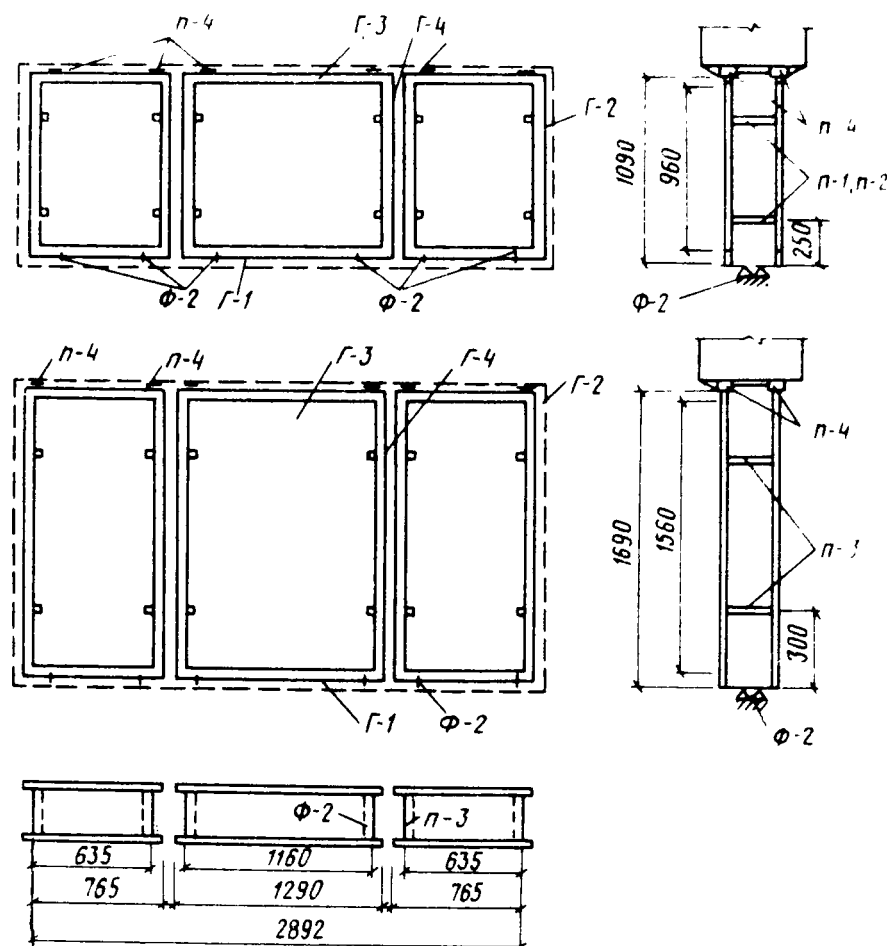


Рис. 3.26. Форма и основные размеры верхнеподвесных легковскрывающихся переплетов при двойном остеклении
 П1-3 — подвески-ломатели; П-4 — петли; Г-1-3 — герметики-уплотнители; Ф-2 — фиксатор

ритными размерами листового стекла 1200x1200 и 1200x1800 мм и толщиной пластины не более соответственно 3 и 4 мм.

Использование остекления в качестве ЛСК не всегда выгодно экономически, при больших площадях остекления значительно увеличиваются эксплуатационные расходы на его содержание, а также осложняется обеспечение стабильности теплового режима в здании. Кроме того, разрушаемое при взрывах стекло создает дополнительную опасность для людей, находящихся в зоне взрыва.

Для заполнения световых проемов применяют также светопрозрачные материалы из пластика. Такие качества пластмасс как прозрачность, легкость при достаточной прочности, коррозионная стойкость ставит их в число наиболее эффективных и совершенных ЛСК.

Благодаря отсутствию переплетов светопрозрачные панели из стеклопластиков по сравнению с обычным заполнителем оконных проемов обладают большей светопрозрачностью и меньшей массой. Панели могут выполняться целиком открывающимися.

В качестве ЛСК наряду с остеклением могут применяться облегченные стеновые панели, которые находят применение в строительстве.

3.4. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ СТЕНОВЫХ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основным видом стеновых ограждений промышленных зданий в настоящее время являются крупнопанельные облегченные ограждающие конструкции. Замена сплошных стен с оконными проемами ограждениями из легких крупноразмерных панелей позволяет полностью использовать вертикальное ограждение для размещения в нём ЛСК.

В одноэтажных зданиях применение легкобрасываемых стеновых ограждений в некоторых случаях позволяет отказываться от устройства легкобрасываемых элементов в покрытии.

Основная используемая в строительстве промышленных зданий со взрывоопасными производствами стеновая панель — керамзитобетонная. Панель представляет однослойную конструкцию из керамзитобетона с плотностью в сухом состоянии 900 кг/м^3 и маркой М50. Масса 1 м^2 в зависимости от толщины составляет 195–320 кг. Толщина панели принимается равной 160; 200; 240 и 300 мм. Высота панели 1,2 м. Узел крепления панели к колонне выдерживает давление взрыва 50 кПа (табл. 3.12). Панель из автоклавного ячеистого бетона марки 35 плотностью 700 кг/м^3 имеет поверхностную плотность 1 м^2 от 125 до 250 кг, узлы же крепления панели и колонны также разрушаются при давлении не менее 50 кПа.

ГПИ проектстальконструкция совместно с ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко разработал ограждающие конструкции из трехслойных панелей с обшивками из алюминиевых сплавов и утеплителем из полистирольного пенопласта. Номинальный размер панели $6,0 \times 1,5 \text{ м}$, толщина 140 мм. Обшивка панелей выполнена из гладких листов алюминиевого сплава АМцП толщиной 1 мм. По контуру панель окаймляется рамкой швеллерного сечения, составленной из двух уголков $20 \times 20 \times 2 \text{ мм}$ и стенки из древесноволокнистой плиты толщиной 4 мм, оклеенной снаружи листом из алюминиевого сплава толщиной 0,5 мм. Все элементы панели с поверхностной плотностью $20,2 \text{ кг/м}^2$ склеиваются между собой синтетическим клеем холодного отверждения.

ЦНИИпромзданий совместно с ЦНИИСК разработал для промышленных зданий взрывоопасных производств бескаркасные трехслойные панели из листовых материалов размером $1,2 \times 3,0 \text{ м}$. Стеновая панель представляет конструкцию, состоящую из наружных облицовочных слоев и внутреннего теплоизоляционного слоя. В качестве облицовочного слоя используются листовые материалы: асбестоцемент, алюминий, стеклопластик. Для внутреннего облицовочного слоя — цементный фибролит, плитный пенопласт, пеностекло. Соединение производится на клею. В зависимости от применяемых материалов толщина панелей колеблется от 52 до 120 мм, а поверхностная плотность от 8 до 77 кг/м^2 (рис. 3.27).

Конструктивные характеристики стеновых легкобрасываемых панелей и разрушающие их нагрузки приведены на рис. 3.28–3.31 в табл. 3.12.

В конструкции легкобрасываемых стеновых панелей большое значение имеет решение деталей, их крепление к основным конструкциям, обеспечивающих сбрасываемость панелей при минималь-

Т а б л и ц а 3.12. Нагрузки, разрушающие элементы крепления стеновых ограждающих легкосбрасываемых конструкций

Тип ограждающей конструкции	Геометрические размеры, м			Поверхностная плотность, кг/м ²	Элемент крепления и его напряженное состояние	Расчетное сопротивление материала крепления при особом сочетании нагрузок, кН/см ²	Нагрузка, разрушающая узел крепления ЛСК, кПа
	высота	ширина	толщина				
1	2	3	4	5	6	7	8
Керамзитобетонная панель сплошного сечения плотностью 900 кг/м ³	1,2	6	0,16	195	Арматурный стержень ϕ 14 мм растяжение	60	50,3
			0,2	222			
			0,24	264			
			0,3	320			
Панели из автоклавного ячеистого бетона плотностью 700 кг/м ³	1,2	6	0,16	125	Арматурный стержень ϕ 14 мм	60	50,3
			0,2	167			
			0,3	250			
			0,16	110	Арматурный стержень ϕ 14 мм	60	50,3
Панели из автоклавного ячеистого бетона плотностью 550 кг/м ³	1,2	6	0,16	110	Арматурный стержень ϕ 14 мм	60	50,3
			0,2	140			
	2,4	6	0,31	47 и 59	Арматурный стержень ϕ 12 мм растяжение	60	11
	3						
Стеновая панель из профилированного настила с заполнением стеклом или минераловатным материалом	3,6						
	4,2						
	4,8 до 12						
Стеновая панель с профилированным листом и несгораемым утеплителем из жестких минераловатных плит	2,4	3	0,18	35	Стержень с резбой М 6, растяжение	60	7,9
	3						
	3,6						
	4,2 до 12						
Стеновая асбестоцементная экструзионная панель	6	0,6	0,12	71	Стержень с резбой М 8, растяжение	60	9,3
			0,14	91			
			0,16	97			
			0,18	108			

Стеновая панель ПСМ	3	6	0,12	45	Стержень с резьбой М 16, растяжение	60	7,9
Стеновая асбестоцементная панель СКВр для завода СКГ, проект Гипрокаучука:	3	6	0,16	82	Болт М 14, растяжение	73	67,2
проектное решение фактическое выполнение					Арматурный стержень ϕ 16, срез	35	35,7
Волнистые асбестоцементные листы	2,5	1,097					3,2
Волнистые алюминиевые листы	5,4	0,65			Болт М 8, растяжение	60	2,6
Алюминиевые листы трапецеидального профиля	5,4	0,65			Болт М 8, растяжение	60	3,3

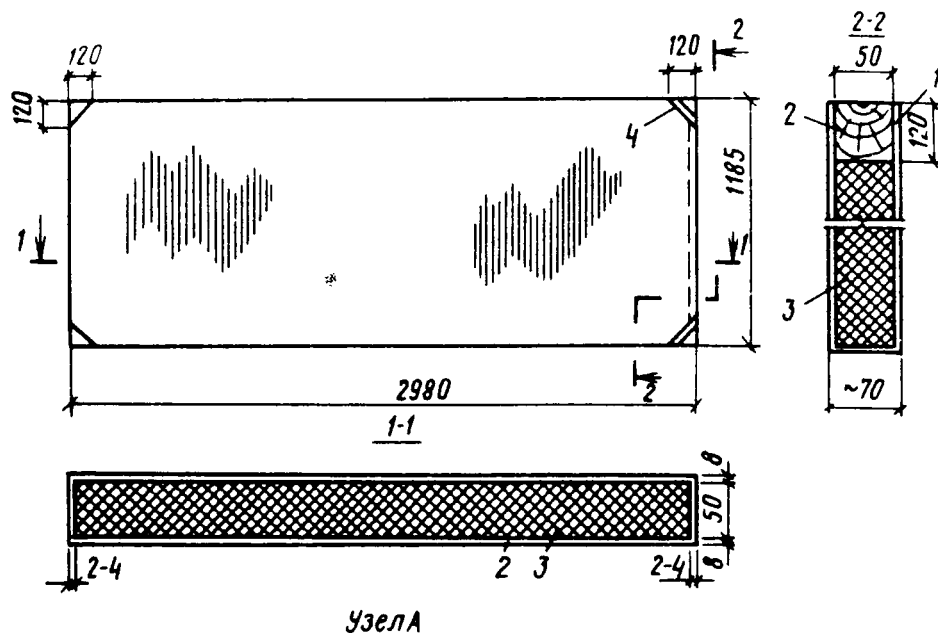


Рис. 3.27. Опытная стенная панель ОП-1
1; 2 — асбестоцементные листы; 3 — пенопласт марки ПС-Б;
4 — антисептированная деревянная бобышка

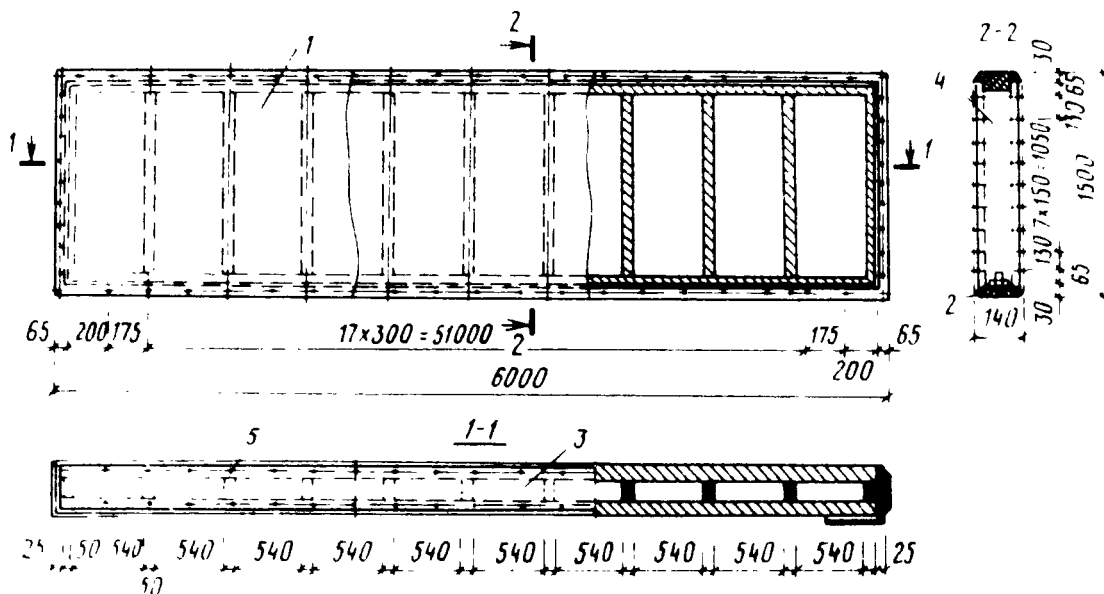


Рис. 3.28. Стенная панель с алюминиевыми обшивками
1 — обшивка из алюминиевого сплава; 2 — нащельник из листа; 3 — древесно-волоконная плита; 4 — полистирольный пенопласт; 5 — облицовка листом толщиной 0,5 мм

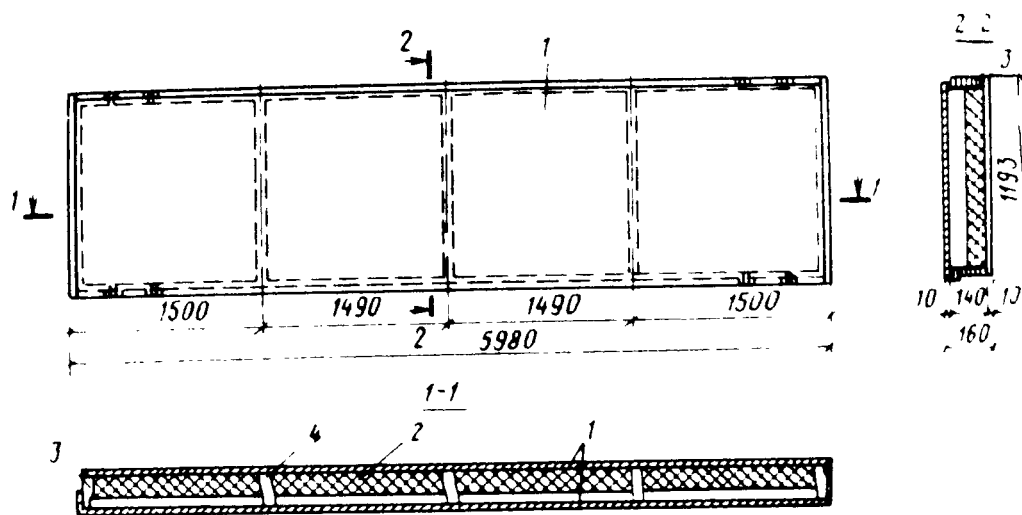


Рис. 3.29. Стеновая трехслойная асбестоцементная панель
1 — асбестоцементные листы; 2 — пенопласт или минеральные маты; 3 — обвязка из фиброцементных листов; 4 — каркас из фиброцементных брусков

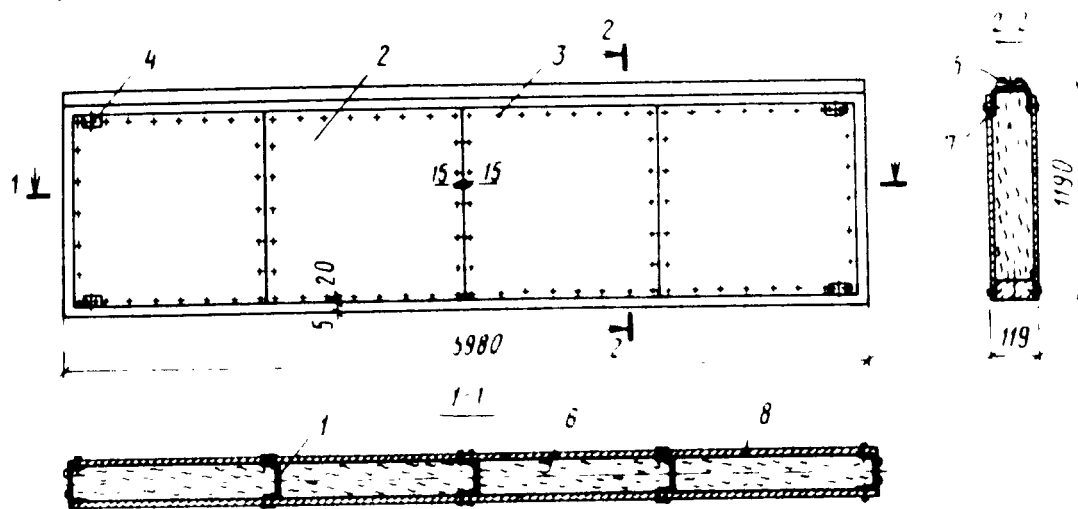


Рис. 3.30. Стеновая асбестоцементная панель сплошного сечения на алюминиевом каркасе

1 — каркас из алюминиевых сплавов; 2 — асбестоцементные листы; 3 — стальные винты; 4 — стальная накладка; 5 — губчатая резина или поризол; 6 — листовый пенопласт или минеральные маты; 7 — прокладка из бреззла, покрытая битумной мастикой; 8 — битумная пароизоляция

ной взрывной нагрузке. На рис. 3.32, 3.33 приведены схемы крепления к основным несущим конструкциям бескаркасных трехслойных панелей из листовых материалов длиной 3 м, разработанные ЦНИИпромзданий совместно с ЦНИИСК и НИИСФ. Конструкции панелей позволяют использовать различные листовые материалы в соответствии с условиями эксплуатации стен. Имеющиеся конструкции каркасных панелей из листовых материалов длиной 6 м предусматривают применение асбестоцементных листов (ЦНИИСМ), нестойких во влажной среде или алюминиевых листов (ГПИ проектстальконструкция).

Бескаркасные трехслойные панели состоят из наружных слоев и внутреннего теплоизоляционного слоя из пенополистирола. Соединение производится на клею. Наружные слои выполняются

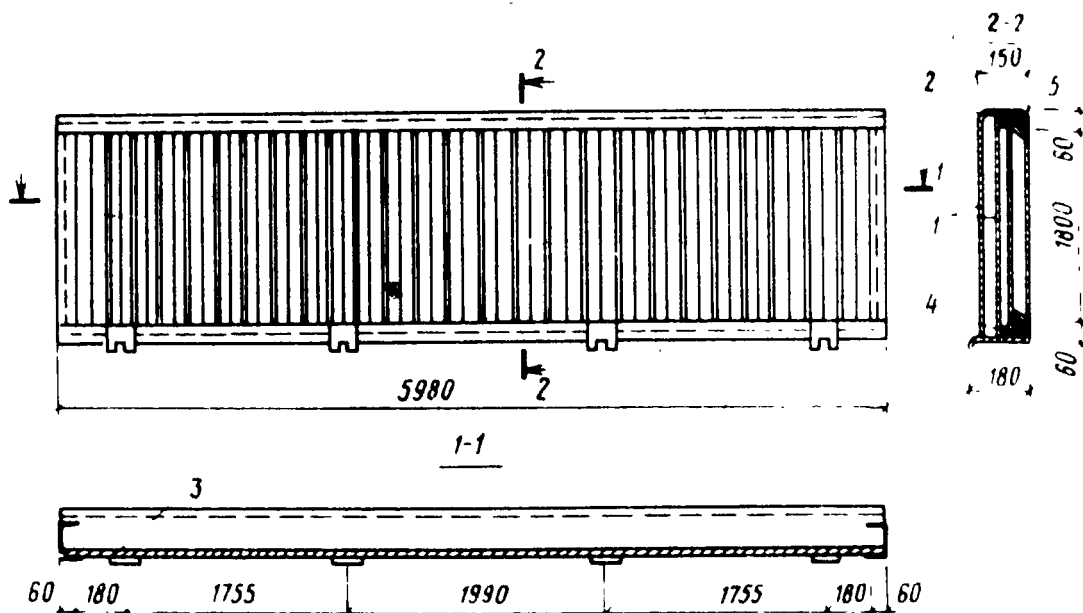


Рис. 3.31. Светопрозрачная панель из стеклопластика

1 — стеклопластик светопрозрачный волнистый толщиной 1,5 мм; 2 — гнутый алюминиевый профиль толщиной 4 мм; 3 — уплотнитель резинокбитумный; 4 — брусок; 5 — утеплитель

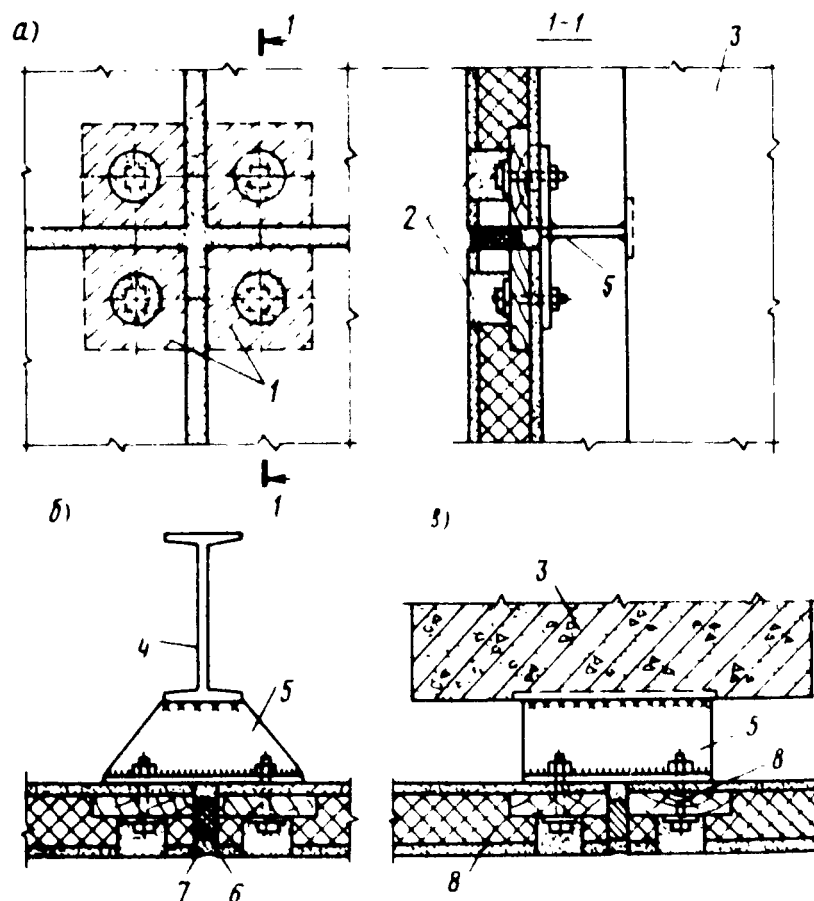


Рис. 3.33. Крепление рядовых легкобрасываемых панелей к каркасу здания

а — крепление плит по вертикали к колонне; б — крепление плит по горизонтали к фахверку; в — крепление плит по горизонтали к колонне; г — крепление плит по вертикали к колонне; 1 — деревянные бобышки в углах панели; 2 — пробки из цементного раствора; 3 — железобетонная колонна; 4 — стойка фахверка; 5 — кронштейн; 6 — герметическая прокладка; 7 — маскика УМ-40; 8 — стеновая панель

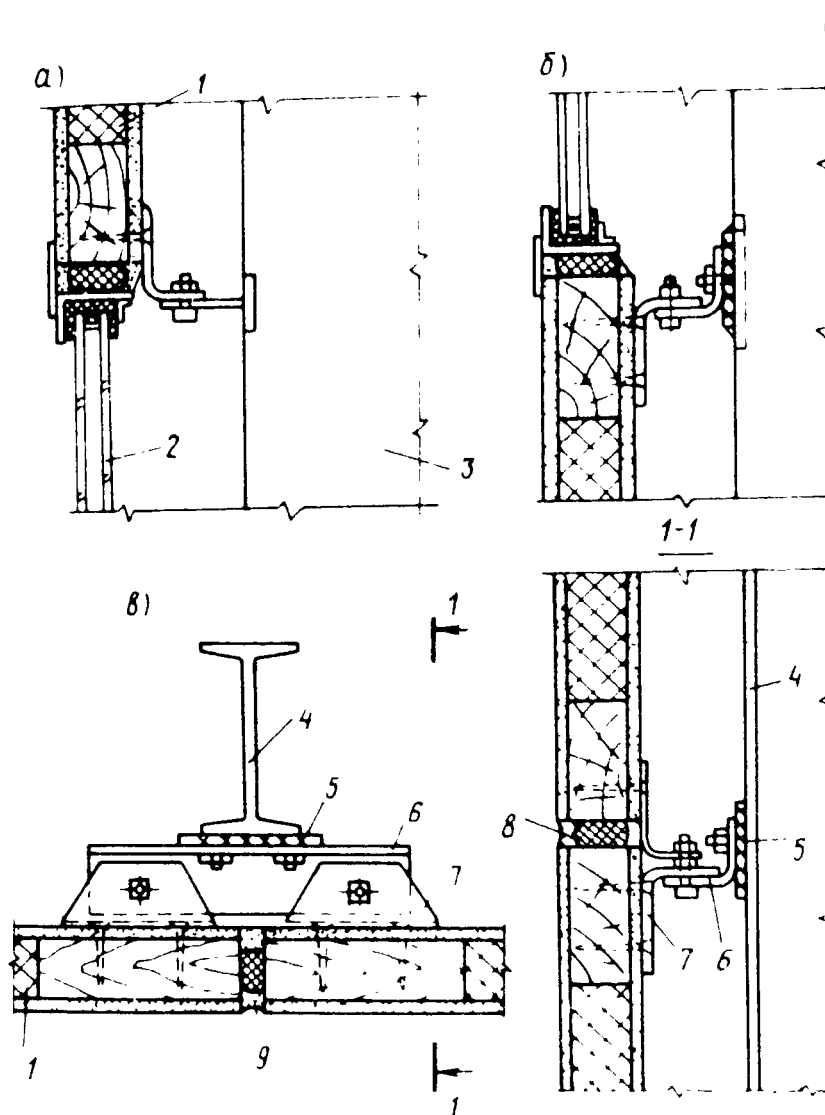


Рис. 3.32. Схемы крепления рядовых легкобрасываемых панелей к каркасу зданий

*а — над оконными проемами к железобетонной колонне;
б — под оконными проемами к железобетонной колонне;
в — к стойке фахверка; 1 — стеновая панель; 2 — оконная панель; 3 — железобетонная колонна; 4 — стойка фахверка; 5 — прокладка; 6 — уголок; 7 — кронштейн; 8 — герметичная прокладка; 9 — мастика УМ-40*

из плоских асбестоцементных листов толщиной 8 мм. В зависимости от наличия и вида агрессивных воздействий облицовочные листы с внутренней стороны панели могут быть приняты из листов алюминия, плакированной стали, закаленного или упругогибкого стеклошлякоситалла и др. Системы креплений рассчитываются на излом внутреннего слоя панелей на участках креплений при действии взрывной нагрузки.

Детали креплений для легкобрасываемых панелей разработаны при откосе стен от наружной грани колонн на 70 мм. Откос стен позволяет приблизить крепление к торцам панелей, что обеспечивает сокращение площади излома. При таком решении создаются более благоприятные условия монтажа крепления и условия их эксплуатации, особенно во взрывоопасной и агрессивной среде.

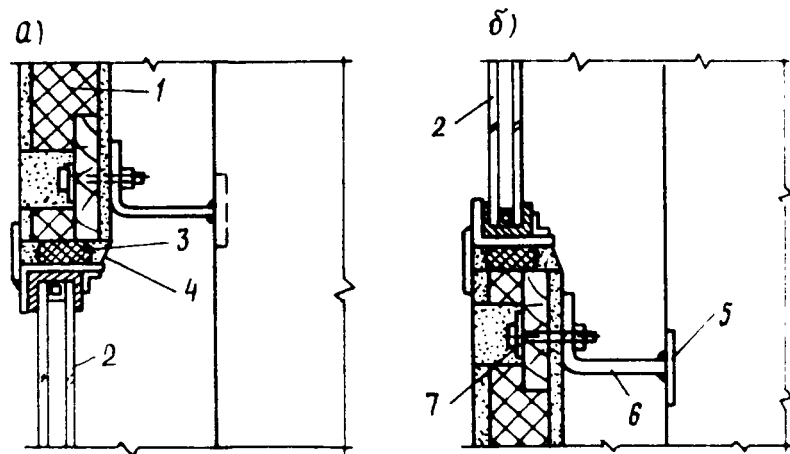


Рис. 3.34. Вариант с потайным креплением легко-сбрасываемой панели к каркасу здания

а — над оконным проемом; б — под оконным проемом; 1 — стеновая панель; 2 — оконная панель; 3 — герметическая прокладка; 4 — мастика УМ-40; 5 — закладная деталь в колонне; 6 — кронштейн; 7 — болт

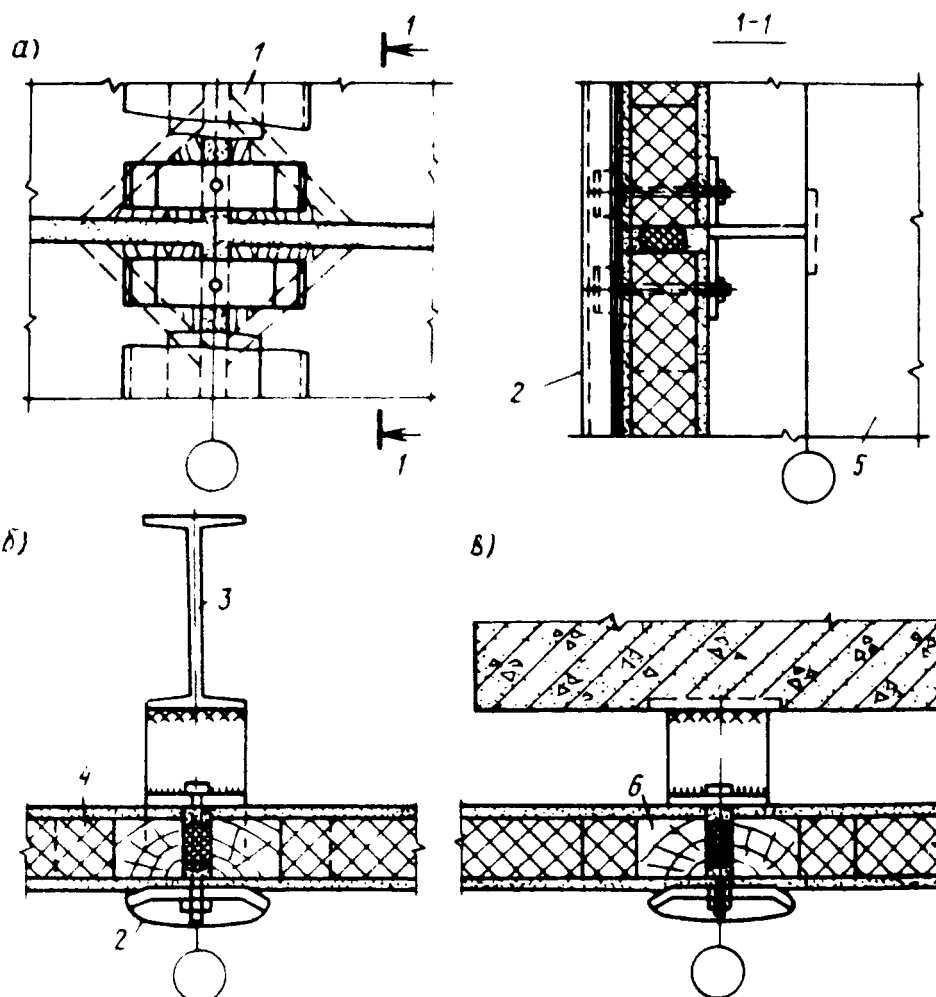


Рис. 3.35. Вариант с потайным креплением легко-сбрасываемой панели к каркасу здания

а — крепление плит по вертикали к колонне; б — крепление плит по горизонтали к стойке фахверка; в — крепление плит по горизонтали к колонне; 1 — резиновая прокладка; 2 — нащельник; 3 — стойка фахверка; 4 — стеновая панель; 5 — железобетонная колонна; 6 — герметическая прокладка

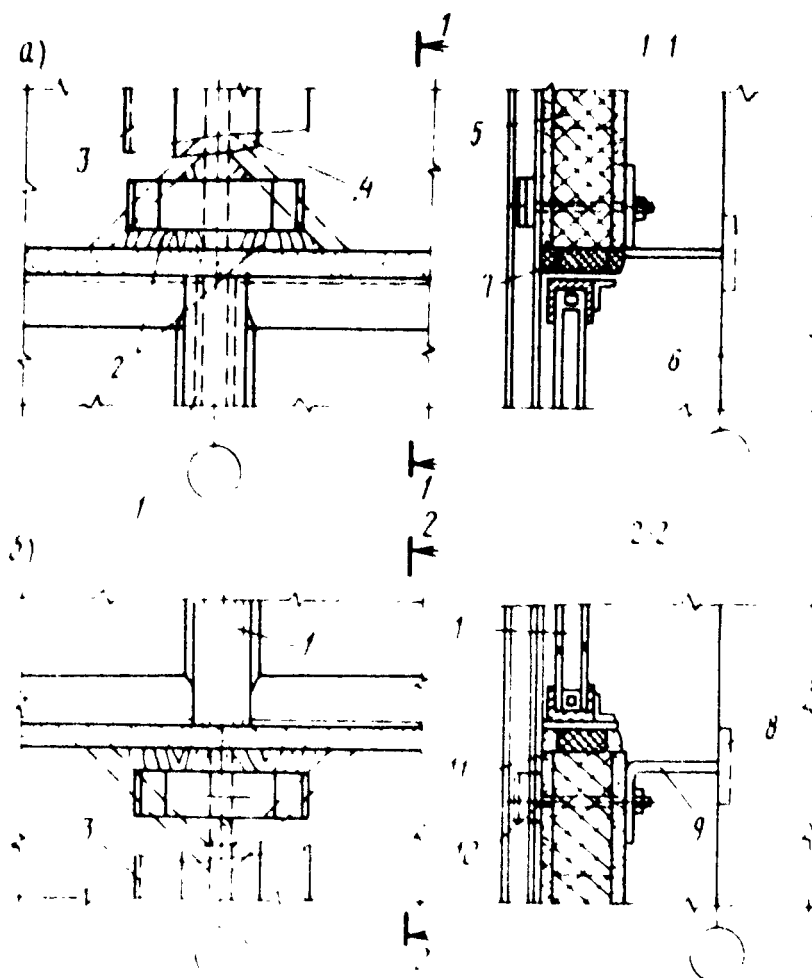


Рис. 3.36. Вариант с навеской панели на уголки
а - над оконными проемами, б - под оконными проемами; 1 - оконная панель; 2 - деревянные бобышки; 3 - нащельник; 4 - резиновая наклейка; 5 - стеновая панель; 6 - железобетонная колонна; 7 - мастика УМ-40; 8 - закладная деталь в колонне; 9 - кронштейн; 10 - болт; 11 - герметичная прокладка

Крепления состоят из Т-образных анкеров и вертикальных нащельников из алюминиевых профилей.

С целью уменьшения сопротивления панели взрывной нагрузке в углах наружного асбестоцементного листа делают вырезы для опирания крепежного болта непосредственно на деревянную бобышку, закладываемую в панель во время ее изготовления.

Вариант с потайным креплением отличается отсутствием нащельников и расположением крепежного болта в толще панели (рис. 3.34, 3.35).

Один из вариантов крепления панели (рис. 3.36) предусматривает навеску панелей в двух верхних углах при помощи уголков, предварительно прикрепленных к панели. Верхняя панель крепится к нижней специальной скобой (ветровым крючком). Все соединительные болты и элементы должны быть оцинкованными. Другой вариант предусматривает крепление только верхней части панели с помощью алюминиевого нагеля.

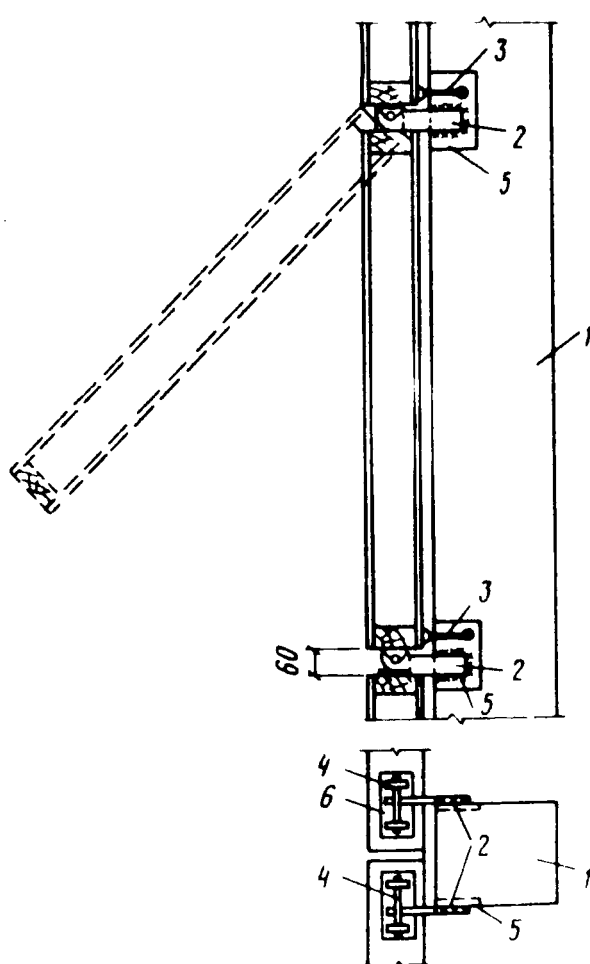


Рис. 3.37. Конструкция шарнирно-поворотной легкобрасываемой стеновой панели с верхним горизонтальным шарниром

1 — колонна; 2 — соединительная деталь; 3 — стягивающий анкер; 4 — закладная деталь стеновой панели; 5 — закладная деталь колонны; 6 — закладная деталь панели

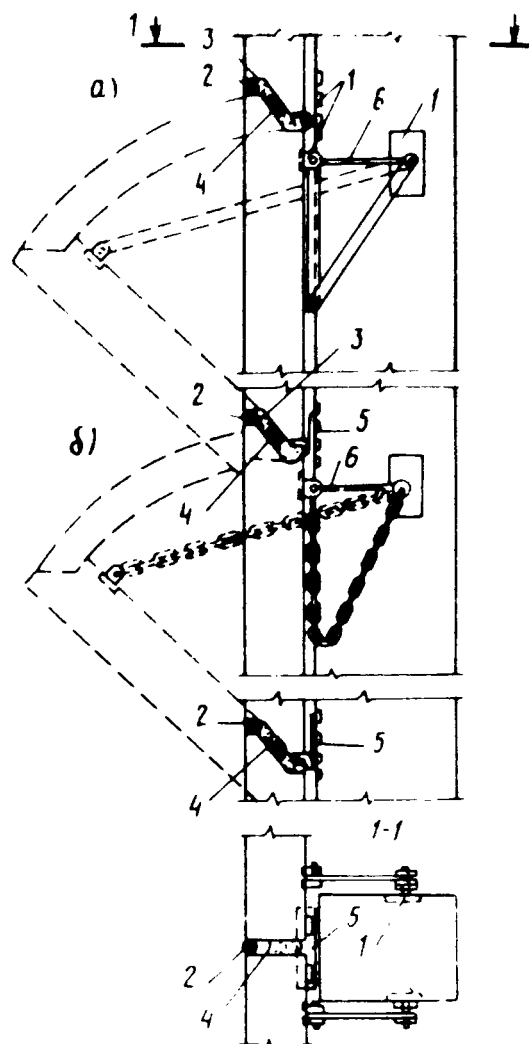


Рис. 3.38. Конструкция поворотных стеновых панелей с фиксированием их

а — при помощи рычага; б — при помощи цепи; 1 — закладные детали; 2 — упругий герметик; 3 — утеплитель; 4 — твердая прокладка; 5 — опорный столик из уголков 100x63; 6 — стягивающий анкер

На рис. 3.37, 3.38 приведены конструкции поворотных стеновых панелей, а на рис. 3.39, 3.40 конструкции легкобрасываемых элементов, вскрывающихся по нижней или верхней кромке.

В качестве легкобрасываемых стеновых панелей рекомендуется применять легкие асбестоцементные стеновые панели, изготавливаемые методом экструзии, размером 6x0,6 м.

3.5. КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

Анализ конструктивных решений легких покрытий для зданий взрывоопасных производств показывает, что в настоящее время применяются в основном два вида легкобрасываемых покрытий.

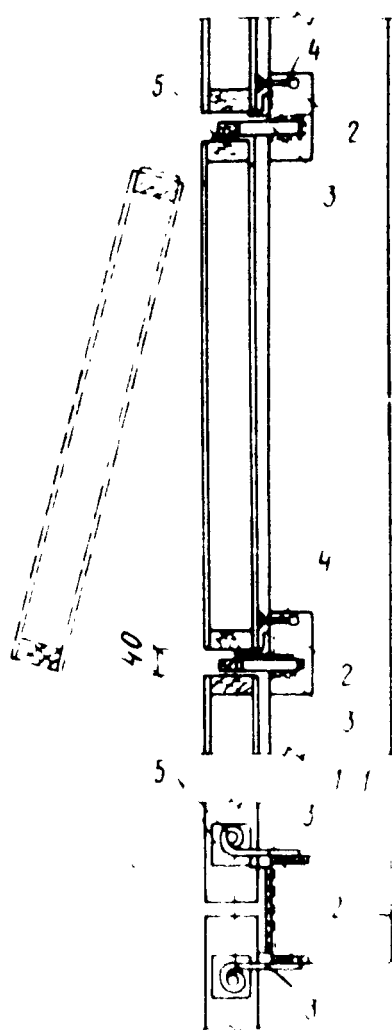


Рис. 3.39. Конструкция легкобрасываемой стеновой панели с первоначальным вскрытием на нижней кромке

1 — колонна; 2 — закладная деталь колонны; 3 — соединительная деталь; 4 — стягивающий анкер; 5 — закладная деталь панели

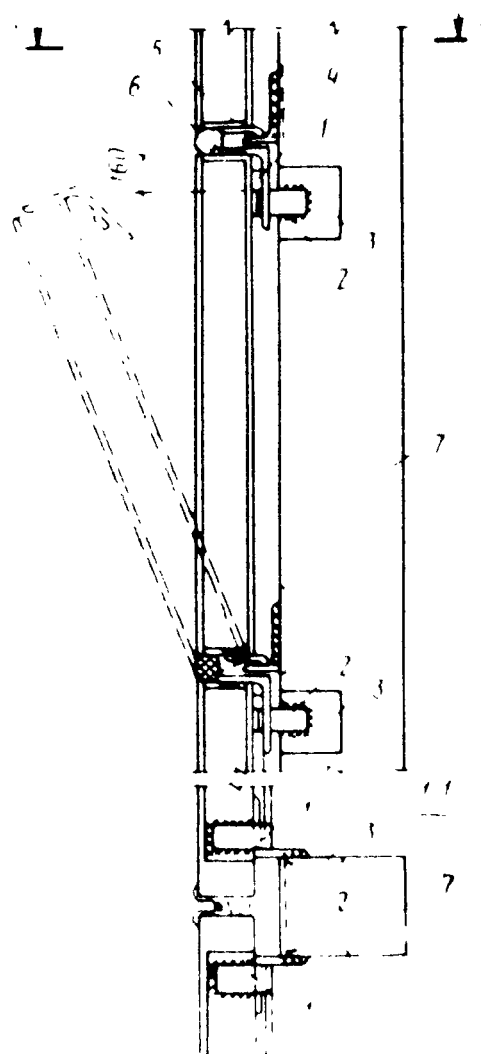


Рис. 3.40. Конструкция легкобрасываемой стеновой панели с первоначальным вскрытием по верхней кромке

1 — фиксирующий элемент; 2 — соединительная деталь; 3, 5 — закладные детали; 4 — опорный столик; 6 — герметик; 7 — колонна

В первом случае по основным несущим конструкциям покрытий, фермам и балкам укладываются железобетонные плиты с отверстиями (серия 1.465-7, 1.465-3) длиной 12 и 6 м и шириной 3 и 1,5 м. На эти плиты укладываются легкобрасываемые элементы, а затем устраивается кровля. Во втором случае легкобрасываемое покрытие устраивается по металлическим или железобетонным прогонам, уложенным с шагом 3 или 1,5 м.

Железобетонные плиты для легкобрасываемой кровли представляют собой облегченный вариант ребристых железобетонных плит покрытия и отличаются от последних тем, что имеют проем между ребрами жесткости. Отношение площади проемов ко всей площади плиты, называется коэффициентом проемности.

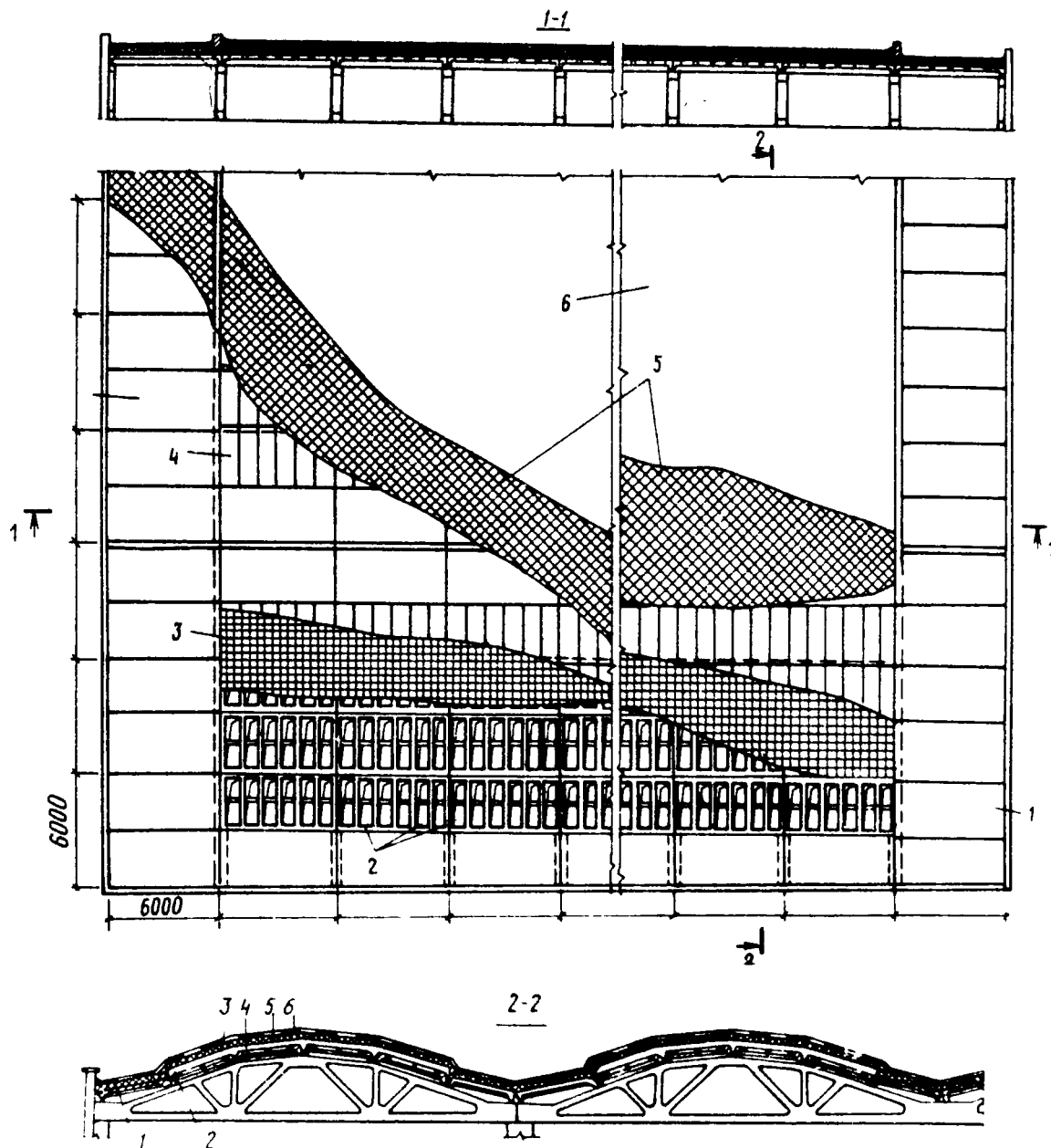


Рис. 3.41. Конструктивная схема устройства легкой кровли по сборным железобетонным плитам 3х6 м по серии 1.465-7

1 — сплошные железобетонные плиты; 2 — плиты КЖС; 3 — арматурная сетка 200х200 мм; 4 — асбестоцементные волнистые листы; 5 — утеплитель; 6 — водоизоляционный ковер

На железобетонные плиты с отверстиями шириной 3 м укладываются легкобрасываемые элементы с шагом 1,5 м. Если площадь легкобрасываемых участков недостаточна, то сплошные плиты у температурного шва могут быть заменены плитами с отверстиями при условии обеспечения жесткости диска покрытия за счет установки горизонтальных связей.

Заполнителем отверстий в железобетонных плитах для легкобрасываемой кровли могут быть легкие плиты заводского изготовления поверхностной плотностью до 50–60 кг/м² или профилированные асбестоцементные листы. По асбестоцементным листам укладывается плиточный утеплитель с наименьшей объемной плот-

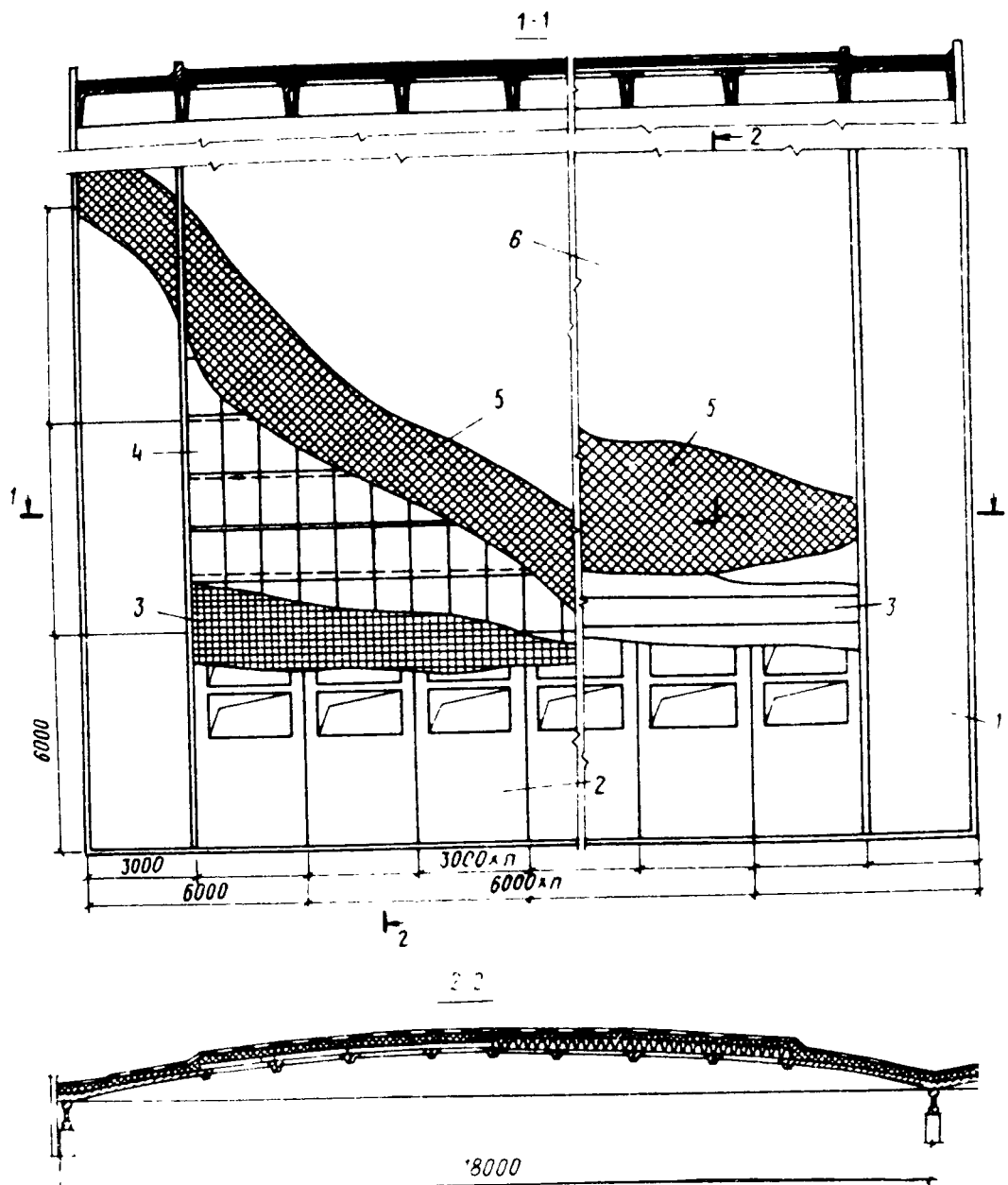


Рис. 3.42. Конструктивная схема устройства легкой кровли по сборным железобетонным плитам типа КЖС

1 — сплошные железобетонные плиты КЖС; 2 — плиты для легкосбрасываемой кровли; 3 — арматурная сетка 200х200 мм; 4 — асбестоцементные волнистые листы; 5 — утеплитель; 6 — водоизоляционный ковер

ностью. Конструктивно прогонные решения легкосбрасываемых покрытий выполняются аналогично плитным.

По железобетонным или металлическим прогонам могут укладываться волнистые асбестоцементные листы или стальной оцинкованный профилированный настил размером 1,5х3 м с последующей укладкой плитного утеплителя или облегченных плит.

Облегченные плиты, располагаемые в покрытии промышленных зданий, характеризуются многообразием конструктивных решений, отличающихся в основном профилем несущего элемента плиты, а также конструкцией плиты, расположением утеплителя и размером плиты.

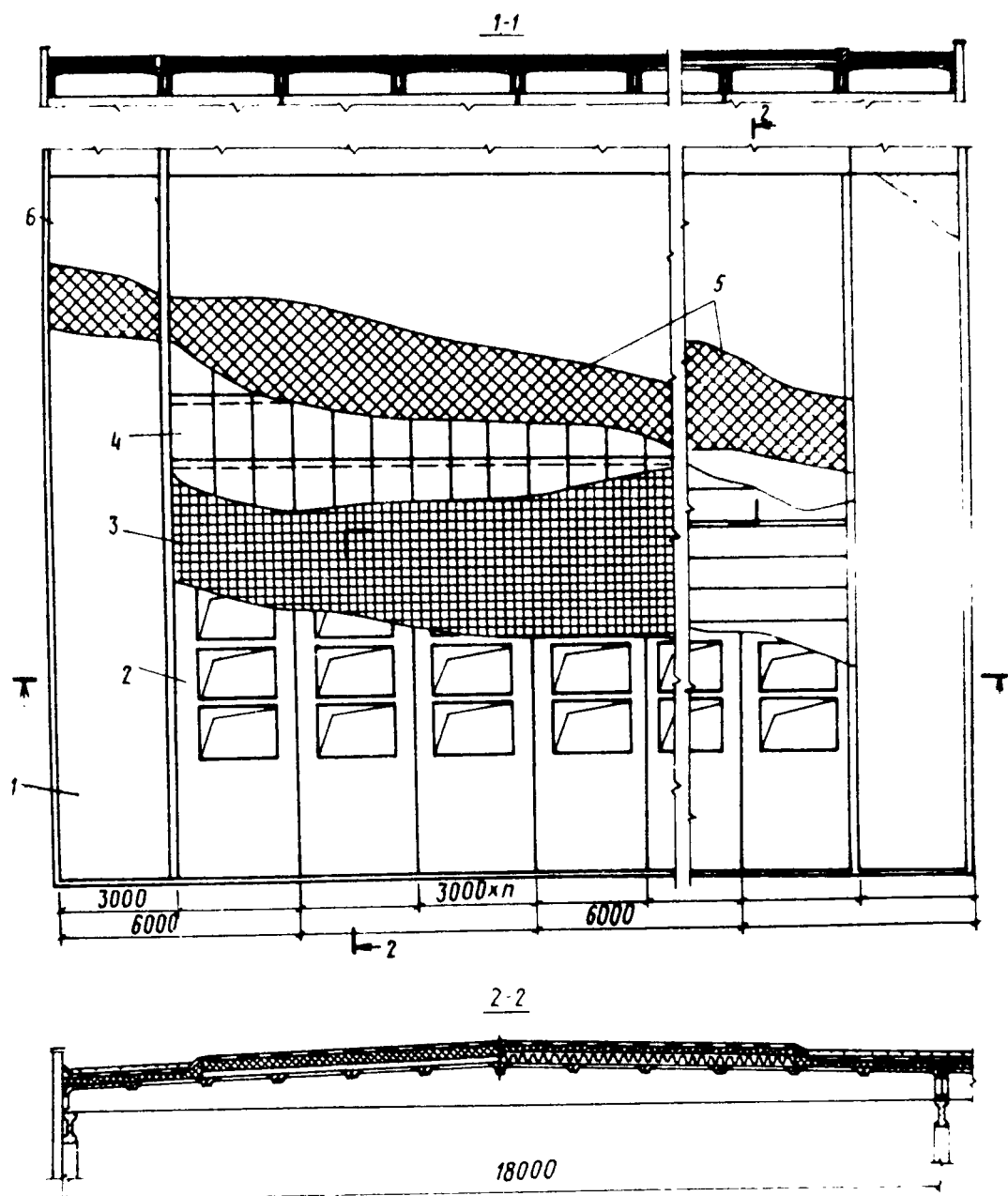


Рис. 3.43. Конструктивная схема устройства легкой кровли по сборным железобетонным плитам 3х6 м

1 — сплошная железобетонная плита типа П; 2 — плиты для легкосбрасываемой кровли; 3 — арматурная сетка 200х200 мм; 4 — асбестоцементные волнистые листы; 5 — утеплитель; 6 — основной водоизоляционный ковер

В качестве несущей основы легкосбрасываемых покрытий отапливаемых зданий приняты железобетонные плиты размером 3х6 м по серии 1.465-7, рис. 3.41, железобетонные панели-оболочки КЖС (рис. 3.42) размером 3х18 м и плиты покрытий типа П размером 3х18 м (рис. 3.43).

Сборные железобетонные плиты размером 3х6 м опираются на сегментные фермы пролетом 18 м (по серии ПК-01-129/68). При применении панелей-оболочек КЖС требуется их перестановка в связи с необходимостью введения между отверстиями поперечных ребер, а при отсутствии таких ребер требуется установка стальных прогонов для укладки асбестоцементных листов.

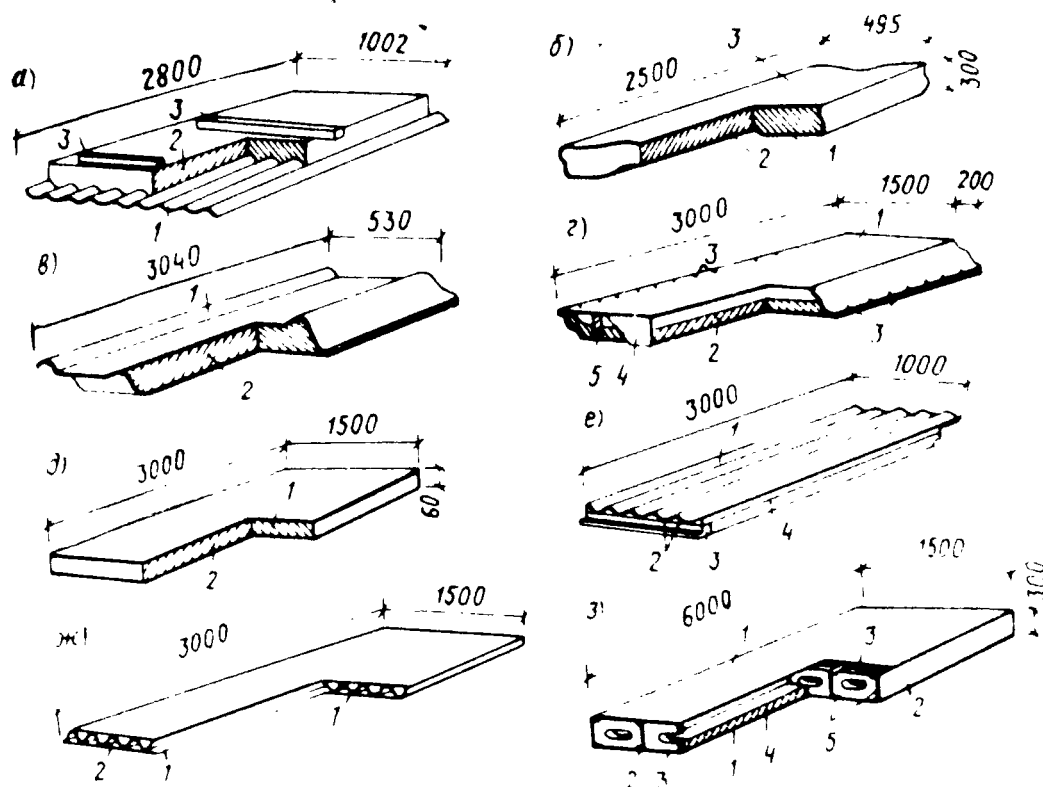


Рис. 3.44. Типы легких плит

а — плита Шермана; 1 — асбестоцементный лист; 2 — пенобетон; 3 — деревянные рейки; б — лотковая плита; 1 — асбестоцементный лоток; 2 — утеплитель; 3 — стяжка или слой гидроизоляции; в — плита АС; 1 — асбестоцементные обшивки; 2 — утеплитель; г — плита АП; 1 — фасонная обшивка; 2 — утеплитель; 3 — алюминиевые заклепки; 4 — асбестоцементные заглушки; 5 — деревянная бобышка; д — плита типа "сэндвич"; 1 — асбестоцементные обшивки; 2 — теплоизоляционный слой; е — двухслойная безрубероидная плита; 1 — волнистый асбестоцементный лист; 2 — стальная ленточная арматура; 3 — пенопластовая плотная плита; 4 — плита из пенопласта ПСБ-С; ж — трехслойная плита без утеплителя; 1 — асбестоцементный лист; 2 — волнистый асбестоцементный лист; 3 — плита ПАК; 1 — асбестоцементные обшивки; 2 — асбестоцементные ребра; 3 — диафрагма из легкого бетона; 4 — утеплитель; 5 — ленточная стеклопластиковая арматура

Для покрытий отапливаемых зданий из плит "на пролет" ЦНИИпромзданий рекомендует применять плиты типа П, которые по приведенным затратам более экономичны. Отверстия в плитах и панелях-оболочках перекрываются несущими асбестоцементными листами типа УВ-7,5 или стальными профилированными настилами.

Предполагается, что легкобрасываемые участки покрытий с асбестоцементными листами и стальными профилированными настилами при воздействии избыточного взрывного давления работают по принципу поднимающихся (вскрывающихся) клапанов. Типы легких плит приведены на рис. 3.44.

По асбестоцементным волнистым и стальным профилированным листам выполняется пароизоляция (по расчету), теплоизоляция из вермикулитобитума (монолитная) или из плит ФРП и основной водоизоляционный ковер.

Проектирование кровель на легкобрасываемом покрытии необходимо выполнять в соответствии с "Инструкцией по проектированию рулонных и мастичных кровель зданий и сооружений промышленных предприятий".

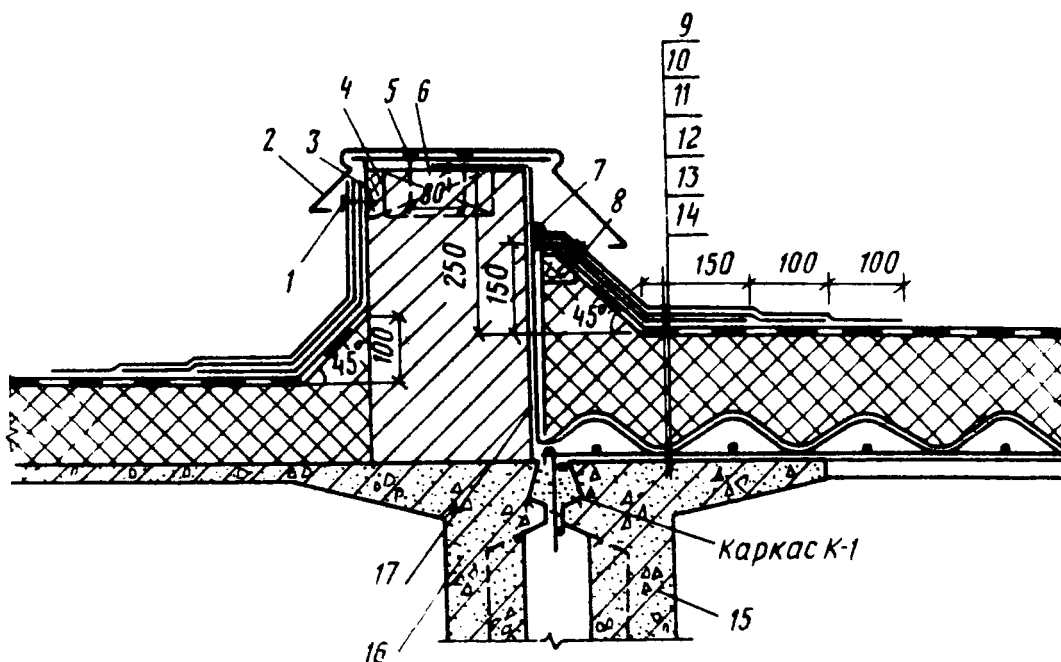


Рис. 3.45. Схема устройства поперечного шва в кровле в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий с применением асбестоцементных волнистых листов

1 — гвозди кровельные 3,5х40 с шайбой из белой жести; 2 — оцинкованная кровельная сталь; 3 — антисептированная деревянная рейка; 4 — костыли 4х40 через 600 мм; 5 — гвозди кровельные К35х40; 6 — антисептированная деревянная пробка 50х80х150 через 600 мм; 7 — мастика УМС-50; 8 — антисептированный деревянный брус 50х50; 9 — три слоя дополнительного водоизоляционного ковра; 10 — утеплитель; 11 — асбестоцементные волнистые листы УВ-7,5-1750; 12 — армирующая сетка; 13 — сборная железобетонная плита типа КЖС или П; 15 — плита легкосбрасываемого покрытия; 16 — сплошная плита; 17 — полиэтиленовая пленка

На участках легкосбрасываемого покрытия с применением плит типа П кровли выполняются без гравийного защитного слоя. В этом случае, как и при применении в покрытиях панелей КЖС и плит размером 3х6 м, верхний слой кровель выполняют из рубероида марки РК-420 с крупнозернистой посыпкой. В случае применения мастичных кровель их верхнюю поверхность окрашивают краской БП-177 либо выполняют с посыпкой из крупнозернистого песка.

Для обеспечения безопасности производства работ при устройстве легкосбрасываемого покрытия с асбестоцементными волнистыми листами следует предусматривать укладку по несущим плитам рулонной армирующей сетки. Сетку перед укладкой необходимо покрасить масляной краской 2 раза. Армирующие сетки укладываются поперек плит покрытий и крепятся к армирующим каркасам, укладываемых в швы между плитами. Сетки между собой связываются проволокой.

Для уменьшения сопротивления воздействию взрывной нагрузки легкосбрасываемые покрытия с асбестоцементными и стальными листами разрезаются продольными и поперечными швами на участки с различной площадью (от 36 до 360 м²). Швы совмещаются с местами сопряжения обычной и легкосбрасываемых частей покрытия (рис. 3.45—3.50).

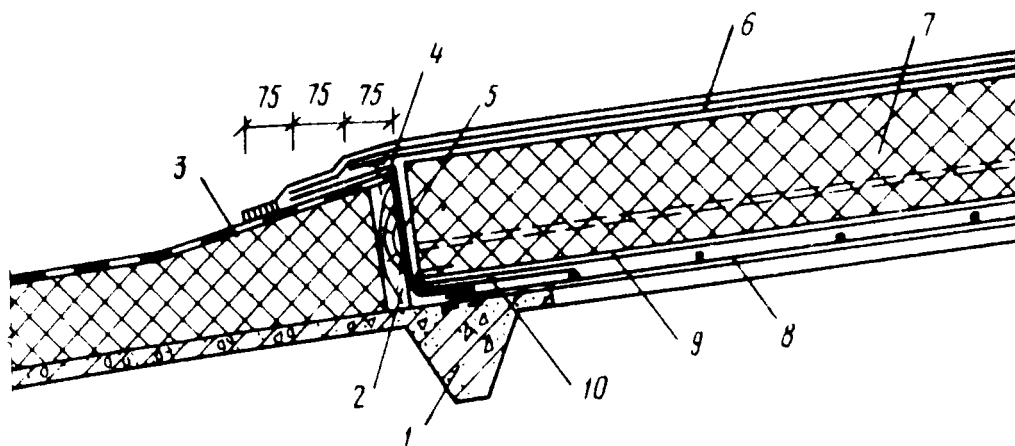


Рис. 3.46. Схема устройства продольного шва в кровле в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий с применением асбестоцементных волнистых листов

1 — плита легкосбрасываемого покрытия; 2 — антисептированная деревянная доска 32х180; 3 — основной водоизоляционный ковер; 4 — гвозди толевые; 5 — полиэтиленовая пленка; 6 — основной водоизоляционный ковер; 7 — утеплитель; 8 — сетка 200х200х5х5; 9 — асбестоцементные волнистые листы УВ-7,5-1750; 10 — крючки $\Phi 481$, 3 шт. на лист

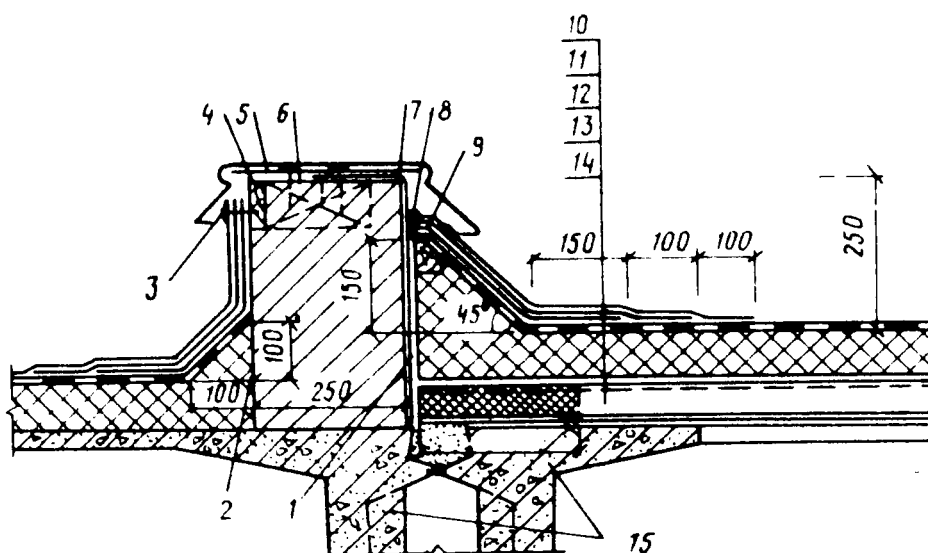


Рис. 3.47. Схема устройства поперечного шва в кровле в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий с применением стальных профилированных настилов

1 — полиэтиленовая пленка; 2 — наклонный бортик из теплоизоляционного материала; 3 — гвозди кровельные; 4 — антисептированная деревянная рейка 25х80; 5 — костыли; 6 — антисептированная деревянная пробка 50х80; 7 — оцинкованная кровельная сталь; 8 — мастика УМС-50; 9 — антисептированный деревянный брус 50х50; 10 — дополнительные слои водоизоляционного ковра; 11 — основной водоизоляционный ковер; 12 — утеплитель; 13 — пароизоляция; 14 — стальной профилированный настил; 15 — сборная железобетонная плита типа КЖС или П

Поверхностная плотность легкосбрасываемого покрытия с применением асбестоцементных листов и монолитной вермикулитобитумной теплоизоляции толщиной 100 мм составляет 67 кг/м², а с применением стальных профилированных настилов и плит ФРП толщиной 75 мм — 34 кг/м². Асбестоцементные листы укла-

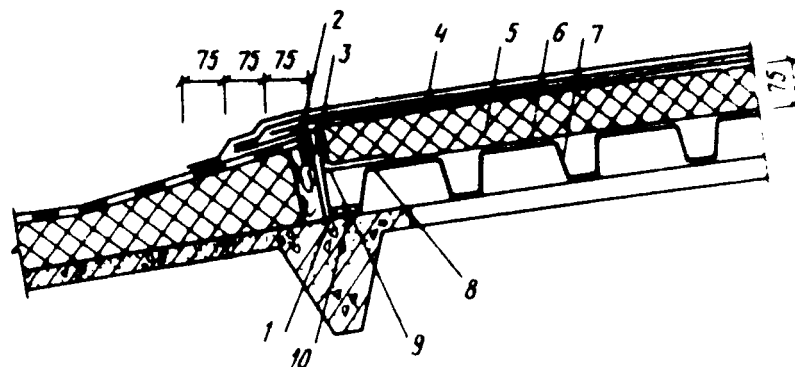


Рис. 3.48. Схема устройства продольного шва в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий с применением стальных профилированных настилов

1 — полиэтиленовая пленка; 2 — гвозди толевые; 3 — деревянная антисептированная доска 32х130; 4 — основной водоизоляционный ковер; 5 — утеплитель; 6 — пароизоляция; 7 — стальной профилированный настил; 8 — комбинированные заклепки; 9 — оцинкованная кровельная сталь; 10 — железобетонная плита

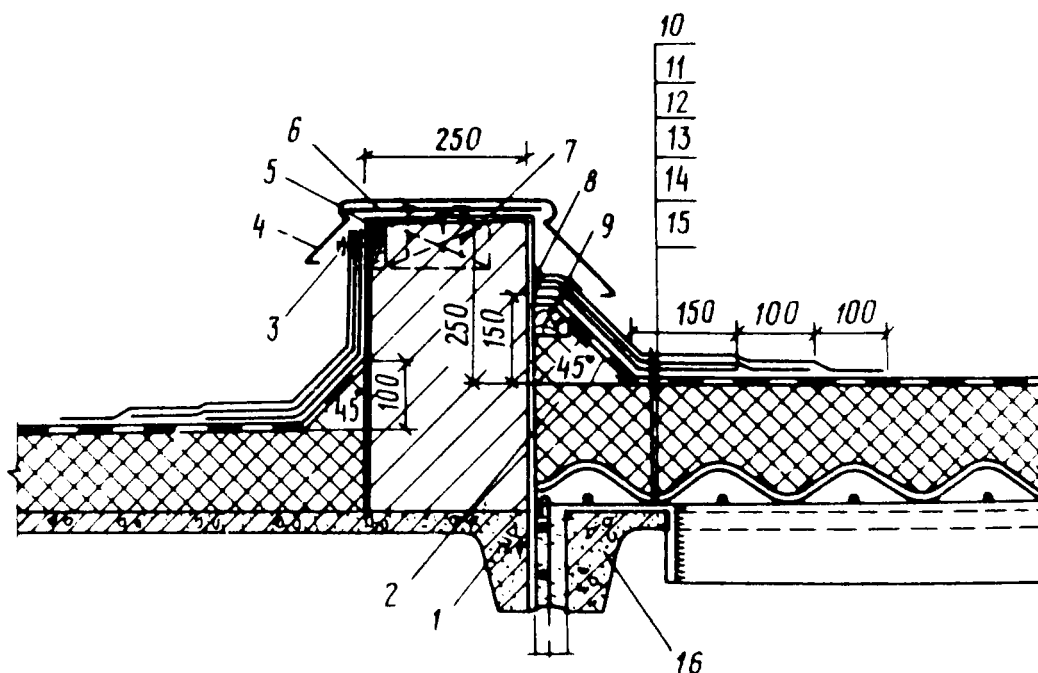


Рис. 3.49. Схема устройства продольного шва в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий с применением асбестоцементных волнистых листов

1 — сплошная плита; 2 — полиэтиленовая пленка; 3 — гвозди кровельные; 4 — оцинкованная кровельная сталь; 5 — антисептированная деревянная рейка; 6 — костыли; 7 — антисептированная деревянная пробка; 8 — мастика УМС-50; 9 — антисептированный деревянный брус; 10 — три слоя дополнительного водоизоляционного ковра; 11 — основной водоизоляционный ковер; 12 — утеплитель; 13 — асбестоцементные волнистые листы УВ-7,5-1750; 14 — арматурная сетка; 15 — металлическая балка; 16 — железобетонная плита для легкосбрасываемого покрытия

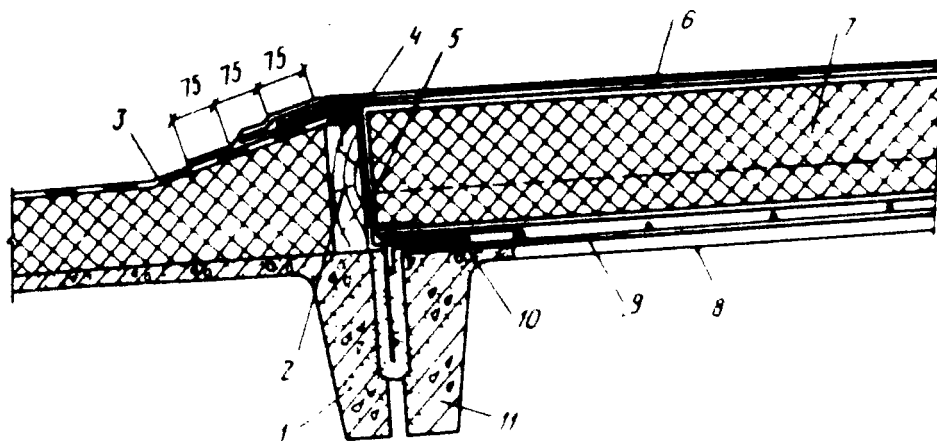


Рис. 3.50. Схема устройства продольного шва в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий с применением асбестоцементных волнистых листов

1 — железобетонная плита 3х6 м; 2 — антисептированная деревянная доска; 3 — основной водоизоляционный ковер; 4 — гвозди толевые; 5 — полиэтиленовая пленка; 6 — водоизоляционный ковер; 7 — утеплитель; 8 — сетка; 9 — асбестоцементные волнистые листы; 10 — крючки; 11 — железобетонная плита легкосбрасываемого покрытия

дываются внахлестку и во избежание горизонтальных смещений крепятся при монтаже к сетке специальными крючками.

Стальные профилированные настилы соединяются между собой в местах нахлестки продольных ребер комбинированными заклепками через 600 мм. Стальные профилированные настилы закрепляются дюбелями диаметром 4,5 мм с шайбами диаметром 12,6 мм через 1,5 м к железобетонным плитам и настилам только у крайних продольных ребер настила.

При производстве работ на участках легкосбрасываемых покрытий хождение допускается только по ходовым мостикам. Применение тачек для перевозки материалов не допускается.

Работы по устройству легкосбрасываемых покрытий должны выполняться с соблюдением требований СНиП III-4-80 "Техника безопасности в строительстве" и СНиП II-2-80 "Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений".

Поперечный шов в местах сопряжения легкосбрасываемого и обычного покрытий (по скату кровли) решается с помощью кирпичной стенки толщиной 250 мм (см. рис. 3.45, 3.46, 3.47). Стенка должна быть оштукатурена с обеих сторон цементно-песчаным раствором. Основной водоизоляционный ковер легкосбрасываемого покрытия заводится на наклонный бортик из теплоизоляционного материала и закрепляется к деревянному антисептированному бруску со срезанной гранью под углом 45°. Слои дополнительного водоизоляционного ковра выполняются из трех слоев рубероида марки РМ-350. Для разделения легкосбрасываемого покрытия с кирпичной стенкой между ними прокладывается полиэтиленовая пленка, которая закрепляется толевыми гвоздями к антисептированной деревянной пробке на кирпичной стенке. Полиэтиленовая пленка заводится под слой теплоизоляции на 100—150 мм. Стык между кирпичной стенкой и кровлей легкосбрасываемого покрытия герметизируется мастикой УМС-50 и перекры-

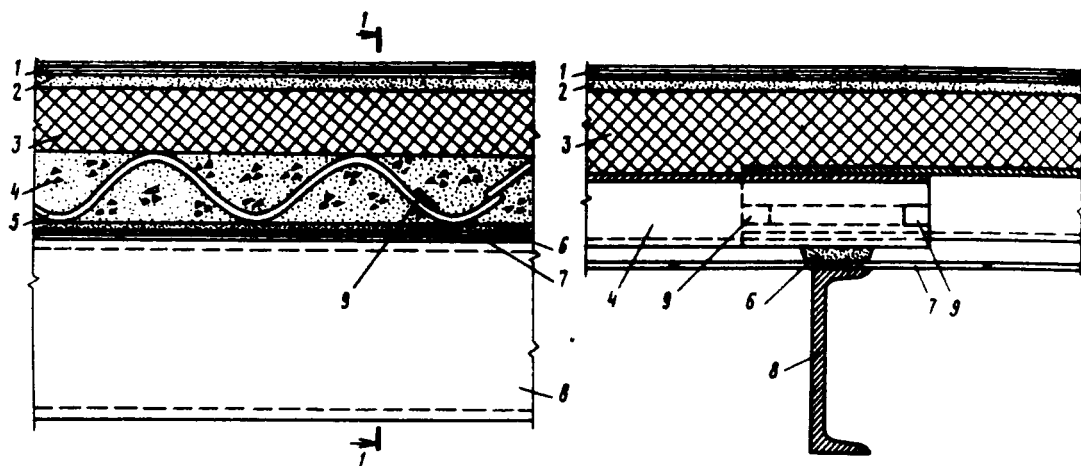


Рис. 3.51. Конструкция легкобрасываемой кровли по металлическим прогонам с применением волнистых асбестоцементных листов

1 — водоизоляционный ковер; 2 — выравнивающий слой; 3 — легкие плиты; 4 — утеплитель; 5 — асбестоцементные волнистые листы; 6 — пароизоляция; 7 — арматурная сетка; 8 — металлический прогон; 9 — упоры

вается фасонными элементами из оцинкованной кровельной стали. Для крепления фасонного элемента устанавливаются костыли из полосовой стали размером 4x40 мм через 600 мм, которые крепятся к деревянным антисептированным пробкам кровельными гвоздями.

Продольный шов в местах сопряжения легкобрасываемого и обычного покрытий (поперек ската кровли) решается с помощью деревянных антисептированных досок (см. рис. 3.48, 3.49, 3.50), которые прикрепляются к железобетонной плите при помощи оцинкованного уголка. Основной водоизоляционный ковер легкобрасываемого покрытия выполняется с нахлесткой на кровлю обычного покрытия. Величина нахлестки каждого слоя 75 мм. С целью разделения легкобрасываемого покрытия с обычным между ними прокладывается полиэтиленовая пленка, которая закрепляется толевыми гвоздями к деревянной доске. Полиэтиленовая пленка заводится под несущие асбестоцементные листы и стальные профилированные настилы. Перед устройством пароизоляции у крайнего ребра стального профилированного настила закрепляется полоса из оцинкованной кровельной стали.

Ребра стальных профилированных настилов на торцевых участках легкобрасываемого покрытия заполняются уплотненной минеральной ватой на длину 250 мм. Конструктивные решения легких кровель, рекомендуемых к защите зданий со взрывоопасными производствами, можно свести к трем вариантам.

В первом варианте (рис. 3.51, табл. 3.14) в качестве кровельного покрытия используются волнистые асбестоцементные листы марки УВ-7,5. В этом варианте за основу легкобрасываемого покрытия приняты типовые сборные железобетонные плиты шириной 1,5 и 3,0 м, длиной 6 и 12 м с отверстиями для легкобрасываемой кровли по ГОСТ 22701-77, типовым сериям 1.465-3, 1.465-7 или металлические прогоны с шагом 3,0 м по железобетонным или металлическим фермам.

Масса легкобрасываемого покрытия с учетом коэффициента перегрузки в зависимости от применяемого типа утеплителя

Т а б л и ц а 3.13. Типовые решения легкосбрасываемой кровли

Название материала или конструкции	Марка	Плотность кг/м ³	Толщина слоя, мм	Нормативная расчетная плот- ность, кг/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная по- верхностная плотность, кг/м ²
<i>Рулонный ковер</i>						
Рубероид 1 слой	РЧ 350	—	—	—	—	—
Рубероид 1 слой	РМ 350	—	—	—	—	—
Пергамин 1 слой	П 350	—	—	15	1,1	17
Битумная мастика 3 слоя	МБК-1-55	—	—	—	—	—
Цементно-песчаная стяжка	100	2000	15	30	1,2	36
<i>Утеплитель</i>						
I вариант. Пенобетон плитный	—	400	80	32	1,1	35
II вариант. Минераловатные плиты на синтетической связке	—	200	70	14	1,1	16
Засыпка волн асбестоцементных листов крошкой пенобетона	—	300	23	7	1,2	8
Волнистые асбестоцементные листы	УВ-7,5	—	—	25	1,1	28
Поверхностная плотность легкосбра- сываемой кровли	I вариант	—	—	109	—	124
	II вариант	—	—	91	—	105

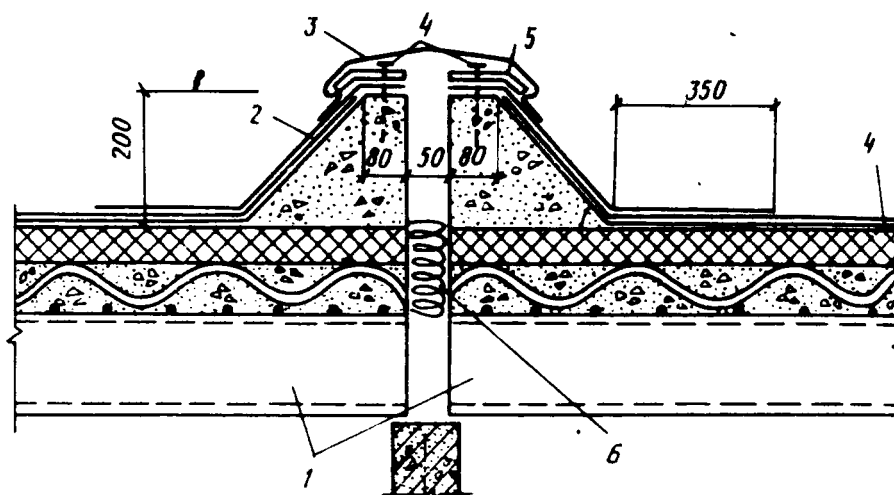


Рис. 3.52. Схема разрезки ковра мягкой кровли легкосбрасываемого покрытия

1 — металлические прогоны; 2 — дополнительный слой водозащитного ковра; 3 — кровельная оцинкованная сталь; 4 — дюбель ДГП 3,5х40; 5 — стальная полоса 4х40; 6 — минеральная вата

может быть снижена по сравнению с нормативным значением (120 кг) до величины 105 кг (см. данные табл. 3.13 для 2-го варианта утеплителя).

Швы разрезки водозащитного ковра и теплоизоляции устраиваются в виде бетонных бортиков (рис. 3.52) обрамляющих всю карту, по которым наклеиваются слои водозащитного ковра, сверху покрываются фасонным элементом из кровельной стали. При этом варианте из каждой средней карты требуется организованный водоотвод с устройством не менее двух водосточных воронок и дополнительный расход труб на ливневую канализацию.

Металлические сетки, укладываемые для обеспечения безопасности производства работ под асбестоцементные волнистые листы, между собой связываются проволокой и крепятся к металлическим прогонам.

Асбестоцементные волнистые листы укладываются внахлестку и во избежание горизонтальных смещений при монтаже крепятся к сетке специальными анкерами из арматурной стали по 3 шт. на лист.

Таким образом, асбестоцементные волнистые листы не являются свободнолежащими элементами легкосбрасываемого покрытия и для их подъема под воздействием избыточного взрывного давления необходимо преодолеть не только силу собственной массы конструкции кровли, но и сопротивление узлов крепления листов к сетке.

Во II варианте в качестве несущего элемента легкосбрасываемых участков покрытия принят стальной профилированный настил, который крепится к металлическим прогонам гнутыми кляммерами из полосовой стали толщиной 3 мм через гофр (см. рис. 3.53).

Один конец кляммера, отогнутый на 90°, после укладки на прогон обоих соединяемых профилированных листов настила внахлестку, пригибается до отказа. Прикрепление участков профилированного настила кляммерами к металлическим прогонам поз-

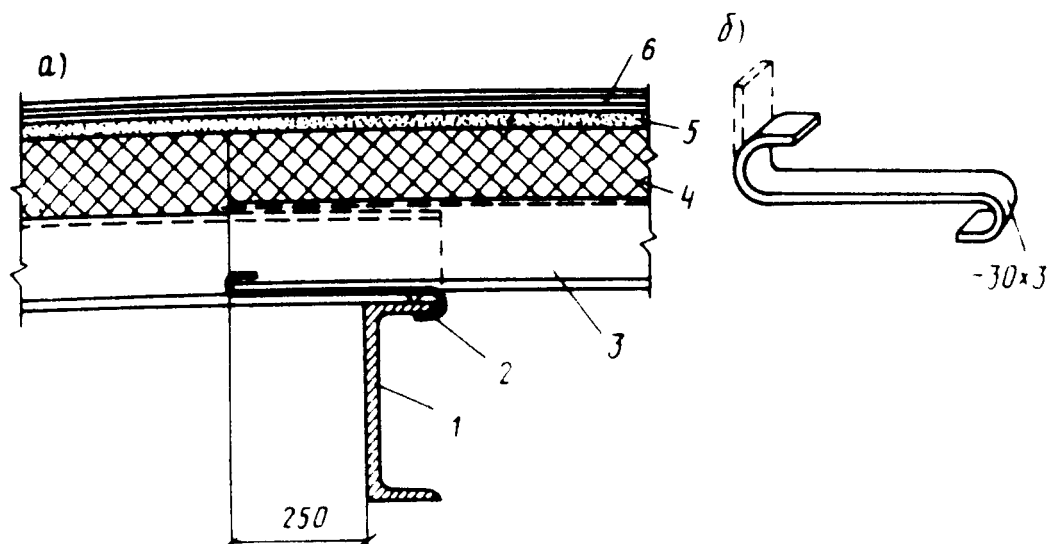


Рис. 3.53. Облегченное покрытие с применением стального профилированного настила

а — конструкция покрытия; *б* — кляммер; 1 — металлический прогон; 2 — самонарезающийся болт; 3 — профилированный настил; 4 — утеплитель; 5 — выравнивающий слой; 6 — водоизоляционный ковер

волит настилу под воздействием давления от взрыва внутри производственного помещения приподняться над покрытием и через образовавшиеся при этом отверстия сбросить (стравить) давление взрыва.

Соединение листов профилированного настила между собой вдоль гофров осуществляется с шагом 500 мм комбинированными заклепками.

Ребра стальных профилированных настилов на торцевых участках легкобрасываемого покрытия заполняются уплотненной минеральной ватой на длину 250 мм.

Как видно из данных, приведенных в табл. 3.14, расчетная плотность облегченного покрытия с применением стального профилированного настила равна 81 кг на 1 м² покрытия, т.е. на 24 кг меньше по сравнению с типовым решением легкобрасываемого покрытия по первому варианту. Однако следует отметить, что легкобрасываемые элементы этого типа покрытия не полностью вскрываются под воздействием давления взрыва, а лишь приподнимаются над покрытием на высоту, соответствующую длине кляммера. Такое конструктивное решение покрытия, несмотря на относительно небольшую плотность 1 м² сбрасываемого элемента, значительно снижает его эффективность при использовании в качестве легкобрасываемой конструкции.

В качестве III варианта разработано легкобрасываемое покрытие с применением асбестоцементных панелей, получаемых методом экструзии. Технические решения этого варианта легкобрасываемого покрытия обеспечивают его значительную эффективность по сравнению со всеми остальными как эксплуатируемыми, так и вновь запроектированными типами. Положительным моментом этой конструкции является устройство шва разрезки водоизоляционного ковра покрытия в виде компенсатора из полиизобутана, вкладываемого в шов, образуемого слоем утеплителя (см. рис. 3.54). Полость шва заполняется минеральной ватой и разделяет-

Т а б л и ц а 3.14. Состав покрытия с применением стального профилированного настила

Название материала или конструкции	Марка	Плотность, кг/м ³	Толщина слоя, мм	Нормативная поверхность, кг/м ²	Коэффициент перегрузки	Расчетная поверхность, кг/м ²
Рубероид 1 слой	РЧ 350	—	—	15,0	1,1	17,0
Рубероид 1 слой	РМ 350	—	—	—	—	—
Пергамин 1 слой	П 350	—	—	—	—	—
Битумная мастика 3 слоя	МБК-155	—	—	—	—	—
Цементно-песчаная стяжка	100	2000	15	30	1,2	36,0
Жесткие минеральные плиты на синтетической связке	П-1-1-1	200	70	14,0	1,1	16,0
Стальной профилированный настил	—	—	—	10,9	1,1	12,0
				70,0		81

Рис. 3.54. Шов разрезки легко-сбрасываемого покрытия, заполненный компенсатором из полиизобутилена

1 — легкая плита; 2 — компенсатор; 3 — мастика У-30М; 4 — минеральная вата

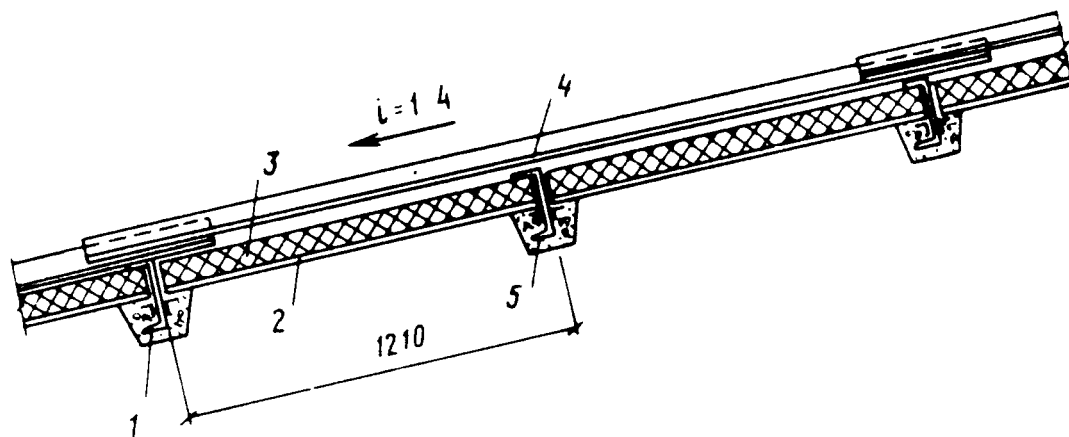
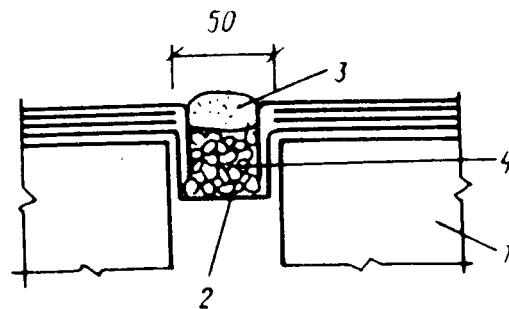


Рис. 3.55. Легкосбрасываемое покрытие для неотапливаемых зданий
1 — прогоны; 2 — асбестоцементные плоские плиты; 3 — минераловатные плиты; 4 — асбестоцементные волнистые листы; 5 — промазка цементным раствором

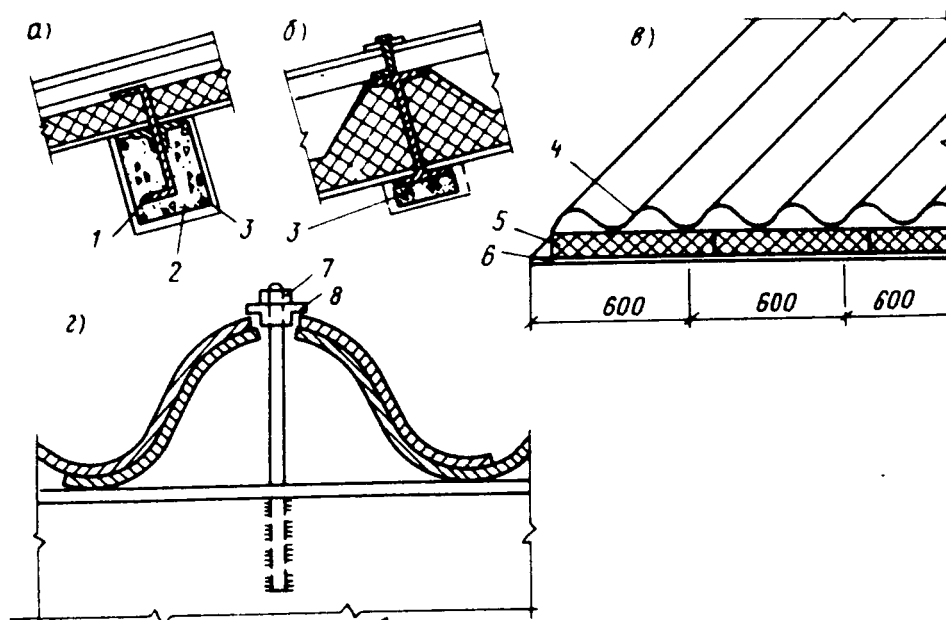


Рис. 3.56. Схемы устройства крепления легкой кровли к металлическим прогонам, защищенным бетоном

а — прогон из швеллера; б — прогон из таврового сечения; в — разрез кровли; г — деталь крепления асбестоцементных волнистых листов; 1 — прогон; 2 — бетон; 3 — сетка; 4 — асбестоцементные волнистые листы; 5 — асбестоцементная плоская плита; 7 — гайка; 8 — шайба резиновая

ся тиоколовой мастикой У-30М. В этом случае отпадает необходимость устройства организованного водоотвода с поверхности легкобрасываемых карт покрытия.

Асбестоцементные панели, получаемые методом экструзии, укладываются по металлическим прогонам насухо, без крепления. Для предотвращения сдвига панелей к металлическим прогонам привариваются упоры-ограничители, состоящие из металлической полосы размером 80х6 мм с шагом 600 мм. Следовательно, при принятом конструктивном решении укладки экструзионных панелей по металлическим прогонам подъем легкобрасываемого покрытия начнется уже при достижении давления от взрыва внутри производственного помещения, которое численно равно массе конструкции покрытия в пересчете на 1 м² ее площади плюс инерционность вскрытия.

Укладка асбестоцементных панелей, получаемых методом экструзии, по металлическим прогонам позволяет достичь максимальной проемности — 92% вместо 38—45% в зависимости от конструкции основания под легкобрасываемое покрытие. Применение в качестве кровельного покрытия асбестоцементных панелей, получаемых методом экструзии, не требует устройства выравнивающей цементно-песчаной стяжки, утеплителя и засыпки пустот крошкой пенобетона, что значительно снижает трудоемкость монтажа и позволяет снизить плотность покрытия до 79 кг/м².

Эффективность этого типа легкобрасываемого покрытия повысится еще больше, если осуществлять разрезку рулонного водоизоляционного ковра на карты размером 7,5х6,0 м, т.е. принимать площадь карты не более 45 вместо 144 м².

Легкобрасываемые покрытия неотапливаемых зданий могут выполняться с применением асбестоцементных волнистых листов по стальным фермам (по серии ПК-01-130) с уклоном 1:3,5. При проектировании и устройстве покрытий из волнистых асбестоцементных листов рекомендуется пользоваться "Типовыми деталями одноэтажных промышленных неотапливаемых зданий с покрытием и стенами из асбестоцементных волнистых листов" (ТДА серии 2.460-1,2).

Необходимо отметить, что при устройстве легкобрасываемых покрытий в неотапливаемых помещениях, покрытие проектируется исходя из условий, что ходить по нему нельзя (рис. 3.55, 3.56), осмотр и ремонт осуществляются со стационарных или переносных специальных щитов. Плоские асбестоцементные плиты, расположенные под утеплителем, при недостаточной их несущей способности могут быть заменены волнистыми асбестоцементными листами усиленного профиля. Целесообразность применения тех или иных листов решается при конкретной разработке покрытия в процессе проектирования. Учитывая, что сопротивление асбестоцементных волнистых листов сбросу кровли может оказаться значительным, для крепления их применяют специальные шайбы из нестареющей резины, которые должны проскочить через отверстия при возникновении снизу давления, превышающего расчетное.

Основным достоинством этого типа кровли является ее небольшая плотность (до 50 кг/м²), а при применении более легкого утеплителя она может быть еще снижена. Исключен мокрый процесс устройства выравнивающей цементной стяжки и повышена

легкосбрасываемость за счет отсутствия ковра мягкой кровли. К недостаткам относятся необходимость увеличения уклона кровли, а следовательно, и увеличения объема здания; невозможность ходить по кровле; а также более сложное решение участков, где должны быть пропущены через крышу трубы. На этих участках возможно потребуется укладка волнистых металлических листов того же профиля.

Многолетние экспериментальные и теоретические исследования, проведенные по решению данной проблемы, показали, что конструкция легкобрасываемого покрытия должна состоять из максимально облегченных элементов кровельного покрытия и плитного утеплителя, а также мягкого рулонного водоизоляционного ковра кровли. В качестве элементов несущего основания под легкобрасываемое покрытие рекомендуется применять типовые сборные железобетонные плиты шириной 1,5 и 3 м, длиной 6 м с отверстиями для участков легкобрасываемой кровли по ГОСТ 22701–77, типовым сериям 1.465-3 и 1.465-7. Однако при таком конструктивном решении резко уменьшается проемность, величина которой составляет для зданий с шириной пролета 18 м – 38%, 24 м – 42% и 30 м – 45%. Для максимального использования площади кровли в качестве элементов несущего основания под легкобрасываемое покрытие рекомендуется применять металлические прогоны с шагом 3 м, укладываемые по железобетонным фермам и балкам. При этом независимо от ширины пролета здания обеспечивается максимально возможная проемность (92%), т.е. отношение площади проемов для аварийного сброса продуктов взрыва к общей площади покрытия. Масса легкобрасываемого покрытия должна устанавливаться согласно методики, приведенной в гл. II. Уменьшение массы легкобрасываемого покрытия может осуществляться за счет исключения защитного гравийного слоя.

В качестве облегченных элементов кровельного покрытия рекомендуется применять: асбестоцементные утепленные плиты на асбестоцементном каркасе длиной 3 м по серии 1.465-9; асбестоцементные панели, изготавливаемые методом экструзии, длиной 6 м, разработанные ЦНИИпромзданий (шифр 227-76).

В качестве теплоизоляции рекомендуется применять облегченные плитные утеплители: плиты теплоизоляционные из пенопласта на основе резольных фенолформальдегидных смол по ГОСТ 20916–75; плиты перлитофосфогелевые из перлитового легковеса по ГОСТ 21500–76; плиты теплоизоляционные из полистирольного пенопласта по ГОСТ 15588–70. Перечисленные типы утеплителей не требуют устройства выравнивающей цементно-песчаной стяжки.

Для обеспечения безопасности производства работ по устройству легкобрасываемого покрытия, а также для дальнейшей его безопасной эксплуатации и на случай аварийного взрыва под легкие плиты легкобрасываемого участка кровли необходимо укладывать рулонную арматурную сетку диаметром 5 мм с размером ячейки 200x200 мм по ГОСТ 8478–66 с креплением ее к несущим металлическим прогонам.

Для уменьшения сопротивления действию давления при взрыве внутри помещения асбестоцементные утепленные каркасные плиты и асбестоцементные панели, изготавливаемые методом экструзии, следует укладывать по сборным железобетонным плитам

с отверстиями для легкобрасываемой кровли или несущим металлическим прогонам поверх рулонной арматурной сетки без крепления.

Предотвращение сдвига плит обеспечивается устройством на несущих металлических прогонах упоров — металлических пластинок размером 80х150х6 мм и шагом 600 мм.

Мягкий рулонный водоизоляционный ковер кровли рекомендуется разрезать на карты в продольном направлении по линии сопряжения участков легкобрасываемого покрытия со сборными железобетонными плитами сплошного сечения обычной кровли, укладываемыми на концах стропильных балок или ферм покрытия в один ряд вдоль наружных продольных стен здания, а в поперечном направлении — по линиям, совпадающим с поперечными разбивочными осями здания.

При такой схеме разрезки площадь отдельной карты рулонного водоизоляционного ковра кровли составляет для зданий с шириной пролета 18, 24 и 30 м соответственно 45, 63 и 81 м².

Для облегчения вскрытия шва рулонного водоизоляционного ковра кровли при действии давления взрыва на внутреннюю поверхность помещения конструкцию шва рекомендуется проектировать в виде компенсатора из полиизобутилена, вкладываемого в шов, боковыми стенками которого являются плиты утеплителя.

Полость шва следует заполнять минеральной ватой и разделять тиоколовой мастикой марки У-30М по ГОСТ 13489—68. При такой конструкции шва рулонного водоизоляционного ковра кровли отпадает необходимость устройства организованного водоотвода с поверхности каждой карты легкобрасываемого покрытия, поскольку в этом случае оказывается достаточным установить воронки внутренних водостоков только на сборных железобетонных плитах сплошного сечения обычной кровли.

Плиты утеплителя в месте разрезки рулонного водоизоляционного ковра мягкой кровли легкораскрывающимся швом следует укладывать с зазором 5 см, а легкие асбестоцементные утепленные каркасные плиты и асбестоцементные панели, изготавливаемые методом экструзии, рекомендуется укладывать впритык.

3.6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗАПОЛНЕНИЙ ДВЕРНЫХ ПРОЕМОВ, ВОРОТ И ЛЮКОВ

Строительными нормами рекомендуется применение в качестве легкобрасываемых конструкций дверей, распашных ворот и открывающихся оконных переплетов (фрамуг). Однако нормами не определены требования к закреплению и запираению таких устройств, Masse поворотных конструкций, площади вскрываемых элементов. Из опыта эксплуатации таких конструкций в зданиях со взрывоопасными производствами установлено, что при имевших место аварийных взрывах далеко не все поворотные конструкции оказывались достаточно эффективными в условиях воздействия на них взрывной нагрузки.

На основании обобщения экспериментальных и расчетных данных, а также анализа последствий аварий промышленных взрывов установлено, что при достаточной площади остекленных поверх-

ностей, выполняющих роль легкобрасываемых конструкций, разрушение при взрыве внутри помещения были незначительными и ограничивались обычно разрушением остекления. При этом давление на основные несущие конструкции здания ограничивается величиной, не превышающей 3,5 кПа. В связи с этим следует принимать, что нагрузка от давления при взрывном горении горючих смесей внутри помещения на несущие конструкции (колонны, ригели и др.), передаваемая через узлы крепления поворотных конструкций и за счет их инерционности в процессе открывания не должна превышать величины 3,5 кПа. Таким образом, эффективность открывания поворотных устройств, применяемых в качестве легкобрасываемых, проявляется в том, что давление на основные несущие конструкции здания должно быть ограничено величиной, не превышающей 3,5 кПа.

Для расчетной оценки эффективности сбрасывания были проверены следующие поворотные конструкции:

1. Открывающиеся фрамуги двойных и одинарных оконных панелей серии ПР-05-50/73 марок (в числителе марка панели, в знаменателе марка фрамуги) $\frac{ДО-180}{Ф-1}$ и $\frac{О-180}{Ф-Ф}$, размер фрамуги 1150x724 мм, масса 76,2 кг, соответственно массой 38,1 кг; $\frac{ДО-120}{Ф-3}$ и $\frac{О-120}{Ф-3}$ размером фрамуги 1150x1124 мм и массой 54,8 и 27,4 кг;

2. Двери для промышленных зданий марки Д-2, размер полотна 2300x700 мм, масса 44,76 кг; марки Д-3, размер полотна 2300x1100 мм, масса 70,4 кг. Толщина полотна равна 40 мм;

3. Распашные ворота серии ПР-05-364, размер полотна 1,5x3,0 м, масса 441 кг; серии ПР-05-36.1, размер полотна 2,35x5,6 м, масса 1289 кг.

Расчетная оценка проводилась при условии, что взрыв протекает в ускоренном режиме горения с коэффициентом интенсификации, равном 2. Расчетные значения нагрузок, при которых вскрываются поворотные конструкции, приведены в табл. 3.15 [50].

При взрывах газозвудушных смесей со средними параметрами горения в рассматриваемых объемах производственных помещений двери являются эффективными легкобрасываемыми конструкциями в том случае, если давление, разрушающее запорные устройства, не превышает 2 кПа. При этом максимальное давление взрыва на ограждающие конструкции здания не превышает допустимого давления, равного 3,5 кПа. При взрывах смесей с высокими реакционно-кинетическими свойствами двери являются эффективными легкобрасываемыми конструкциями при объемах равных и более 2000 м³, при величине усилия, разрушающего запорное устройство, не превышающего 1,0 кПа.

Распашные ворота, применяющиеся в практике строительства, являются достаточно инерционными поворотными конструкциями, так как имеют значительную массу и размеры одного полотна. Так, например, при взрывах газозвудушных смесей с высокими реакционно-кинетическими свойствами наименьшая величина давления равная 4,72 кПа развивается внутри помещения объемом 1·10⁴ м³ при использовании в качестве легкобрасываемых поворотных конструкций распашных ворот серии ПР-05-36.4. Эта величина дав-

Т а б л и ц а 3.15. Расчетные значения нагрузок, действующих на поворотные конструкции

Марка кон- струкции	Нагрузка, разрушаю- щая запор- ное устрой- ство, кПа	Расчетные взрывные нагрузки, кПа, на ограждаю- щие конструкции при использовании поворотных конструкций					
		ГВС со средними пара- метрами горения*			ГВС с высокими реак- ционно-кинетическими свойствами**		
		10 ³	10 ^{3.5}	10 ⁴	10 ^{3.5}	10 ^{3.5}	10 ⁴
Открывающиеся оконные фрамуги							
ДО-180	0	2,0	1,05	0,8	5,2	2,75	2,05
Ф-1	1,0	2,24	1,3	1,1	5,45	2,8	2,36
ДО-120	0	1,87	1,0	7,7	4,9	2,62	2,02
Ф-3	1,0	2,15	1,28	1,08	5,15	2,8	2,25
О-180	0	1,35	0,71	0,53	3,45	1,85	1,38
Ф-1	1,0	2,0	1,41	1,27	3,63	2,0	1,57
О-120	0	1,25	0,67	0,51	3,3	1,75	1,35
Ф-1	1,0	1,95	1,39	1,26	3,43	1,87	1,60
Двери промышленных зданий							
Д-2	0	1,42	0,73	0,57	3,73	1,93	1,52
	1,0	1,7	1,5	1,36	3,98	2,24	1,79
Д-3	0	1,71	0,91	0,69	4,55	2,4	1,83
	1,0	1,9	1,62	1,4	4,42	2,33	1,89
Распашные ворота							
ПР-05-36.4	0	4,5	2,35	1,8	11,54	6,2	4,72
	1,0	4,65	2,60	2,1	11,9	5,9	4,9
ПР-05-36.1	0	5,95	3,1	2,4	15,7	8,15	6,25
	1,0	6,1	3,35	2,65	15,3	8,4	5,8

* Под средними параметрами горения принимается взрывное горение ГВС на нижнем пределе взрываемости.

** Под высокими реакционно-кинетическими свойствами рассматривается взрывное горение ГВС при стехиометрической концентрации.

ления превышает допускаемое в 1,4 раза. При взрывах смесей со средними параметрами горения минимальная величина давления возникает при тех же условиях, но составляет 1,8 кПа.

При взрывах газовоздушных смесей со средними параметрами горения все марки рассматриваемых открывающихся оконных фрамуг вскрываются при нагрузках до 3,5 кПа при величинах усилий, разрушающих запорные устройства, до 2 кПа.

При взрывах газовоздушных смесей с высокими реакционно-кинетическими свойствами оконные одинарные переплеты являются легкобрасываемыми конструкциями в ограждении зданий объемом от 10³ м³ и выше при величине усилий, разрушающих запорные устройства до 1,0 кПа. Оконные двойные переплеты

с такой же величиной разрушающего запорные устройства давления являются легкобрасываемыми поворотными конструкциями в ограждении зданий объемом $3 \cdot 10^3$ м³ и более.

Следует заметить, что на величину давления при взрыве горючих смесей внутри производственного объема значительное влияние оказывают масса поворотных конструкций, прочность их крепления к основным конструкциям зданий, объем взрывоопасного помещения и параметры горения взрывоопасных смесей.

При применении приведенных конструктивных решений легкобрасываемых элементов в каждом конкретном случае они должны проверяться на нагрузки, которые могут возникнуть на ограждающие конструкции при взрыве горючей смеси, для оценки их легкобрасываемости.

В зависимости от задач, входящих в защиту зданий от взрыва строительными методами, как приведенные конструктивные решения, так и любые другие, должны соответствовать по своей конструкции, массе, площади элемента, схеме опирания, площади ковра мягкой кровли и другим параметрам, нагрузке, при которой обеспечивается неразрушаемость самого слабого строительного элемента или технологического устройства.

ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ ЛЕГКОБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

4.1. ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗОК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗРЫВНОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ, НА НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЙ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по оценке эффективности ЛСК показали, что применение ЛСК является надежным методом защиты зданий от опасного повышения давления на ограждающие конструкции при взрывном горении ГВС. Причем, эффективность применения ЛСК определяется тем, насколько полно учтены параметры взрывоопасной ГВС при определении требуемой площади ЛСК и выполнены необходимые требования, предъявляемые к параметрам ЛСК, исходя из величины взрывной нагрузки, при которой обеспечивается неразрушаемость основных несущих конструкций.

Несущие конструкции эксплуатируемых и строящихся зданий со взрывоопасными производствами имеют различную прочность. При решении вопросов взрывоопасности за счет применения ЛСК в настоящее время не учитываются величина и характер нагрузок, действующих на несущие конструкции.

Из приведенного анализа взрывов горючих смесей внутри производственных зданий (гл. 1) видно, что только за период с 1970 по 1980 г. частичное разрушение строительных конструкций и оборудования составило 48,7%, а полное разрушение строительных конструкций и оборудования и частичное разрушение строитель-

ных конструкций соседних зданий — 11,5%. Это подтверждает предположение о том, что применение ЛСК без учета нагрузок, действующих на основные несущие конструкции зданий при взрывном горении ГВС внутри здания, не обеспечивает требуемой взрывобезопасности производств.

Применение ЛСК является эффективным только тогда, когда возникающие нагрузки в объеме не превышают несущей способности основных конструкций за счет снижения воздействия взрывных нагрузок на ограждающие конструкции и обеспечения взрывоустойчивости сооружения. Под взрывоустойчивостью следует понимать способность сооружения сохраняться после аварийного взрыва в таком состоянии, при котором возможна последующая его эксплуатация. Взрывоустойчивость зданий и сооружений характеризуется величиной допускаемого избыточного давления при взрывном горении ГВС на внутреннюю поверхность ограждающих конструкций, не превышающей нагрузок, которые могут привести к выходу из строя основных конструкций и оборудования.

Определение допускаемых нагрузок на строительные конструкции зданий взрывоопасных производств необходимо производить с учетом их назначения и особенностей работы в условиях действия взрывных нагрузок. Конструкции при действии на них динамических нагрузок могут работать как в упругой стадии, так и за пределом упругости. В принципе может быть допущена упругопластическая работа конструкций, но тогда восстановление конструкций потребует значительных затрат. Поэтому представляется целесообразным, чтобы наиболее ответственные конструкции, например, колонны, фермы, ригели работали в упругой стадии. Для второстепенных конструкций, например, стеновых панелей, могут быть допущены остаточные деформации. Для дверей, ворот, витражей, легких перегородок в тех случаях, когда это не ведет к нарушению технологических процессов, может быть допущено их разрушение.

При этом эффективность принимаемых мер защиты от взрыва зависит от ряда критериев. Важнейшим критерием является скорость возрастания давления при взрыве, которая определяет динамику воздействия давления на строительные конструкции. Максимальные скорости нарастания давления при взрывах ГВС составляют приблизительно 150 МПа/с. Эта величина определяет и возможную область защиты строительными мероприятиями. Вместе с этим доказано, что наиболее эффективно работают ЛСК при скоростях распространения пламени при взрывном горении $U_p \leq 0,2 C_{ш}$, где $C_{ш}$ — скорость распространения звука в ГВС [41, 48]. Защита зданий ЛСК может осуществляться и при больших скоростях горения, но эффективность их заметно снижается; при достижении скоростей горения приблизительно 80 м/с и более применение ЛСК является нецелесообразным.

Для того чтобы получить необходимые данные для разработки рекомендаций по проектированию зданий взрывоопасных производств в первую очередь необходимо установить, какую взрывную нагрузку могут они выдержать, не разрушаясь. Для этого необходимо оценить эффект воздействия взрывных нагрузок на несущие конструкции при вскрытии ЛСК.

Решение задачи по обеспечению устойчивости различных конструктивных элементов воздействию взрывных нагрузок при исполь-

зовании ЛСК в зданиях взрывоопасных производств нельзя рассматривать отдельно от решения задачи по оценке несущей способности основных конструкций, обеспечивающих взрывоустойчивость здания в целом. Действительно, если основные конструкции каркаса здания, например, колонны не могут воспринять динамическую нагрузку, возникающую при взрыве горючей смеси внутри помещений, то ни о какой взрывоустойчивости не может быть речи. В связи с этим необходимо знать, какую динамическую нагрузку могут выдержать, не разрушаясь, основные несущие конструкции здания.

Расчет конструкций с учетом воздействия взрывных нагрузок для обеспечения способности здания к дальнейшей эксплуатации может производиться по предельному состоянию 1а и 1б [25, 43]. Состояние 1а устанавливается для конструкций, в которых не допускаются остаточные деформации, вызывающие необходимость восстановительного их ремонта или замены. Достижение состояния 1а характеризуется появлением в растянутой арматуре динамического предела текучести.

Поскольку в железобетонных конструкциях, армированных высокопрочными сталями, после достижения в арматуре условного предела текучести изгибающий момент, воспринимаемый сечением, не остается постоянным, а продолжает расти до некоторого предельного значения, то состояние 1б представляется возможным нормировать величинами усилий, получаемых в результате динамического расчета. В статически неопределимых конструкциях, если это не оговаривается специальными условиями, допускаются в отдельных сечениях остаточные деформации, сопровождающиеся трещинами, ограниченными по ширине. Предельное состояние 1а такой конструкции достигается в результате ее работы в упруго-пластической стадии.

В переармированных изгибаемых и внецентренно сжатых элементах, например колоннах, предельное состояние 1а достигается в результате работы в упругой стадии. В конструкциях, которые предназначены для многократного восприятия динамической нагрузки, пластические деформации, как правило, не допускаются.

В зданиях с взрывоопасными производствами за период эксплуатации более 50 лет взрывы внутри помещений могут происходить многократно и сопровождаться пожарами, снижающими прочностные характеристики материалов элементов конструкций. С целью максимального уменьшения затрат на восстановление зданий после аварий следует предусматривать разрушение только легкосбрасываемых конструкций или их узловых соединений с основными конструкциями.

При расчетах конструкций на однократное динамическое воздействие нагрузки большой интенсивности, характеризующейся малым временем воздействия на сооружение ($\tau \approx 10^{-3}$ с), большое значение имеет, в какой стадии (упругой или упругопластической) работает конструкция. При работе конструкции в упруго-пластической стадии существенно повышаются расчетные динамические характеристики материала конструкции: сопротивление бетона и арматуры по сравнению со статическими. Это особенно характерно для железобетонных конструкций, выполненных с при-

менением арматуры класса А-1 и А-II, несущая способность которых может быть повышена в 1,75 раза.

При нагрузках малой интенсивности и времени действия ($\tau > 10^{-1}$ с) для арматурных сталей классов А-IV, А-IIIB и В-II, применяющихся в несущих конструкциях промышленных зданий, повышение предела текучести можно не учитывать [42, 43], так как становится меньше разница между допускаемыми нагрузками, полученными при расчетах в упругой и пластической стадиях работы конструкции. Допущение пластических деформаций в несущих конструкциях, например, в колоннах позволит увеличить предельную нагрузку на каркас здания лишь в 1,2 раза, но при последующем взрывном воздействии на сооружение его реальная взрывоустойчивость по сравнению с исходной существенно уменьшится.

Учитывая, что здания для взрывоопасных производств относят к классу сооружений, предназначенных для многократного восприятия динамических нагрузок, их несущие конструкции целесообразно рассчитывать по предельному состоянию 1а. Фактически элементы, рассчитываемые по предельному состоянию 1а, будут работать в условно-упругой стадии, поэтому при подборе сечения арматуры внецентренно сжатых конструкций следует считать, что в растянутой арматуре наиболее напряженных сечений достигаются напряжения, соответствующие динамическому пределу текучести.

Взрывную нагрузку следует принимать равномерно распределенной по грузовой площади элемента и приложенной нормально к ее поверхности (гл. II, § 1).

Итак, если расчет конструкции производить по предельному состоянию 1а, 1б, т.е. в упругой стадии, то условие прочности для изгибаемых конструкций запишется в следующем виде:

$$M_{\text{доп}} = M_q + M_d, \quad (4.1)$$

где $M_{\text{доп}}$ — полный изгибающий момент, который может воспринять конструкция; M_q — изгибающий момент от действия статической нагрузки; M_d — изгибающий момент от действия динамической нагрузки.

Динамический изгибающий момент определяется:

$$M_d = M_p K_d, \quad (4.2)$$

где M_p — момент от амплитудного значения динамической нагрузки (при условии, что она действует статически); K_d — коэффициент динамичности по изгибающему моменту,

тогда

$$M_{\text{доп}} = M_p K_d + M_q. \quad (4.3)$$

Если, например, известна конструкция колонны и величина момента от статической нагрузки, то при найденном коэффициенте динамичности K_d определяется динамический момент M_p , а затем и допускаемая нагрузка

$$M_p = (M_{\text{доп}} - M_q) / K_d. \quad (4.4)$$

поэтому одной из основных задач является нахождение коэффициента динамичности. Для нахождения коэффициента динамичности необходимо знать выражение для функции динамичности, которая определяется из решения уравнения

$$T''(t) + \omega^2 T(t) = \omega^2 f(t). \quad (4.5)$$

Это уравнение получается при использовании метода Бубнова–Галеркина для решения уравнения колебаний балки либо плиты и имеет один и тот же вид для обеих конструкций. Здесь ω – частота собственных колебаний:

для балки

$$\omega_0^2 = \left[\int_0^l f(x)F(x)dx \right] / \left[m \int_0^l F^2(x)dx \right];$$

для плиты

$$\omega_0^2 = \left[\int_0^a \int_0^b f(x,y)F(x,y)dxdy \right] / \left[m \int_0^a \int_0^b F^2(x,y)dxdy \right],$$

где функция f характеризует изменение динамической нагрузки по координатам, функция F дает форму прогиба от действия статической нагрузки интенсивностью f .

Уравнение (4.5) представляет собой уравнение вынужденных колебаний системы с одной степенью свободы.

Как показывают исследования [44], а также анализ расчетов конструкций на действие кратковременных нагрузок, в большинстве случаев с достаточной для практических целей точностью конструкцию можно рассматривать как систему с одной степенью свободы. При этом погрешности при определении перемещений (деформаций) не будут превышать 2–3%, а при определении изгибающих моментов и поперечных сил – 10–20%, что соответствует точности задания параметров расчетных взрывных нагрузок, возникающих при взрывном горении ГВС внутри помещений.

Отсюда следует, что для нахождения функции динамичности для конструкции (колонны, балки, плиты) ее можно рассматривать как систему с одной степенью свободы, загруженной заданной динамической нагрузкой. При этом только важно наиболее точно определить частоту собственных колебаний.

Например, определяя функцию динамичности для колонны многоэтажного здания, вполне естественно для частоты собственных колебаний колонны принять частоты собственных колебаний всего здания в целом и найти функцию динамичности из решения уравнения

$$T''(t) + \omega^2 T(t) = P f(t). \quad (4.6)$$

Для нахождения функции динамичности необходимо знать вид и характер динамической нагрузки, возникающей при взрывном горении ГВС внутри помещения. При расчете конструкций на действие динамической нагрузки, возникающей при взрыве ГВС, последняя может быть представлена в виде

$$P(x, t) = P f(x) f(t),$$

где P – амплитудное значение динамической нагрузки; $f(x)$, $f(t)$ – функции, характеризующие изменение нагрузки по координатам и во времени.

Предполагая, что динамическая нагрузка является равномерно распределенной, т.е. $f(x) = 1$, динамические перемещения и внутренние усилия в конструкции будут определяться:

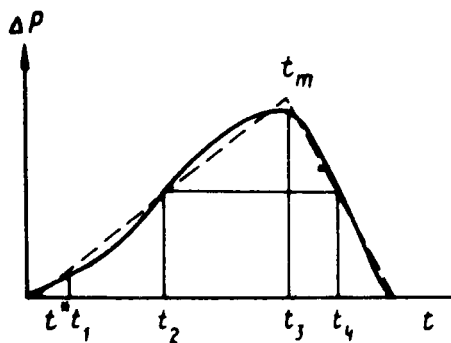


Рис. 4.1. Зависимость $P = f(t)$, аппроксимируемая аналитическими функциями-многочленами

$$y_d(x, t) = y_{ст}^p(x) T(t);$$

$$M_d(x, t) = M_{ст}^p(x) T(t); \quad (4.7)$$

$$Q_d(x, t) = Q_{ст}^p(x) T(t),$$

где $y_{ст}^p(x)$ — статический прогиб; $M_{ст}^p(x)$ — статический изгибающий момент; $Q_{ст}^p(x)$ — поперечная сила от амплитудного значения действующей динамической нагрузки; $T(t)$ — функция динамичности.

Ее максимальное значение в интервале действия динамической нагрузки является коэффициентом динамичности

$$K_d = \max T(t). \quad (4.8)$$

Если имеются экспериментальные или теоретические кривые, определяющие величину и характер динамической нагрузки в зависимости от времени при взрыве ГВС внутри помещения, уравнения которых неизвестны, то прежде всего возникает вопрос о достаточно точной аппроксимации этих кривых.

Для случая наиболее точного решения этой задачи выражение функции динамичности $T(t)$ запишем в следующем виде (рис. 4.1) :

$$T(t) = y(t_m) \cos \omega_1(t - t_m) + \frac{y'(t_m)}{\omega_1} \sin \omega_1(t - t_m) + \\ + \frac{m \omega^2}{m_1 \omega_1^2} \frac{\omega_1}{P_m} \int_{t_m}^t F_1(\tau) \sin \omega_1(t - \tau) d\tau, \quad (4.9)$$

где m — масса соответственно до вскрытия ЛСК; m_1 — после вскрытия ЛСК; ω, ω_1 — частоты свободных колебаний конструкции до и после вскрытия ЛСК; t_m — время от начала взрыва ГВС до достижения максимального давления; P_m — максимальное значение давления, развиваемое внутри помещения при взрыве ГВС; $F_1(\tau)$ — функция, описывающая зависимость давления от времени на участке падения давления в интервале времени $t_m > t$;

$$y(t_m) = \frac{\omega}{P_m} \int_0^t F(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau \Big|_{t=t_m}, \quad (4.10)$$

где $F(\tau)$ — функция, описывающая зависимость давления от времени на участке нарастания давления $0 \leq t \leq t_m$.

В формуле (4.10) предполагается, что максимальные перемещения достигаются конструкцией на участке падения давления после

вскрытия ЛСК, когда масса и частота свободных колебаний конструкции изменяются, т.е. в момент времени $t = t_m$ (рис. 4.1).

Чтобы найти значение коэффициента динамичности, необходимо решить уравнение $T'(t) = 0$, и найденное из решения этого уравнения значение времени t^* подставить в выражение для функции динамичности $T(t)$ (4.9).

Собирая воедино все коэффициенты при $\sin \omega_1 t$, $\cos \omega_1 t$ и свободные члены и обозначая их соответственно через А, В и С, приведем уравнение $T'(t) = 0$ к виду:

$$A \sin \omega_1 t + B \cos \omega_1 t - C = 0. \quad (4.11)$$

Решение его сводится к решению уравнения

$$z^2 - \frac{2A}{B+C} z - \frac{C-B}{C+B} = 0 \quad (4.12)$$

и искомое время определяется

$$t^* = \frac{2}{\omega_1} \arctg z. \quad (4.13)$$

Анализ уравнения (4.12) показывает, что оно не имеет положительного корня в двух случаях:

- 1) при $A < 0$, $B > 0$ и $|B| < |C|$;
- 2) при $A < 0$, $B < 0$ и $|B| < |C|$.

Анализ экспериментальных и теоретических зависимостей, определяющих величину и характер динамических нагрузок в зависимости от времени при взрыве ГВС внутри помещений различных объемов показал, что они могут быть аппроксимированы одними и теми же аналитическими функциями-многочленами. При этом аппроксимация должна производиться по интервалам многочленами различных степеней.

Для наиболее часто встречающихся графиков зависимости давления от времени было установлено, что аппроксимация может производиться следующим образом (см. рис. 4.1).

1. На первом интервале нарастания давления $0 \leq t \leq t_1$. Это прямая

$$f_1(t) = \Phi t.$$

2. На втором интервале нарастания давления $t_1 \leq t \leq t_2$ аппроксимирующей функцией является кубическая парабола

$$f_2(t) = at^3 + bt^2 + ct + d.$$

3. На следующем интервале $t_2 \leq t \leq t_3$ — квадратная парабола с вершиной в точке $t_3 - t_m$

$$f_3(t) = gt^2 + ft + n.$$

В точке $t=t_3$ давление достигает максимального значения, и начинается спад давления.

4. На первом интервале падения давления предполагается, что оно происходит по параболе

$$f_3(t) = gt^2 + ft + n \text{ при } t_3 \leq t \leq t_4.$$

5. На последнем интервале при $t > t_4$ спад давления происходит по прямолинейному закону

$$f_4(t) = \phi_1 t + \phi_2.$$

Для нахождения аппроксимирующих функций можно воспользоваться интерполяционными многочленами Лагранжа. Тогда будем иметь:

$$f_2(t) = f_2(t_1) \frac{(t-t_2)(t-t_3)(t-t_4)}{(t_1-t_2)(t_1-t_3)(t_1-t_4)} + f_2(t_2) \frac{(t-t_1)(t-t_3)(t-t_4)}{(t_2-t_1)(t_2-t_3)(t_2-t_4)} +$$

$$+ f_2(t_3) \frac{(t-t_1)(t-t_2)(t-t_4)}{(t_3-t_1)(t_3-t_2)(t_3-t_4)} + f_2(t_4) \frac{(t-t_1)(t-t_2)(t-t_3)}{(t_4-t_1)(t_4-t_2)(t_4-t_3)};$$

$$f_3(t) = f_3(t_1) \frac{(t-t_2)(t-t_3)}{(t_1-t_2)(t_1-t_3)} + f_3(t_2) \frac{(t-t_1)(t-t_3)}{(t_2-t_1)(t_2-t_3)} +$$

$$+ f_3(t) \frac{(t-t_1)(t-t_2)}{(t_3-t_1)(t_3-t_2)};$$

$$f_4(t) = f_4(t_1) \frac{t-t_2}{t_1-t_2} + f_4(t_2) \frac{t-t_1}{t_2-t_1}.$$

Выражение для $y(t_m)$ будет иметь следующий вид:

$$y(t_m) = \frac{\omega}{P_m} \int_0^{t_m} F(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau = \frac{\omega}{P_m} \left\{ \int_0^{t_1} f_1(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau + \int_{t_1}^{t_2} f_2(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau + \int_{t_2}^{t_m} f_3(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau \right\}. \quad (4.14)$$

И, наконец, интеграл, входящий в выражение (4.9) для функции динамичности будет выражаться

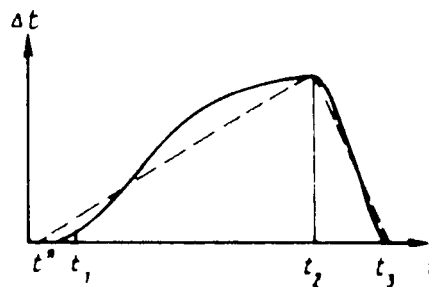
$$\int_{t_m}^t F_1(\tau) \sin \omega_1(t-\tau) d\tau = \int_{t_m}^{t_3} f_3(\tau) \sin \omega_1(t-\tau) d\tau +$$

$$+ \int_{t_3}^t f_4(\tau) \sin \omega_1(t-\tau) d\tau. \quad (4.15)$$

В интегралы (4.14) и (4.15) следует подставить выражения функций $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ и $f_4(t)$, записанные в общем виде.

В этом решении изменение массы конструкции и частоты свободных колебаний происходит в момент времени $t=t_m$, когда давление взрыва достигает максимального значения.

Рис. 4.2. Зависимость $P = f(t)$, аппроксимируемая ломаными линиями



Анализ кривых $P(t)$ показал, что изменение давления можно аппроксимировать также достаточно точно ломаными линиями, т.е. представить закон $P(t)$ в виде треугольного импульса (рис. 4.2).

1. Предположим, что при срабатывании ЛСК масса и частота колебаний конструкции изменяются незначительно, тогда функция динамичности будет иметь следующий вид:

$$T(t) = \omega \int_0^t F(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau = \omega \left\{ \int_0^{t_1} f_1(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau + \int_{t_1}^{t_2} f_2(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau + \int_{t_2}^t f_3(\tau) \sin \omega(t-\tau) d\tau \right\}, \quad (4.16)$$

где

$$f_1(\tau) = \frac{t_1 - t^*}{t_2 - t^*} \frac{\tau}{t_1},$$

$$f_2(\tau) = \frac{\tau - t^*}{t_2 - t^*},$$

$$f_3(\tau) = \frac{\tau - t^*}{t_2 - t^*} - (\tau - t_2) \left(\frac{1}{t_2 - t^*} + \frac{1}{t_3 - t_2} \right).$$

Вычисляя интегралы, находим:

$$T(t) = \frac{1}{t_1} \frac{t_1 - t^*}{t_2 - t^*} \left\{ t_1 \cos \omega(t-t_1) - \frac{\sin \omega t}{\omega} + \frac{1}{\omega} \sin \omega(t-t_1) \right\} + \frac{1}{t_2 - t^*} \left\{ t - t^* - (t_1 - t^*) \cos \omega(t-t_1) - \frac{t_3 - t^*}{(t_2 - t^*)(t_3 - t_2)} \left[t - t_2 - \frac{t}{\omega} \sin \omega(t-t_2) \right] \right\}. \quad (4.17)$$

Для нахождения коэффициента динамичности необходимо определить время t_m , при котором $T(t)$ достигает максимального значения.

Приравняв производную $T'(t)$ нулю, и выполнив соответствующие преобразования, получим уравнение вида

$$A \sin \omega t + B \cos \omega t - C = 0, \quad (4.18)$$

где

$$A = \frac{t_3 - t^*}{t_3 - t_2} \sin \omega t_2 - \frac{t^*}{t_1} \sin \omega t_1;$$

$$B = \frac{t_3 - t^*}{t_3 - t_2} \cos \omega t_2 - \frac{t^*}{t_1} \cos \omega t_1 - \frac{t_1 - t^*}{t_1};$$

$$C = \frac{t_2 - t^*}{t_3 - t_2}.$$

Это уравнение приводится к следующему виду:

$$z^2 - \frac{2A}{B+C} z + (C-B) = 0, \quad (4.19)$$

где

$$B+C = \frac{t_3 - t^*}{t_3 - t_2} \cos \omega t_2 + \frac{t^*}{t_1} (1 - \cos \omega t_1) - 1 + \frac{t_2 - t^*}{t_3 - t_2};$$

$$C-B = \frac{t_2 - t^*}{t_3 - t_2} - \left[\frac{t_3 - t^*}{t_3 - t_2} \cos \omega t_2 + \frac{t^*}{t_1} (1 - \cos \omega t_1) - 1 \right].$$

Можно показать, что уравнение с коэффициентами $2A/B + C$ и $(C - B)$ всегда имеет один положительный корень $z_1 > 0$

$$t_m = \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} z.$$

2. Если в результате срабатывания ЛСК масса конструкции и частота колебаний изменяются значительно, то коэффициент динамичности определяется по следующей формуле:

$$T(t) = y(t_2) \cos \omega_1 (t - t_2) + \frac{y'(t_2)}{\omega_1} \sin \omega_1 (t - t_2) +$$

$$+ \omega_1 \frac{m \omega^2}{m_1 \omega_1^2} \int_{t_2}^t F(\tau) \sin \omega_1 (t - \tau) d\tau, \quad (4.20)$$

где

$$y(t_2) = \frac{1}{t_2 + t^*} \left\{ \frac{t_1 - t^*}{t_1} \left[t_1 \cos \omega (t_2 - t_1) + \frac{1}{\omega} \sin \omega (t_2 - t_1) - \frac{1}{\omega} \sin \omega t_2 \right] + \right.$$

$$\left. + (t_2 - t^*) - (t_1 - t^*) \cos \omega (t_2 - t_1) - \frac{1}{\omega} \sin \omega (t_2 - t_1) \right\};$$

$$y'(t_2) = \frac{1}{t_2 - t^*} \left\{ \frac{t_1 - t^*}{t_1} [-\omega t_1 \sin \omega (t_2 - t_1) - \right.$$

$$- \cos \omega t_2 + \cos \omega (t_2 - t_1)] + 1 - \cos \omega (t_2 - t_1) + \omega (t_1 - t^*) \times$$

$$\left. \times \sin \omega (t_2 - t_1) \right\};$$

$$F(\tau) = \frac{\tau - t^*}{t_2 - t^*} - (\tau - t_2) \frac{t_3 - t^*}{(t_2 - t^*)(t_3 - t_2)}.$$

Окончательное выражение для функции динамичности имеет вид:

$$\begin{aligned} T(t) = & \gamma(t_2) \cos \omega_1 (t_1 - t_2) + \frac{\gamma'(t_2)}{\omega_1} \sin \omega_1 (t - t_2) + \\ & + \frac{m \omega_1^2}{m_1 \omega_1^2} \left\{ -\frac{1}{t_2 - t^*} [t - t^* (t_2 - t^*) \cos \omega_1 (t - t_2) - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 (t - t_2)] - \right. \\ & \left. - \frac{t_3 - t^*}{(t_2 - t^*)(t_3 - t_2)} [t - t_2 - \frac{1}{\omega_1} \sin \omega_1 (t - t_2)] \right\}; \quad (4.21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T(t) = & \gamma(t_2) \omega_1 \sin \omega_1 (t - t_2) + \gamma'(t_2) \cos \omega_1 (t - t_2) + \\ & + \frac{m \omega_1^2}{m_1 \omega_1^2} \left\{ -\frac{1}{t_2 - t^*} [1 + \omega_1 (t_2 - t^*) \sin \omega_1 (t - t_2) - \cos \omega_1 (t - t_2)] - \right. \\ & \left. - \frac{t_3 - t^*}{(t_2 - t^*)(t_3 - t_2)} [1 - \cos \omega_1 (t - t_2)] \right\}. \quad (4.22) \end{aligned}$$

Приравнявая производную нулю, получим

$$A \sin \omega_1 (t - t_2) + B \cos \omega_1 (t - t_2) - C = 0, \quad (4.23)$$

где

$$A = \omega_1 \left\{ \frac{m \omega_1^2}{m_1 \omega_1^2} - \gamma(t_2) \right\};$$

$$B = \gamma'(t_2) + \frac{m \omega_1^2}{m_1 \omega_1^2} \frac{1}{t_3 - t_2};$$

$$C = \frac{m \omega_1^2}{m_1 \omega_1^2}.$$

Это уравнение приводится к виду

$$z^2 - \frac{2A}{B + C} z + (C - B) = 0, \quad (4.24)$$

где

$$B + C = \gamma'(t_2) + \frac{m \omega_1^2}{m_1 \omega_1^2} \frac{2}{t_3 - t_2}$$

$$C - B = -\gamma'(t_2).$$

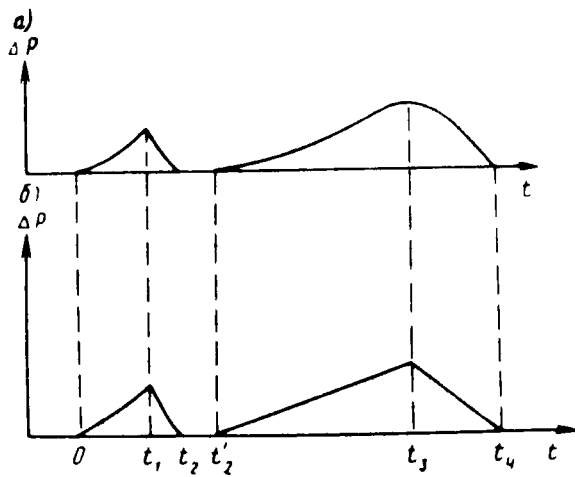


Рис. 4.3. Зависимость $P = f(t)$
 а — характер и величина действующей взрывной нагрузки; б — график динамической нагрузки для аппроксимации действующей нагрузки

Поскольку $y(t)$ — функция возрастающая, то $y'(t_2) > 0$, поэтому уравнение имеет один положительный корень

$$t_m = \frac{2}{\omega_1} \operatorname{arctg} z_1 + t_2. \quad (4.25)$$

Для коэффициента динамичности получаем $K_d = T(t_m)$.

Для оценки точности аппроксимации кривой давления $P(t)$ прямыми зависимостями (треугольным импульсом) необходимо произвести численные расчеты.

Кривые изменения динамической нагрузки, развивающейся при взрывном горении ГВС внутри здания взрывоопасных производств, имеющих ЛСК, могут характеризоваться возникновением нескольких пиков давления. Эта характеристика нагрузки накладывает определенные закономерности на ее воздействие на конструкции.

Первый пик соответствует давлению, при котором происходит разрушение, например, остекления, после чего давление резко падает, иногда до нуля. Затем при истечении продуктов сгорания через открытые отверстия, площадь которых недостаточна, происходит нарастание давления до максимального, а потом снова падение до нуля. При этом второй пик давления может превышать первый (рис. 4.3).

Как было показано выше, кривые динамических нагрузок могут быть аппроксимированы ломаными линиями и, в частности, могут быть представлены в виде треугольников.

Действующая нагрузка при взрывном горении ГВС внутри помещения характеризуется тем, что довольно медленно нарастает до максимального значения, но после его достижения очень быстро убывает до нуля, т.е.

$$\frac{t_2 - t_1}{t_1} < 1; \frac{t_4 - t_3}{t_3 - t_2} < 1. \quad (4.25a)$$

Для определения функции динамичности рассмотрим три интервала времени (см. рис. 4.3):

1. В общем виде нагрузка действует в интервале $0 \leq t < t_2$.

В интервале $0 \leq t \leq t_2$ нагрузка изменяется по закону $f_1(t) = P \cdot t / t_1$, а в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$ — по закону $f_2(t) = P \left(1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right)$.

Перемещение может достигнуть максимального значения в интервале $t_1 \leq t \leq t_2$, поэтому

$$y(t) = \delta_{11} \omega \int_0^{t_1} \frac{P\tau}{t_1} \sin(t-\tau) d\tau + \delta_{11} \omega \int_{t_1}^t P \left(1 - \frac{\tau-t_1}{t_2-t_1} \right) \sin \omega(t-\tau) d\tau; \quad (4.26)$$

$$y(t) = P \delta_{11} T(t) = y_{ст} T(t). \quad (4.27)$$

Функция динамичности $T(t)$ определяется по формуле

$$T(t) = \omega \int_0^{t_1} \frac{\tau}{t_1} \sin \omega(t-\tau) d\tau + \omega \int_{t_1}^{t_2} \left(1 - \frac{\tau-t_1}{t_2-t_1} \right) \times \\ \times \sin \omega(t-\tau) d\tau.$$

Окончательное выражение для функции динамичности имеет вид

$$T(t) = 1 - \frac{t-t_1}{t_2-t_1} - \frac{t_2}{\omega t_1(t_2-1)} \sin \omega(t-t_1) - \frac{\sin \omega t}{\omega t_1}. \quad (4.28)$$

Для того чтобы найти максимальное значение функции динамичности, т.е. установить коэффициент динамичности, следует приравнять производную $T'(t)$ нулю и из полученного уравнения найти время t^* , при котором $T(t)$ достигает максимального значения.

$$T'(t) = \frac{1}{t_2-t_1} + \frac{t_2}{t_1(t_2-t_1)} \cos \omega(t-t_1) - \frac{\cos \omega t}{t_1}. \quad (4.29)$$

Предположим, что $t-t_1 = U$, тогда

$$T'(t) = \frac{1}{t_2-t_1} + \frac{t_2}{t_1(t_2-t_1)} \cos \omega U - \frac{\cos \omega(U+t_1)}{t_1} \quad (4.30)$$

Это уравнение перепишем в виде

$$A \cos \omega U + B \sin \omega U - C = 0, \quad (4.31)$$

где коэффициенты А, Б, В вычисляются по формулам

$$A = \frac{t_2}{t_1(t_2-t_1)} - \frac{\cos \omega t}{t_1}; \\ B = \frac{\sin \omega t_1}{t_1}; \quad C = \frac{1}{t_2-t_1}.$$

Уравнение (4.31) приводится к виду

$$z^2 - \frac{2B}{A+C} z - \frac{A-C}{A+C} = 0. \quad (4.32)$$

После решения уравнения (4.32) искомое время равно

$$t^* = t_1 + U = t_1 + \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} z, \quad (4.33)$$

где z — действительный корень квадратного уравнения.

Коэффициент динамичности определяется уравнением

$$K_g = T(t^*) = 1 - \frac{U}{t_2 - t_1} + \frac{t_2}{t_1(t_2 - t_1)} \frac{\sin(2 \operatorname{arctg} z)}{\omega} - \frac{\sin(2 \operatorname{arctg} z + \omega t_1)}{\omega t_1}. \quad (4.34)$$

Найденное значение коэффициента динамичности следует сравнить с амплитудой f свободных колебаний системы после снятия нагрузки при $t > t_2$ и за коэффициент динамичности необходимо принять большее из этих значений.

Амплитуда свободных колебаний системы определяется по формуле

$$f = \sqrt{y^2(t_2) + \left(y' \frac{t_2}{\omega}\right)^2}, \quad (4.35)$$

где

$$y(t_2) = \frac{t_2}{t_1(t_2 - t_1)} \frac{\sin \omega(t_2 - t_1)}{\omega} - \frac{\sin \omega t_2}{\omega t_1};$$

$$y'(t_2) = -\frac{1}{t_2 - t_1} + \frac{t_2 \cos \omega(t_2 - t_1)}{t_1(t_2 - t_1)} - \frac{\cos \omega t_2}{t_1}.$$

Выше было отмечено, что динамическая нагрузка, возникающая при взрывном горении ГВС при вскрытии ЛСК, характеризуется

соотношением $\frac{t_2 - t_1}{t_1} < 1$,

где t_1 — время нарастания нагрузки до максимального значения; $(t_2 - t_1)$ — интервал времени, в котором происходит падение нагрузки.

Исследования показали, что динамическая нагрузка, изменяющаяся по рассматриваемому закону, для которой выполняется соотношение (4.25а), в некоторых случаях может не иметь точек экстремума в промежутке $[t_1, t_2]$, и поэтому максимальное перемещение, а следовательно, коэффициент динамичности следует определять как амплитуду свободных колебаний.

При определении коэффициента динамичности для нагрузки действующей в интервале времени, в котором происходит вскрытие ЛСК ($0 \leq t \leq t_2$), необходимо обязательно рассмотреть интервалы времени $[t_1, t_2]$ и $[t > t_2]$, т.е. когда система совершает свободные колебания и значения коэффициента динамичности принимать наибольшие. При этом может оказаться, что коэффициент динамичности будет меньше 1.

2. Рассмотрим действие нагрузки в интервале времени $t_2 \leq t \leq t_4$.

В этом случае перемещение может достигать максимального значения при $t_3 \leq t \leq t_4$.

Для функции динамичности будем иметь выражение

$$T(t) = \omega \int_0^{t_3-t_2} \frac{\tau}{t_3-t_2} \sin \omega(t-\tau) d\tau + \int_{t_3-t_2}^{t-t_2} \left(1 - \frac{\tau-t_3+t_2}{t_4-t_3}\right) \times \\ \times \sin \omega(t-\tau) d\tau + y(t_2) \cos \omega(t-t_3) + \frac{y'(t_2)}{\omega} \sin \omega(t-t_3). \quad (4.36)$$

После вычисления интегралов получим:

$$T(t) = 1 - \frac{t-t_3}{t_4-t_3} - \frac{1}{\omega} \frac{\sin(t-t_2)}{t_3-t_2} + \frac{t_4-t_2}{(t_3-t_2)(t_4-t_3)} \frac{\sin \omega(t-t_3)}{\omega} + \\ + y(t_2) \cos \omega(t-t_3) + \frac{y'(t_2)}{\omega} \sin \omega(t-t_3). \quad (4.37)$$

Чтобы найти максимальное значение функции динамичности, необходимо определить время t^* из решения уравнения $T'(t) = 0$ и подставить его в уравнение (4.37).

Для производной $T'(t) = 0$ имеем:

$$T'(t) = -\frac{1}{t_4-t_3} - \frac{\cos \omega(t-t_2)}{(t_3-t_2)} + \frac{t_4-t_2}{(t_3-t_2)(t_4-t_3)} \cos(t-t_3) + y'(t_2) \times \\ \times \cos \omega(t-t_3) - y(t_2) \omega \sin \omega(t-t_3) = 0. \quad (4.38)$$

Предположим, что $U = t-t_3$, тогда $t-t_2 = U + T$, $T = t_3-t_2$.

Перепишем уравнение (4.38) в следующем виде:

$$T'(t) = -\frac{1}{t_4-t_3} - \frac{\cos \omega(t-T)}{t_3-t_2} + \frac{t_4-t_2}{(t_3-t_2)(t_4-t_3)} \cos \omega U - y(t_2) \times \\ \times \omega \sin \omega U + y'(t_2) \cos \omega U = 0. \quad (4.39)$$

В результате соответствующих преобразований приходим к уравнению:

$$A \cos \omega U - B \sin \omega U - C = 0, \quad (4.40)$$

где коэффициенты A , B , C вычисляются по формулам

$$A = \frac{t_4-t_2}{(t_3-t_2)(t_4-t_3)} - \frac{\cos \omega T}{t_3-t_2} + y'(t_2);$$

$$B = y(t_2) \omega - \frac{\sin \omega T}{t_3-t_2};$$

$$C = \frac{1}{t_4 - t_3}.$$

Уравнение (4.40) приводится к квадратному уравнению

$$z^2 + \frac{2B}{A+C} z - \frac{A-C}{A+C} = 0. \quad (4.41)$$

После решения уравнения (4.41) можно найти искомое время t^*

$$t^* = t_3 + U = t_3 + \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} z, \quad (4.42)$$

где z — пригодный корень квадратного уравнения.

Коэффициент динамичности вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} K_g = \max T(t) = T(t^*) = & 1 - \frac{t^* - t_3}{t_4 - t_3} - \frac{1}{\omega} \frac{\sin \omega(t^* - t_2)}{t_3 - t_2} + \\ & + \frac{t_4 - t_2}{(t_3 - t_2)(t_4 - t_3)} \frac{\sin \omega(t^* - t_3)}{\omega} + y(t_2) \cos \omega U(t^* - t_3) + \\ & + \frac{y'(t_2)}{\omega} \sin \omega(t^* - t_3). \end{aligned} \quad (4.43)$$

или

$$\begin{aligned} K_g = & 1 - \frac{U}{t_4 - t_3} - \frac{1}{\omega} \frac{\sin(2 \operatorname{arctg} z + \omega(t_3 - t_2))}{t_3 - t_2} + \frac{t_4 - t_2}{(t_3 - t_2)(t_4 - t_3)} \times \\ & \times \frac{\sin(2 \operatorname{arctg} gz)}{\omega} + y(t_2) \cos(2 \operatorname{arctg} z) + \frac{y'(t_2)}{\omega} \sin(2 \operatorname{arctg} z). \end{aligned} \quad (4.44)$$

Для нахождения функции динамичности при действии нагрузки в виде треугольного импульса для случая, когда нагрузка характеризуется соотношением $\frac{t_2 - t_1}{t_1} < 1$, можно получить решение в другом виде, более удобным для вычислений.

С этой целью перенесем начало координат в точку t_1 . Максимальное значение нагрузки будем находить из решения задачи, считая, что динамическая нагрузка действует по закону $P(t) = Pt/t_1$ в интервале времени $0 \leq t \leq t_1$.

Тогда

$$y(t) = \delta_{11} \omega \int_0^t P \frac{t}{t_1} \sin \omega(t - \tau) d\tau = P \delta_{11} \frac{1}{t_1} \left(t - \frac{\sin \omega t}{\omega} \right). \quad (4.45)$$

Откуда

$$\begin{aligned} y(t_1) &= P \delta_{11} \left(1 - \frac{\sin \omega t_1}{\omega t_1} \right); \\ y'(t_1) &= P \delta_{11} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{\cos \omega t_1}{t_1} \right); \end{aligned}$$

Теперь представим, что в интервале времени $0 \leq t \leq (t_2 - t_1)$ действует нагрузка, изменяющаяся по закону

$$P(t) = P \left(1 - \frac{t}{t_2 - t_1} \right). \quad (4.46)$$

В этих условиях при $t = 0$ и ненулевых начальных значениях: $y(0) = y(t_1)$; $\dot{y}(0) = \dot{y}(t_1)$ перемещение будет определяться по формуле

$$y(t) = P \delta_{11} \left\{ y(t_1) \cos \omega(t - t_1) + \frac{\dot{y}(t_1)}{\omega} \sin \omega(t - t_1) \right\} + \\ + P \delta_{11} \omega \int_0^{t-t_1} \left(1 - \frac{\tau}{t_2 - t_1} \right) \sin \omega(t - \tau) d\tau. \quad (4.47)$$

Для функции динамичности формула перемещения будет иметь вид

$$T(t) = y(t_1) \cos \omega(t - t_1) + \frac{\dot{y}(t_1)}{\omega} \sin \omega(t - t_1) + \\ + \omega \int_0^{t-t_1} \left(1 - \frac{\tau}{t_2 - t_1} \right) \sin \omega(t - \tau) d\tau = y(t_1) \cos \omega(t - t_1) + \\ + \frac{\dot{y}(t_1)}{\omega} \sin \omega(t - t_1) + 1 - \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} - \cos \omega(t - t_1) + \frac{1}{t_2 - t_1} \times \\ \times \frac{\sin \omega(t - t_1)}{\omega}. \quad (4.48)$$

При расчете коэффициента динамичности следует найти время t^* , при котором функция динамичности принимает максимальное значение. Для этого необходимо решить уравнение

$$- \frac{1}{t_2 - t_1} + \omega \sin \omega(t - t_1) + \frac{\cos \omega(t - t_1)}{t_2 - t_1} - y(t_1) \omega \sin \omega(t - t_1) + \\ + \dot{y}(t_1) \cos \omega(t - t_1) = 0.$$

Затем это уравнение приводится к виду

$$A \cos \omega(t - t_1) + B \sin \omega(t - t_1) = C = 0,$$

которое затем сводится к квадратному уравнению

$$z^2 + \frac{2B}{A + C} z - \frac{A - C}{A + C} = 0,$$

где

$$A = -\frac{1}{t_2 - t_1} + \dot{y}(t_1);$$

$$B = \omega [1 - \dot{y}(t_1)];$$

$$C = -\frac{1}{t_2 - t_1}.$$

После решения этого уравнения находим искомое время

$$t^* = t_1 + U = t_1 + \frac{2}{\omega} \operatorname{arctg} z,$$

где z — пригодный корень квадратного уравнения.

Выражение для коэффициента динамичности будет следующим:

$$K_d = 1 - \frac{U}{t_2 - t_1} - \cos(2 \operatorname{arctg} z) + \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{\sin(2 \operatorname{arctg} z)}{\omega} + \\ + y(t_1) \cos(2 \operatorname{arctg} z) + \frac{y'(t_1)}{\omega} \sin(2 \operatorname{arctg} z). \quad (4.49)$$

3. В интервале времени $t_4 < t$.

$$T(t) = y(t_4) \cos \omega(t - t_4) + \frac{y'(t_4)}{\omega} \sin \omega(t - t_4), \quad (4.50)$$

где

$$y(t_4) = \frac{t_4 - t_2}{(t_3 - t_2)(t_4 - t_3)} \frac{\sin \omega(t_4 - t_3)}{\omega} - \frac{1}{\omega} \frac{\sin(t_4 - t_2)}{t_3 - t_2} + \\ + y(t_2) \cos \omega(t_4 - t_3) + \frac{y'(t_2)}{\omega} \sin \omega(t_4 - t_3); \\ y'(t_4) = \frac{1}{t_4 - t_3} + \left\{ \frac{t_4 - t_2}{(t_3 - t_2)(t_4 - t_3)} \cos \omega(t_4 - t_3) - \frac{\cos(t_4 - t_2)}{t_3 - t_2} - \right. \\ \left. - \omega y(t_2) \sin \omega(t_4 - t_3) + y'(t_2) \cos \omega(t_4 - t_3) \right\}.$$

В этих уравнениях $y(t_2)$ и $y'(t_2)$ определяются по формуле (4.34).

Коэффициент динамичности следует находить как амплитуду свободных колебаний системы после снятия нагрузки, т.е.

$$K_g = f = \sqrt{y^2(t_4) + \left(\frac{y'(t_4)}{\omega} \right)^2}. \quad (4.51)$$

Приведенные формулы для нахождения коэффициентов динамичности были получены на основе аппроксимации графиков изменения динамической нагрузки при взрывном горении ГВС, найденных из решения соответствующих уравнений. Практически это приводит к замене кратковременной импульсивной нагрузки, изменяющейся по некоторому криволинейному закону, кратковременным импульсом, изменяющимся по закону треугольника.

Такой подход к решению задачи оправдывается следующими положениями. Во-первых, такая аппроксимация достаточно точна,

а ошибка идет в запас прочности. Полученные формулы достаточно просты и ими можно пользоваться в инженерных расчетах без особых затруднений.

4.2. РАСЧЕТ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ К ОСНОВНЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

В соответствии со СНиП узлы крепления ЛСК к конструкциям следует рассчитывать на основные сочетания постоянных, длительных и кратковременных нагрузок и иногда с дополнением одной из особых нагрузок.

Динамическое воздействие нагрузки, вызванной взрывом, может быть учтено коэффициентом динамичности K_d , на который следует умножить величину статического давления.

Допустим величина статического давления, вызванного взрывом, устанавливается в зависимости от несущей способности основных конструкций. Расчетная величина статического давления равна допустимой величине, умноженной на коэффициент перегрузки или недогрузки n , который характеризует возможное отклонение взрывного давления от допустимой величины в большую или меньшую сторону.

Учитывая, что взрывное давление может отклоняться от допустимого уровня на 30%, значения коэффициента перегрузки могут быть приняты равными $n = 1,3$ или $0,7$. В тех случаях, когда для конструкции неблагоприятен избыток взрывного давления, следует принимать $n = 1,3$ (например, при расчете конструкций на прочность или устойчивость). Коэффициент $n = 0,7$ можно учитывать при проверке креплений ограждающих конструкций на сбрасываемость, так как эти крепления должны разрушаться при взрыве в том случае, если взрывное давление окажется ниже допускаемого.

Расчет на основные сочетания нагрузок по обеспечению несущей способности сооружения и его элементов в процессе эксплуатации должен проводиться согласно действующим нормам.

Расчет на особое сочетание нагрузок, которое может возникнуть при взрыве, имеет две цели:

а) обеспечить сбрасываемость стеновых и кровельных ограждающих ЛСК при взрыве номинальной силы: ограждающие конструкции или их крепления должны разрушаться при действии особого сочетания нагрузок;

б) обеспечить несущую способность (прочность, устойчивость и т.д.) основных элементов каркаса сооружения — основных колонн, ферм и балок покрытия, оснований и анкерных болтов основных колонн.

Таким образом, главные элементы каркаса должны сохранять несущую способность как при основном, так и при особом сочетании нагрузки, а ограждающие конструкции или их крепления к каркасу здания должны оставаться прочными при основном сочетании нагрузок и разрушаться при дополнительном.

Расчет узлов крепления ЛСК заключается в проверке непрочности креплений при взрывной нагрузке. Условие непрочности может быть записано в следующем виде:

$$\sigma \leq R_{oc} \gamma_c^{oc}, \quad (4.52)$$

где σ — нормальное, касательное или приведенное напряжение при особом сочетании нагрузок; R_{oc} — расчетное сопротивление стали при особом сочетании нагрузок на растяжение, изгиб, срез в зависимости от марки материала и характера напряженного состояния рассчитываемой детали крепления; γ_c^{oc} — коэффициент условий работы крепления при особом сочетании нагрузок, учитывающий факторы, не поддающиеся расчету; для предварительного расчета принято $\gamma_c^{oc} = 1,2$, т.е. вводится 20%-й запас прочности крепления. Коэффициент условий работы рекомендуется устанавливать экспериментально.

Поскольку речь идет о разрушаемости креплений, расчетное сопротивление R_{oc} устанавливается по временному сопротивлению стали σ_b . В качестве базы для определения расчетного сопротивления σ_b принимается нормативное сопротивление $\sigma_b^{мин}$. Так как механические свойства стали изменчивы, при расчете конструкций на прочность в качестве нормативного сопротивления $\sigma_b^{мин}$ принимается некоторое минимальное значение временного сопротивления $\sigma_b^{макс}$, ниже которого с определенной степенью вероятности временное сопротивление стали быть не может. При расчете креплений на разрушение в качестве нормативного сопротивления следует принимать максимальную величину $\sigma_b^{макс}$.

Изменчивость механических свойств обычно описывается "нормальным" законом распределения. По данным [44] $\sigma_b^{мин} = R_n = \sigma_b^{ср} - 3a$, где отклонение "3 стандарта" ≈ 60 МПа. Считая кривую распределения напряжений симметричной, можно принять $\sigma_b^{макс} = R_n^{oc} = \sigma_b^{ср} + 3a$. Величина R_n приводится в нормах СНиП II-23-81. В зависимости от R_n получаем для стали 3:

$$R_n^{oc} = R_n + 6a \approx R_n + 120 \text{ МПа}. \quad (4.53)$$

Таким образом, величина R_n^{oc} может быть найдена с помощью общепринятых норм проектирования.

При расчете на прочность расчетное сопротивление стали определяется делением нормативного сопротивления на коэффициент надежности по материалу $\gamma_m > 1$, который учитывает возможность попадания в конструкцию стали с сопротивлением ниже нормативного. При проверке способности креплений разрушаться неблагоприятным будет обратный случай — превышение фактического сопротивления стали нормативного уровня. Считая, что вероятность этого превышения будет такой же, как вероятность понижения прочности, представляется возможным определять R_{oc} умножением R_n^{oc} на γ_m . Величины γ_m приводятся в СНиП II-23-81.

Взрывное давление может прикладываться к внутренним поверхностям помещения с достаточно высокой скоростью. В свою очередь, мгновенная прочность стали зависит от скорости приложения нагрузки. Повышение прочности материала креплений в зависимости от этой скорости по сравнению со статической прочностью предлагается учитывать коэффициентом $\gamma_v > 1$, для определения величины которого необходимы соответствующие экспериментальные исследования.

Поскольку взрывное давление действует не непосредственно на детали креплений, а на элементы ЛСК (панели), последние могут играть роль амортизаторов. Степень амортизации будет зависеть от материалов и конструкций элементов ЛСК и креплений. Влияние амортизации может быть изучено с помощью экспериментов и учтено либо специальным коэффициентом, либо уточнением значения коэффициента условий работы γ_c^{oc} , что представляется более удобным.

Расчетное сопротивление материала крепления может определяться по формуле

$$R_{oc} = R_n^{oc} \gamma_m \gamma_v. \quad (4.54)$$

Наиболее неблагоприятным сочетанием нагрузок при проверке креплений на разрушаемость будет случай, когда одновременно с взрывной нагрузкой, отрывающей элемент ЛСК от каркаса здания, будут действовать максимальные нагрузки, прижимающие элементы ЛСК к каркасу (положительное ветровое давление, снег и т.д.). При этом для большей безопасности при взрыве следует прижимающие элемент ЛСК нагрузки принимать без снижения их величины и без введения коэффициента сочетаний $n_c < 1$, СНиП II-23-81.

Расчет на основное сочетание нагрузок. Отрыв панели вызывается отрицательным давлением ветра. Расчетная величина этого давления $q^{bo} = q_n^{bo} n_b$. Расчетное усилие в одном креплении $N = q^{bo} S/m$. Расчетное сопротивление стали $R_n^{oc} = R_n / \gamma_m$. Исходя из условия прочности крепления $N/A \leq R_n S_c$, определяем необходимое сечение детали $A = N / R_n \gamma_c$.

Расчет на особое сочетание нагрузок. Отрыв панели вызывается давлением, которому препятствует положительная ветровая нагрузка. Расчетная отрывающая нагрузка $q_{oc} = q_n^{b3} n n_g - q_n^b n_b n_c$. Расчетное сопротивление стали $R_{oc} = R_n^{oc} \gamma_m \gamma_v$. Условие разрушаемости крепления $N_{oc}/A \geq R_{oc} \gamma_c$.

Если сечение детали крепления при расчете на основное сочетание нагрузок подобрано без излишнего запаса, то разрушение наступит тогда, когда

$$\frac{q_{oc}}{q^{bo}} > \frac{R_n^{oc}}{R_n} \frac{\gamma_c^{oc}}{\gamma_c}. \quad (4.55)$$

Определив положительное и отрицательное ветровое давление через нормативный скоростной напор ветра q_n^b как $q_n^{bn} = 0,8 q_n^b$ и $q_n^{bo} = 0,6 q_n^b$ и раскрыв значения q_{oc} , R_{oc} и R_n , условие (4.55) можно выразить через отношение нормативных величин взрывного давления и скоростного ветрового напора:

$$\frac{q_n^{b3}}{q_n^b} > \frac{n_b}{n K_d} \left[0,6 \gamma_m^2 \gamma_v \frac{\gamma_c^{oc}}{\gamma_c} - \left(1 + \frac{120}{R_n} \right) + 0,8 \right]. \quad (4.56)$$

Для расчета деталей крепления элементов легкобрасываемых конструкций, работающих на растяжение (отрыв ЛСК) ниже приведены следующие исходные данные:

- S — площадь поверхности стеновой легкобрасываемой панели;
- $q_n^{вп}$ — нормативное положительное ветровое давление;
- $q_n^{во}$ — нормативное отрицательное ветровое давление;
- n_v — коэффициент перегрузки ветрового давления;
- $q_n^{вз}$ — нормативное статическое взрывное давление;
- $n = 0,7$ — коэффициент недогрузки взрывного давления;
- $K_g = 1,3$ — коэффициент динамичности взрывного давления;
- R_n — нормативное сопротивление (по временному сопротивлению стали марки ВСтЗкп2—1 по ТУ 12-1-3023-80, 355 МПа);
- $R_n^{ос}$ — то же, при расчете на особое сочетание нагрузок при взрыве;
- γ_m — коэффициент безопасности по материалу (для сталей по ТУ 14-1-3023-80; $\gamma_m = 1,025$);
- $\gamma_c = 1$ — коэффициент условий работы при основном сочетании нагрузок;
- $\gamma_c^{ос} = 1,2$ — то же, при особом сочетании нагрузок;
- γ_v — коэффициент увеличения мгновенной прочности стали при повышении скорости приложения нагрузки, рекомендуется в первом приближении принимать $\gamma_v = 1,2$;
- n_c — коэффициент сочетаний для кратковременных нагрузок, $n_c = 0,8$.

С учетом принятых числовых значений величин, входящих в выражение (4.56), получаем

$$\frac{q_n^{вз}}{q_n^в} > 2,9. \quad (4.57)$$

Таким образом, для того чтобы спроектированное без запаса прочности при основном сочетании нагрузок крепление легкобрасываемой конструкции, например стеновой панели, разрушалось при взрыве, достаточно, чтобы взрывное давление превосходило нормативный скоростной напор ветра примерно в три раза. Однако практически сечения элементов крепления назначаются конструктивно и часто с большим запасом прочности, при этом необходимая для разрушения взрывная нагрузка будет увеличиваться пропорционально этому запасу.

Приведенный расчет деталей крепления может быть распространен и на расчет их соединений (сварных и болтовых).

4.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЙ СТЕНОВЫХ И КРОВЕЛЬНЫХ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Расчетные характеристики болтов. Для определения расчетных характеристик болтов использована та же методика, которая принята для определения расчетных характеристик прокатных металлов.

Аналогично формуле (4.54) расчетное сопротивление материала болта при взрыве принято равным

$$R_{oc}^b = R_n^{ocb} \gamma_m^b \gamma_v \quad (4.58)$$

где R_n^{ocb} — нормативное сопротивление материала болта при особом сочетании нагрузок; γ_m^b — коэффициент безопасности по материалу болта; γ_v — коэффициент увеличения прочности стали при повышении скорости приложения нагрузки.

В первом приближении для болтов класса 4.6 принято аналогично формуле (4.53)

$$R_n^{ocb} = R_n + 120 \text{ МПа}; \quad (4.59)$$

где R_n — нормативное сопротивление стали болтов, принимаемое при расчетах на прочность и равное временному сопротивлению материала болта.

Средняя величина R_n принята равной 400 МПа. Ввиду отсутствия данных в нормах значение $\gamma_m^b = 1,15$ принято по аналогичным данным ведомственных норм треста Гидромонтаж Минэнерго СССР СТП 513—78, $\gamma_v = 1,2$ как и ранее.

В результате $R_{oc}^b = 400 \cdot 1,15 \cdot 1,2 = 552$ МПа. Это сопротивление использовано при расчете болтов на растяжение. При расчете болтов на срез в качестве расчетного сопротивления принималась величина $R_n = 345$ МПа.

Расчет креплений стеновой панели ПСМ (рис. 4.4).

Деталь крепления $R_n = 345$ МПа; $R_n^{oc} = 345 + 120 = 465$ МПа; $\gamma_m = 1,025$; $R_{oc} = 465 \cdot 1,025 \cdot 1,2 = 572$ МПа; $\gamma_c^{oc} = 1,2$.

Несущая способность детали $\phi 16$ мм:

$$[N] = R_{oc} \gamma_c^{oc} A_n = 57,2 \cdot 1,2 \cdot 2 = 137,28 \text{ кН}.$$

Нагрузка на деталь крепления приходится с площади 18 м^2 , разрушающее давление на панель $137,28/18 = 7,62$ кПа.

Для III ветрового района СССР нормативный ветровой напор $q^{вп} = 450$ Па. С учетом аэродинамического коэффициента 0,8 и коэффициента перегрузки 1,2 расчетный ветровой напор

$$q^{вп} = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 450 = 432 \text{ Па}.$$

Необходимое расчетное давление, вызванное взрывом

$$q^{вз} = 7,62 + 0,432 = 8,052 \text{ кПа}.$$

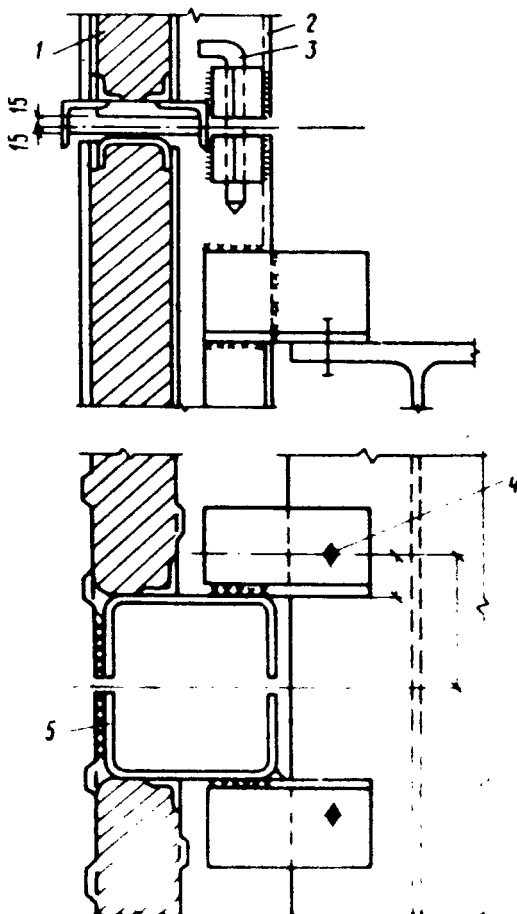


Рис. 4.4. Узел крепления панели ПСМ к опорному ригелю
1 — панель ПСМ, 2 — рама панели,
3 — стержень диаметром 16 мм, 4 — болт М20; 5 — опорный ригель

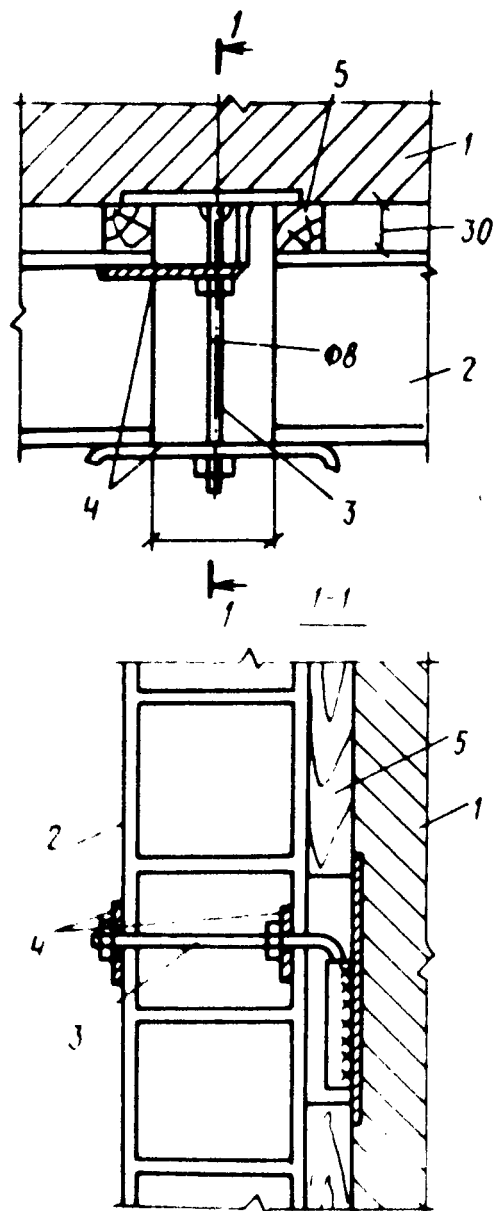


Рис. 4.5. Узел крепления
экструзионных стеновых пане-
лей
1 — железобетонная колонна;
2 — стеновая панель; 3 — метал-
лический стержень 8 мм; 4 — метал-
лические накладки; 5 —
деревянная рейка

Предполагая, что динамичность нагрузки компенсируется амортизацией панели ($K_d = 1$) и с учетом коэффициента недогрузки $n = 0,7$, необходимое нормативное взрывное давление

$$q_n^{B3} = 8,052/0,7 = 11,5 \text{ кПа.}$$

Узел 1 п.

Крепление осуществляется болтом М 20 класса 4.6, работающим на срез $R_{oc}^{cp} = 410 \text{ МПа}$, $A_n = 3,14 \text{ см}^2$. Несущая способность болта $[N] = R_{oc}^{cp} \gamma_c^{oc} A_n = 41 \cdot 1,2 \cdot 3,14 = 154,5 \text{ кН}$.

Нагрузка на узел приходится с площади $4,5 \text{ м}^2$; разрушающее давление на панель $154,5/4,5 = 34,3 \text{ кПа}$.

Расчет креплений стеновых асбестоцементных экструзионных панелей (рис. 4.5).

Размер панелей $6 \times 6 \text{ м}$. Крепление в двух точках.

Деталь 1. $\phi 8$, резьба М 8, $A = 0,5 \text{ см}^2$; $R_{oc} = 572 \text{ МПа}$. Несущая способность детали

$$[N] = R_{oc} \gamma_c^{oc} A_n = 57,2 \cdot 1,2 \cdot 0,5 = 34,32 \text{ кН}.$$

Нагрузка на деталь приходится с площади $3,6 \text{ м}^2$.

Разрушающее давление на панель $34,32/3,6 = 9,53 \text{ кПа}$

Ветровое расчетное давление $1,2 \cdot 0,8 \cdot 450 = 0,432 \text{ кПа}$.

Необходимое нормативное давление, вызванное взрывом:

$$q_u^{B3} = (95,3 + 0,432) / 0,7 = 14,23 \text{ кПа}.$$

Расчет креплений кровельных панелей. Размер панели $3 \times 12 \text{ м}$, масса панели $47,2 \cdot 1,1 = 51,9 \text{ кг}$. Масса рубероида с мастикой $8 \cdot 1,1 = 8,8 \text{ кг/м}^2$. Гравийная подсыпка $40 \cdot 1,2 = 48 \text{ кг}$. Панель крепится в четырех углах швами $6-8 \text{ мм}$. Нормативное сопротивление металла шва по временному сопротивлению $R_{min} = 420 \text{ МПа}$; $R_{min}^{oc} = 420 \cdot 1,2 = 504 \text{ МПа}$. Расчетное сопротивление металла шва срезу при особом сочетании нагрузок $R_{wf}^{oc} = R_{min}^{oc} \cdot 0,55 \cdot \gamma_{wm} \gamma$, где $0,55$ — коэффициент перехода от растяжения к срезу; $\gamma_{wm}^V = 1,25$ — коэффициент безопасности по металлу шва; $\gamma_V = 1,2 \cdot R_{wf}^{oc} = 504 \cdot 0,55 \cdot 1,25 \cdot 1,2 = 415,8 \text{ МПа}$.

Несущая способность соединения по прочности металла шва

$$[N]_{wf} = R_{wf}^{oc} \gamma_{wf} \gamma_c^{oc} \beta_f k_f l_w$$

где $\gamma_{wf} = 1$; $\beta_f = 0,7$ (коэффициент при ручной сварке); $k_f = 0,6 \text{ см}$ — катет шва; $l_w = 8 - 1 = 7 \text{ см}$ — расчетная длина шва. $[N]_{wf} = 41,58 \cdot 1,2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \times 7 = 14,66 \text{ кН}$.

Нормативное сопротивление стали разрыву $R_n = 345 \text{ МПа}$; $R_n^{oc} = 345 + 120 = 465 \text{ МПа}$; $\gamma_m = 1,025$; $R_{oc} = 465 \cdot 1,25 \cdot 1,2 = 572 \text{ МПа}$.

Расчетное сопротивление металла зоны сплавления срезу

$$R_{wz}^{oc} = 0,45 \cdot R_{oc} = 0,45 \cdot 572 = 257 \text{ МПа}.$$

Несущая способность соединения по металлу зоны сплавления

$$[N]_{mz} = R_{wz}^{oc} \gamma_{mz} \gamma_c^{oc};$$

$$\gamma_{wz} = 1; \beta_z = 1; k_f = 0,6 \text{ см}; l_w = 7 \text{ см};$$

$$[N]_{wz} = 25,7 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 7 = 12,95 \text{ кН}.$$

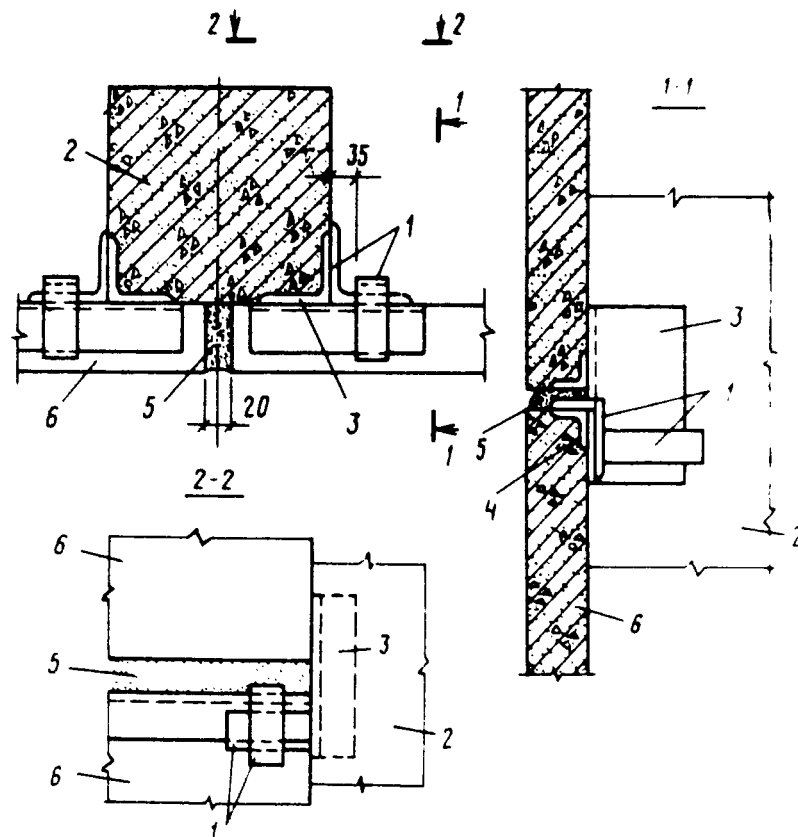


Рис. 4.6. Узел крепления стеновой панели из автоклавного ячеистого бетона к колоннам каркаса здания

1 — металлический уголок 100х14 мм; 2 — колонна; 3 — закладная деталь в колонне; 4 — то же, в панели; 5 — цементно-песчаный раствор марки М50; 6 — стеновая панель

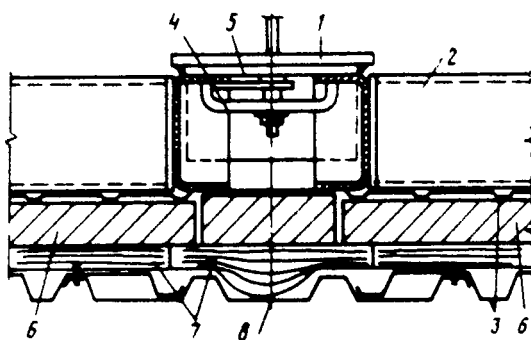


Рис. 4.7. Узел крепления стеновых панелей из металлических профилированных листов с утеплителем (шифр 217-78)

1 — колонна; 2 — каркас из швеллеров; 3 — металлические профилированные листы; 4 — накладка для крепления панелей к колонне; 5 — пластина со стержнем диаметром 14 мм; 6 — жесткие минераловатные плиты; 7 — вкладыши из минераловатных плит; 8 — нащельник

В качестве несущей способности сварного шва принята меньшая из величин $[N]_{wf}$ и $[N]_{wz}$, равная 12,95 кН.

Нагрузка на шов собирается с площади 9 м².

Разрушающее крепление давления $12,95/9 = 2,1$ кПа. Учитывая снеговую нагрузку для района 1500 кН/м² и коэффициент С, учитывающий снеговой мешок, равный 3, имеем расчетную снеговую нагрузку $1,500 \cdot 1,4 \cdot 3 = 6,3$ кПа (1,4 — коэффициент перегрузки).

Необходимое нормативное взрывное давление равно

$$q_n^{B3} (2,1 + 6,3 + 51,9 + 8,8 + 48) / 0,7 = 27,52 \text{ кПа.}$$

Т а б л и ц а 4.1. Результаты расчетов креплений ЛСК к ограждающим конструкциям

Тип ограждающей конструкции	Площадь, с которой нагрузка приходится на крепление, м ²	Слабейший элемент крепления и его напряженное состояние	Нормативное статическое взрывное давление, разрушающее крепление, кПа
Кровельная панель 3х12 м с учетом снеговой нагрузки в месте перепада высоты здания для 1У снегового района; расчетная величина снеговой нагрузки, 6,3 кН/м ²	9	Сварной шов 6–8 мм, срез	27,52
Стеновая панель ПСМ	18	Стержень с резьбой М16	11,5
Стеновая асбестоцементная экструзионная панель для сельскохозяйственных зданий	3,6	Стержень с резьбой М8, растяжение	14,23
Стеновая керамзитобетонная типовая панель	2,7	Арматурный стержень ϕ 14 мм, растяжение	56,54
Стеновая панель из профилированного настила с заполнением (стекло или минераловатный материал)	9	Стержень ϕ 12 мм, растяжение	12,92
Стеновая асбестоцементная панель:			
проектное решение	1,8	Болт М14, растяжение	67,2
фактически выполненное решение		Стержень ϕ 14 мм, срез	35,7
Переплеты			
схема крепления 1:			
расчетная ветровая нагрузка 4,05 кН/м ²	0,72	Болт М6, срез	32
то же, 1,4 кН/м ²			29,9
схема крепления 2:			
расчетная ветровая нагрузка 1,94 кН/м ²	1,08	—	21,4
то же, 9,3 кН/м ²			19,1
схема крепления 3:			
расчетная ветровая нагрузка 1,09 кН/м ²	1,44	—	21,4
то же, 7,0 кН/м ²			14,8

Расчет креплений стеновых керамзитобетонных панелей (рис. 4.6). Размер панели 6х1,8 м. Крепление в четырех углах с помощью деталей ϕ 14 мм из арматуры класса А-1.

$$A_n = \pi \cdot 1,4^2 / 4 = 1,54 \text{ см}^2; R_{oc} = 572 \text{ МПа.}$$

Несущая способность детали $[N] = R_{oc} \gamma_c^{oc} A_n = 57,2 \cdot 1,2 \cdot 1,54 = 105,7 \text{ кН}$. Нагрузка на деталь приходится с площади 2,7 м². Разрушающее давление на панель $105,7 / 2,7 = 39,15 \text{ кПа}$. Ветровое расчетное давление 0,43 кПа. Необходимое нормативное давление, вызванное взрывом

$$q_n^{вз} = (39,15 + 0,43) / 0,7 = 56,54 \text{ кПа.}$$

Сварные соединения расчетом не проверялись.

Расчет креплений стеновых панелей из профилированного настила с заполнителем (стекло или минераловатный материал) (рис. 4.7). Размер панели 12х3 м. Панель крепится в четырех углах. Наиболее слабая деталь крепления — стержень ϕ 12 мм из Ст3.

$$A_n = \pi \cdot 1,2^2 / 4 = 1,13 \text{ см}^2; R_{oc} = 572 \text{ МПа}.$$

Несущая способность детали $[N] = 57,2 \cdot 1,2 \cdot 1,13 = 77,56 \text{ кН}$. Нагрузка на деталь приходится с площади 9 м². Разрушающее панель давление $77,56/9 = 8,6 \text{ кПа}$. Расчетное ветровое давление 430 Па. Необходимое нормативное давление, вызванное взрывом:

$$q_n^{B3} = (8,62 + 0,43) / 0,7 = 12,92 \text{ кПа}.$$

Расчеты, приведенные в табл. 4.1, показали, что крепления рассмотренных панелей обладают значительным резервом прочности и требуют для их разрушения весьма больших давлений, возникающих при взрыве, опасных для основных строительных конструкций.

4.4. НАГРУЗКИ, РАЗРУШАЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Для установления допускаемых нагрузок на основные несущие и ограждающие конструкции зданий и допускаемые значения снижения давления взрыва на конструкции за счет применения ЛСК можно использовать статистические данные о разрушении и повреждении различных конструкций и зданий в результате аварийных взрывов внутри производственных зданий, испытаний конструкций, а также расчетные данные. При этом представляется возможным рассмотреть следующие конструкции промышленных зданий: с несущими кирпичными стенами; бескаркасные крупнопанельные; здания с железобетонными и металлическими каркасами.

Ни по одному виду строительных конструкций нет столь многочисленных данных об их поведении при взрывах, как по каменным конструкциям. К сожалению, эти данные еще недостаточно обобщены, что ограничивает возможность решения многочисленных задач при проектировании каменных конструкций для зданий с взрывоопасными производствами.

Методы расчета несущей способности конструкции из кирпича отличаются большой степенью идеализации их реальных свойств и условий работы под действием взрывных и других нагрузок. В какой-то степени несовершенство методов расчета компенсируется повышенными коэффициентами запаса прочности, принимаемыми при проектировании каменных конструкций, а также конструктивными ограничениями, которые предусматриваются нормами. Однако при этих условиях о взрывостойких каменных конструкциях можно говорить только, если обеспечивается надлежащее качество их выполнения по проектам, учитывающим их специфические особенности. Невыполнение этих условий ведет к разным повреждениям не только при сильных, но даже и при относительно слабых взрывных нагрузках.

Анализ аварий показывает, что одним из наиболее уязвимых мест в кирпичной кладке являются сечения по швам, в которых сцепление часто оказывается недостаточным для обеспечения

Т а б л и ц а 4.2. Изменение величины нормального сцепления в зависимости от вида кладки и марки раствора

Вид кладки	Нормативная величина нормального сцепления R_p^H , кПа, в зависимости от марки раствора		
	50	25	10
Из обожженного кирпича	180	120–180	60–120
Из силикатного "	120–180	60–120	–
Из бетонных камней марки 50	180	120–180	60–120
50 и выше:			
сплошных	180	120–180	60–120
пустотелых	120–180	60–120	–
Из бетонных камней марок 25–35:			
сплошных	–	60–120	60–120
пустотелых	–	60–120	–

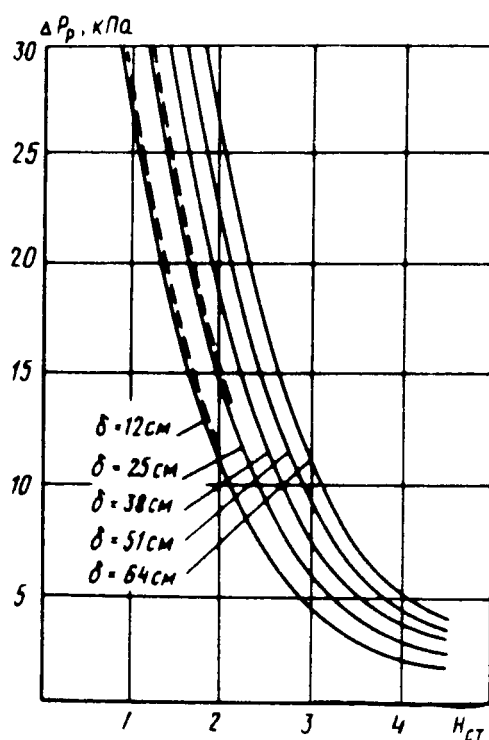


Рис. 4.8. Значение разрушающих нагрузок ΔP на кирпичные стены в зависимости от их высоты $H_{ст}$ и толщины δ (— — теоретические; - - - — экспериментальные)

сопротивления сдвигу, разрыву или главным растягивающим напряжениям. Таким образом, величина сцепления — одна из основных характеристик, определяющих взрывостойкость кладки. Так как одним из параметров, определяющих сцепление в кладке, является марка раствора, то классификацию кладок можно производить с указанием минимальной марки раствора, при которой в этой кладке может быть достигнуто необходимое сцепление.

В табл. 4.2 приведены изменения величины нормального сцепления R_p^H кладки в зависимости от вида кладки из кирпича марки не менее 75, которые позволяют установить величину давления,

разрушающего кирпичные стенки в зависимости от их размеров (рис. 4.8).

Из рис. 4.8 видно, что кирпичная кладка разрушается при нагрузке ≈ 30 кПа.

Крупнопанельное строительство занимает значительное место в общем объеме промышленного строительства, однако до настоящего времени еще нет данных поведения крупнопанельных зданий при взрывах горючих смесей внутри помещений. Поэтому исходя из особенностей этой конструкции и основываясь на опыте проектирования, строительства и экспериментальных данных, можно прийти к выводу, что применение крупных панелей в строительстве зданий для взрывоопасных производств вполне оправдано.

Преимущества крупнопанельных промышленных зданий перед кирпичными в отношении взрывоустойчивости могут быть обоснованы следующими соображениями.

Качество крупных панелей гарантировано заводскими условиями их изготовления. Поэтому очевидно, что при надлежащем конструктивном решении стыков крупнопанельные стены обладают значительно более высоким и устойчивым сопротивлением сдвигающим и растягивающим напряжениям, чем стены, выполненные из мелкоштучной кладки.

Обязательное наличие конструктивного или расчетного армирования дополнительно повышает несущую способность крупнопанельных стен, в то время как продольное армирование кладки весьма трудоемко, а при выполнении его без вертикальных стержней путем укладки только горизонтальной арматуры по растворным швам мало эффективно. Применение панелей для несущих стен и необходимость соблюдения требований типизации сборных изделий обуславливают простые и четкие, благоприятные с точки зрения взрывоустойчивости архитектурно-планировочные решения зданий, отличающиеся симметричным расположением конструкций, равномерным и частым расположением несущих стен. Последнее обеспечивает сборным перекрытиям большую надежность в выполнении ими роли горизонтальных диафрагм жесткости пространственной коробки здания. Убедительным примером повышенной взрывостойкости крупнопанельных зданий по сравнению с кирпичными являются результаты осмотра конструкций после аварийных взрывов, когда здание с кирпичными стенами при нагрузке, не превышающей 20 кПа, толщиной 51 см имели значительные разрушения, в то время как в крупнопанельных зданиях при нагрузке до 30 кПа можно было наблюдать лишь в отдельных местах волосяные, типа усадочных, трещины вдоль монтажных швов.

Здания с несущим каркасом получили широкое распространение в строительстве. Опыт эксплуатации зданий с взрывоопасными производствами показывает, что каркасные здания довольно взрывоустойчивы. Взрывоустойчивость их обеспечивается надежной связью отдельных элементов в единое целое, образующих пространственную конструкцию. При правильном расчете и конструировании каркасные конструкции можно отнести к наиболее взрывоустойчивым.

По способу восприятия нагрузок в практике одноэтажного и многоэтажного строительства нашли применение каркасы рамной конструкции, а также рамно-связевые и шарнирно-связевые.

Каркасы рамной конструкции с жесткими узлами воспринимают как вертикальные, так и горизонтальные нагрузки. Такие каркасы допускают свободную планировку помещений, что особенно ценно для большинства промышленных зданий. Каркасы рамной системы обладают четкой расчетной схемой, а это очень важно для правильного проектирования зданий на воздействие взрывных нагрузок внутри помещений. Для равномерного распределения усилий в элементах каркаса целесообразно для зданий взрывоопасных производств рекомендовать рамный каркас с жесткими узлами.

В рамно-связевом каркасе горизонтальные нагрузки воспринимаются как вертикальными диафрагмами, так и самим каркасом. Такое решение способствует выравниванию изгибающих моментов по высоте каркаса, позволяя в большей степени, чем при предыдущем решении, унифицировать номенклатуру сборных элементов. Вертикальные диафрагмы увеличивают жесткость здания, но их наличие иногда затрудняет свободную планировку помещений.

Совместная работа элементов каркаса междуэтажных перекрытий и диафрагм наиболее просто достигается в монолитном железобетоне.

При выполнении рамно-связевого каркаса в сборном железобетоне требуется более тщательное замоноличивание междуэтажных перекрытий с целью повышения его жесткости, чем в каркасах рамной системы без вертикальных диафрагм. Поэтому для зданий взрывоопасных производств можно рекомендовать рамно-связевые каркасы из монолитного железобетона, что уже находит применение в практике строительства, где вертикальные диафрагмы обеспечивают зданию требуемую жесткость каркаса и лучшие технико-экономические показатели по сравнению с чисто каркасным решением.

В практике строительства зданий с взрывоопасными производствами получили распространение железобетонные каркасы, решаемые по шарнирно-связевой системе с передачей всех горизонтальных нагрузок на жесткие вертикальные связи. В качестве жестких вертикальных связей используются конструкции лестничных клеток, лифтовых шахт, стены и железобетонные диафрагмы. В промышленных зданиях часто применяются стальные связи в продольном направлении. Вертикальные конструкции жесткости или связи рассчитываются на полное восприятие горизонтальных нагрузок, в том числе они могут рассчитываться и на воздействие взрывных нагрузок. Для шарнирно-связевой системы обычно предусматривается соединение элементов каркаса путем сварки стальных закладных деталей, назначение которых состоит в обеспечении устойчивости каркаса на время монтажа. Недостатком конструкций, выполненных по шарнирно-связевой системе, ограничивающим область ее применения в малоэтажных зданиях для взрывозащиты, является то, что в случае разрушения отдельных связей, где при взрыве могут возникнуть большие усилия, возможно обрушение значительной части здания, каркас которого без связей представляет собой изменяемую шарнирную систему.

Для зарубежной практики строительства зданий с взрывоопасными производствами характерно решение каркасных зданий в монолитном железобетоне с гибкой и жесткой арматурой или в ме-

талле. Элементы таких конструкций выдерживают горизонтальные нагрузки до 50 кПа и больше.

В нашей стране подавляющее большинство каркасных зданий выполняется из сборного железобетона. Сложность разработки взрывоустойчивого каркаса из сборного железобетона связана с ограниченным количеством данных о поведении их во время взрыва. Этим, а также рядом расчетных и производственных трудностей можно объяснить имеющееся многообразие конструктивных решений сборных железобетонных каркасов, отличающихся между собой как по разрезке на монтажные элементы, так и по способам сопряжения сборных конструкций.

Учитывая, что разрезка каркаса на сборные элементы и конструкция узловых соединений является одной из наиболее важных и сложных задач проектирования взрывоустойчивости зданий, на ней следует остановиться особо.

В практике проектирования и строительства сборных железобетонных каркасов для зданий с взрывоопасными производствами применяется несколько способов разрезки каркаса на сборные элементы. При этом каркас расчленяется либо на линейные элементы колонн и ригелей, либо на комбинированные элементы, включающие в себя колонны и ригели. Указанные способы разрезки могут осуществляться как в поперечном, так и в продольном направлении каркаса. При разрезке на линейные элементы значительно упрощается технология изготовления, транспортирование и монтаж сборных железобетонных элементов. Однако при такой разрезке стыкование ригелей с колоннами осуществляется в сечениях с максимальными изгибающими моментами, которые могут быть знакопеременными. Это может вызвать серьезные затруднения в конструировании стыков.

Большинство промышленных зданий как для взрывоопасных, так и для обычных производств проектируется и строится с каркасом с жесткими узлами из линейных элементов колонн и ригелей. В этих каркасах используется номенклатура железобетонных изделий, которые выдерживают горизонтальные нагрузки 30 кПа и более. Каркасы разработаны для сетки колонн 6х6 и 6х9 м с количеством этажей до 5 и высотой от 3,6 до 7,2 м под нагрузки 10–25 кН/м². Усилия от вертикальных и горизонтальных взрывных нагрузок в поперечном направлении воспринимаются поперечными рамами каркаса с жесткими узлами. Наличие больших нагрузок на перекрытии промышленных зданий привело к необходимости устройства консолей на колоннах. Стыки колонн каркаса устраиваются на высоте 0,7–0,8 м от уровня перекрытия. В продольном направлении усилия от взрывных нагрузок воспринимаются продольными рамами каркаса, которые также имеют жесткие узлы. Продольные рамы каркаса образуются из сборных железобетонных колонн и продольных монолитных ригелей.

С каркасом из линейных элементов, выполненным по рамной схеме, запроектировано и построено большое количество зданий для взрывоопасных производств, в том числе и многоэтажных.

Разрезка каркаса по второму способу на комбинированные элементы вызвано желанием использовать положительные качества каркасов из монолитного железобетона. При точной разрезке каркаса элементы заводского изготовления могут выполняться

крестообразной формы с расположением стыков колонн в сечениях с нулевыми значениями изгибающих моментов от взрывной нагрузки, а стыков ригелей — в четвертях или середине пролетов. При необходимости крестообразные элементы могут быть укрупнены в П-, Н- и Ж-образные железобетонные элементы. В таких железобетонных элементах жесткие узлы рам одного направления выполняются монолитными в заводских условиях, что благоприятно с точки зрения взрывоустойчивости. Учитывая, что стыки колонн являются наиболее ответственными и трудоемкими в выполнении узлами, при проектировании каркасов, собираемых из комбинированных железобетонных конструкций, следует стремиться к уменьшению количества стыков колонн. Стремление к выносу стыков из зоны максимальных усилий в обоих направлениях каркаса привело к появлению пространственных крестообразных элементов.

При выборе способа разрезки каркаса на элементы заводского изготовления следует учитывать характер действующих в узле усилий (знакопостоянных или знакопеременных), конструкцию стыков, их прочность и деформативные особенности, способ изготовления, транспортирование и монтаж.

При проектировании сборных железобетонных каркасов зданий с взрывоопасными производствами следует стремиться к тому, чтобы стыки колонн были расположены в сечениях, работающих на центральное или внецентренное сжатие с малыми эксцентриситетами. Их следует относить от грани примыкания к узлу с целью удаления от зоны максимальных изгибающих моментов при разрезке каркаса на монтажные элементы. Необходимо также стремиться к уменьшению количества стыков колонн, проектируя сборные элементы высотой в несколько этажей. При проектировании стыков следует иметь в виду, что под воздействием взрывных нагрузок каркас здания может подвергнуться повторным нагрузкам различной интенсивности и частоты, и в его элементах могут возникнуть знакопеременные усилия.

Поскольку в настоящее время данные о поведении сборных каркасов при взрыве горючих смесей внутри здания очень ограничены, следует применять точные стыки, которые можно проверить экспериментально в лабораторных и приближенных к производственным условиям. Учитывая динамический характер взрывного воздействия, в каркасах, воспринимающих взрывную нагрузку, не следует применять шарнирные стыки колонн, а также стыки с приторцованными поверхностями без соединения продольной арматуры колонн.

Все существующие конструкции стыков колонн могут быть разделены на две группы: стыки на стальных закладных деталях и замоноличенные.

В стыках первой группы усилия передаются через закладные детали путем их сварки при монтаже каркаса. Стальные закладные детали должны быть приварены к рабочей арматуре или надежно заделаны в бетоне стыкуемых элементов. Стыки второй группы выполняются сваркой арматурных выпусков и замоноличиванием бетоном или раствором.

Наиболее надежными являются стыки колонн с соединением оголовков путем приварки к ним накладок из арматурной или полосовой стали. Эти стыки способны сопротивляться действию зна-

чительных изгибающих моментов, они применяются для сопряжения колонн, работающих в условиях внецентренного сжатия даже с большими эксцентриситетами. Большинство типовых проектов промышленных зданий, разработанных как для обычных, так и для зданий с взрывоопасными производствами, имеет стыки колонн данного типа.

Правильно рассчитанные и сконструированные замоноличенные стыки колонн могут приближаться по своей работе к целым сечениям и поэтому могут быть взрывостойкими. В этих стыках имеются благоприятные условия для развития пластических деформаций, способствующих поглощению взрывной энергии и создающих дополнительный резерв несущей способности стыка. В большинстве случаев такие стыки конструктивно выполняются путем сварки выпусков арматурных стержней из торцов стыкуемых элементов сборных железобетонных колонн с последующим замоноличиванием зоны стыка раствором или бетоном.

Результаты исследований и опыт строительства дают основание рекомендовать замоноличенные стыки колонн со сваркой выпусков арматурных стержней для применения в сборных железобетонных каркасах зданий, возводимых для взрывоопасных производств.

Анализ последствий аварий показывает, что большинство повреждений происходит в результате разрушений узловых соединений. Ответственность узловых сопряжений возрастает в зданиях с навесными панелями, где заполнение в значительной степени выключается из работы, и все функции по обеспечению прочности, жесткости и пространственной неизменяемости здания возлагаются только на каркас.

Узлы каркаса — место пересечения колонн и ригелей — могут выполняться монолитными, сборно-монолитными и сварными.

При линейной разрезке каркаса стыкование сборных элементов осуществляется в узлах различными способами. В промышленных зданиях с тяжелыми нагрузками сопряжение ригелей поперечной рамы с колоннами осуществляется соединением с помощью ванной сварки выпусков верхней арматуры из ригеля и колонны с дуговой сваркой стальных закладных деталей ригеля и консоли колонны с последующим замоноличиванием зазора между стыкуемыми элементами каркаса.

Конструкции зданий с монолитным железобетонным каркасом с успехом противостояли воздействию взрывных нагрузок. Повреждения ограничивались небольшими трещинами в перегородках, а заметные повреждения отмечались только в тех сооружениях, при возведении которых были допущены погрешности в производстве работ в основном за счет некачественного выполнения рабочих швов в железобетонных элементах монолитного каркаса.

Оценка несущей способности конструкций промышленных зданий, проведенная на основании аварийных взрывов, анализа результатов исследований, изложенных в литературных источниках [7, 17, 24, 48, 52, 54, 58, 59], данных по нагрузкам, вызывающим различную степень и характер разрушения сооружений и конструкций, приведена в табл. 4.3.

В зависимости от характера повреждения строительные конструкции по степени разрушения можно разделить на пять степеней:

**Т а б л и ц а 4.3. Степень разрушения сооружений и конструкций
в зависимости от величины действующей нагрузки**

Вид сооружения, конструкции	Степень разрушения	Давление взрыва, кПа
1	2	3

По данным П.Л.Савича [54]

Остекление	Частичное	3,3
Остекление	Полное	7,2
Кирпичные стены	Опрокидывание стен	4,6
Оконные рамы, кровля	Разрушение оконных рам, кровли	10,4
Одноэтажные кирпичные здания	Полное	30,4

По данным К.К.Андреева и А.Ф.Беляева [7]

Здания со стальными карка- сами и легкие железобетонные сооружения	Значительное	60—70
Несейсмостойкие кирпичные и железобетонные здания и сооружения	Полное	100
Железобетонные сейсмостой- кие здания и конструкции	"	150—200

По данным М.А.Садовского [52]

Остекление	Полное	5—10
Легкие перегородки	"	5
Перекрытие по деревянным балкам	"	1—16
Железобетонные стены толщиной $\delta = 25$ см	Значительное	300
Кирпичные стены толщиной $\delta = 38$ см	"	25
Кирпичные стены толщиной $\delta = 51$ см	"	45

По данным Н.А.Стрельчука [48]

Кирпичные стены толщиной $\delta = 64$ см	Значительное	55
Кирпичные стены толщиной $\delta = 51$ см	"	25
Кирпичные стены толщиной $\delta = 38$ см	"	15
Кирпичные стены толщиной $\delta = 25$ см	Опрокидывание стен	7
Железобетонные стены тол- щиной $\delta = 25$ см	Значительное	80
Железобетонные стены тол- щиной $\delta = 12$ см	"	60
Свободноопертые покрытия поверхностной плотностью, кг/м ² :		
60	Значительное	2,9
104	"	3,7
132	"	4,8
270	"	27,1
Покрытия по деревянным балкам	"	10—16
Деревянные легкосбрасывае- мые конструкции (вышиб- ные)	Сбрасывание конструкции	2,6—4,7

Вид сооружения, конструкции	Степень разрушения	Давление взрыва, кПа
1	2	3

Остекление	Полное	5–10
Легкие перегородки	Значительное	5

По данным Ю.А.Юрманова [58]

Железобетонные стены толщиной $\delta = 25$ см	Сильная деформация стен, образование трещин, отслаивание бетона	280–350
Кирпичные стены толщиной $\delta = 25–38$ см	Сильная деформация, образование трещин	49–56
Бетонные и шлакобетонные стены толщиной $\delta = 24–26$ см	Полное	49–56
Деревянные балки диаметром 14–16 см	Частичное	10–13
Фундаменты, оборудование массой до 1 т (лебедки, вентиляторы)	Смещение фундаментов, поломка оборудования	40–60
Воздуховоды	Обрыв креплений, деформация	15–35

По данным Ю.С.Яковлева [59]

Железобетонные стены толщиной $\delta = 25$ см	Полное	300
Бетонные стены толщиной $\delta = 25–36$ см	Частичное	35–45
Кирпичные стены толщиной $\delta = 25–38$ см	Полное	45–56
Деревянные балки толщиной $\delta = 14–16$ см	"	10–18

По данным В.И.Ганушкина [17]

Остекление	Полное	3
Перегородки, перекрытия по деревянным балкам	"	10–18
Деревянные здания	Полное	14–20
Каменные здания	"	35–45
Промышленные здания	Полное	80–100

По данным С.М.Козарко [24]

Остекление	Частичное	1,5–2
Остекление	Полное	3,5–7
Перегородки, двери	"	12
Здания с деревянным каркасом	Сильное повреждение	17
Промышленные здания	Среднее	17
Шлакоблочные стены	Частичное	22
Кирпичные здания	Среднее повреждение	28
Кирпичные здания	Сильное "	38
Здания с железобетонным каркасом	Среднее повреждение	38
Промышленные здания со стальным и железобетонным каркасом	Сильное "	53
Кирпичные стены толщиной $\delta = 38$ см	Частичное "	53

слабую, среднюю, повышенную, сильную и чрезвычайно сильную (табл. 4.4).

Слабые разрушения характеризуются тем, что основные строительные конструкции не разрушаются. Происходит разрушение остекления, отрыв дверей, ворот, образуются трещины на внутренних перегородках. Имеет место незначительное повреждение технологического оборудования, вентиляционных коробов, сдвиг незакрепленного оборудования. Такой характер повреждений имеет место при нагрузках до 5 кПа. При этом возможно продолжение эксплуатации здания при выполнении незначительного ремонта. Если применение ЛСК обеспечивает снижение нагрузок, действующих на ограждающие конструкции при взрывном горении ГДС до 5 кПа, то не будет необходимости в проверке несущей способности существующих основных конструкций.

Средние разрушения и разрушения повышенной степени характеризуются частичным разрушением основных несущих строительных конструкций, разрушением плит покрытия, дверей, перекрытий, кровли и оборудования. Возникают трещины в шлакоблочных стенах, разрушаются деревянные здания. Эти повреждения вызываются нагрузкой до 20 кПа. При возникновении таких нагрузок возможно продолжение эксплуатации здания после проведения восстановительных работ. Как видно из анализа разрушающих нагрузок, в ряде случаев может оказаться целесообразным заблаговременное усиление отдельных конструкций здания.

Т а б л и ц а 4.4. Классификация строительных конструкций по степени их разрушения

Степень разрушения строительных конструкций	Характер повреждений			Давление, кПа
	строительных конструкций зданий		оборудования	
	одноэтажных	многоэтажных		
1	2	3	4	5

Слабая

(взрывы внутри помещения без разрушения основных строительных конструкций и оборудования). Возможно продолжение эксплуатации здания при выполнении незначительных ремонтных работ

Разрушение остекления, отрыв дверей, ворот, образование трещин на внутренних перегородках, вскрытие ЛСК

Незначительное повреждение вентиляционных коробов, сдвиг незакрепленного оборудования

До 5

Средняя

(частичное разрушение основных строительных конструкций и оборудования). Возможна эксплуатация здания после восстановительных работ

Вскрытие ЛСК, полное разрушение остекления, опрокидывание кирпичных стен, легких перегородок, разрушение покрытия поверхностной плотностью до 132 кг/м²

Разрушение От 5 до 10 воздуховодов, вентиляционных коробов

Степень разрушения строи- тельных конструкций	Характер повреждений			Давле- ние, кПа
	строительных конструк- ций зданий		оборудова- ния	
	одноэтаж- ных	многоэтаж- ных		
1	2	3	4	5

Сильная

(частичное разрушение основных несущих строительных конструкций и значительное разрушение оборудования). Возможна эксплуатация после восстановительных работ

Разрушение деревянных перегородок, покрытий по деревянным балкам, пено-разрушение перекрытий

Частичное разрушение технологического оборудования

От 10 до 20

Чрезвычайно сильная

(сильное разрушение основных несущих конструкций, остаточные деформации в стальных конструкциях). Возможна эксплуатация после значительных восстановительных работ

Значительное разрушение несущих конструкций, трещины в кирпичных стенах

Сильное разрушение оборудования

От 20 до 30

Полное

(разрушение зданий кирпичных, каркасных). Эксплуатация возможна только зданий из монолитного железобетона, с тяжелым металлическим каркасом, сборных железобетонных с повышенной несущей способностью

Разрушение каменных зданий, кирпичных стен, стального каркаса железобетонного каркаса без повышенной несущей способности

Полное разрушение оборудования

От 30 до 50

Сильные разрушения характеризуются разрушением каменных конструкций зданий, возникновением остаточных деформаций в стальных конструкциях. Возможна эксплуатация здания после восстановительного ремонта. При нагрузках до 30 кПа и использовании ЛСК потребуется некоторое усиление отдельных конструкций. Чрезвычайно сильные разрушения характеризуются разрушением железобетонных каркасов, выполненных без учета их повышенной несущей способности. Вместе с этим нагрузки до 50 кПа без заметных повреждений выдерживают здания из монолитного железобетона, железобетонные и стальные каркасные здания, рассчитанные на повышенную несущую способность (см. табл. 4.4).

Данные о величинах нагрузок, при которых начинают разрушаться ограждающие конструкции, узлы их крепления и запорные устройства, а также легкобрасываемые конструкции приведены в табл. 4.5.

Т а б л и ц а 4.5. Нагрузки, разрушающие ограждающие и несущие конструкции зданий

Типы и характеристика конструкций	Несущая способность конструкций, кПа	Величина разрушающей нагрузки, кПа
<i>Ограждающие</i>		
Кирпичные стены толщиной 1,5 или 2 кирпича	40—50	40—50
Стеновые однослойные панели из легкого бетона длиной 6 м, высотой 1,2—1,8 м, толщиной 20,24 см	5,5—7	5—7
Железобетонные плиты размером 1,5х6 м для покрытия промышленных зданий серии 1.466-7	7—8	7—8
Остекление толщиной 4 мм стальных оконных панелей и переплетов промышленных серий ПР-05-50/73 и ПР-05-32	Не более 3,5	Не более 3,5
Участки ЛСК покрытия		Не более 1,2
Ворота распашные промышленных зданий серии ПР-05-36.1, ПР-05.36.2, ПР-05-36.3 и ПР-05-36.4	Разрушающее уси- лие на узлы запор- ного устройства — 4,3	3,5—0,95
Двери промышленных зданий по ГОСТ 6629—74	Разрушающее уси- лие на узлы запор- ного устройства — 1,5	1,1—1,8
<i>Несущие</i>		
Сборные железобетонные колонны сплошного сечения 40х40 см для одноэтажных зданий с расчетной высотой 6,2 и 7,4 м серии КЭ-01-49	150—200	При сплошной на- веске стеновых па- нелей 8—15. При на- личии остекления 24—45
Сборные железобетонные предвари- тельно напряженные двускатные балки для покрытий зданий про- летами 12 и 18 м с шагом балок 6 м серии ПК-01-06	85—90	При отсутствии участков ЛСК, по- крытия 6—7. При наличии участков ЛСК покрытия 18—20

Таким образом, анализ данных лабораторных испытаний аварийных взрывов, а также расчетные данные о взрывных нагрузках, разрушающих различные виды конструкций промышленных зданий, могут быть положены в основу построения систем взрывозащиты зданий взрывоопасных производств строительными методами.

4.5. ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗДАНИЙ СО ВЗРЫВООПАСНЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

При проектировании конструкций для зданий с взрывоопасными производствами весьма важен выбор конструктивных схем, материалов и конструктивных мероприятий. При этом данные о величине и характере взрывных нагрузок позволяют оптимизировать требования к объемно-планировочным и конструктивным реше-

ниям при проектировании зданий со взрывоопасными производствами и получить рекомендации, направленные на предотвращение разрушения конструкций при аварийных взрывах.

Эффект воздействия взрывных нагрузок на строительные конструкции в значительной степени зависит от скорости нарастания давления в объеме, которая в свою очередь зависит от скорости сгорания ГВС. Таким образом, при проектировании зданий в первую очередь необходимо оценить степень опасности горючей смеси, в зависимости от которой можно установить уровень взрывозащиты, учитывая, что чем меньше скорость горения ГВС, тем эффективнее срабатывают ЛСК при прочих равных условиях. При скорости распространения пламени $U_n \leq 0,2 C_4$ процесс изменения давления в помещении при взрывном горении ГВС можно считать квазистатическим [19, 20]. При $U_n > 0,2 C_4$ в помещении могут возникать довольно сильные волны сжатия, а в некоторых случаях и ударная волна. В связи с этим при проектировании сооружений взрывоопасных производств необходимо принять все меры для снижения скорости горения ГВС в аварийных ситуациях и во всяком случае не допускать, чтобы скорость распространения пламени U_n превышала $0,2 C_4$. При выполнении указанных требований задача по определению нагрузок, возникающих в помещениях взрывоопасных производств при взрывном горении ГВС, может решаться в квазистатической постановке.

В связи с этим, исходя из максимального избыточного давления, которое может быть допущено в помещении при устройстве в его наружном ограждении ЛСК, представляется возможным все виды конструкций разделить на пять групп (классов) с учетом возможного снижения взрывных нагрузок до безопасных величин на ограждающие конструкции, а также разрушающих нагрузок (табл. 4.6).

Максимальное избыточное давление $\Delta P_{\text{доп}}^{\text{д}}$ взрыва приближенно может определяться по формуле

$$P_{\text{доп}}^{\text{д}} = \Delta P_{\text{доп}}^{\text{ст}} / K_{\text{д}},$$

где $\Delta P_{\text{доп}}^{\text{ст}}$ — равномерно распределенная статическая нагрузка, действующая изнутри помещения, при которой строительные конструкции, за исключением ЛСК, не выйдут из строя; $K_{\text{д}}$ — коэффициент динамичности.

На основании изучения характера и степени разрушения строительных конструкций в зависимости от величин действующих взрывных нагрузок в табл. 4.7 приведены рекомендуемые решения основных конструкций зданий взрывоопасных производств в зависимости от принимаемого класса взрывозащиты. Класс взрывозащиты сооружения находится в прямой зависимости от степени взрывоопасности, т.е. диапазон выбора конструкций позволяет проектировщику рассмотреть различные варианты уровня взрывозащиты с учетом возможного снижения взрывных нагрузок на ограждающие конструкции при применении ЛСК до допускаемых величин. Ограничения величин нагрузок, действующих на основные ограждающие конструкции рекомендуется устанавливать с учетом устройства минимальных значений площадей ЛСК в зависимости от класса взрывозащиты.

При заданной величине допускаемого избыточного давления в помещении $\Delta P_{\text{доп}}^{\text{д}}$ требуемая площадь ЛСК определяется по фор-

Т а б л и ц а 4.6. Допускаемое давление на конструкции в зависимости от класса взрывозащиты

Класс взрывозащиты	I	II	III	IV	V
Допускаемое статическое давление на основные конструкции, $\Delta P_{\text{доп}}^{\text{ст}}$, кПа	50	30	20	10	5
Допускаемое избыточное давление взрыва на ограждающие конструкции, $\Delta P_{\text{доп}}^{\text{д}}$, кПа	30	20	12	6	3,5
Давление вскрытия элементов ЛСК, $\Delta P_{\text{вскр}}$, кПа	10	6	4	2	1

Т а б л и ц а 4.7. Рекомендуемые решения основных несущих конструкций зданий взрывоопасных производств в зависимости от класса взрывозащиты

Вид конструкции	Этажность	Класс взрывозащиты				
		I	II	III	IV	V
Монолитные железобетонные	одноэтажное	рекомендуются				
	многоэтажное	"				
Стальные с тяжелым каркасом	одноэтажное	"				
	многоэтажное	"				
Сборные железобетонные с повышенной несущей способностью	одноэтажное	допускаются	рекомендуются			
	многоэтажное	допускаются	"			
Сборные железобетонные без повышенной несущей способности	одноэтажное	допускаются	рекомендуются			
	многоэтажное	не допускаются	допускаются	"		
Стальной каркас	одноэтажное	допускаются	рекомендуются			
	многоэтажное	не допускаются	допускаются	"		
Кирпичные стены	одноэтажное	допускаются	рекомендуются			
	многоэтажное	не допускаются	допускаются	допускаются	рекомендуются	

муле (2.60) или по табл. 4.8. Причем в табл. 4.8 приведены значения требуемых площадей ЛСК, вскрытие которых должно происходить в тех пределах снижения давлений, которые указаны в табл. 4.6 (при коэффициенте интенсификации, равном 2). При этом, принимая во внимание данные табл. 4.8, возможно увеличивать или уменьшать установленную по табл. 4.8 площадь ЛСК в зависимости от изменения давления в момент вскрытия ЛСК по отношению к допускаемому избыточному (табл. 4.9).

Нагрузки, при которых начинают перемещаться элементы ЛСК или разрушаться узлы их крепления к основным конструкциям, приведены в табл. 4.10.

Как показали исследования, в качестве легкообрасываемых ограждающих конструкций можно широко использовать остекле-

Т а б л и ц а 4.8. Минимальные значения площадей легкобрасываемых конструкций в зависимости от класса взрывозащиты, объема помещения и при нормальной скорости горения ГВС

Нормальная скорость горения ГВС, м/с	Объем помещения, м ³	Площадь ЛСК, м ² /м ³ , в зависимости от класса взрывозащиты				
		I	II	III	IV	V
	≤ 500	0,018	0,026	0,041	0,08	0,165
	> 500 ≤ 1000	0,014	0,018	0,032	0,062	0,126
	> 1000 ≤ 10000	0,007	0,01	0,04	0,054	0,064
≥ 0,7	> 10000	0,004	0,006	0,009	0,018	0,036
0,6–0,7	≤ 500	0,016	0,023	0,036	0,071	0,145
	> 500 ≤ 1000	0,012	0,017	0,027	0,053	0,109
	> 1000 ≤ 10000	0,006	0,009	0,014	0,027	0,055
	> 10000	0,003	0,005	0,008	0,016	0,032
0,5–0,6	≤ 500	0,013	0,019	0,029	0,058	0,118
	> 500 ≤ 1000	0,010	0,014	0,023	0,045	0,09
	> 1000 ≤ 10000	0,005	0,007	0,011	0,022	0,045
	> 10000	0,003	0,004	0,007	0,013	0,027
0,4–0,5	≤ 500	0,011	0,016	0,025	0,061	0,1
	> 500 ≤ 1000	0,008	0,012	0,018	0,036	0,072
	> 1000 ≤ 10000	0,004	0,006	0,007	0,014	0,036
	> 10000	0,002	0,003	0,005	0,009	0,018
< 0,4	≤ 500	0,008	0,012	0,018	0,036	0,072
	> 500 ≤ 1000	0,006	0,009	0,014	0,027	0,055
	> 1000 ≤ 10000	0,003	0,004	0,007	0,013	0,027
	> 10000	0,0015	0,002	0,003	0,007	0,014

Т а б л и ц а 4.9. Необходимое увеличение площади ЛСК с изменением величины взрывной нагрузки в момент их вскрытия

Повышение избыточного давления по отношению к уменьшенному на ограждающие конструкции, %	Требуемое увеличение площади ЛСК, %, в зависимости от класса взрывозащиты				
	I	II	III	IV	V
5	12	8	6	4	2
10	18	12	10	6	3
20	24	18	16	8	4
30	30	24	18	12	6
40	36	30	24	16	10
50	42	36	32	20	12
60	50	42	36	26	16
70	60	52	44	32	20
80	72	64	56	42	26
90	88	76	72	56	42

ние, двери, распашные ворота, открывающиеся оконные переплеты, элементы стального ограждения и покрытия.

На основании обобщения экспериментальных и расчетных данных, а также анализа последствий аварийных промышленных взрывов установлено, что остекление, выполняющее роль легкобрасываемых конструкций, разрушается при нагрузке до 2,5 кПа (см. табл. 4.10), т.е. нагрузку на основные несущие конструкции здания

Т а б л и ц а 4.10. Нагрузки, при которых происходит разрушение остекления, вскрытие поворотных ограждающих элементов и покрытия

Конструкция	Размер, м	Толщина, м	Поверхностная плотность, кг/м ²	Разрушающая нагрузка, кПа
1	2	3	4	5
Одинарное остекление	1,2х1,2	0,03	—	1,5
	1,2х1,5			1
	1,2х1,8			1
Одинарное остекление	1,2х1,2	0,04	—	2
	1,2х1,5			1,5
	1,2х1,8			1
Одинарное остекление	1,2х1,2	0,05	—	3
	1,2х1,5			2
	1,2х1,8			2
Двойное остекление	1,2х1,2	0,03	—	2
	1,2х1,5			1,5
	1,2х1,8			1,5
Двойное остекление	1,2х1,2	0,04	—	3
	1,2х1,5			2
	1,2х1,8			2
Двойное остекление	1,2х1,2	0,05	—	4
	1,2х1,5			3
	1,2х1,8			2,5
Двустворчатые ворота	1,8х3,6		60	2,5
Перекрытия				Болт М6 работает на срез. Расчетное сопротивление 650 МПа
Схема крепления 1:	1,2х0,6			
расчетная ветровая нагрузка, кН/м ² 4,05			40	32
то же, 1,4			40	28,9
Схема крепления 2:	1,2х0,9			
расчетная ветровая нагрузка, кН/м ² 1,94			40	21,4
то же, 0,93			40	19,1
Схема крепления 3:	1,2х1,2			
расчетная ветровая нагрузка, кН/м ² 1,09			40	14,8
то же, 0,7			40	14,4
Поворотные перекрытия, закрывающиеся на замок	1х1		40	0,5
Свободно лежащая панель в покрытии	1х1		20	1,1
			50	2,3
			75	3,2
			100	4,9
			120	6,7
			150	9,2
Панель в покрытии	1х2		20	1,3
			50	2,6
			75	3,7
			100	5,6
			120	7,7
			150	10,6
Панель в покрытии	4х4		20	1,4
			50	3
			75	4,1

Продолжение табл. 4.10

Конструкция	Размер, м	Толщи- на, м	Поверх- ностная плот- ность, кг/м ²	Разрушающая нагрузка, кПа
1	2	3	4	5
Профилированное стекло	2,7х0,22	0,06	100	6,4
			120	8,7
			150	11,9
				3,3

можно ограничить величиной, не превышающей при одинарном остеклении 2 кПа и двойном остеклении – 2,5 кПа.

Если при принятой величине $\Delta P_{\text{доп}}^A$ требуемая площадь ЛСК не может быть размещена в наружном ограждении помещения, то с помощью выражения (2.63) может быть определена величина максимального избыточного давления $\Delta P_{\text{макс}}$, возникающего в помещении при максимально возможной площади ЛСК. Для определения величины $\Delta P_{\text{макс}}$, соответствующей принятой площади ЛСК, следует задаваться рядом последовательно возрастающих значений $\Delta P_{\text{макс}} > P_{\text{доп}}^A$. Рассматривая заданные значения $\Delta P_{\text{макс}}$ в качестве $\Delta P_{\text{доп}}^A$, по формуле (2.63) вычисляются соответствующие величины $S_{\text{тр}}$. Расчет следует вести до тех пор, пока не будет выполнено условие $S_{\text{тр}} \leq S_n$.

Для обеспечения безопасности работ в помещениях, находящихся рядом с помещениями взрывоопасных производств, возникает необходимость устройства разделительных стен и перекрытий, которые должны выдерживать большую взрывную нагрузку по отношению к помещению данного класса взрывозащиты. В связи с этим рекомендуется разделительные стены и перекрытия рассчитывать на нагрузку, превышающую на единицу класс взрывозащиты данного помещения.

В процессе вскрытия ЛСК может образоваться опасная зона в пределах определенных расстояний от сооружения, характеризующаяся воздействием некоторого избыточного давления. Расстояние от стены со сбросными отверстиями, соответствующее определенному давлению, можно установить, используя опытные данные, полученные при взрывах в камере объемом 300 м³, таблица 4.11.

Зная величину опасных зон при вскрытии отверстий в наружном ограждении зданий, можно установить минимальные безопасные разрывы между взрывоопасными зданиями и сооружениями с повышенными требованиями безопасности, которые ориентировочно могут быть разделены на три группы (табл. 4.12). Для первой группы зданий разрывы устанавливались исходя из того, что не будет разрушено остекление в соседних зданиях $\Delta P_{\text{доп}} \leq 0,5$ кПа при условии истечения продуктов горения и взрывоопасной смеси из проема, вскрывающегося мгновенно. Причем в момент вскрытия давление внутри помещения в зависимости от класса взрывозащиты было снижено до величины, соответствующей его максимальному значению. Для второй группы зданий разрывы устанавли-

Т а б л и ц а 4.11. Изменение взрывной нагрузки в зависимости от удаления от стены со сбросными отверстиями и класса взрывозащиты здания

Расстояние от стены, м	Взрывная нагрузка, кПа, в зависимости от класса взрывозащиты				
	I	II	III	IV	V
5	30	20	12	6	3,5
7,5	27	17	10	5	3,0
10	22	13	8	3,5	2,5
12,5	18	9	5	2,5	1,5
15	13	6	4	1,5	0,5
20	10	5	2,5	1	
30	5	2,5	1		
50	1	0,5			

Т а б л и ц а 4.12. Минимальные безопасные разрывы между взрывоопасными помещениями, зданиями и сооружениями с повышенными требованиями безопасности

Группа зданий и сооружений	Здания и сооружения с повышенными требованиями безопасности	Объем взрывоопасных помещений м ³	Безопасные разрывы, м, в зависимости от класса взрывозащиты				
			I	II	III	IV	V
1	Здания и сооружения с пребыванием людей более 200 чел.: столовые, общественные здания, лаборатории, мастерские, поликлиники школы, граница предприятия	≤ 500	70	60	50	40	30
		500 - 1000	80	70	60	50	40
		1000 - 10000	90	80	70	60	50
		10000	100	90	80	70	60
2	Здания и сооружения с пребыванием людей от 41 до 200 чел.: залы общественного и специального транспорта, энергетические объекты, дымовые трубы, градирни жел. дороги, мосты	≤ 500	35	30	25	20	15
		500 - 1000	40	35	30	25	20
		1000 - 10000	45	40	35	30	25
		10000	50	45	40	35	30
3	Здания и сооружения с пребыванием людей до 40 чел., с взрывоопасными производствами, эстакады трубопроводов, линии электропередач	≤ 500	18	15	12	10	7
		500 - 1000	20	18	15	12	10
		1000 - 10000	22	20	18	15	12
		10000	25	22	20	18	15

ливались при воздействии нагрузки на соседнее здание $\Delta P_{\text{доп}} \leq 2,5$ кПа, для третьей — $\Delta P_{\text{доп}} \leq 5$ кПа.

Минимальные безопасные разрывы между взрывоопасными помещениями, зданиями и сооружениями с повышенными требованиями безопасности могут быть уменьшены в зависимости от

Т а б л и ц а 4.13. Допускаемое уменьшение безопасных разрывов между зданиями и сооружениями

Общая площадь сбросных отверстий в рассматриваемой конструкции стены, м ²	Коэффициент снижения безопасного разрыва в зависимости от класса взрывозащиты				
	I	II	III	IV	V
15	1	1	1	1	1
10–15	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75
5–10	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
5	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4

общей площади сбросных отверстий в рассматриваемой конструкции стены и класса взрывозащиты здания (табл. 4.13).

Итак, разработанная система взрывозащиты промышленных зданий взрывоопасных производств основывается на классификации всех зданий по уровню их взрывозащиты в зависимости от величины допускаемой нагрузки на основные конструкции, допускаемого уровня уменьшения возникающих взрывных нагрузок на ограждающие конструкции. Исходя из этих нагрузок, выбираются виды основных конструкций зданий и устанавливается требуемая площадь определенного вида ЛСК. Рекомендуемая классификация взрывозащиты позволяет дифференцированно оценить возможность размещения зданий относительно друг друга, т.е. устанавливать необходимые разрывы между зданиями.

В основу расчета минимально безопасных разрывов между зданиями и сооружениями была положена эмпирическая зависимость, полученная в результате экспериментальных исследований по оценке разлета элементов ЛСК при взрывном горении газопылевых смесей в опытных камерах $l = 2,52 \Delta P_{\text{вскр}} + 15,2$ (l — дальность разлета частей ЛСК; $\Delta P_{\text{вскр}}$ — давление вскрытия элементов ЛСК).

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Величина материального ущерба, причиняемого предприятию в результате взрыва ГВС внутри здания со взрывоопасным производством, зависит от эффективности мероприятий по обеспечению его взрывобезопасности.

Результаты обследования последствий аварийных взрывов и проведенные расчеты нагрузок от взрывов внутри конкретных зданий, в наружном ограждении которых были запроектированы ЛСК, показали, что кроме разрушения ЛСК имеют место разрушения основных ограждающих и несущих конструкций здания, а иногда и конструкций соседних зданий.

Предлагаемые решения по обеспечению взрывобезопасности промышленных зданий отличаются от существующих дифференцированным подходом к подбору типов и количества ЛСК для каждого конкретного случая. При этом производство самих ЛСК, за исключением специально разработанных деталей легкобрасываемого покрытия, не требует дополнительных затрат, так как предлагаемые в качестве легкобрасываемых строительные конструкции являются типовыми, выпускаемыми промышленностью строительных материалов. Устройство в наружном ограждении зданий ЛСК, количество и тип которых соответствуют решениям, предлагаемым в данной работе, ограничивает размеры повреждения зданий разрушением ЛСК в стеновом ограждении и на участках, где предусматривается устройство легкобрасываемого покрытия. При наличии повреждений стоимость ущерба будет минимальной в связи с отсутствием необходимости затрат на восстановление технологического оборудования и основных строительных конструкций. При этом резко сокращаются затраты на ремонтно-восстановительные работы, уменьшаются потери от временного прекращения производственной деятельности предприятия. В то же время необходимо отметить, что осуществление мероприятий по повышению взрывобезопасности производств, в технологических процессах которых используются горючие газы, связано с рядом дополнительных затрат.

Для повышения взрывобезопасности зданий помимо ЛСК используются методы пассивного резервирования — усиление основных несущих конструкций зданий (за счет увеличения сечения конструкций, повышения их жесткости, изменения конструктивной схемы здания и т.п.).

С увеличением площадей ЛСК, а также несущей способности основных конструкций взрывобезопасность здания повышается. Одновременно увеличиваются первоначальная стоимость здания и эксплуатационные расходы, так как стоимость возведения 1 м² ЛСК, как правило, больше стоимости 1 м² основных ограждающих конструкций. Это приводит также к увеличению отчислений на амортизацию и содержание конструкций во время эксплуатации здания. Кроме того, потери тепла через ЛСК, расположенные в покрытии или стеновом ограждении, значительно больше, чем через основные, что, в свою очередь, приводит к дополнительному увеличению эксплуатационных расходов.

Вопрос о проведении мероприятий по обеспечению взрывобезопасности должен в каждом случае рассматриваться применительно к конкретному предприятию.

Очевидно для предприятий, на которых находится обслуживающий персонал, во всех случаях необходимо предусматривать меры по обеспечению взрывобезопасности, чтобы защитить людей, технологическое оборудование, основные строительные конструкции.

Для промышленных зданий и сооружений, цехов с автоматическим управлением, где обслуживающий персонал отсутствует, в тех случаях, когда вероятность возникновения взрыва мала, может оказаться, что экономически будет оправдано разрушение здания, если затраты на восстановление не будут превосходить затрат на устройство ЛСК.

Экономическое обоснование предлагаемого варианта ЛСК может потребовать рассмотрения одной из следующих задач:

1. При наличии в здании обслуживающего персонала определение экономически обоснованных конструктивных решений ЛСК, выбора материала и определения требуемой площади ЛСК.

2. Если в здании отсутствует обслуживающий персонал, необходимо, исходя из анализа суммарных затрат на строительство, эксплуатацию и восстановление здания и затрат на устройство ЛСК, оценить целесообразность устройства ЛСК.

Таким образом, определение экономической эффективности применения ЛСК сводится, во-первых, к оценке эффективности применения ЛСК для зданий с производствами, управляемыми дистанционно или автоматически. В этом случае следует установить необходимость устройства ЛСК. Во-вторых, при необходимости устройства ЛСК определить оптимальные варианты ЛСК, обеспечивающие взрывобезопасность здания.

5.2. ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В процессе проектирования зданий взрывоопасных производств существенное место занимают вопросы выбора экономически эффективных материалов для изготовления ЛСК. Выбор материалов для изготовления ЛСК должен осуществляться с учетом стоимости материалов, затрат на возведение ЛСК и эксплуатацию здания. Задача заключается в том, чтобы свести к минимуму величину полных затрат на возведение и эксплуатацию здания при использовании ЛСК. Так как указанные затраты являются разновременными, то для их суммирования можно использовать рекомендованный "Инструкцией по определению экономической эффективности капитальных вложений в строительстве" метод приведения разновременных затрат в сопоставимый вид, в основе которого лежит формула сложных процентов

$$B = 1 / (1 + E_{н.п})^t, \quad (5.1)$$

где $E_{н.п}$ — норматив для разновременных затрат, равный 0,08; t — период времени приведения разновременных затрат, в годах.

При выборе материалов для изготовления ЛСК следует также учитывать вероятность возникновения взрывов, приводящих к разрушению ЛСК. Нужно отметить, что действующая инструктивная и нормативная литература по экономической оценке вариантов проектных решений со статическими, вероятностными показателями не дает рекомендаций по их оценке. Поэтому возникает необходимость в создании методики, позволяющей учитывать вероятность возникновения взрывов и разрушения ЛСК. Для этого надо иметь необходимые статистические данные о частоте взрывов на однотипных производствах. В настоящее время по ряду производств (дивинила, гидроперекиси изопренбензола, аммиака и других) имеются некоторые данные, позволяющие при помощи вероятностно-статистических методов вычислить средний период между взрывами:

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_k}, \quad (5.2)$$

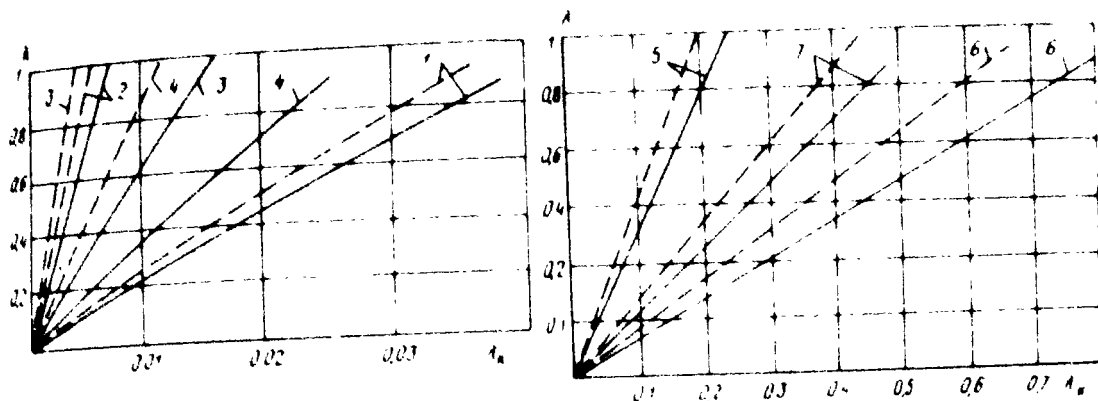


Рис. 5.1. Зависимость интенсивности разрушения строительных конструкций λ_k от интенсивности возникновения взрывов λ в помещениях различных производств

1 — стена, 2 — плита, 3 — колонна; 4 — балки покрытия; 5 — легко-сбрасываемая кровля; 6 — остекление; 7 — двери (— — — — — производства divinила; — — — — — производства гидроперекиси и изопропилбензола)

где λ_k — интенсивность разрушений конструкций, измеряемая количеством разрушений за один год эксплуатации, определяется по формуле

$$\lambda_k = n \lambda / Nr(t), \quad (5.3)$$

где n — общее число однотипных строительных конструкций; λ — интенсивность возникновения взрывов, определяется по формуле

$$\lambda = (r-1) / Nr(t); \quad (5.4)$$

N — количество однотипных элементов строительных конструкций, за которыми велось наблюдение; $r(t)$ — число взрывов за период наблюдения.

На рис. 5.1 приведены зависимости разрушения строительных конструкций от интенсивности возникновения взрывов в помещениях с различными производствами, полученными на основании изучения материалов расследования причин аварий.

Выбор материала для ЛСК можно производить по критерию минимальных суммарных народнохозяйственных затрат на изготовление (возведение), восстановление и эксплуатацию конструкций за период функционирования здания по формуле

$$П = C_{K_0} + \sum_{i=1}^{r(t) t_{cp}} \frac{C_i - C_{K_{ост}}}{(1 + E_{н.п})^i} + \frac{1}{E_{н.п}} \mathcal{E}^{год}, \quad (5.5)$$

где C_{K_0} — первоначальная сметная стоимость ЛСК, тыс. руб.; C_i — затраты, непосредственно связанные с восстановлением ЛСК, тыс. руб.; $C_{K_{ост}}$ — остаточная стоимость разрушенных конструкций, тыс. руб.; $\mathcal{E}^{год}$ — годовые эксплуатационные затраты, отчисления на амортизацию и содержание конструкций, тыс. руб.; $E_{н.п}$ — норматив для приведения разновременных затрат в сопоставимый вид ($E_{н.п} = 0,08$); $T_{сл}$ — нормативный срок службы здания в целом, в годах; t_{cp} — среднее время безаварийной работы здания, т.е. период между взрывами [определяется по формуле (5.2)]; $a = \left[\frac{T_{сл} - 1}{t_{cp}} \right]$ — выражение, показывающее, что восстановление осуществляется целое количество раз (т.е. учитывается только целая часть отношения); $i = t_{cp}, 2t_{cp}, \dots, at_{cp}$ — годы возникновения взрывов.

Последнее слагаемое формулы (5.5) учитывает суммарные эксплуатационные затраты на весь период функционирования здания. Так как годовые эксплуатационные затраты $\mathcal{E}^{\text{год}}$ отдалены друг от друга на один год, то они являются разновременными. Известно, что суммирование таких затрат возможно после их приведения к определенному моменту времени. Так как в формуле затраты по первому и второму слагаемому учитывают вложения в период первоначального осуществления ЛСК, то и в данном случае за момент приведения эксплуатационных затрат выбран момент начала их эксплуатации.

Приведение производится при помощи формулы

$$\mathcal{E}_{T_{\text{сп}}} = \sum_{i=1}^{T_{\text{сп}}} \mathcal{E}_i^{\text{год}} \left[1 / (1 + E_{\text{н.п}})^i \right]. \quad (5.6)$$

Если эксплуатационные затраты не меняются по годам, т.е. $\mathcal{E}^{\text{год}} = \mathcal{E}_2^{\text{год}} + \mathcal{E}_3^{\text{год}} = \text{const}$, $\mathcal{E}^{\text{год}}$ можно вынести за знак суммы. Тогда оставшаяся часть выражения, представляющая собой сумму убывающей геометрической прогрессии с первым членом a и знаменателем g , равным $\frac{1}{1 + E_{\text{н.п}}}$ (при $T_{\text{сп}}$ стремящемся к бесконечности), имеет вид

$$\Sigma = a / (1 - g) = 1 / E_{\text{н.п}}. \quad (5.7)$$

Следовательно, суммарные эксплуатационные затраты будут равны

$$\Sigma = \frac{1}{E_{\text{н.п}}} \mathcal{E}^{\text{год}}. \quad (5.8)$$

5.3. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТА ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Защита зданий от воздействия взрыва ГВС внутри помещения может быть обеспечена при выполнении следующих мероприятий:

использование ЛСК;

усиление несущих конструкций здания;

сочетание ЛСК с усилением основных несущих конструкций.

Возникает необходимость выбора такого варианта защиты, который потребует минимальных затрат при возведении и эксплуатации объекта для обеспечения заданной степени взрывобезопасности с учетом вероятности возникновения взрывов.

Минимум суммарных затрат определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Pi = C_y + C^{\text{расч}} E_{\text{н}} \Phi_{\text{пр}} t_{\text{стр}} + \frac{1}{E_{\text{н.п}}} (1,06 C_i \frac{a_1 + a_2}{100} + \mathcal{E}^{\text{от}}) + \\ + \sum_{i=t_{\text{сп}}}^{r(t) t_{\text{сп}}} \frac{3_i}{(1 + E_{\text{н.п}})^i} E \Phi t_{\text{ост}}, \end{aligned} \quad (5.9)$$

где C_y — сметная себестоимость работ по усилению основных несущих конструкций здания; $C^{\text{расч}}$ — расчетная сметная себестоимость легкосбрасывае-

мых конструкций в деле; E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений; C_i — сметная себестоимость конструкций в деле; a_1 и a_2 — нормативы соответственно реновационных отчислений и на содержание конструкций от их сметной стоимости; $\mathcal{E}^{OT}$ — годовые затраты на отопление здания; $\mathcal{Z}_i$ — затраты, непосредственно связанные с ликвидацией последствий взрывов в i -м году; $\Phi_{пр}$ — сметная стоимость производственных фондов строительных организаций, занятых на монтаже конструкций; $t_{стр}$ — период монтажа в годах; Φ — сметная стоимость здания с применением ЛСК; $t_{ост}$ — период остановки производства, связанный с ликвидацией последствий взрыва, в годах.

Стоимость усиления несущих конструкций C_y должна устанавливаться расчетом для конкретного здания. При $C_y = 0$ взрывобезопасность зданий достигается только при использовании ЛСК.

Расчетная себестоимость ЛСК определяется по соответствующим единым районным единичным расценкам, прейскурантам сметных цен на материалы, изделия и конструкции для соответствующих районов строительства с учетом накладных расходов. При этом следует также учесть экономический эффект $\mathcal{E}_i$ от сокращения трудоемкости и продолжительности выполнения работ по возведению ЛСК;

$$C^{расч} = C_i - \mathcal{E}_i. \quad (5.10)$$

Определение величины $\mathcal{E}_i$ осуществляется исходя из следующих предпосылок:

а) по всем вариантам легкобрасываемых конструкций определяется трудоемкость работ m_i в чел.-дн.;

б) вариант с наибольшей трудоемкостью принимается за исходный;

в) все остальные варианты с меньшей трудоемкостью при равных производственных условиях (одинаковое количество трудовых ресурсов, одинаковая сменность) будут выполняться быстрее и, следовательно, давать по отношению к исходному варианту экономический эффект.

Для исходного варианта $\mathcal{E}_i = 0$. Для остальных вариантов величина $\mathcal{E}_i$ складывается из трех экономических эффектов:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_i^1 + \mathcal{E}_i^2 + \mathcal{E}_i^3, \quad (5.11)$$

где $\mathcal{E}_i^1$, $\mathcal{E}_i^2$, $\mathcal{E}_i^3$ — величины экономических эффектов от сокращения соответственно условно постоянной части накладных расходов, зависящих от трудоемкости работ и основной заработной платы.

Эффект от сокращения условно постоянной части накладных расходов определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i^1 = 0,5 \frac{C K_{н.р}}{(1 + K_{н.р}) 1,06} \left(1 - \frac{m_i}{m_{исх}} \right), \quad (5.12)$$

где $K_{н.р}$ — коэффициент, учитывающий размер накладных расходов, равный 0,12—0,19; $m_{исх}$ — трудоемкость работ по возведению легкобрасываемых конструкций по исходному варианту в чел.-дн.; 0,5 — коэффициент, учитывающий долю условно постоянных расходов в общем объеме накладных расходов; 1,06 — коэффициент, учитывающий плановые накопления.

Эффект от сокращения части накладных расходов, зависящий от трудоемкости работ, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i^2 = 0,6 (m_{\text{исх}} - m_i). \quad (5.13)$$

Эффект от сокращения части накладных расходов, зависящий от основной заработной платы, определяется по формуле

$$\mathcal{E}_i^3 = 0,15 (3_{\text{исх}} - 3_i), \quad (5.14)$$

где $3_{\text{исх}}$, 3_i — основная заработная плата соответственно по исходному и i -му вариантам, руб.

Годовые затраты на отопление здания $3^{\text{от}}$ могут определяться по формуле

$$3^{\text{от}} = F_{\text{лск}} \mathcal{E}_m^{\text{от}} = F_{\text{лск}} \frac{Y_T (t_{\text{вн}}^{\text{o}} - t_{\text{ср}}^{\text{o}}) 24 T_{\text{от}}}{R_{\text{от}} \cdot 10^6}, \quad (5.15)$$

где $F_{\text{лск}}$ — площадь легкосбрасываемых конструкций, м^2 ; Y_T — стоимость единицы теплоты, руб.; $t_{\text{вн}}^{\text{o}}$ — расчетная температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ср}}^{\text{o}}$ — средняя расчетная температура наружного воздуха за отопительный период, $^{\circ}\text{C}$; 24 — число часов в сутках; $T_{\text{от}}$ — продолжительность отопительного периода, сут; $R_{\text{от}}$ — термическое сопротивление стены или покрытия, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Затраты, непосредственно связанные с ликвидацией последствий взрывов, определяются:

1. Для вариантов, где площади ЛСК удовлетворяют требованиям обеспечения гарантии неразрушения зданий в целом, по формуле

$$3 = 3_{\text{лск}} + 3_{\text{ок}} + 3_{\text{об}} + 3_{\text{см}} + 3_{\text{оч}} - O, \quad (5.16)$$

где $3_{\text{лск}}$ — затраты на восстановление легкосбрасываемых конструкций (величина $3_{\text{лск}}$ определяется по сметным нормам с учетом затрат на разборку); $3_{\text{ок}}$ — затраты на восстановление основных конструкций (если легко-сбрасываемые конструкции не обеспечивают снижения взрывной нагрузки до допустимой величины); $3_{\text{об}}$ — затраты на восстановление оборудования и внутренних сетей; $3_{\text{см}}$ — затраты на восстановление смежных зданий и сооружений (если нанесен ущерб их конструкциям); $3_{\text{оч}}$ — затраты на очистку территории от разрушенных конструкций (определяется путем расчета фактических затрат на разработку и перевозку разрушенных конструкций); O — остаточная стоимость поврежденных конструкций, если они могут быть повторно использованы (может быть принята в размере 10% стоимости ЛСК).

Величины $3_{\text{ок}}$, $3_{\text{об}}$, $3_{\text{см}}$ — определяются путем умножения восстановительных объемов на соответствующие сметные нормы на ремонтные работы. Необходимые объемы восстановления устанавливаются как средние величины по данным статистических наблюдений.

2. Для вариантов, где вследствие уменьшения площадей ЛСК допускается разрушение здания в целом, затраты, связанные с ликвидацией последствий аварии, определяются по формуле

$$3 = C_1 + 3_{\text{см}} + 3_{\text{оч}} - O, \quad (5.17)$$

где C_1 — затраты на восстановление разрушенного здания.

Для укрупненных расчетов величину 3 можно принимать равной стоимости первоначального возведения легкосбрасываемых конст-

рукций. Если известно изменение стоимости конструкций по времени, то в расчет следует ввести соответствующий поправочный коэффициент k_t , тогда $Z = 1,06 C_i k_t$. На основании рассмотренной модели экономической оценки и обоснования выбора варианта ЛСК можно сделать следующие выводы.

1. Защита зданий от действия взрыва внутри помещений за счет применения ЛСК связана с дополнительными затратами. Поэтому задача обеспечения принятой взрывобезопасности с наименьшими суммарными затратами на возведение и эксплуатацию здания является весьма важной.

2. При экономической оценке принятого варианта ЛСК основополагающим параметром является среднее время безаварийной работы здания, которое может быть выражено через интенсивность разрушений, являющуюся, как известно, случайной величиной. Для ее определения применимы вероятностно-статистические методы.

3. При выборе материалов для изготовления ЛСК необходимо свести к минимуму величину полных затрат на возведение и эксплуатацию ЛСК с учетом вероятности возникновения взрывов. Рассмотренный метод позволит подобрать такие материалы для ЛСК, при которых полные народнохозяйственные затраты будут минимальными.

4. Уравнение (5.9) для экономического обоснования выбора варианта ЛСК дает возможность установить величину суммарных народнохозяйственных затрат на строительство, эксплуатацию и восстановление здания с учетом вероятности возникновения взрыва. Анализ этого уравнения и расчеты показывают, что для зданий с дистанционным и автоматическим управлением, где взрывы происходят с интервалами времени 12–15 лет и более, экономически оправдано уменьшение площадей ЛСК относительно величин, полученных расчетом.

5. Приведенный пример экономической оценки эффективности ЛСК только для здания компрессорной по приведенной методике показывает, что для этих зданий экономический эффект при использовании разработанного метода обеспечения взрывобезопасности зданий со взрывоопасными производствами составляет около 3% суммарных народнохозяйственных затрат на строительство и эксплуатацию. С учетом строительства объектов только такого типа экономический эффект от внедрения результатов данной работы составит более 0,5 млн. руб. в год. Но учитывая, что перечень взрывоопасных производств в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и других отраслях промышленности составляет несколько десятков наименований, то годовой экономический эффект составит несколько десятков миллионов рублей.

5.4. ПРИМЕРЫ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Пример 1. При проектировании здания компрессорной (взрывоопасное производство категории А, СНиП II-90-81), горючий газ — этилен, необходимо подобрать наиболее эффективный с экономической точки зрения материал для ЛСК.

Исходные данные. Первоначальная стоимость материала C_{K0} для изготовления 100 м^2 ЛСК равна 36 и 40 тыс. руб.; затраты на восстановление соответственно 39 и 43 тыс. руб.; остаточная стоимость разрушенных ЛСК по 4 тыс. руб. Эксплуатация зданий компрессорных рассматриваемого типа требует в течение 45 лет ежегодных затрат в размере 1,5 и 1 тыс. руб. Взрывы в объеме зданий компрессорных происходят со средней частотой t_{cp} один раз в 10 лет.

Для решения поставленной задачи следует определить суммарные затраты на первоначальное возведение, восстановление и эксплуатацию ЛСК, минимум которых будет соответствовать экономически эффективному варианту материала ЛСК. Расчет ведется по формуле

$$\Pi^I = 36 + \sum_{i=10}^{\left[\frac{45-1}{10}\right]10} \frac{39-4}{(1+0,08)^i} + \frac{1}{0,08} 1,5 = 36 + (39-4) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{1,08^{10}} + \frac{1}{1,08^{20}} + \frac{1}{1,08^{30}} + \frac{1}{1,08^{40}} \right) + \frac{1,5}{0,08} = 84,55 \text{ тыс. руб.}$$

$$\Pi^{II} = 40 + \sum_{i=10}^{\left[\frac{45-1}{10}\right]10} \frac{43-4}{(1+0,08)^i} + \frac{1}{0,08} 1,0 = 40 + (43-4) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{1,08^{10}} + \frac{1}{1,08^{20}} + \frac{1}{1,08^{30}} + \frac{1}{1,08^{40}} \right) + \frac{1}{1,08} = 85,62 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, из двух рассматриваемых вариантов материала для ЛСК наиболее эффективным является первый.

Решим эту задачу для зданий компрессорных, в которых частота взрывов ГВС внутри здания t_{cp} равна 15 годам.

$$\Pi^I = 36 + \sum_{i=15}^{\left[\frac{45-1}{15}\right]15} \frac{39-4}{(1+0,08)^i} + \frac{1}{0,08} 1,5 = 36 + (39-4) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{1,08^{15}} + \frac{1}{1,08^{30}} \right) + \frac{1,5}{0,08} = 69,7 \text{ тыс. руб.}$$

$$\Pi^{II} = 40 + \sum_{i=15}^{\left[\frac{45-1}{15}\right]15} \frac{43-4}{(1+0,08)^i} + \frac{1,0}{0,08} = 40 + (43-4) \times$$

$$\times \left(\frac{1}{1,08^{15}} + \frac{1}{1,08^{30}} \right) + \frac{1,0}{0,08} = 69,0 \text{ тыс. руб.}$$

В этом случае наиболее эффективным является второй вариант. Следовательно, при выборе материалов для изготовления ЛСК существенное влияние оказывают не только стоимостные показатели, но и среднее время безаварийной работы конструкций, которое может быть установлено на основании наблюдения за данными производства, а также при изучении материалов последствия взрывов.

Пример 2. Выбрать экономически целесообразную площадь ЛСК для обеспечения взрывобезопасности здания компрессорного цеха при следующих исходных данных, табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5.1. Выбор варианта площади легкобрасываемых конструкций для здания объемом $2,3 \cdot 10^4 \text{ м}^3$

Наименование показателей	Значение показателей в зависимости от площади ЛСК, м^2		
	по расчету, $F_{\text{ЛСК}}=1150$	по нормам, $F_{\text{ЛСК}}=690$	максимально возможная по проекту, $F_{\text{ЛСК}}=1840$
Сметная себестоимость конструкций C_i , тыс. руб.	24,15	14,49	38,64
Трудоемкость работ по возведению легкобрасываемых конструкций m_i , чел.-дн.	402	241	644
Заработная плата рабочих, занятых на возведении легкобрасываемых конструкций $З_i$, тыс. руб.	3,1	1,8	4,8
Количество рабочих в смену, чел.	10	10	10
Годовые затраты на отопление здания, приходящиеся на 100 м^2 легкобрасываемых конструкций $З_{\text{от}}$, тыс. руб.	6,0	4,6	7,0
Затраты, связанные с восстановлением конструкций $З_{\text{в}}$, тыс. руб.	26,55	26,0	42,1
Амортизационные отчисления q_1 , %	2,0	2,0	2,0
Отчисления на содержание конструкций q_2 , %	0,8	0,8	0,8
Срок службы здания, годы	60	60	60
Среднее время безаварийной работы $t_{\text{ср}}$, годы	10	5	15
Капитальные вложения в строительство объекта, тыс. руб.	300	300	300
Время остановки производства, связанное с взрывом $t_{\text{ост}}$, годы	0,015	0,02	0,01

Расчетная сметная себестоимость ЛСК равна:

$$C_1^{\text{расч}} = C_1 - З_1;$$

$$C_2^{\text{расч}} = C_2 - З_2;$$

$$C_3^{\text{расч}} = C_3 = 38,64 \text{ тыс. руб.};$$

$$З_1^I = 0,5 \frac{24,15 \cdot 0,16}{1,16 \cdot 1,06} \left(1 - \frac{402}{644} \right) = 0,59 \text{ тыс. руб.}$$

$$З_2^I = 0,5 \frac{14,49 \cdot 0,16}{1,16 \cdot 1,06} \left(1 - \frac{241}{644} \right) = 1,25 \text{ тыс. руб.};$$

$$\mathfrak{Z}_1^{II} = 0,6 (644 - 402) = 0,145 \text{ тыс. руб.};$$

$$\mathfrak{Z}_2^{II} = 0,6 (644 - 241) = 0,24 \text{ тыс. руб.};$$

$$\mathfrak{Z}_1^{III} = 0,15 (4,8 - 3,1) = 0,255 \text{ тыс. руб.};$$

$$\mathfrak{Z}_2^{III} = 0,15 (4,8 - 1,8) = 0,45 \text{ тыс. руб.};$$

$$\mathfrak{Z}_2 = 0,59 + 0,145 + 0,255 = 0,99 \text{ тыс. руб.};$$

$$\mathfrak{Z}_3 = 1,25 + 0,24 + 0,45 = 1,94 \text{ тыс. руб.};$$

$$C_1^{\text{расч}} = 24,15 - 0,99 = 23,16 \text{ тыс. руб.};$$

$$C_2^{\text{расч}} = 14,49 - 1,94 = 12,55 \text{ тыс. руб.}$$

Суммарные народнохозяйственные затраты на строительство здания компрессорной и его эксплуатацию равны:

$$\Pi^I = 23,16 + \frac{1}{0,08} (1,06 \cdot 24,15 \cdot 0,028 + 6,0) + (26,55 + 0,12 \cdot 300 \times 0,015) \left(\frac{1}{1,08^{10}} + \frac{1}{1,08^{20}} + \frac{1}{1,08^{30}} + \frac{1}{1,08^{40}} + \frac{1}{1,08^{50}} \right) = 128,5 \text{ тыс. руб.};$$

$$\begin{aligned} \Pi^{II} = 12,55 + \frac{1}{0,08} (1,06 \cdot 14,49 \cdot 0,028 + 4,6) + (26,0 + 0,12 \cdot 300 \times \\ \times 0,02) \left(\frac{1}{1,08^5} + \frac{1}{1,08^{10}} + \frac{1}{1,08^{15}} + \frac{1}{1,08^{20}} + \frac{1}{1,08^{25}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{1,08^{30}} + \dots + \frac{1}{1,08^{55}} \right) = 131,5 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi^{III} = 38,64 + \frac{1}{0,08} (1,06 \cdot 38,64 \cdot 0,028 + 7,0) + (42,1 + 0,12 \times \\ \times 300 \cdot 0,01) \left(\frac{1}{1,08^{15}} + \frac{1}{1,08^{30}} + \frac{1}{1,08^{45}} \right) = 158,14 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Таким образом, эффективным является первый вариант при площади ЛСК, равной 1150 м².

Расчет данного примера показывает, что уменьшение площадей ЛСК до минимальных размеров не дает желаемого результата, так как в этом случае увеличивается вероятность разрушений при взрывах. Увеличение площади ЛСК обеспечивает большую взрывобезопасность здания и в конечном счете приводит к минимальным приведенным затратам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1976. — 452 с.
2. Агафонов В.В., Баратов А.Н., Румянцев В.С. Пожаротушение//Сборник научных трудов ВНИИПО МВД СССР. — М., 1983. — 68 с.
3. Агафонов В.В., Абдурагимов И.М., Баратов А.Н., Румянцев В.С., Стрельчук Н.А. II Всесоюзная научная конференция: "Пожаровзрывобезопасность производственных процессов в металлургии". — М., 1983. — 242 с.
4. Адушкин В.В., Когарко С.М., Лямин А.Г. Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере//Свойства взрывчатых веществ и их совершенствование/Под ред. М.В.Дубнова. — М.: Недра, 1975. — 360 с.
5. Александров В.Е., Иващенко П.Ф., Румянцев В.С. Эффективность защитных мероприятий от взрыва газовых смесей//Горючесть веществ и химические средства пожаротушения. — М., 1976. — Вып. 3. — С. 34–41.
6. Александров В.Е., Иващенко П.Ф., Румянцев В.С., Вогман Л.П. Влияние источника зажигания на процесс сгорания метановоздушной смеси//Горючесть веществ и химические средства пожаротушения. — М., 1976. — Вып. 3. — С. 42–48.
7. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960. — 560 с.
8. Бабкин В.С., Бабушок В.И. О начальной стадии горения газа в замкнутом объеме//Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13. — № 3. — С. 24–29.
9. Бабкин В.С., Бабушок В.И., Михайлова Л.Г. Влияние термодинамических и кинетических параметров на динамику сгорания газа в сферическом сосуде//Физика горения и взрыва. — 1979. — Т. 15. — № 6. — С. 14–20.
10. Баум Ф.А., Станюкевич К.П., Шехтер В.М. Физика взрыва/Под ред. К.П.Станюкевича. — М.: Наука, 1975. — 782 с.
11. Бесчастнов М.В., Соколов В.М. Предупреждение аварий в химической промышленности. — М.: Химия, 1979. — 380 с.
12. Бесчастнов М.В., Соколов В.М., Кац М.И. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения. — М.: Химия, 1976. — 368 с.
13. Бурлаков И.С. К расчету конструкций зданий и сооружений для взрывоопасных производств. Промышленное строительство. — 1972. — № 8. — С. 8–12.
14. Временные нормы и правила по технике безопасности и производственной санитарии для проектирования строительства и эксплуатации производств ацетилена термоокислительным пиролизом метана и электрокрекингом метана. — М.: Госхимиздат, 1972. — 28 с.
15. Гнускин А.М. Исследование защиты промышленных зданий при взрывах газов внутри помещений. Автореф. дис. канд. техн. наук. — М., 1965. — 18 с.
16. Годжелло М.Г. Расчет площади легкобрасываемых конструкций для зданий и сооружений взрывоопасных производств. — М.: Стройиздат, 1981. — 49 с.
17. Ганушкин В.И. Приспособление подвалов существующих зданий под убежища. — М.: Стройиздат, 1971. — 68 с.
18. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 321 с.
19. Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.В. Теория теплового распространения пламени. — М., 1947 (Московский механический институт). — 240 с.
20. Зельдович Я.Б., Воеводский В.В. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. — М., 1947 (Московский механический институт). — 186 с.
21. Иост В. Взрывы и горение в газах. — М.: ИНЛ, 1952. — 358 с.
22. Иващенко П.Ф., Румянцев В.С. Конвективный подъем и скорость распространения больших очагов пламени//Физика горения и взрыва. — 1978, № 3. — 160 с.
23. Инструкция по расчету перекрытий на импульсные нагрузки. — М.: Стройиздат, 1966. — 142 с.
24. Когарко С.М., Адушкин В.В., Лямин А.Г. Исследование сферической детонации газовых смесей//Научно-технические проблемы горения и взрыва. — 1965. — № 2. — С. 551.
25. Киселев В.А. Строительная механика: Специальный курс. — М.: Стройиздат, 1970. — 482 с.

26. Комаровский А.Н. Панельное и крупноблочное строительство промышленных и энергетических объектов. — М.: Энергия, 1970. — 680 с.
27. Конструкция каркасно-панельных стен с применением панелей длиной 3 м, выполненных из листовых материалов (асбестоцемента, алюминия, пластмасс и т.д.) и эффективных теплоизоляционных материалов. — ЦНИИ-промзданий, 1965. — 204 с.
28. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1968. — 592 с.
29. Мольков В.В., Некрасов В.П. Динамика сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения//Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 18, — № 4. — С. 17–24.
30. Мосашвили З.Т. Экспериментальные исследования процессов взрывного горения в топках котлов//Сообщение АН Грузинской ССР. — 1978. — Т. 90. — № 1. — 1021 с.
31. Маркштейн Д.Г. Нестационарное распространение пламени. — М.: Мир, 1968. — 437 с.
32. Никитин В.С., Рябцев В.А. Основные параметры взрыво- и пожароопасности газов и паров в СССР, США и ФРГ: Обзор. — М., 1974. — 162 с. — (Обзор ВЦНИИОТ).
33. Определение категорий противопожарной защиты промышленных зданий. Проект норм 18230. Противопожарная защита промышленных зданий ФРГ//Промышленное строительство. — 1968. — № 5. — 62 с.
34. Орлов Г.Г., Лейбман А.Е. Экономическая оценка эффективности применения легкосбрасываемых конструкций в зданиях со взрывоопасными производствами//Экономика строительства. — 1976. — № 4. — 61 с.
35. Орлов Г.Г., Стрельчук Н.А., Предтеченский В.М. и др. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве//Под ред. Н.А.Стрельчука. — М.: Стройиздат, 1970. — 126 с.
36. Орлов Г.Г. Предотвращение разрушения зданий при взрывах в химических производствах//Химическая промышленность: Химия. — М., 1976. — № 4. — 102 с.
37. Орлов Г.Г. Причины взрывов горючих смесей внутри производственных зданий//Охрана труда в строительстве/МИСИ им. В.В.Куйбышева. — М., 1978, № 161. — 140 с.
37. Орлов Г.Г., Лейбман А.Е., Манасян А.И. Определение экономически оптимальных площадей легкосбрасываемых ограждающих конструкций//Охрана труда в строительстве/МИСИ им. В.В.Куйбышева. — М., 1978, № 161. — 140 с.
39. Петров А.И. Исследование нагрузок от взрывного горения газоздушных смесей: Автореф. канд. техн. наук. — М., 1979. — 18 с.
40. Пилюгин Л.П. Нагрузки, возникающие при взрывах газоздушных смесей в помещениях взрывоопасных производств//Взрывобезопасность в строительстве. Сб. трудов/МИСИ им. В.В.Куйбышева. — М., 1983. — 142 с.
41. Пилюгин Л.П., Стрижевский М.И., Литвин Н.А. и др. Рекомендации по проектированию предохранительных (легкосбрасываемых) конструкций сооружений взрывоопасных производств/МИСИ им. В.В.Куйбышева. — М., 1984. — 45 с.
42. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. — М.: Стройиздат, 1980. — 204 с.
43. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. — М.: Стройиздат, 1974. — 207 с.
44. Рабинович И.М., Сеницын А.П., Теренин И.Н. Расчет сооружений на действие кратковременных и мгновенных сил/ВИА им. Куйбышева. — М., 1957. — Т. 1, Т. 2. — 582 с.
45. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. — М.: Химия, 1980. — 376 с.
46. Румянцев В.С. Исследование нагрузок на конструкции здания от взрыва газоздушных смесей внутри помещения с учетом интенсификации горения: Автореф. дисс. канд. техн. наук. — М., 1977. — 20 с.
47. Стрельчук Н.А., Иващенко П.Ф. Исследование нагрузок от взрыва газоздушных смесей в производственных помещениях//Пожарная профилактика и тушение пожаров. — М.: Стройиздат, 1966. — 68 с. (Информ. сб. № 3).
48. Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г. Защита зданий взрывоопасных производств от нагрузок, возникающих при взрывном горении газоздушных

- смесей (ГВС) //Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. Справочник проектировщика. — М., Стройиздат, 1981. — 215 с.
49. Стрельчук Н.А., Имайкин Г.А. Оценка методами теории надежности требуемых площадей легкоразрушаемых конструкций зданий насосных АБТ//Безопасность труда в промышленности. — 1970. № 2. — С. 14–16.
50. Стрельчук Н.А., Иващенко П.Ф., Румянцев В.С. К расчету легкосбрасываемых конструкций для зданий взрывоопасных производств//Промышленное строительство. — 1975, № 1 — С. 12–13.
51. Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г., Макаров Г.А., Кушелев В.П. Охрана труда в химической промышленности. Уч. для вузов. — М.: Химия, 1977. — 568 с.
52. Садовский М.А. Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва. — М.—Л.: Изд. АН СССР, 1945. — 202 с.
53. Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований//Физика горения и взрыва. Сб. трудов 1. — М., Изд. АН СССР, 1952. — С. 108–112.
54. Савич П.Л. Динамика взрывных волн/ВИА им. В.В.Куйбышева. — М. — 230 с.
55. Уманский А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Ч. 2. — М.: Стройиздат, 1972. — 502 с.
56. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. — М.: МГУ, 1957. — 438 с.
57. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. — М.: АН СССР, 1963. — 176 с.
58. Юрманов Ю.А. Защита сооружений от действия воздушной УВ//Записки ЛГИ им. Г.В.Плеханова. — М., 1966, — Т. 52. — Вып. 1. — С. 506–512.
59. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. — Л.: Судпромгиз, 1961. — 360 с.
60. Bartkneech W. Explosion, Ablaut und Schutzmassnahmen. — Berlin — Heidelberg — New York//Springer-Verlag. — 1978. — P. 26–45.
61. Bradkey B., Mitcheson A. /Comb. and Flame. 1978. — V. 32, № 3. — P. 221–255.
62. Bradley D., Mitcheson A. The Venting of Gaseous Explosion in Spherical Vessels//Combustion and Flame. — 1978. — № 32. — P. 221–236.
63. Burgoyne J.H., Wilson M.J. -G. The relief of pentane vapourair explosion in Vessels//Symposium on chemical process hazards. Manchester. — 1980. — P. 25–29.
64. Carson P.A., Mymford C.J. An analysis of incidents involving major hazards in the chemicals industry//Journal of Hazardous Materials. — 1979. — V. 3, № 2. — P. 149–165.
65. Chan C, Moen L.O. Lee J.H.S.//Comb. and Flame. — 1983. — V. 49, P. 27–39.
66. Deuhstedt F.D., Feely F.J., Commer C.//The 10th. World Petroleum Congress. — Bucharest. — 1979. — P. 26–45.
67. Charney M. Explosive venting vs. explosion venting. //Loss Prevention, — 1967, V. 1, p. 35–38.
68. Dorge K.J., Pangritz D., Wagner H.G.//Acta Astronautica. — 1976. — V. 3. — P. 1067–1076.
69. Fire Prot Manual Hydrocarbon Process, Plants, Honston. Tex., 1973.
70. Harris G.F.—P., Briskoe P.G. The venting of pentane vapour—air explosions in a large vessel//Comb. and Flame. — 1967. — V. 11, № 4. — P. 329–338.
71. Heinrich H.I., Kowall R. Beitrag zur Kenntniss des Ablauts druckkentlasteter Strahlexplosion bei Zundung durch turbulente Flammen//Staubrein—haltung der Luft. — 1972. — Bd. 32, № 7. — S. 121–133.

72. Hillebrand D.N. Explosionsavastin//Teknisk Tidskrift. — 1958. — V. 88, № 48. — S. 426–432
73. Hjertager B.H. Euromech 139: Uncontrolled Blasts and Explosions in Industry//Aberystwyth. Wales, UK, April. — 1981. — № 6. — P. 7–39.
74. Hillebrand D. Kemiska och elektriska explosioner//Teknisk tidskrift. — 1955. V. 85, № 23. S. 541–544.
75. Lind C.D., Whitson J. Department of Transportation//United States Coast. Report. — № GG-85-77. — 1977. — P. 16–56.
76. Man I.O., Lee L.H.S., Hjertager B.H., Kuhre K//Comb. and Flame. 1982. — V. 47. — P. 31–52.
77. Marskall V.S. Process-plant safety-strategic approach//Chemical Engineering. — 1975. — V. 82, № 27. — P. 58–60.
78. Maisey H.R. Gaseous and dust explosion venting//Chemistry and Process Engineering. — 1965. — V. 46, № 10. — P. 527–535.
79. Morn J., Donato M., Knustautas R. Lee J.H.S.//Comb. and Flame., — 1980, — V. 39. — P. 21–32.
80. Moen J.O., Lee J.H., Hjertager B.H. Fuhre K. and Eckhoff R.//The Chr. Michelsen Institute Report, Bergen, Norway. 1981.
81. Moen J.O., Donato M., Lee J.H.S.//Comb. and Flame. — 1981. — V. 39, № 1. — P. 16–23.
82. Mundday G. The calculation of venting areas for pressure relief of explosions in vessels//Second Symposium on Chemical Process Hazards. — 1963. — № 1. Chem. E. — P. 46–54.
83. National Fire Code, U.S.A. — 1968. — V. 2.
84. Palmer K.N. Progress Review. — 1956. — № 38.
85. Pasman H.J. Design of pressure reliefvents//Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. New York. — 1974. — P. 185–189.
86. Pester O.//Chemische Technik. — 1967. — Bd. 19, № 11.
87. Raslash D.J.//The relief of gas and vapour explosions in domestic structures. Part one. The Structural Engineer. — 1969. — V. 47, № 10. — P. 403–408.
88. Roobash B.G., Rogowski Z.W. Gaseous explosion in vented ducts//Comb. and Flame. — 1960. — V. 4, № 4. — P. 301–312.
89. Simmonds W.A., Cubbage P.A. The design of explosion reliefs for industrial drying ovens//Symposium on Chemical process hazards, Manchester. — 1960. — P. 69–70.
90. Solberg D.M., Pappas J.A., Skramstad E.//18-th Symposium (Int) on Combustion, Waterloo, Canada, August. — 1980. — P. 17–22.
91. Strehlow R.A.//14-th Symposium International on Combustion. — 1972.
92. Wilhelm E.H. Loss Prev.a.Safety Promot.//Process. Ind., Amsterdam. — 1974.
93. Wingerden C.J.M., Zeeuwen J.P.//Journal of Hazardous Materials. — 1983. — V. 8. — P. 139–156.
94. Yao C. Explosion Venting of Low-Strength//Equipment and Structures Loss Prevention. — 1974. — V. 8. — P. 1–9.
95. Zakosh R.G.//13-th Loss Prevention Symposium, Texas, Houston, April, 2–5. — 1979.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Г л а в а 1. Анализ взрывоопасности производств	5
1.1. Причины взрывов внутри производственных помещений	5
1.2. Взрывоопасность газо-, паро- и пылевоздушных смесей	11
1.3. Анализ нормативных материалов по защите зданий от взрывов горючих смесей внутри помещений	17
1.4. Оценка взрывоопасности производства	20
1.5. Определение степени интенсификации скорости распространения пламени	25
Г л а в а 2. Определение величины и характера нагрузок, действующих на ограждение конструкции при взрывном горении газозооушных смесей	44
2.1. Исходные предпосылки для определения величины и характера нагрузок	44
2.2. Определение нагрузок, возникающих при взрывном горении газозооушных смесей и мгновенном вскрытии легкобрасываемых конструкций	46
2.3. Учет несферичности поверхности фронта пламени	54
2.4. Определение величины и характера нагрузок при использовании инерционных легкобрасываемых конструкций	60
2.5. Определение площади легкобрасываемых конструкций	71
Г л а в а 3. Конструктивные решения легкобрасываемых ограждающих элементов	76
3.1. Основные требования, предъявляемые к легкобрасываемым ограждающим конструкциям	76
3.2. Экспериментальные испытания легкобрасываемых конструкций	77
3.3. Применение остекления в качестве легкобразрушающихся и легкобрасываемых элементов	99
3.4. Конструктивные решения стеновых легкобрасываемых элементов	107
3.5. Конструктивные решения легкобрасываемых покрытий	116
3.6. Использование в качестве легкобрасываемых конструкций заполнений дверных проемов, ворот и люков	134
Г л а в а 4. Применение легкобрасываемых конструкций для обеспечения взрывобезопасности зданий и сооружений	137
4.1. Оценка воздействия нагрузок, возникающих при взрывном горении газозооушных смесей, на несущие конструкции зданий	137
4.2. Расчет узлов крепления легкобрасываемых конструкций к основным конструкциям	155
4.3. Примеры расчета узлов креплений стеновых и кровельных легкобрасываемых элементов	159
4.4. Нагрузки, разрушающие строительные конструкции	164
4.5. Объемно-планировочные и конструктивные решения зданий со взрывоопасными производствами	175
	197

Г л а в а 5. Экономическая оценка эффективности применения легко- сбрасываемых конструкций	182
5.1. Исходные данные экономической оценки эффективности легкосбрасываемых конструкций	182
5.2. Выбор материала для легкосбрасываемых конструкций	184
5.3. Экономическое обоснование варианта легкосбрасываемых конструкций	186
5.4. Примеры экономической оценки эффективности легкообра- сываемых конструкций	189
Список литературы	193

Научное издание

Геннадий Григорьевич Орлов

**ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ
ДЛЯ ВЗРЫВОЗАЩИТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ**

Редакция литературы по строительным материалам и конструкциям

Зав. редакцией *И.Х.Намазашвили*

Редактор *З.С.Шестопалова*

Технический редактор *Н.Н.Аксенова*

Корректор *Е.Р.Герасимюк*

Оператор *Н.М.Гайнулина*

ИБ № 3586

Подписано в печать 06.05.87 Т—15720 Формат 84х108/32

Бумага офсетная № 2 Печать офсетная Усл.печ.л. 10,50 Усл.кр.-отт. 10,71

Уч.-изд.л. 15,74 Тираж 4900 экз. Изд. № АУ1-635 Заказ **298**

Цена 2 р. 40 к.

Стройиздат 101442, Москва, Каляевская 23а

Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
300600, г. Тула, пр. Ленина, 109

ВНИМАНИЮ СТРОИТЕЛЕЙ И РУКОВОДИТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ!

Ленинградский Дом строительной книги предлагает памятки по технике безопасности, выпущенные Стройиздатом:

Памятка асфальтобетонщику

Памятка кровельщику по стальным кровлям

Памятка машинисту безкопрового дизель-молота

Памятка машинисту телескопической автовышки

Памятка проходчику на поверхностных работах

Памятка слесарю-трубопроводчику

Памятки высылаются наложенным платежом. Цена каждой памятки 10 коп.

Заказы направляйте по адресу: 195027, г. Ленинград, Большеохтинский пр., 1. Дом строительной книги.

Блан-заказ для организаций

№ п.п.	Название памятки	Заказы- ваемое ко- личество	Цена	Сумма
1.	Памятка асфальтобетон- щику			
2.	Памятка кровельщику по стальным кровлям			
3.	Памятка машинисту те- лескопической авто- вышки			
4.	Памятка машинисту бес- копрового дизель- молота			
5.	Памятка проходчику на поверхностных работах			
6.	Памятка слесарю-трубо- проводчику			

Адрес _____

Телефон _____

Место печати _____

Распорядитель кредита _____

Главный бухгалтер _____

Цена 2 р. 40 к.

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ:

**П и л ю г и н Л. П. Конструкции сооружений
взрывоопасных производств.**

Изложены теоретические основы проектирования предохранительных конструкций. Дана оценка эффекта действия на строительные конструкции нагрузок, возникающих в аварийных ситуациях при взрывном горении газовоздушных смесей в помещениях взрывоопасных производств.