

Г. Г. ОРЛОВ, д-р техн. наук, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ICA_kbs@mgsu.ru)

А. Д. КОРОЛЬЧЕНКО, лаборант испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве, Московский государственный строительный университет (Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; e-mail: ikbs@mgsu.ru)

УДК 614.841.123.24

НАГРУЗКИ, РАЗРУШАЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ

Проанализированы данные по разрушению и степени повреждения различных конструктивных элементов зданий и сооружений, которые имели место как при аварийных взрывах внутри производственных помещений, так и при наружных взрывах, а также результаты испытаний конструкций на действие взрывных нагрузок. Показано, что одним из наиболее уязвимых мест в кирпичной кладке при строительстве зданий являются сечения по швам, сцепление в которых зачастую оказывается недостаточным для обеспечения сопротивления сдвигу, разрыву или главным растягивающим напряжениям. Обоснованы преимущества крупнопанельных промышленных зданий перед кирпичными с точки зрения их взрывоустойчивости. Даны рекомендации по проектированию сборных железобетонных каркасов зданий со взрывоопасными производствами. Представлены данные по несущей способности конструкций промышленных зданий, полученные на основании материалов по аварийным взрывам, анализа результатов исследований, изложенных в литературных источниках, а также данные по нагрузкам, вызывающим разрушения сооружений и конструкций различной степени и характера. Дана классификация строительных конструкций по степени их разрушения. Приведены данные по взрывным нагрузкам, при которых начинают разрушаться различные виды основных строительных конструкций и здания и которые могут быть использованы для построения системы взрывозащиты зданий со взрывоопасными производствами строительными методами. Определено поведение конструкций при аварийных взрывах, испытаниях и расчетах конструкций; установлены допустимые нагрузки на несущие и ограждающие конструкции в целях получения исходных данных для составления рекомендаций по проектированию зданий для взрывоопасных производств.

Ключевые слова: взрывоустойчивость зданий; строительные конструкции; разрушающие нагрузки; пределы несущей способности; аварийные взрывы; взрывные нагрузки; взрывоопасные производства.

DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.45-56

Для определения нагрузок, в пределах которых возможно снижение взрывного давления внутри помещений за счет применения предохранительных конструкций (ПК), и области их применения для защиты от действия взрыва газозвушной смеси (ГВС) внутри помещений возникла необходимость установить пределы несущей способности основных конструкций зданий и сооружений со взрывоопасными производствами. Для этого были изучены и проанализированы данные по разрушению и степени повреждения различных конструктивных элементов зданий и сооружений, имевшие место в результате аварийных взрывов как внутри производственных помещений, так и при наружных взрывах, а также использованы результаты испытаний конструкций на действие взрывных нагрузок и расчетные данные. При этом представилось возможным

рассмотреть следующие конструкции промышленных и гражданских зданий, по которым были получены сведения об их несущей способности при воздействии взрывных нагрузок:

- с несущими кирпичными стенами;
- бескаркасные крупнопанельные;
- с железобетонным и металлическим каркасами.

Ни по одному виду строительных конструкций нет столь многочисленных данных по их поведению при взрывах, как по каменным конструкциям. К сожалению, эти данные практически не обобщены, что ограничивает возможность решения многочисленных задач при проектировании каменных конструкций для зданий со взрывоопасными производствами.

Методы расчета несущей способности конструкции из кирпича отличаются большой степенью иде-

ализации 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 и при этих условиях о взрывоустойчивых каменных конструкциях можно говорить только в том случае, если обеспечивается надлежащее качество изготовления их по проектам, учитывающим их специфические особенности. Невыполнение этих условий ведет к разным повреждениям не только при сильных взрывных нагрузках, но и при относительно слабых.

Анализ имевших место аварий показывает, что одним из наиболее уязвимых мест в кирпичной кладке являются сечения по швам, сцепление в которых часто оказывается недостаточным для обеспечения сопротивления сдвигу, разрыву или главным растягивающим напряжениям. Таким образом, сцепление — одна из основных характеристик, определяющих взрывоустойчивость кладки. Так как одним из параметров, определяющих сцепление в кладке, является марка раствора, то классификацию кладок можно проводить с указанием минимальной марки раствора, при которой в этой кладке может быть достигнуто необходимое сцепление. В табл. 1 приведены значения нормального сцепления R_0^H для различных видов кладки из кирпича марки не менее 75, которые позволяют установить давления, разрушающие кирпичные стены, в зависимости от их размеров [1, 2].

Из рис. 1, на котором нанесены опытные и расчетные значения разрушающих нагрузок, видно, что кирпичная кладка разрушается при нагрузках от 2,5 до 30 кПа и более.

Крупнопанельное строительство занимает значительное место в общем объеме промышленного строительства. До настоящего времени мы не располагаем опытом поведения крупнопанельных зданий при взрывах горючих смесей внутри помещений. Однако, 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 оправданно.

Преимущества крупнопанельных промышленных зданий перед кирпичными с точки зрения их взрывоустойчивости могут быть обоснованы следующими соображениями.

Качество крупных панелей должно быть гарантировано заводскими условиями их изготовления, поэтому очевидно, что при надлежащем конструк-

Таблица 1. Нормативные значения нормального сцепления кладки в зависимости от марки раствора для разных видов кладки из кирпича

Вид кладки	R_0^H , кПа, в зависимости от марки раствора		
	50	25	10
Из обожженного кирпича	180	120–180	60–120
Из силикатного кирпича	120–180	60–120	—
Из бетонных камней марки 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	—

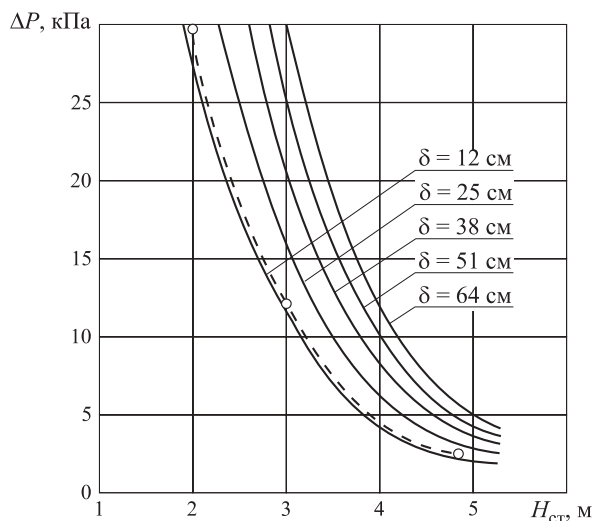


Рис. 1. Зависимость разрушающих нагрузок ΔP на кирпичные стены от их высоты $H_{ст}$ и толщины δ : — — — расчетные данные; - - - - - опытные данные

тивном решении стыков крупнопанельные стены обладают значительно более высоким и устойчивым сопротивлением сдвигающим и растягивающим напряжениям, чем стены ручной кладки.

Обязательное наличие конструктивного или расчетного армирования дополнительно повышает несущую способность крупнопанельных стен, в то время как продольное армирование кладки весьма трудоемко, а выполнение его путем укладки только горизонтальной арматуры по растворным швам, без вертикальных стержней, малоэффективно. Применение панелей для несущих стен и необходимость соблюдения требований типизации сборных изделий обуславливают простые, четкие и благоприятные с точки зрения взрывоустойчивости архитектурно-

планировочные решения здания, отличающиеся симметричным расположением конструкций, равномерным и частым размещением несущих стен. Последнее обеспечивает большую надежность сборных покрытий как горизонтальных диафрагм жесткости пространственной коробки здания. Убедительным примером повышенной взрывоустойчивости крупнопанельных зданий по сравнению с кирпичными являются результаты осмотра конструкций после аварийных взрывов, когда здания с кирпичными стенами толщиной 51 см при нагрузке, не превышающей 20 кПа, имели значительные разрушения. В то же время 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 со взрывоопасными производствами показывает, что каркасные здания довольно взрывоустойчивы, что обеспечивается надежной связью отдельных элементов, образующих единую пространственную конструкцию. При правильном расчете и конструировании каркасные конструкции следует 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 со взрывоопасными производствами 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 межэтажных перекрытий и диафрагм наиболее просто достигается применением монолитного железобетона. При выполнении рамно-связевого каркаса из сбор-

ного железобетона требуется более тщательное замоноличивание межэтажных перекрытий в целях повышения его жесткости, чем в каркасах рамной системы без вертикальных диафрагм. В связи с этим для зданий со взрывоопасными производствами можно рекомендовать рамно-связевые каркасы из монолитного железобетона, что, в частности, уже находит применение в практике строительства. Вертикальные диафрагмы обеспечивают зданию требуемую жесткость каркаса и лучшие технико-экономические показатели несущих конструкций, чем при чисто каркасном решении.

В практике строительства зданий со взрывоопасными производствами получили распространение сборные железобетонные каркасы, выполняемые по шарнирно-связевой схеме с передачей всех горизонтальных нагрузок на жесткие вертикальные связи. В качестве последних 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 на воздействие взрывных нагрузок. Для шарнирно-связевой системы обычно предусматривается соединение элементов каркаса посредством сварки стальных закладных деталей, назначение которых состоит в обеспечении устойчивости каркаса на время монтажа. Недостатком конструкций, выполненных по шарнирно-связевой схеме, ограничивающей область их применения малоэтажными зданиями, с точки зрения взрывозащиты является то, что разрушение отдельных связей (где при взрыве могут возникать большие усилия) может привести к обрушению значительной части здания, так как каркас без связей представляет собой изменяемую шарнирную систему.

Для зарубежной практики строительства зданий со взрывоопасными производствами характерно решение каркасных зданий с применением монолитного железобетона с гибкой и жесткой арматурой или металла. Элементы таких конструкций выдерживают горизонтальные нагрузки до 50 кПа и более.

В нашей стране подавляющее большинство каркасных зданий выполняется из сборного железобетона. Сложность разработки взрывоустойчивого каркаса из сборного железобетона связана с ограниченным объемом данных по поведению их во время взрыва. Этим, а также рядом расчетных и производственных трудностей можно объяснить многообразие конструктивных решений сборных железобетонных каркасов, различающихся по разрезке на

монтажные элементы и в особенности по способам сопряжения сборных конструкций.

Учитывая, что разрезка каркасов на сборные элементы и конструирование узловых соединений являются одной из наиболее важных и сложных задач проектирования взрывоустойчивых зданий, на этом следует остановиться особо.

В практике проектирования и строительства сборных железобетонных каркасов для зданий со 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 и колонны, и ригели. Указанные способы разрезки могут осуществляться как в поперечном, так и в продольном направлении каркаса. При разрезке каркаса на линейные элементы значительно упрощается технология изготовления, транспортирование и монтаж сборных железобетонных элементов. Однако при этом стыкование ригелей с колоннами осуществляется в сечениях с максимальными изгибающими моментами, которые могут быть и знакопеременными, что 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 используются железобетонные изделия, выдерживающие горизонтальные нагрузки 30 кПа и более. Каркасы разработаны для сетки колонн 6×6 и 6×9 м с количеством этажей до 5 и высотой от 3,6 до 7,2 м и рассчитаны на 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 перекрытия 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 и 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 многоэтажных.

Разрезка каркаса по второму способу на комбинированные элементы вызвана желанием использовать положительные свойства каркасов из монолитного железобетона. При точной разрезке каркаса на элементы в заводских условиях последние могут

выполняться крестообразной формы с расположением стыков колонн в сечениях с нулевыми изгибающими моментами 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 обеспечения взрывоустойчивости. Учитывая, что стыки колонн наиболее ответственны и трудоемки в выполнении, при проектировании сборных каркасов, собираемых из комбинированных железобетонных конструкций, следует стараться сокращать количество 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 в заводских условиях следует учитывать характер действующих в узле усилий (знакопостоянных или знакопеременных), конструкцию стыков, их прочность и деформативные особенности, изготовление, транспортировку и монтаж.

При проектировании сборных железобетонных каркасов зданий со взрывоопасными производствами следует стремиться к тому, чтобы стыки колонн были расположены в сечениях, работающих на центральное сжатие или внецентренное сжатие с малыми эксцентриситетами. Их следует относить от грани примыкания к узлу в целях удаления от зоны максимальных изгибающих моментов при разрезке каркаса на монтажные элементы. Необходимо также стремиться к уменьшению количества стыков колонн, проектируя сборные элементы высотой на несколько этажей. При проектировании стыков следует иметь в виду, что под воздействием взрывных нагрузок каркас здания может подвергаться повторным нагрузкам различной интенсивности и частоты и в его элементах могут возникать знакопеременные усилия.

Поскольку в настоящее время данные по поведению сборных каркасов при взрыве горючих смесей внутри здания очень ограничены, следует применять такие 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 — на стальных

Таблица 2. Характер разрушения конструкций и сооружений в зависимости от величины действующей нагрузки по опытным данным

Вид сооружения, конструкции	Степень разрушения	Давление взрыва, кН/м ²
<i>По данным П. Л. Савича [3]</i>		
Остекление	Частичное разрушение	3,3
Остекление	Полное разрушение	7,2
Кирпичные стены	Опрокидывание стен	4,6
Оконные рамы, кровля	Разрушение оконных рам, кровли	10,4
Одноэтажные кирпичные дома	Полное разрушение	30,4
<i>По данным М. А. Садовского [4]</i>		
Остекление	Полное разрушение	5–10
Легкие перегородки	То же	5
Перекрытие по деревянным балкам	«	1–16
Кирпичные стены, $\delta = 38$ см	Значительное разрушение	25
Кирпичные стены, $\delta = 51$ см	То же	45
<i>По данным Н. А. Стрельчука [5]</i>		
Кирпичные стены, $\delta = 64$ см	Значительное разрушение	55
Кирпичные стены, $\delta = 51$ см	То же	25
Кирпичные стены, $\delta = 38$ см	«	15
Кирпичные стены, $\delta = 25$ см	Опрокидывание стен	7
Железобетонные стены, $\delta = 25$ см	Разрушение	80
Железобетонные стены, $\delta = 12$ см	То же	60
Свободно опертые покрытия массой, кг/м ² :		
60	«	2,9
104	«	3,7
132	«	4,8
270	«	27,1
Покрытия по деревянным балкам	«	10–16
Деревянные ЛСК (вышибные)	Сбрасывание конструкций	2,6–4,7
Остекление	Полное разрушение	5–10
Легкие перегородки	Разрушение	5
<i>По данным Ю. А. Юрманова [6]</i>		
Кирпичные стены, $\delta = 25\div 38$ см	Сильная деформация, образование трещин	49–56
Бетонные и шлакобетонные стены, $\delta = 24\div 26$ см	Полное разрушение	49–56
Деревянные балки диаметром 14–16 см	Разрушение	10–13
Фундаменты, оборудование массой до 1 т (лебедки, вентиляторы)	Смещение фундаментов, поломка оборудования	40–60
Воздуховоды	Обрыв креплений, деформация	15–35
<i>По данным Ю. С. Яковлева [7]</i>		
Бетонные стены, $\delta = 25\div 36$ см	Разрушение	35–45
Кирпичные стены, $\delta = 25\div 38$ см	То же	45–56
Деревянные балки, $\delta = 14\div 16$ см	«	10–18
<i>По данным В. И. Ганушкина [8]</i>		
Остекление	Полное разрушение	5
Перегородки, перекрытия по деревянным балкам	То же	10
Деревянные здания	Разрушение	14–20
Каменные здания	То же	35–45

Вид сооружения, конструкции	Степень разрушения	Давление взрыва, кН/м ²
<i>По данным С. М. Козарко [9]</i>		
Остекление	Частичное разрушение	1,5–2
Остекление	Полное разрушение	3,5–7
Перегородки, двери	Разрушение	12
Дома с деревянным каркасом	Сильное повреждение	17
Промышленные здания	То же	17
Шлакоблочные стены	Разрушение	22
Кирпичные здания	Среднее повреждение	28
Кирпичные здания	Сильное повреждение	38
Здания с железобетонным каркасом	Среднее повреждение	38
Промышленные здания со стальным и железобетонным каркасом	Сильное повреждение	58
Кирпичные стены, $\delta = 38$ см	Разрушение	53

Таблица 3. Нагрузки, разрушающие ограждающие и несущие конструкции зданий

Тип и характеристика конструкций		Несущая способность конструкций, кПа	Величина разрушающей нагрузки, кПа
Ограждающие	Кирпичные стены толщиной в 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 и 24 см серии 1.432-5	5,5–7	5–7
	Железобетонные плиты размером 1,5×6,0 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 серий ПР-05-36.1, ПР-05.36.2, ПР-05-36.3 и ПР-05-36.4	4,3*	3,5–0,95
	Двери промышленных зданий по ГОСТ 6629–74	1,5*	1,1–1,8
Несущие	Сборные железобетонные колонны сплошного сечения 40×40 см для одноэтажных зданий с расчетной высотой 6,2 и 7,4 м серии КЭ-01-49	150–200	8–15 (при сплошной навеске стеновых панелей); 24–45 (при наличии остекления)
	Сборные железобетонные предварительно напряженные двускатные балки для покрытий зданий пролетами 12 и 18 м с шагом балок 6 м серии ПК-01-06	85–90	6–7 (при отсутствии участков ЛСК покрытия); 18–20 (при наличии участков ЛСК покрытия)
* Разрушающее усилие на узлы запорного устройства.			

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 значительных изгибающих моментов, поэтому они применяются для сопряжения колонн, работающих в условиях внецентренного сжатия даже с большими эксцентриситетами. Большинство типовых проектов,

Таблица 4. Классификация строительных конструкций по степени их разрушения

Степень разрушения строительных конструкций	Характеристика	Характер повреждений			Давление, кПа
		строительных конструкций зданий		оборудования	
		одноэтажных	многоэтажных		
Слабая	Взрывы внутри помещения без разрушения основных строительных конструкций и оборудования. Возможно продолжение эксплуатации здания после выполнения незначительных ремонтных работ	Разрушение остекления; отрыв дверей, ворот; образование трещин на внутренних перегородках; вскрытие ЛСК		Незначительное повреждение вентиляционных коробов; сдвиг незакрепленного оборудования	До 3,5
Средняя	Частичное разрушение второстепенных строительных конструкций и оборудования. Возможна эксплуатация здания после восстановительных работ	Вскрытие ЛСК, полное разрушение остекления; опрокидывание кирпичных стен, легких перегородок; разрушение покрытия с массой 1 м ² до 75 кг		Разрушение воздухопроводов, вентиляционных коробов	От 3,5 до 6
Повышенная	Частичное разрушение основных несущих строительных конструкций и значительное разрушение оборудования. Возможна эксплуатация после восстановительных работ	Разрушение части каркаса; разрушение деревянных зданий; образование трещин в блочных стенах; полное разрушение перекрытий	Разрушение перегородок, покрытий по деревянным балкам, перекрытий	Частичное разрушение технологического оборудования	От 6 до 12
Сильная	Сильное разрушение основных несущих конструкций, остаточные деформации в стальных конструкциях. Возможна эксплуатация после значительных восстановительных работ	Значительное разрушение несущих конструкций; образование трещин в кирпичных стенах	Разрушение кирпичных самонесущих стен; деформация стального легкого каркаса	Сильное разрушение оборудования	От 12 до 20
Чрезвычайно сильная	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	Разрушение сборных железобетонных конструкций без повышенной несущей способности	Чрезвычайно сильное разрушение оборудования	От 20 до 30

разработанных как для обычных промышленных зданий, так и для зданий со взрывоопасными производствами, имеют стыки колонн данного типа.

Правильно рассчитанные и сконструированные замоноличенные стыки колонн могут приближаться по своей работе и взрывоустойчивости к целым сечениям. 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 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, предназначенных для взрывоопасных производств.

Анализ последствий аварий показывает, что большинство повреждений является результатом разрушения узловых соединений. Ответственность узловых сопряжений возрастает в зданиях с навесными панелями, в которых заполнение в значительной степени выключается из работы и все функции по обеспечению прочности, жесткости и пространственной неизменяемости здания возлагаются только на каркас.

Таблица 5. Нагрузки, разрушающие элементы крепления ограждающих легкобрасываемых конструкций

№ п/п	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	Керамзитобетонная панель сплошного сечения с плотностью 900 кг/м ³	1,2	6	0,16 0,20 0,24 0,30	195 222 264 320	Арматурный стержень Ø14, растяжение	60	50,3
2	Панели из автоклавного ячеистого бетона с плотностью 700 кг/м ³	1,2	6	0,16 0,20 0,24 0,30	125 167 195 250	Арматурный стержень Ø14	60	50,3
3	Панели из автоклавного ячеистого бетона с плотностью 550 кг/м ³	1,2	6	0,16 0,20	110 140	То же	60	50,3
4	Стеновая панель из профилированного настила с заполнением стекло- или минераловатным материалом	2,4; 3; 3,6; 4,2; 4,8–12	6	0,31	47; 59	Арматурный стержень Ø12, растяжение	60	11
5	Стеновая панель с профилированным листом и негорючим утеплителем из жестких минераловатных плит (разработка ГПИ “Теплопроект”)	2,4; 3; 3,6; 4,2–12	3	0,18	35	Стержень с резьбой М 6, растяжение	60	7,9
6	Стеновая асбестоцементная экструзионная панель (чертежи серии 1.830.8-2, вып. 1 и 2)	6	6	0,12 0,14 0,16 0,18	71 91 97 108	Стержень с резьбой М 8, растяжение	60	9,3
7	Стеновая панель ПСМ (чертежи ТЭП 190933.0000041.02955.000.КМ03)	3	6	0,12	45	Стержень с резьбой М 16, растяжение	60	7,9
8	Стеновая асбестоцементная панель СКВр для завода СКГ (проект Гипрокаучука):							
	а) проектное решение	3	6	0,16	82	Болт М 14, растяжение	73	67,2
	б) фактическое выполнение	3	6	0,16	82	Арматурный стержень Ø16, срез	35	35,7
9	Волнистые асбестоцементные листы	2,5	1,097	–	–	–	–	3,2
10	Волнистые алюминиевые листы	5,4	0,65	–	–	Болт М 8, растяжение	60	2,6
11	Алюминиевые листы трапецидального профиля	5,4	0,65	–	–	То же	60	3,3

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 для сопряжения ригелей поперечной рамы с колоннами применяется соединение с помо-

щью ванной сварки выпусков верхней арматуры из ригеля и колонны, дуговой сварки 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. Характер повреждений

ограничивался небольшими трещинами в перегородках, а заметные повреждения отмечались только в тех сооружениях, при возведении которых были допущены ошибки в производстве работ, в частности некачественное выполнение рабочих швов в железобетонных элементах монолитного каркаса.

Таким образом, данные по несущей способности конструкций промышленных зданий, полученные на основании материалов аварийных взрывов, анализа результатов исследований, изложенных в литературных источниках [3–11], а также данные по нагрузкам, вызывающим различную степень и характер разрушений сооружений и конструкций [12–15], приведены в табл. 2 и 3.

Итак, в зависимости от характера повреждения строительные конструкции по степени разрушения можно разделить на пять степеней: слабую, среднюю, повышенную, сильную и чрезвычайно сильную (табл. 4).

Слабые разрушения характеризуются тем, что основные строительные конструкции сохраняют свою целостность, но имеет место разрушение остекления, отрыв дверей и ворот, образование трещин на внутренних перегородках, незначительное повреждение технологического оборудования, вентиляционных коробов, сдвиг незакрепленного оборудования. Такой характер повреждений наблюдается при нагрузках до 3,5 кПа. При этом возможно продолжение эксплуатации здания после незначительного ремонта. Если применение легкобросаемых конструкций (ЛСК) обеспечивает снижение нагрузок, действующих на ограждающие конструкции при взрывном горении ГВС, до 3,5 кПа, то при этом обычно не возникает необходимости в проверке несущей способности основных конструкций.

Разрушения средней и повышенной степени характеризуются частичным разрушением основных несущих строительных конструкций, плит покрытия, дверей, перекрытий, кровли и оборудования [16, 17], образованием трещин в шлакоблочных стенах, раз-

рушением деревянных зданий. Эти повреждения вызываются нагрузкой до 12 кПа. При возникновении таких нагрузок возможно продолжение эксплуатации здания после проведения восстановительных работ. В ряде случаев может оказаться целесообразным (как видно из анализа разрушающих нагрузок) заблаговременное усиление отдельных конструкций здания.

Сильные разрушения характеризуются разрушением каменных конструкций зданий, возникновением остаточных деформаций в стальных конструкциях. Эксплуатация здания возможна после восстановительного ремонта. При нагрузках до 20 кПа и использовании ЛСК потребуется некоторое усиление отдельных конструкций [18–21].

Чрезвычайно сильные разрушения характеризуются разрушением железобетонных каркасов, выполненных без учета их повышенной несущей способности. Вместе с тем нагрузки до 30 кПа без заметных повреждений выдерживают здания из монолитного железобетона, железобетонные и стальные каркасные здания, рассчитанные на повышенную несущую способность (см. табл. 3).

Данные по нагрузкам, при которых начинают разрушаться ограждающие конструкции, узлы их крепления и запорные устройства, а также легкобросаемые конструкции, приведены в табл. 5.

Данные табл. 5, а также данные по взрывным нагрузкам, при которых начинают разрушаться различные виды основных строительных конструкций и здания в целом, могут быть использованы для построения системы взрывозащиты зданий со взрывоопасными производствами строительными методами.

На основании изучения поведения конструкций при аварийных взрывах, испытаний и расчета конструкций установлены значения допустимых нагрузок на основные несущие и ограждающие конструкции в целях получения исходных данных для составления рекомендаций по проектированию зданий для взрывоопасных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. — М. : Стройиздат, 1980. — 190 с.
2. Попов Н. Н., Расторгуев Б. С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. — М. : Стройиздат, 1964. — 152 с.
3. Савич П. Л. Динамика взрывных волн. — Ч. 1–2. — М. : Военно-инженерная академия Красной армии им. В. В. Куйбышева, 1941. — 208 с.
4. Садовский М. А. Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва. — М.–Л. : Изд-во АН СССР, 1945. — 44 с.
5. Стрельчук Н. А., Мишуев А. В., Никитин А. Г., Орахелашвили Н. В. Газодинамика горения газозвушной смеси в полужамкнутом объеме при сбросе давления в незагазованный смежный объем // Физика горения и взрыва. — 1984. — № 1. — С. 65–69.
6. Юрманов Ю. А. Защита сооружений от действия воздушной УВ // Записки Ленинградского горного института. — 1966. — Т. 52, вып. 1. — С. 34–38.

7. Яковлев Ю. С. Гидродинамика взрыва. — Л. : Судпромгиз, 1961. — 314 с.
8. Ганушкин В. И., Морозов В. И., Никонов Б. И., Орлов Г. И. Приспособление подвалов существующих зданий под убежища. — М. : Стройиздат, 1971. — 208 с.
9. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Научно-технические проблемы горения и взрыва. — 1965. — № 2. — С. 22–34.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Vol. 475–476. — P. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475–476.1344.
11. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Тушение пламени огнетушащими порошками и аэрозольными составами // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 8. — С. 63–68.
12. Горев В. А., Пилюгин Л. П. и др. Расчет и проектирование предохранительных конструкций. Объекты гражданской обороны. Защитные сооружения : сб. научн. тр. — М. : ЦНИИПромзданий, 1991. — № 5.
13. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А. Анализ причин взрывов горючих смесей внутри производственных зданий // Научное обозрение. — 2015. — № 12. — С. 119–123.
14. Корольченко Д. А., Громовай В. Ю., Ворогушин О. О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях // Вестник МГСУ. — 2011. — № 1-2. — С. 331–335.
15. Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 12. — С. 69–74.
16. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А., Корольченко А. Я. Экономическая оценка эффективности применения предохранительных конструкций для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 6. — С. 51–57.
17. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А. Оценка степени интенсификации взрывного горения газозвдушной смеси // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 5. — С. 62–67.
18. Bradley D., Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels // Combustion and Flame. — 1976. — Vol. 26. — P. 201–217. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90072-9.
19. Crescitelli S., Russo G., Tufano V. Analysis and design of venting systems: A simplified approach // Journal of Occupational Accidents. — 1979. — Vol. 2, No. 2. — P. 125–133. DOI: 10.1016/0376-6349(79)90004-x.
20. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А., Корольченко А. Я. Определение величины и характера взрывных нагрузок при применении инерционных предохранительных конструкций // Пожаровзрывобезопасность. — 2015. — Т. 24, № 4. — С. 47–55.
21. Орлов Г. Г., Корольченко Д. А., Лямин А. В. Оптимизация требований к конструктивным и объемно-планировочным решениям при проектировании зданий и сооружений для взрывоопасных производств // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23, № 11. — С. 67–74.

Материал поступил в редакцию 10 января 2015 г.

Для цитирования: Орлов Г. Г., Корольченко А. Д. Нагрузки, разрушающие строительные конструкции в результате аварийных взрывов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 3. — С. 45–56. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.45-56.

English

LOADINGS WHICH DESTROY BUILDING STRUCTURES IN CONSEQUENCE OF EMERGENCY EXPLOSIONS

ORLOV G. G., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ICA_kbs@mgsu.ru)

KOROLCHENKO A. D., Laboratory Assistant of Test Laboratory, Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; e-mail address: ikbs@mgsu.ru)

ABSTRACT

To determine the bearing capacity limits of main structures of buildings and constructions with explosive productions it was analyzed data on destruction and damage rate of various constructive elements of buildings and constructions which took place as due to emergency explosions inside production premises so due to external explosion; it were also used results of tests of structures under the action of explosive loads. The analysis of past accidents shows that one of the most vulnerable spots of brickwork created during construction of buildings are sections at seams which cohesion is often insufficient to provide shearing resistance, breaking strength or resistance to the main tensile stresses. Advantages of large-panel industrial buildings before brick buildings, in regards to their explosion stability, are proved. Recommendations on designing of collapsible reinforced concrete structural frames of buildings with explosive productions are given. Data on bearing capacity of structures of industrial buildings obtained on the basis of materials on emergency explosions, analysis of results of researches stated in literary sources and also data on loadings causing destruction of constructions and structures of various degree and character are presented. Classification of building structures according to their damage rate is given. Data on explosive loads which cause destruction of different types of the main building structures that can be used for creation of the explosion protection system of buildings (using construction methods) with explosive productions are given. Behavior of structures in case of emergency explosions, tests and calculations of structures is defined; permissible loads on the bearing and filler structures with the purpose to obtain the initial data for recommendations on design of buildings for explosive productions is determined.

Key words: explosion stability of buildings; building structures; destroying loads; limits of bearing capacity; emergency explosions; explosive loads; explosive productions.

REFERENCES

1. Popov N. N., Rastorguev B. S. *Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsialnykh sooruzheniy* [Matters of calculation and designing of specific constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 190 p.
2. Popov N. N., Rastorguev B. S. *Raschet zhelezobetonykh konstruksiy na deystviye kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok* [Calculation of reinforced concrete structures under action of a short-term dynamic loadings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 152 p.
3. Savich P. L. *Dinamika vzryvnykh voln* [Dynamics of blast waves]. Moscow, Military and Engineering Academy of Red Army named after V. V. Kuibyshev Publ., 1941. Part 1-2, 208 p.
4. Sadovskiy M. A. *Opytnyye issledovaniya mekhanicheskogo deystviya udarnoy volny vzryva* [Empirical researches of mechanical action of air shock wave from explosion]. Moscow–Leningrad, Academy of Sciences of USSR Publ., 1945. 44 p.
5. Strelchuk N. A., Mishuev A. V., Nikitin A. G., Orakhelashvili N. V. *Gazodinamika goreniya gazovozdushnoy smesi v poluzamknutom obyeme pri sbrose davleniya v nezagazovannyi smezhnyy obyem* [Gas dynamics of the burning process of a gas-air mixture in a half-closed volume in conditions when pressure is released into adjacent not gas-laden volume]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1984, no. 1, pp. 65–69.
6. Yurmanov Yu. A. *Zashchita sooruzheniy ot deystviya vozdushnoy UV* [Protection of constructions against action of air shock wave]. *Zapiski Leningradskogo gornogo instituta — Proceedings of Leningrad Mining Institute*, 1966, vol. 52, issue 1, pp. 34–38.
7. Yakovlev Yu. S. *Gidrodinamika vzryva* [The hydrodynamics of an explosion]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1961. 314 p.
8. Ganushkin V. I., Morozov V. I., Nikonov B. I., Orlov G. I. *Prisposobleniye podvalov sushchestvuyushchikh zdaniy pod ubezshishcha* [Adaptation of cellars of the existing buildings under shelters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 208 p.
9. Kogarko S. M., Adushkin V. V., Lyamin A. G. *Issledovaniye sfericheskoy detonatsii gazovykh smesey* [Investigation of the spherical detonation of gas mixtures]. *Nauchno-tekhnicheskiye problemy goreniya i vzryva — Scientific and Technical Problems of Burning and Explosion*, 1965, no. 2, pp. 22–34.
10. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. *Fighting fires of carbon dioxide in the closed buildings*. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 475–476, pp. 1344–1350. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.475-476.1344.

11. Korolchenko D. A., Sharovarnikov A. F. Tusheniye plameni ognetushashchimi poroshkami i aerazolnymi sostavami [Extinguishing of a flame by dry chemical powders and aerosol compositions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 8, pp. 63–68.
12. Gorev V. A., Pilyugin L. P. et al. *Raschet i proyektirovaniye predokhranitelnykh konstruksiy. Obyekty grazhdanskooy oborony. Zashchitnyye sooruzheniya: sb. nauchn. tr.* [Calculation and design of safety structures. Objects of civil defense. Protective constructions. Collection of scientific papers]. Moscow, TsNIIPromzdaniy Publ., 1991, no. 5.
13. Orlov G. G., Korolchenko D. A. Analiz prichin vzryvov goryuchikh smesey vnutri proizvodstvennykh zdaniy [Analysis of the causes of inflammable mixture explosions in production buildings]. *Nauchnoye obozreniye — Science Review*, 2015, no. 12, pp. 119–123.
14. Korolchenko D. A., Gromovoy V. Yu., Vorogushin O. O. Primeneniye tonkoraspylennoy vody dlya tusheniya pozharov v vysotnykh zdaniyakh [Fire extinguishing in tall buildings by using water mist systems]. *Vestnik MGSU — Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2011, no. 1-2, pp. 331–335.
15. Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. Vliyaniye dispersnosti kapel vody na effektivnost tusheniya pozharov goryuchey zhidkosti [Impact of dispersion of water drops on the efficiency of fire extinguishing of combustible liquid]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 69–74.
16. Orlov G. G., Korolchenko D. A., Korolchenko A. Ya. Ekonomicheskaya otsenka effektivnosti primeniya predokhranitelnykh konstruksiy dlya obespecheniya vzryvoustoychivosti zdaniy i sooruzheniy [Economic efficiency of application of explosion-relief valves in order to ensure explosion stability of buildings and constructions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 6, pp. 51–57.
17. Orlov G. G., Korolchenko D. A. Otsenka stepeni intensivifikatsii vzryvnogo goreniya gazovozdushnoy smesi [Assessment of intensification degree of explosive combustion of a gas-air mixture]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 5, pp. 62–67.
18. Bradley D., Mitcheson A. Mathematical solutions for explosions in spherical vessels. *Combustion and Flame*, 1976, vol. 26, pp. 201–217. DOI: 10.1016/0010-2180(76)90072-9.
19. Crescitelli S., Russo G., Tufano V. Analysis and design of venting systems: A simplified approach. *Journal of Occupational Accidents*, 1979, vol. 2, no. 2, pp. 125–133. DOI: 10.1016/0376-6349(79)90004-x.
20. Orlov G. G., Korolchenko D. A., Korolchenko A. Ya. Opredeleniye velichiny i kharaktera vzryvnykh nagruzok pri primenenii inertsiionnykh predokhranitelnykh konstruksiy [Determination of the value and character of the explosive loads in case of using of the inertial safety constructions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 47–55.
21. Orlov G. G., Korolchenko D. A., Lyapin A. V. Optimizatsiya trebovaniy k konstruktivnym i obyemno-planirovochnym resheniyam pri proyektirovanii zdaniy i sooruzheniy dlya vzryvoopasnykh proizvodstv [Optimization of requirements to constructive and space-planning decisions when designing buildings and constructions for explosive productions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 11, pp. 67–74.

For citation: Orlov G. G., Korolchenko A. D. Nagruzki, razrushayushchiye stroitelnyye konstruksii v rezultate avariynykh vzryvov [Loadings which destroy building structures in consequence of emergency explosions]. *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 45–56. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.03.45-56.