



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет»**

129337, Россия, Москва, Ярославское ш., д. 26, тел. (495) 781-80-07



УТВЕРЖДАЮ
Проректор НИУ МГСУ

М.Е. Лейбман

2017 г.

ОТЧЕТ

о выполнении работы по теме:

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО МОНТАЖУ
ЛЕГКОСБРАСЫВАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТЕНОВЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ СЭНДВИЧ-
ПАНЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ООО «КОМПАНИЯ МЕТАЛЛ ПРОФИЛЬ»,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОПАСНЫЕ НАГРУЗКИ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВАХ

Этап 1

Разработка методического пособия для расчета необходимой площади легкобрасываемых конструкций и количества креплений, обеспечивающей безопасные нагрузки при аварийных взрывах, с учетом объемно-планировочных решений зданий, типа взрывоопасного вещества, характеристик сэндвич-панелей и избыточного давления вскрытия ЛСК.

Обоснование возможности применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл Профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций. Определение монтажных схем и количества крепления панелей.

Шифр № К.390-17 от 14.06.2017г.

Арх. № 4184 / К.390-17

Начальник НТЦ «Взрывоустойчивость»
профессор, д.т.н.

Комаров А.А.

Зав. лаб. «Газодинамики горения и взрыва»
НТЦ «Взрывоустойчивость», к.т.н.

Громов Н.В.

Москва 2017

РЕФЕРАТ

Отчет 79 с., 5 табл., 45 рис., 37 источников.

ПОМЕЩЕНИЯ КАТЕГОРИИ А И Б, ВЗРЫВ ГАЗОПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ЛСК, ТРЕХСЛОЙНЫЕ СЕНДВИЧ-ПАНЕЛИ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ НАГРУЗОК.

Целью настоящей работы является научно-техническое обоснование возможности применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл Профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

Разработано методическое пособие для расчета необходимой площади легкобрасываемых конструкций, обеспечивающей безопасные взрывные нагрузки, с учетом объемно-планировочных решений зданий, типа взрывоопасного вещества, характеристик сэндвич-панелей панелей и избыточного давления вскрытия ЛСК.

Проведена оценка возможности применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл Профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Методы расчета динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве.....	7
1.1 Поражающие факторы при внутренних дефлаграционных взрывах.....	7
1.1.1 Общая характеристика внутренних дефлаграционных взрывов.....	7
1.1.2 Уравнения, описывающие избыточное давление при внутренних дефлаграционных взрывах.....	13
1.1.3 Последствия внутренних дефлаграционных взрывов.....	20
1.1.4 Характеристики поражающих факторов при внутренних дефлаграционных взрывах.....	30
1.2 Исходные данные для определения параметров взрывной нагрузки.....	32
1.3 Общие принципы обеспечения устойчивости строительных конструкций при аварийных взрывах в зданиях, оборудованных ЛСК в виде сэндвич-панелей.....	40
2 Методическое пособие для определения динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей.....	43
2.1 Исходные данные для определения параметров взрывной нагрузки в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей.....	43
2.2 Общие положения методики определения динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей....	44
2.3 Методическое пособие по определению динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей.....	57
3 Экспертное заключение о возможности применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	77

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается использование трехслойных сэндвич-панелей в качестве легкобрасываемых предохранительных конструкций для помещений категории А и Б.

Существует ряд вопросов, которые следует решить, прежде чем использовать тот или иной тип легкобрасываемой конструкции на взрывоопасном объекте. Определяющим условием отнесения той или иной конструкции к ЛСК является обеспечение этой конструкцией своевременного вскрытия проемов требуемой площади для предотвращения роста избыточного давления взрыва в помещении свыше расчетного значения, определяемого прочностью основных несущих строительных конструкций.

В СП 56.13330.2011 «Производственные здания» согласно пункту 5.10: «В помещениях категорий А и Б по взрывопожарной и пожарной опасности следует предусматривать наружные легкобрасываемые ограждающие конструкции. В качестве легкобрасываемых конструкций следует, как правило, использовать одинарное остекление окон и фонарей. При недостаточной площади остекления допускается в качестве легкобрасываемых конструкций использовать конструкции покрытий с кровлей из стальных, алюминиевых, хризолитцементных и битумных волнистых листов, из гибкой черепицы, металлочерепицы, хризолитцементных и сланцевых плиток и эффективного негорючего утеплителя. Площадь легкобрасываемых конструкций следует определять расчетом. При отсутствии расчетных данных площадь легкобрасываемых конструкций должна составлять не менее $0,05 \text{ м}^2$ на 1 м^3 объема помещения категории А и не менее $0,03 \text{ м}^2$ - помещения категории Б».

Как мы видим, нормативные документы рекомендуют подбирать площадь легкобрасываемых конструкций исходя из объема помещения. При этом абсолютно не учитываются особенности физических процессов взрывного горения газопаровоздушных смесей. Такой подход к устройству предохранительных конструкций зачастую приводит к тому, что избыточное давление внутри

помещения (нагрузки на строительные конструкции) может превысить в 3...12 раз допустимое, что приводит к частичному или полному разрушению здания и гибели людей. Это подтверждается большим опытом экспертиз аварийных ситуаций, связанных со взрывами газопаропылевоздушных смесей (ГППВС), проводимыми НТЦ «Взрывоустойчивость» МГСУ.

Для того чтобы действительно обеспечить взрывоустойчивость зданий и сооружений, оборудованных ЛСК, необходимо учитывать реальные особенности помещений и физику взрывного горения.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования взрывного (дефлаграционного) горения ГППВС, проведенные в НТЦ «Взрывоустойчивость» показывают, что величина избыточного давления и темп его нарастания в помещении при взрыве ГППВС зависит от целого ряда факторов. Наиболее важными из них являются:

- 1) объем и форма взрывоопасного помещения;
- 2) вид горючей смеси (газо- или пылевоздушной), образующейся во взрывоопасном помещении в случае аварийной ситуации, и степень заполненности помещения ГППВС к моменту ее воспламенения;
- 3) загроможденность взрывоопасного помещения строительными конструкциями (колонны, стропильные фермы, этажерки и т.п.) и оборудованием;
- 4) общая площадь и места расположения в наружном ограждении взрывоопасного помещения проемов, перекрываемых ЛСК;
- 5) вид ЛСК (сбрасываемые или поворотные), их геометрические и физические параметры (инерционность, давление вскрытия).

Только при учете всех указанных факторов могут быть получены оптимальные решения по обеспечению взрывоустойчивости зданий и сооружений с помощью ЛСК при аварийных взрывах внутри взрывоопасных помещений (внутренний взрыв), или приняты решения о том, что применение ЛСК для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений нецелесообразно. Например, при взрыве водородовоздушной смеси, когда, как правило, не хватает площади сбросных проемов.

Игнорирование и даже недостаточно полный учет отдельных из указанных выше факторов могут приводить к весьма негативным последствиям, связанным со значительными разрушениями зданий и сооружений и гибели людей.



1 Методы расчета параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве

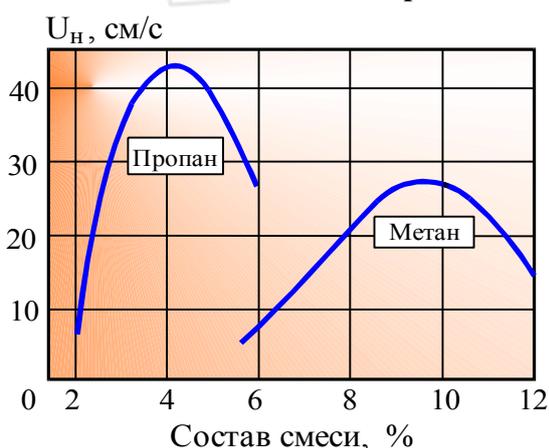
1.1 Поражающие факторы при внутренних дефлаграционных взрывах

1.1.1 Общая характеристика внутренних дефлаграционных взрывов

Аварийные взрывы внутри зданий и помещений характеризуются не детонационным, а дефлаграционным типом взрывного превращения, что накладывает определенные особенности на способы прогнозирования взрывных нагрузок и на методы уменьшения последствий аварийных взрывов.

Дефлаграционный взрыв - это быстрое горение (быстрый пожар) газовоздушной смеси, концентрация горючего в которой находится между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения, т.е. смеси, подготовленной к горению. На рисунке 1.1.1 приведены пределы воспламеняемости некоторых горючих смесей, а также зависимости скорости нормального горения от концентрации горючего в смеси [1].

Нормальная скорость горения углеводородных смесей в зависимости от объемной концентрации



Пределы воспламеняемости водорода и углеводородов

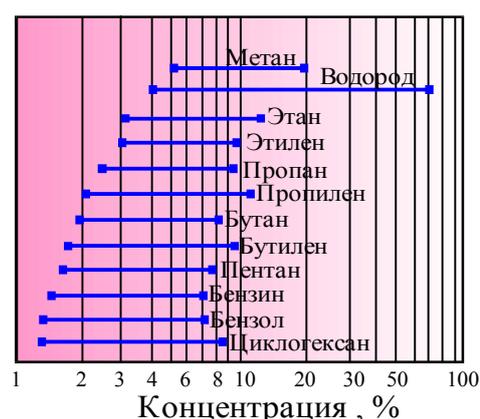


Рисунок 1.1.1- Характеристики взрывоопасности некоторых веществ в зависимости от объемной концентрации вещества в воздухе

Максимальное значение скорости нормального горения U_n наблюдается при определенном процентном содержании горючего газа в смеси. При горении

продукты взрыва расширяются в ε раз. Пламя движется со скоростью U_n относительно продуктов взрыва. Поэтому видимая скорость пламени (скорость, с которой перемещается пламя относительно неподвижного наблюдателя) представляет собой сумму скоростей расширения смеси (скорости ветра) и скорости нормального горения. В начальные моменты взрыва (влияние стен помещения на газодинамические потоки еще не велико) видимая скорость пламени составляет около $\varepsilon \cdot U_n$. Для подавляющего большинства смесей видимая скорость пламени не превышает 3 м/с . Исключение составляют водородовоздушные смеси, видимая скорость пламени у которых существенно выше и составляет около 18 м/с . [2]

При дефлаграционном типе взрывного превращения реализуется принцип квазистатичности избыточного давления, который заключается в независимости взрывной нагрузки от пространственной координаты. Это связано с малостью скорости распространения пламени по сравнению со скоростью звука. Все возмущения, возникающие на фронте пламени, распространяются со скоростью звука. Поскольку скорость распространения пламени в среде на порядок меньше скорости звука, то звуковая волна, несущая в себе возмущения, успевает многократно пробежать по несгоревшей смеси и выровнять в ней давление, плотность и температуру за время, необходимое для заметного перемещения фронта пламени по зданию или помещению.

Внутренние дефлаграционные взрывы - это взрывы газопаровоздушных смесей (ГПВС), происходящие в замкнутых и полужамкнутых объемах.

Избыточное давление при внутреннем дефлаграционном взрыве в замкнутом объеме достигает $700...900\text{ кПа}$ [3]. При взрывах внутри зданий и сооружений, избыточное давление не должно превышать значений $10...15\text{ кПа}$, что лимитируется прочностью строительных конструкций. Поэтому в зданиях и помещениях в результате разрушения ограждения или срабатывания предохранительных конструкций (ПК) замкнутый объем становится разомкнутым. Малость избыточного давления обуславливает доминирующую роль газодинамических потоков на формирование области взрывного горения, на развитие аварийного взрыва и уровни избыточного давления.

Для ограничения роста избыточного давления в помещениях при внутренних дефлаграционных взрывах используют остекленные оконные проёмы или легкобрасываемые конструкции.

При взрыве в помещении, имеющем открытые сбросные проемы, после воспламенения ГПВС, фронт пламени перемещает большую часть несгоревшей ГПВС (свежей смеси) в пространство перед фронтом пламени. Поэтому практически сразу начинается истечение не прореагировавшей смеси через открытый проём в атмосферу. При подходе пламени к сбросному проему вследствие резкого изменения плотности истекающих газов проникает волна разрежения, которая начинает турбулизовать несгоревшая смесь, что в свою очередь приводит к увеличению скорости горения и дополнительному росту давления внутри помещения.

Изменение плотности истекающих через сбросные проемы газов (истечение свежей смеси или продуктов сгорания) приводит к появлению во временной зависимости давления двух максимумов. Первый пик давления соответствует началу истечения через сбросные проемы продуктов сгорания, а второй пик соответствует максимальной площади фронта пламени при установившемся процессе истечения через сбросные проемы продуктов сгорания. Преобладание первого пика давления над вторым полностью определяется формой здания, расположением сбросных проемов (объемно-планировочным решением здания) и местом воспламенения смеси.

На рисунке 1.1.2 приведена типичная осциллограмма взрывного давления [4]. Следует отметить, что видимая скорость пламени замедляется в сторону стен без сбросных проемов и увеличивается в сторону стен со сбросными проемами. Изменение скорости пламени связано с влиянием границ (стен), на которых выполняется условие не протекания, т.е. скорость свежей смеси (ветра) на жестких стенках равна нулю.

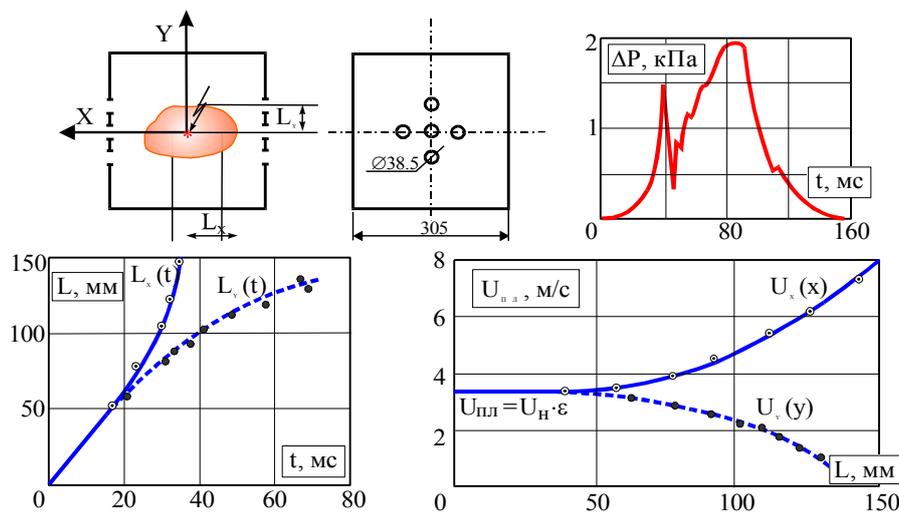


Рисунок 1.1.2 - Типичная осциллограмма взрывного давления и динамические характеристики фронта пламени для двух характерных направлений

Величина избыточного давления для любого момента времени определяется темпом роста давления, вызванного выделением продуктов сгорания на фронте пламени, и темпом снижения давления, вследствие истечения газа (свежей смеси или продуктов сгорания) через открытый проём.

Если сбросной проём остеклен, то он в процессе взрывного горения вскрывается. В этот момент возникает локальный по времени максимум давления, затем наблюдается спад, после чего давление начинает расти, пока не выгорит вся ГПВС (рисунок 1.1.2).

Величина максимального давления в зданиях с глухим остеклением зависит от давления начала разрушения остекления (рисунок 1.1.3), которое зависит от размеров единичной ячейки стекла и его толщины [4].

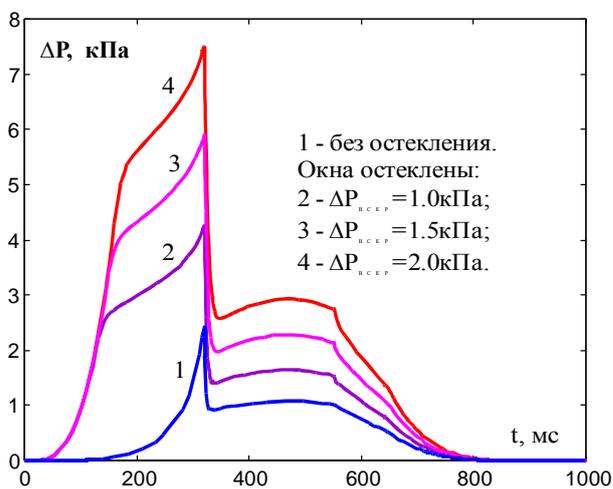


Рисунок 1.1.3 - Взрывное давление в помещении с остекленными окнами

При использовании в качестве ПК легкобрасываемых конструкций (ЛСК) величина максимального давления в основном зависит от характерных размеров помещения и инерционности ЛСК (рисунок 1.1.4).

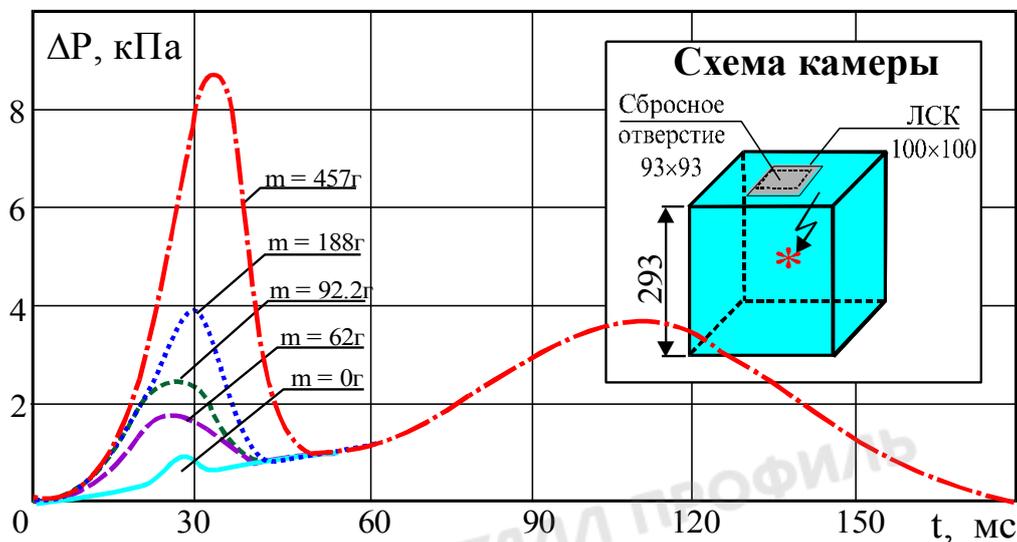


Рисунок 1.1.4 - Влияние инерционности ЛСК на уровни взрывных нагрузок

Вследствие истечения не прореагировавшей смеси через открытый или вскрывшийся проём только часть первоначально имевшейся смеси успевает прореагировать при внутреннем дефлаграционном взрыве. Остальная часть смеси выбрасывается через проём в атмосферу. Поэтому при частичной загазованности помещения (свыше 15-20%) взрывные нагрузки близки к нагрузкам, которые реализуются в полностью загазованных помещениях [5].

Большую опасность представляет случай, когда загазованное помещение соединяется через проём с другим даже незагазованным помещением [6]. В этом случае происходит двухстадийный взрыв. Максимальное давление в смежных помещениях может быть в несколько раз больше, чем при взрыве в одном изолированном помещении с проёмами наружу (рисунок 1.1.5).

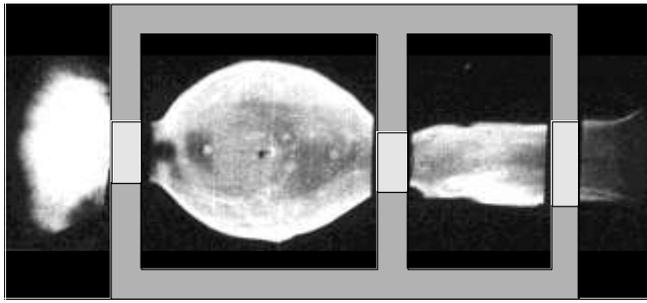


Рисунок 1.1.5 - Фотография взрыва пропановоздушной смеси в смежных камерах

На динамические характеристики внутреннего дефлаграционного взрыва большое влияние оказывает турбулизация свежей смеси, приводящая к увеличению нормальной скорости горения и резкому увеличению видимой скорости пламени. Интенсификация процесса горения при расчетах обычно учитывается введением коэффициента интенсификации α .

Интенсификация процесса горения при взаимодействии пламени с различного рода препятствиями иллюстрирует (рисунок 1.1.6) [4].

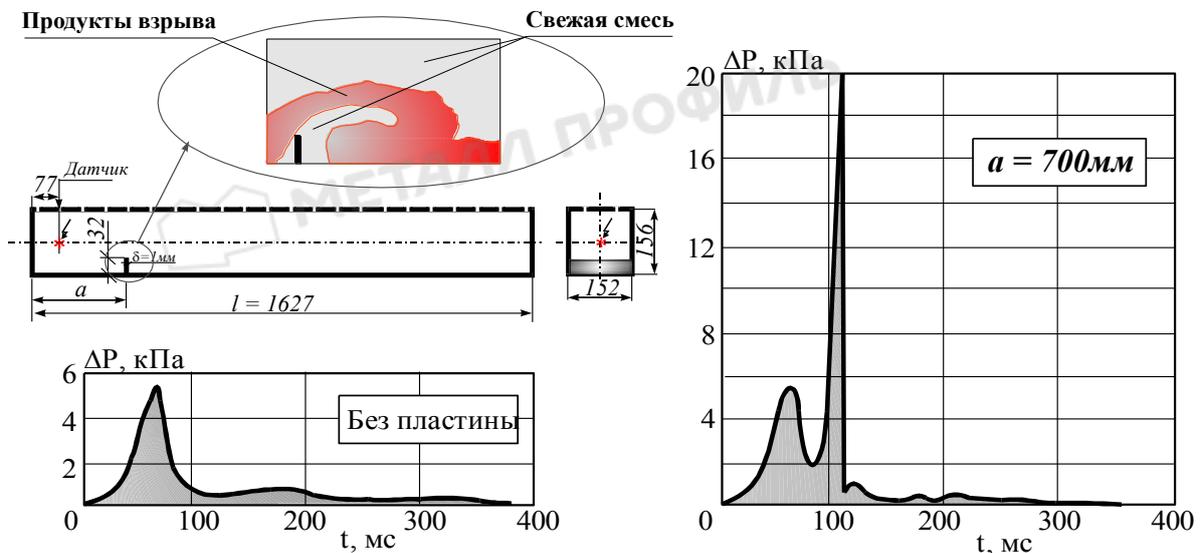


Рисунок 1.1.6 - Влияние препятствий, расположенных на пути пламени, на взрывные нагрузки

Происходит резкое увеличение притока продуктов взрыва, т.к. увеличивается не только общая площадь горения, но и происходит существенная турбулизация смеси в следе за телом. Следствием значительного увеличения притока продуктов взрыва является рост взрывного давления.

1.1.2 Уравнения, описывающие избыточное давление при внутренних дефлаграционных взрывах

При математическом описании процесса взрывного горения в промышленных и гражданских зданиях необходимо исходить из того, что допустимые уровни взрывных нагрузок внутри зданий не должны превышать $\Delta P_{дон} = 10-15 \text{ кПа}$ [4]. При давлениях, больших $\Delta P_{дон}$, основные строительные конструкции большинства зданий разрушаются.

Невысокие уровни избыточного давления позволяют внести в математическую модель ряд упрощений. Во-первых, можно считать, что скорость нормального горения, степень расширения продуктов сгорания и плотность свежей смеси являются величинами постоянными. Во-вторых, использовать принцип квазистатичности избыточного давления, когда давление является функцией только координат и не зависит от времени, т.е. время выравнивания давления существенно превышает время изменения параметров системы.

Динамика изменения давления (нагрузок) в этом случае может быть описана соотношением [4]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \cdot S(t) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot U_n - \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_j}} \cdot S_{np} \cdot f(t, \Delta P)}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}} \cdot P(t) \quad (1.1.1)$$

$P(t)$ - текущее значение давления; ΔP - избыточное давление; $S(t)$ - текущее значение площади поверхности фронта пламени; S_{np} - суммарная площадь сбросных проемов; ρ_i - плотность холодной газовой смеси (ρ_1) или продуктов сгорания (ρ_2); ε - степень расширения смеси при сгорании, $\varepsilon = \rho_1 / \rho_2$; γ_i - показатель адиабаты свежей смеси (γ_1) или продуктов взрыва (γ_2); U_n - нормальная скорость распространения пламени; V_j - текущий объем свежей смеси (V_1) или продуктов взрыва (V_2); $f(t, \Delta P)$ - функциональная зависимость вскрытия предохранительных конструкций (стекло в оконных проемах, ЛСК и т.д.); α - коэффициент

интенсификации процесса горения; μ - коэффициент расхода, истекающих через сбросной проем газов.

Из (1.1.1) следует, что параметры, от которых зависит темп нарастания давления (кроме параметров, характеризующих горючую смесь U_n и ε) являются: площадь фронта пламени, объем помещения, плотность истекающих через сбросные проемы газов и площадь сбросных проемов.

Из формулы (1.1.1) в предположении, что все продукты сгорания мгновенно сбрасываются в атмосферу, т.е. $\frac{dP}{dt} = 0$, и при условии, что на сбросных проемах отсутствуют предохранительные конструкции, следует упрощенное соотношение для определения текущего значения давления [6]:

$$\Delta P(t) \approx 0,5 \cdot \rho_j \cdot U_n^2 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{\mu}\right)^2 \cdot \left(\frac{S(t)}{S_{np}}\right)^2, \quad (1.1.2)$$

где $S(t)$ - текущее значение площади поверхности фронта пламени.

Для определения максимальных взрывных нагрузок в формулах (1.1.1), (1.1.2) необходимо использовать значения параметров U_n и ε , которые соответствуют стехиометрической концентрации ГВС, т.к. при взрывном горении ГВС стехиометрического состава происходит выделение энергии с максимальной скоростью.

Количественное определение влияния параметров предохранительных конструкций (ПК) на уровни взрывных нагрузок проводится по различным методикам в зависимости от того, используется в качестве ПК «глухое» остекление или легкосбрасываемые конструкции (ЛСК) [4,5,7].

Одной из основных задач, возникающих при обеспечении взрывоустойчивости зданий, является задача определения необходимой площади сбросных проемов и выбор параметров предохранительных конструкций, которыми оборудованы сбросные проемы. Параметры предохранительных конструкций оказывают решающее влияние на величину взрывного давления в зданиях и помещениях. Задача выбора параметров ПК должна решаться с учетом допускаемой в здании (помещении) величины максимального избыточного давления.

Для определения динамики взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, необходимо решить следующее обыкновенное дифференциальное уравнение [4]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \cdot S(t) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot U_n - \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_j}} \cdot S_{\text{ПП}} \cdot f(t)}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}} \cdot P(t), \quad (1.1.3)$$

где $f(t) = \frac{S^{\text{OCB}}_{\text{ПП}}(t)}{S_{\text{ПП}}}$ - функциональная зависимость степени освобождения сбросных проемов от предохранительных конструкций; $S^{\text{OCB}}_{\text{ПП}}(t)$ - текущее значение площади проемов, свободных от предохранительных конструкций.

Для помещений, оборудованных ЛСК, функциональная зависимость степени освобождения сбросных проемов от ЛСК определяется как [5]:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } \Delta P < \Delta P_{\text{ВСКР}}; \\ \frac{x(t) \cdot \Pi_{\text{ЛСК}}}{S_{\text{ПП}}}, & \text{при } x(t) < \frac{S_{\text{нр}}}{\Pi_{\text{ЛСК}}}; \\ 1, & \text{при } x(t) > \frac{S_{\text{нр}}}{\Pi_{\text{ЛСК}}}. \end{cases} \quad (1.1.4)$$

где $S_{\text{ПП}}$ - площадь единичного проема, $\Pi_{\text{ЛСК}}$ - периметр единичной ЛСК, $x(t)$ - смещение ЛСК, $\Delta P_{\text{ВСКР}}$ - избыточное давление, при котором происходит скрывание легкобрасываемых конструкций.

Из (1.1.4) следует, что для определения $f(t)$ необходимо знать функциональную зависимость смещения ЛСК от времени - $x(t)$. Для ее определения уравнение (1.1.3) нужно дополнить системой из двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = V(t), \\ \frac{dV(t)}{dt} = \frac{g \cdot (\Delta P - K \cdot \Delta P_{\text{ИНЕР}})}{\Delta P_{\text{ИНЕР}}}, \end{cases} \quad (1.1.5)$$

где $V(t)$ - скорость перемещения ЛСК; $\Delta P_{\text{ИНЕР}} = \frac{m \cdot g}{S_{\text{ПП}}}$ - параметр, характеризующий инерционность легкобрасываемых конструкций; K - параметр, характеризующий место расположения ЛСК ($K=1$ - при расположении ЛСК на крыше здания, $K=0$ -

при расположении ЛСК в стенах здания); g - ускорение свободного падения; m - масса единичной легкобрасываемой конструкции.

Систему из трех уравнений (1.1.3) и (1.1.4) необходимо решать при нулевых начальных условиях.

В результате решения данной системы получим искомое избыточное давление в помещении, оборудованном ЛСК.

Анализ системы уравнений, записанных в безразмерном виде, показывает, что основным параметром, определяющим пик давления, вызванного ЛСК, является

параметр $G_{ЛСК} = G \cdot B^2$ ($G = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot h}{2} \cdot \frac{1}{\Delta P_{ИНЕР}}$, $B = \sqrt{\frac{P_{атм}}{\rho_1 \cdot (\varepsilon \cdot U_n)^2}}$), который представляет собой

безразмерное ускорение, с которым перемещается ЛСК под действием сил давления, возникающих при взрыве определенного типа смеси, характеризующейся безразмерным параметром B .

Физический смысл параметра G заключается в том, что с увеличением линейных размеров здания темп нарастания взрывного давления в здании уменьшается, т.к. увеличивается общее время процесса взрыва. Следовательно, пропорционально размерам здания увеличивается и импульс силы давления, что в свою очередь приводит к увеличению импульса, передаваемого силами давления ЛСК. С другой стороны, увеличение инерционности ЛСК приводит к уменьшению (для данного импульса силы) скорости перемещения ЛСК. Поэтому с увеличением размеров здания (помещения) безразмерное ускорение увеличивается, а при увеличении инерционности ЛСК - уменьшается.

Безразмерный параметр $B = \sqrt{\frac{P_{атм}}{\rho_1 \cdot (\varepsilon \cdot U_n)^2}}$ характеризует тип и качество горючей смеси. Физический смысл параметра B заключается в том, что с увеличением видимой скорости пламени темп выделения продуктов сгорания увеличивается, что в безразмерной терминологии сказывается на эффективности сброса смеси в атмосферу через сбросные проемы - их производительность уменьшается, т.к. уменьшается параметр B .

Для подтверждения корректности описанной вычислительной схемы были проведены экспериментальные исследования [5]. Эксперименты проводились в кубическом объеме (рисунок 1.1.7) и в объеме вытянутой формы. В качестве горючей смеси использовалась пропановоздушная смесь около стехиометрического состава (4.5% пропана + 95.5% воздуха). Размеры пластин, имитирующих ЛСК, составляли: для кубической камеры - 100x100мм, для вытянутой камеры - 35x35мм (диаметр пяти отверстий был равен 28мм). Результаты экспериментальных исследований в кубической камере приведены на рисунке 1.1.7. Из рисунка следует, что с увеличением инерционности ЛСК, т.е. с уменьшением параметра G , уровень взрывных нагрузок увеличивается.

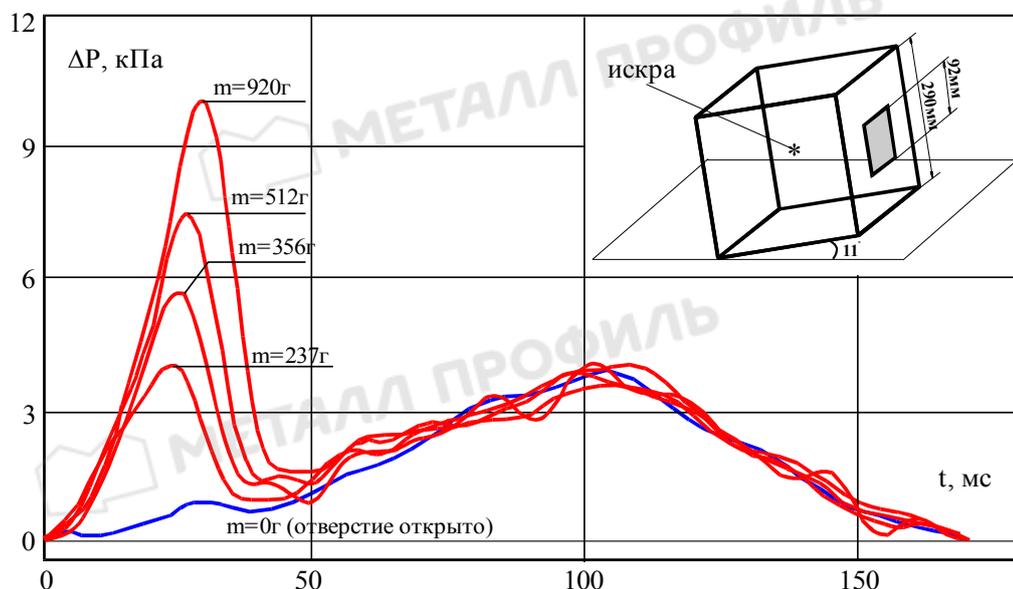


Рисунок 1.1.7 - Экспериментальные осциллограммы взрывного давления в камерах, моделирующих помещения с легкобрасываемыми конструкциями (ЛСК)

Полученное удовлетворительное согласие между результатами расчета и эксперимента позволяет говорить о применимости расчетной схемы для прогнозирования взрывных нагрузок на реальных объектах, где в качестве предохранительных конструкций используются ЛСК (рисунок 1.1.8).

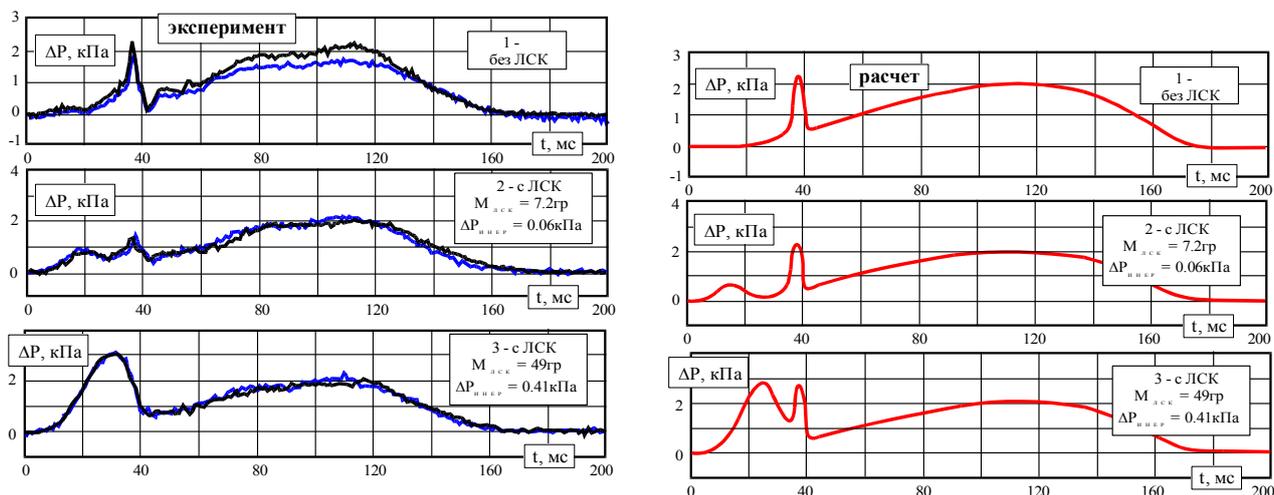


Рисунок 1.1.8 - Сравнение экспериментальных и расчетных осциллограмм давления при взрыве пропановоздушной смеси в кубической камере ($h = 305\text{мм}$).
1 – открытые проемы; 2,3 - проемы закрыты пластинами, моделирующими ЛСК

Рисунок 1.1.9 иллюстрирует влияние ЛСК на динамику взрывных нагрузок в двух геометрически подобных зданиях [8].

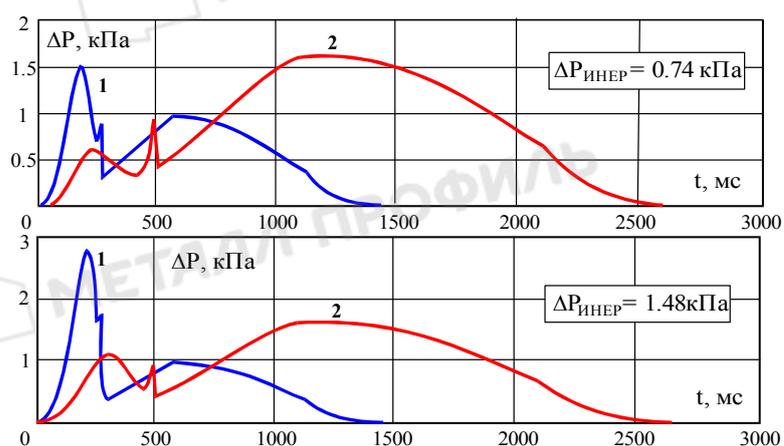


Рисунок 1.1.9 - Влияние легкосбрасываемых конструкций на уровни взрывных нагрузок.
1 - в помещении ГРП; 2 - в помещении НКО

Первое здание имеет высоту $h=3\text{м}$, ширину $b=4.5\text{м}$, длину $L=6\text{м}$ и оборудовано двумя сбросными проемами с суммарной площадью $S_{np}=4.5\text{м}^2$, что соответствует типовому зданию газораспределительного пункта (ГРП). Второе - высоту $h=6\text{м}$, ширину $b=9\text{м}$ и длину $L=12\text{м}$ с двумя сбросными проемами площадью $S_{np}=18\text{м}^2$, что соответствует типовому зданию компрессорного отделения (НКО). При проведении расчетов было принято, что сбросные проемы в рассматриваемых зданиях оборудованы ЛСК с удельной массой - $75\text{кг}/\text{м}^2$ и $150\text{кг}/\text{м}^2$ (соответственно $\Delta P_{ИНЕР}=0.74\text{кПа}$ и $\Delta P_{ИНЕР}=1.48\text{кПа}$). Размер единичной карты ЛСК

был принят $S_{ППР}=1.125м^2$. Было принято, что ЛСК установлены в стенах зданий, а давление вскрытия ЛСК - $\Delta P_{ВСКР}=0кПа$. Из рисунка 1.1.9 следует, что эффективность ЛСК уменьшается по мере уменьшения габаритов здания. В частности, для первого здания максимальные уровни взрывных нагрузок будут определяться параметрами ЛСК, а для второго здания - общей площадью сбросных проемов, т.к. влияние ЛСК на динамику взрывной нагрузки во втором здании будет незначительным.

В помещениях, оборудованных ЛСК, появляется дополнительный пик давления, вызванный инерционностью ЛСК [6]. Временной характер нагрузки, действующей на конструктивные элементы первого здания, принципиально отличается от характера нагрузки, действующей на конструктивные элементы второго здания. В первом случае максимальная нагрузка приходится на временной интервал - 250мс (время вскрытия ЛСК), а во втором случае растягивается в 10 раз, т.е. временной интервал воздействия нагрузки составляет -2500мс (полное время процесса взрывного горения). Данное обстоятельство играет решающую роль при определении коэффициента динамичности нагрузки.

Для определения динамики взрывного давления в помещении, оборудованном ПК с глухим остеклением, необходимо решить следующее обыкновенное дифференциальное уравнение [9]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \cdot S(t) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot U_n - \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_j}} \cdot S_{np} \cdot \Phi\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{вскр}}\right)}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}} \cdot P(t), \quad (1.1.6)$$

где $\Phi\left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{вскр}}\right)$ - коэффициент вскрытия (освобождения) оконного проема от стекла, характеризуемый отношением площади образовавшегося в застекленном проеме отверстия к площади не застекленного проема, который зависит от величины избыточного давления в здании ΔP и от избыточного давления, при котором происходит начальное разрушение стекол $\Delta P_{вскр}$.

Рисунок 1.1.10 иллюстрирует влияние характера остекления на динамические параметры взрывной нагрузки [10].

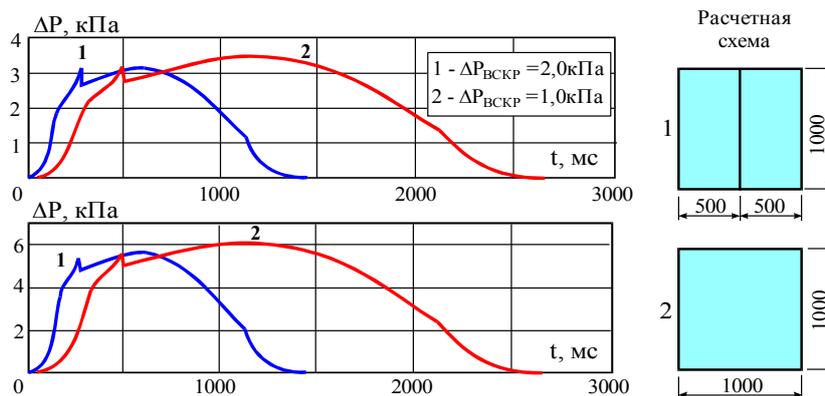


Рисунок 1.1.10 - Влияние характера остекления на динамику взрывной нагрузки.
1 - в помещении ГРП; 2 - в помещении НКО

Расчеты выполнены для зданий ГРП и НКО с геометрическими параметрами, принятыми ранее. Рассматривалось два варианта остекления: размер единичной ячейки остекления - $0,5\text{ м}^2$ и размер единичной ячейки остекления - $1,0\text{ м}^2$ (стекло 3мм, одинарное). Давление вскрытия остекления первого типа примерно составляет 2кПа, а второго типа - 1кПа. Из рисунка следует, что габариты здания при использовании глухого остекления мало влияют на уровни взрывных нагрузок, что связано с экспоненциальным характером зависимости коэффициента вскрытия (освобождения) оконного проема от стекла. Решающее значение оказывает давление начала разрушения остекления или размеры единичной ячейки остекления.

1.1.3 Последствия внутренних дефлаграционных взрывов

Рассмотрим последствия внутренних дефлаграционных взрывов. Наиболее показательны в этом плане аварийные взрывы в жилых домах.

Основной причиной возникновения взрывоопасной ситуации в жилых домах является утечка газа. При этом утечки газа можно подразделить на три группы: утечка через не зажженную конфорку; обрыв (частичный или полный) подводящего к стояку шланга или отрыв газовой плиты от стояка; коррозионный износ газовых коммуникаций или неплотность в системе газоснабжения [11].

Необходимо напомнить, что рабочее давление в газовой системе составляет около 100 мм.вод.ст. [12]. При аварийной ситуации первой группы приток метана в помещение определяется расходом газа через не зажженные конфорки. Для одной конфорки расход газа составляет около $q_K=0.1\text{м}^3/\text{час}$. При неплотности в системе газоснабжения расход составляет около $q=0.19\text{м}^3/\text{час}\cdot S(\text{мм}^2)$, где S – площадь неплотности в мм^2 .

Учитывая, что для взрыва газозвушной смеси концентрация горючей компоненты в ней должна находится между нижним и верхним концентрационными пределами, при анализе причин и последствий аварийных взрывов в жилых домах необходимо рассмотреть вопрос формирования взрывоопасного облака.

Метановоздушная смесь способна взрываться при объемном содержании в ней метана от 5 до 15%, т.е. пределы воспламеняемости метана составляют $C\approx 5-15\%$. При этом скорость горения метановоздушной смеси, определяющая темп выделения продуктов взрыва и, соответственно, уровни взрывных нагрузок, является функцией концентрации (рисунок 1.1.11) и имеет максимум при $C\approx 10\%$ [13].

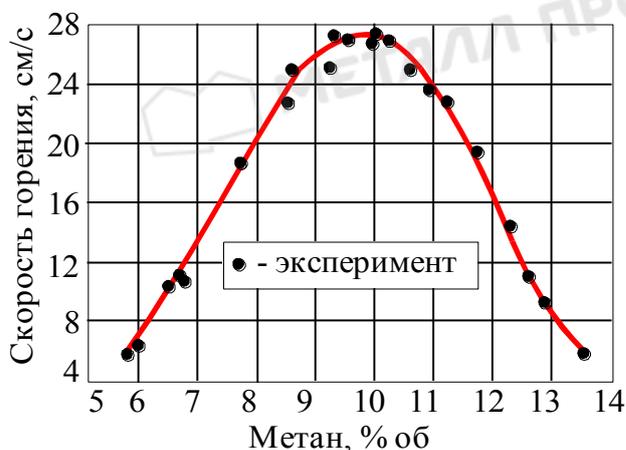


Рисунок 1.1.11 - Скорость горения метановоздушной смеси в зависимости от концентрации

Распределение концентрации вещества по объему и его изменение во времени описывается уравнением диффузии [14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{Q}{V} - \text{div}(\vec{v} \cdot C), \quad (1.1.8)$$

где C - объемная концентрация вещества в смеси; D – коэффициент диффузии для различных направлений; $Q/V=(q-L_{вент}\cdot C)/V$ – удельный объемный расход вещества; q

– объемный расход метана через аварийное отверстие; $L_{вент}$ – вентиляционный расход; v – скорость воздушного потока в помещении; x, y, z – пространственные координаты; t – время; V – объем.

Уравнение (1.1.8) решается при нулевых начальных условиях и следующих граничных условиях: $C=0$ – на свободной границе; $\frac{\partial C}{\partial n}=0$ – на жесткой границе. Скорость воздуха в помещении должна быть определена заранее, исходя из условий связи помещения с внешней средой.

Анализ уравнения (1.1.8), записанного в безразмерном виде, показывает, что характер его решения зависит от соотношения между $\frac{Q}{V_{ист}}$ и $\frac{D}{L^2}$, где $V_{ист}$ – характерный размер источника вещества; L – характерный линейный размер помещения, или от безразмерного параметра $\frac{Q \cdot L^2}{V_{ист} \cdot D}$.

При относительно больших расходах или малых значениях коэффициента диффузии $\left(\frac{Q \cdot L^2}{V_{ист} \cdot D} \gg 1\right)$ концентрация вещества в помещении значительно зависит от пространственной координаты, а в решении уравнения (1.1.8) присутствует явно выраженный максимум, расположенный у источника. При малых расходах вещества $\left(\frac{Q \cdot L^2}{V_{ист} \cdot D} \ll 1\right)$ концентрация вещества в помещении практически не зависит от пространственной координаты.

На рисунке 1.1.12 приведено распределение метана по пространству типовой кухни с минимальными габаритами – 2.4 x 2.1 м (площадь – 5 м², объем – 12.6 м³).

В расчетах принят минимальный коэффициент диффузии $D=0.0005 \text{ м}^2/\text{с}$. Принято, что дверь на кухню закрыта и отсутствует вентиляция $L_{вент}=0 \text{ м}^3/\text{час}$, т.е. нет связи с внешней средой. Расход газа – $q=0.4 \text{ м}^3/\text{час}$ соответствует производительности четырех газовых конфорок.

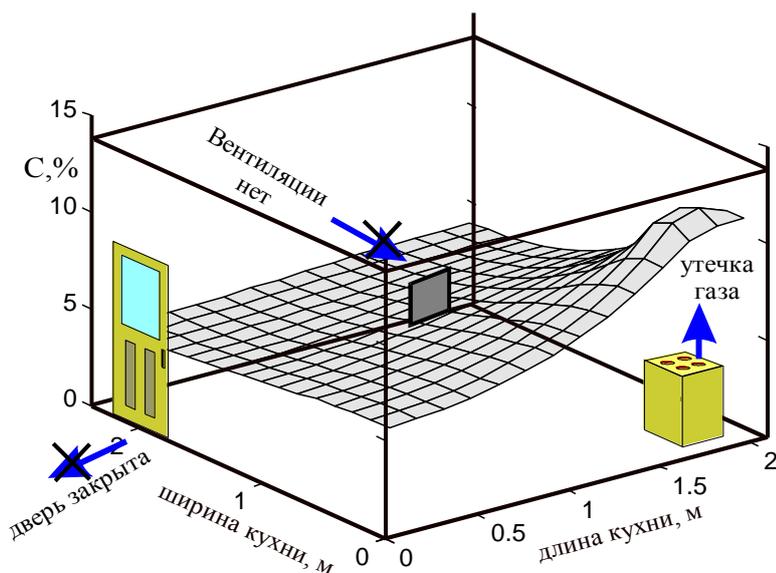


Рисунок 1.1.12 - Распределение концентрации метана $C\%$ по помещению кухни через 2 часа после начала утечки. Вентиляция отсутствует. Дверь на кухню закрыта

При равномерном распределении концентрации метана по пространству помещения (малых утечках газа или больших значениях коэффициента диффузии) изменение концентрации во времени описывается однозонной моделью.

В однозонной модели помещение заменяется одной расчетной ячейкой, имеющей однородные свойства (температура, концентрация, плотность и т.д.) по всем координатам. При этом изменение концентрации в помещении определяется из условий связи данного помещения с другими помещениями и с атмосферой.

Исходя из этих предпосылок, можно записать уравнение изменения концентрации в помещении от времени:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{100 \cdot q}{V} - \frac{L_{\text{вент}} \cdot C}{V} - \frac{D \cdot S_{\text{пр}} \cdot C}{V \cdot L_{\text{пр}}}, \quad (1.1.9)$$

где C - объемная концентрация метана, %; q - расход метана; $L_{\text{вент}}$ - вентиляционный расход; D - коэффициент диффузии; $S_{\text{пр}}$ - площадь открытого проема (двери и т.д.), $L_{\text{пр}}$ - характерное расстояние от источника утечки до открытого проема; V - объем помещения.

Из приведенных выше соотношений следует, что на формирование взрывоопасных облаков значительное влияние оказывает вентиляция помещения.

Рассмотрим количественное влияние вентиляции на процесс формирования газоздушного облака в помещении.

Известно, что вентиляционный расход зависит от времени суток. Так, около 6-7 часов утра вентиляционный расход минимален [13]. Вентиляция может в это время суток отсутствовать или быть отрицательной (например, в период межсезонья, когда центральное отопление выключено). Далее происходит увеличение вентиляционного расхода. Максимальный расход наблюдается в 18-19 часов, после чего начинает снижаться и т.д., т.е. наблюдается циклическое изменение вентиляционного расхода в течение суток. Этот процесс оказывает значительное влияние на образование взрывоопасной смеси при малых значениях аварийного притока газа в помещение.

Рассмотрим возможность формирования взрывоопасной смеси при минимальной вентиляции (исследования показывают, что минимальный вентиляционный расход в жилом помещении составляет около $L_{вент}=5\text{м}^3/\text{час}$) и при равномерном распределении концентрации по пространству.

На рисунке 1.1.13 приведено изменение концентрации во времени для нескольких значений аварийного расхода метана в помещении кухни [4]. Величина расхода $q=0.1\text{м}^3/\text{час}$ соответствует производительности одной конфорки типовой газовой плиты.

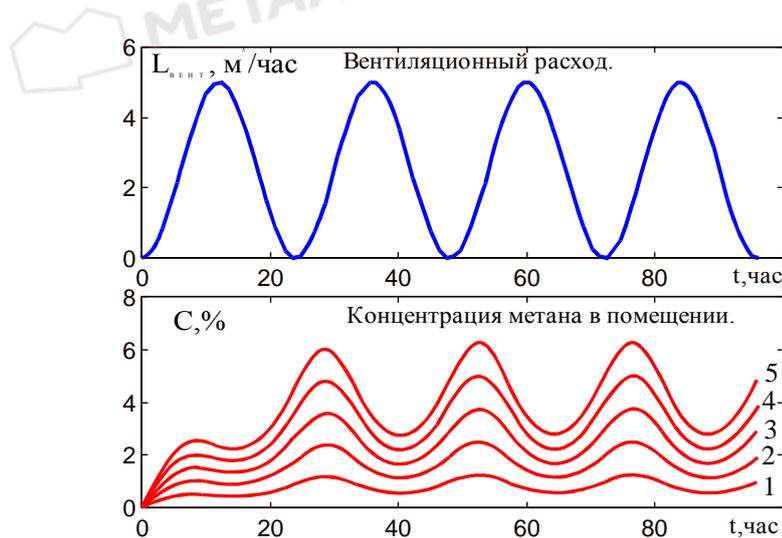


Рисунок 1.1.13 - Зависимость от времени концентрации метана в помещении кухни при минимальной вентиляции и различных расходах метана. Дверь на кухне закрыта.
Расход метана: 1 - 0.02; 2 - 0.04; 3 - 0.06; 4 - 0.08; 5 - 0.1 м³/час

Видно, что взрывоопасная концентрации на кухне может реализоваться при одной не зажженной газовой конфорке. При этом время формирования взрывоопасного облака достаточно велико и составляет, в зависимости от времени начала утечки, от 10 до 25 часов. При аварийном расходе метана $q < 0.02 \text{ м}^3/\text{час}$ формирование взрывоопасной смеси в жилом помещении гарантированно исключено. Во-первых, это связано с тем, что при расходе метана $q < 0.02 \text{ м}^3/\text{час}$ распределение концентрации по помещению во всех случаях носит равномерный характер. Во-вторых, при самом минимальном вентиляционном расходе в жилом помещении столь малые утечки могут обеспечить концентрацию смеси не более 1%, что в пять раз ниже предела взрываемости.

Наличие постоянной (даже незначительной) вентиляции существенно повышает уровень взрывобезопасности, т.к. резко снижает способность формирования взрывоопасных облаков в жилых помещениях.

Ввиду того, что газопаровоздушные смеси способны к горению только при определенной концентрации горючей компоненты в воздухе, аварийные взрывы в жилых зданиях часто носят многостадийный характер. Кроме этого, учитывая, что скорость распространения пламени в газовой смеси существенно зависит от концентрации, взрывные хлопки могут следовать один за другим, т.е. разнесены во времени на несколько секунд. Поэтому свидетели аварий могут слышать один или несколько хлопков. Исключения составляют аварийные взрывы, связанные с разрушением баллонов в условиях пожара. В этом случае время, необходимое на разогрев и разрыв баллона, составляет десятки минут [12].

Примером многостадийного взрыва газовой смеси может служить авария, произошедшая в жилом доме №15а по ул. Руставели (г. Москва) [15]. Результаты обследования места аварии, а также показания соседей свидетельствуют, что аварийный взрыв в квартире №24 был двухстадийным. Утечка газа, в результате которой образовалась смесь взрывоопасной концентрации, произошла на кухне. После ее воспламенения началось взрывное горение метановоздушной смеси на кухне. Избыточное давление на первом этапе развития аварии достигло уровня 2.0-2.5кПа. Были разбиты стекла на кухне, а соседи услышали первый взрыв-«хлопок».

Газовая смесь начала выдавливаться в атмосферу через окно и в соседние комнаты через дверные проемы. Когда пламя достигло окна кухни, наблюдалась вспышка пламени. Смесь, выдавливаемая в комнаты, турбулизировалась. При подходе пламени к жилой комнате, реализовалась вторая стадия взрыва. Максимальное взрывное давление достигло 5-7кПа, следствием чего явилось обрушение межквартирной перегородки. Характер разрушений свидетельствует о значительной интенсификации процесса взрывного горения.

Типичный пример значительных разрушений в жилых комнатах, которые в момент взрыва были даже не загазованными, приведен на рисунке 1.1.14 (аварийный взрыв в г. Архангельске, 1997г.) [16].



Рисунок 1.1.14 - Последствия аварийного взрыва
аварийного взрыва
(г. Архангельск, 1997г.)



Рисунок 1.1.15 - Обрушение жилого кирпичного дома
в результате аварийного взрыва
(г. Бийск, 2000г.)

Причиной формирования взрывоопасного облака послужила утечка пропана на кухне двухкомнатной квартиры (5-ый этаж). Там же от реле холодильника произошло и воспламенение смеси. Из рисунка видно, что наибольшим разрушениям подверглись жилые комнаты, сообщающиеся с кухней.

Аварийная ситуация, связанная с взрывным горением газозвушной смеси в жилой квартире, произошла в г. Бийск (2000г.). В кирпичном доме произошел аварийный взрыв газозвушной смеси. В результате взрыва произошло обрушение

части дома (от первого этажа до третьего), имелись человеческие жертвы, нанесен значительный материальный ущерб (рисунок 1.1.15) [16].

Обрушение кирпичных зданий в результате взрывных аварий достаточно распространенное явление в силу того, что кирпичная кладка, обладая высокой несущей способностью в вертикальном (эксплуатационном) направлении, практически не сопротивляется горизонтальным (взрывным) нагрузкам. Кроме этого, кирпичные стены, как правило, являются несущими конструкциями и при их прогибе (под действием взрывных нагрузок) происходит потеря их устойчивости, что приводит к обрушению всей конструкции. В качестве примера разрушения кирпичных зданий при аварийных взрывах на рисунке 1.1.16 приведены последствия взрыва в мастерских завода «Серп и молот» [17].

К особенностям дефлаграционных взрывов внутри помещений следует отнести формирование мощных воздушных потоков в межквартирных и межкомнатных проходах, коридорах и т.д. Именно эти потоки (а не ударные волны, как это часто трактуется, особенно в прессе) приводят к выбросу фрагментов строительных конструкций и предметов из аварийной квартиры. На рисунке 1.1.17 приведена фотография остаточного прогиба оконной решетки после взрыва в квартире [18].



Рисунок 1.1.16 - Последствия аварийного взрыва на заводе «Серп и молот»



Рисунок 1.1.17 - Остаточный прогиб оконной решетки после взрыва в квартире

Данное повреждение конструкции мог нанести только скоростной напор струи, истекающей из квартиры. При этом следует иметь в виду, что разрушение конструкций происходит под действием избыточного давления, а последующий их выброс происходит под действием скоростного напора.

Резюмируя сказанное, можно констатировать, что для реализации значительных разрушений жилых зданий вполне достаточно иметь незначительный объем газа во взрывоопасном состоянии. При этом уровни взрывных нагрузок существенно зависят от множества факторов: объемно-планировочного решения помещения, сценария протекания аварийного взрыва, характера остекления окон всей квартиры, состояния дверей в момент взрыва (открыты или закрыты межкомнатные двери), места инициирования смеси и т.д. Поэтому при рассмотрении последствий аварийных взрывов достаточно типичным является реализация значительных взрывных нагрузок и последующее разрушение здания при незначительном изменении сценария протекания аварии. Например, если в момент начального взрыва на кухне дверь в коридор квартиры закрыта, то реализуется «хлопок» и последующий незначительный пожар на кухне. Это связано с тем, что переобогащенная смесь при первом «хлопке» будет выдавлена в атмосферу через разрушенное остекление. Если же дверь на кухне в момент первого «хлопка» открыта, то смесь через дверной проем устремляется в соседние комнаты, турбулизируется и обогащается кислородом. В результате формируется хорошо подготовленное к горению взрывоопасное облако, которое через незначительный промежуток времени (через 10-15 секунд) взрывается, что приводит к вторичному взрыву, который причиняет основные разрушения зданию. Описанные сценарии достаточно типичны при аварийных взрывах. Отличие их протекания заключается только в закрытой или открытой кухонной двери, а уровни взрывных нагрузок отличаются в 10-15 раз. Таким образом, двухстадийный аварийный дефлаграционный взрыв в жилых помещениях явление достаточно типичное и обрушение строительных конструкций зданий в результате незначительных по объему утечек горючих веществ в помещения тоже достаточно распространенное явление.

Кроме этого необходимо иметь в виду, что вероятность взрыва значительно возрастает при ухудшении качества вентиляции. На это указывает статистика взрывов, количество которых резко увеличивается в периоды межсезонья, когда отключается (или еще не включено) отопление. В эти периоды температура в

квартирах близка к температуре окружающей среды (окна в квартирах при этом закрыты), поэтому качество естественной вентиляции достаточно плохое (вентиляция «опрокидывается»). Следствием этого является формирование взрывоопасной смеси даже при незначительной утечке газа. Поэтому профилактика вентиляционной системы жилых зданий является и профилактикой взрывобезопасности.

Необходимо отметить, что применяющиеся в последнее время при ремонтах квартир стеклопакеты оборудуются стеклами, которые достаточно прочны и начинают разрушаться только при значительных избыточных давлениях (около 4-6 кПа или 400-600кГ/м² в зависимости от размеров стекла). При аварийных взрывах окна, оборудованные таким остеклением, не выполняют роль сбросных проемов, что приводит к резкому повышению взрывного давления [19].

Следовательно, использование стеклопакетов в помещениях, где возможна загазованность, представляет значительную опасность с точки зрения взрывоустойчивости.

Фотографии типичных значительных разрушений жилых домов, вызванных дефлаграционными взрывами, приведены на рисунке 1.1.18.



Рисунок 1.1.18 - Примеры типичных разрушений жилых домов, вызванных аварийными взрывами

1.1.4 Характеристики поражающих факторов при внутренних дефлаграционных взрывах

Аварийные взрывы внутри зданий и помещений характеризуются не детонационным, а дефлаграционным типом взрывного превращения, при котором соблюдается принцип квазистатичности избыточного давления. Это связано с малостью скорости распространения пламени по сравнению со скоростью звука. Поэтому взрывная нагрузка, действующая на ограждающие помещение поверхности (стены, пол, потолочные перекрытия и т.д.) не зависит от пространственной координаты [4].

Для реализации дефлаграционного взрыва необходимо, чтобы концентрация горючего в газозудушной смеси находилась между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения, т.е. смесь была готова к горению. Поэтому наличие постоянной (даже незначительной) вентиляции существенно повышает уровень взрывобезопасности, т.к. резко снижает способность формирования взрывоопасных облаков в помещениях.

При внутренних дефлаграционных взрывах в замкнутых объемах избыточное давление достигает значений $700-900 \text{ кПа}$, которые не способны выдержать никакие строительные конструкции. Допустимая несущая способность конструкций на два порядка меньше и составляет $5-15 \text{ кПа}$ [20].

Для ограничения роста избыточного давления в помещениях при внутренних дефлаграционных взрывах, используют остекленные оконные проемы необходимой площади или легкобрасываемые конструкции (ЛСК) [21].

Параметры, от которых зависит темп нарастания давления и его максимальное значение являются: параметры, характеризующих горючую смесь - U_n и ε , площадь фронта пламени; объем помещения; плотность истекающих через сбросные проемы газов и площадь сбросных проемов.

Использование предохранительных конструкций, имеющих высокие прочностные (для стекла) или инерционные (для ЛСК) параметры, представляет значительную опасность с точки зрения взрывоустойчивости зданий и помещений.

Кирпичные здания обладают минимальной устойчивостью к взрывным нагрузкам при внутренних взрывах. Обрушение кирпичных зданий в результате взрывных аварий достаточно распространенное явление в силу того, что кирпичная кладка, обладая высокой несущей способностью в вертикальном (эксплуатационном) направлении, практически не сопротивляется горизонтальным (взрывным) нагрузкам. Кроме этого, кирпичные стены, как правило, являются несущими конструкциями и при их прогибе (под действием взрывных нагрузок) происходит потеря их устойчивости, что приводит к обрушению всей конструкции.

Возможной ситуацией, приводящей к внутреннему дефлаграционному взрыву, является аварийный взрыв газовых баллонов в помещениях. В этом случае после разрыва баллона возникает ударная волна и формируется взрывоопасное облако. Ударная волна, сформировавшаяся при разрыве баллона, достаточно быстро затухает, и не может служить причиной крупномасштабных разрушений строительных конструкций. Характер разрушений от ударной волны носит достаточно локальный характер.

Основной характеристикой поражающих факторов при внутренних дефлаграционных взрывах является максимальное избыточное давление, реализуемое при взрыве. А основным параметром, характеризующим разрушения, является соотношение между максимальным избыточным давлением и несущей способностью основных строительных элементов.

Вторичные поражающие факторы, связанные с разлетом осколков и фрагментов строительных конструкций при внутренних дефлаграционных взрывах, можно отнести к разряду второстепенных, т.к. их выброс носит направленный характер (как правило, через оконные проемы), дальнобойность не велика и нет данных об пострадавших от этих поражающих факторов.

1.2. Исходные данные для определения параметров взрывной нагрузки

Увеличение размеров здания приводит к увеличению скорости распространения пламени за счет автотурбулизации горения. Назначение интегрального коэффициента интенсификации производится в зависимости от объема помещения.

Учет различных факторов, влияющих на взрывные нагрузки, подробно изложена в [4]. Учет самоускорения горения (автотурбулизации горения), в результате которого на фронте пламени образуется множество малых возмущений, приводящих к его искривлению, осуществляется введением в (1.1.1) коэффициента интенсификации горения, вызванного масштабным эффектом α_0 . Тогда коэффициент α , входящий в выражение (1.1.1), будет равен произведению коэффициента интенсификации, связанного с масштабным эффектом - α_0 , коэффициента интенсификации, вызванного начальной турбулизацией смеси в помещении, - α_1 и коэффициента интенсификации, связанного с наличием в помещении местных сопротивлений (оборудования, строительных конструкций, переходов и т.д.), - α_2 . Интегральное значение коэффициента интенсификации равно $\alpha = \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2$.

Учет масштабного эффекта

Интегральный коэффициент интенсификации, связанный с масштабным эффектом (коэффициент α_0), определяется в зависимости от характерных размеров помещения. Для помещений с характерным размером до 6м значение коэффициента α_0 равно $\alpha_0 = 1.0$, т.е. самоускорением пламени в таких помещениях можно пренебречь. При больших размерах помещений значение коэффициента α_0 равно $\alpha_0 = 1.225$, что равносильно увеличению скорости нормального горения смеси на 22.5% или росту взрывного давления в 1.5 раза за счет разгона пламени.

Влияние начальной турбулизации смеси

Анализ экспериментальных данных по турбулентным скоростям выгорания газовоздушных смесей [22] показывает, что справедливо следующее соотношение:

$$U_t = U_n \cdot \left(1 + \frac{U'}{U_*}\right), \quad (1.2.1)$$

где U_t - турбулентная скорость горения, U_n - ламинарная скорость горения, U' - амплитуда турбулентных пульсаций, $U_* = 1 \text{ м/с}$ - эмпирический коэффициент пропорциональности.

Удовлетворительное качество принятой аппроксимации иллюстрирует рисунок 1.2.1 [4].

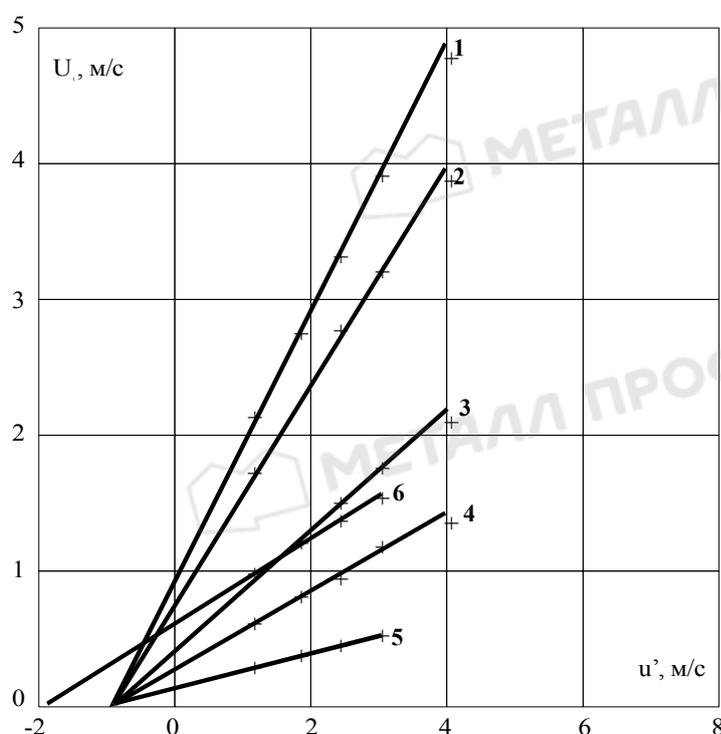


Рисунок 1.2.1 - Зависимость турбулентной скорости выгорания газовых смесей от пульсационной скорости.

- 1 - водород + воздух, $U_n=1,0$ м/с
- 2 - водород + воздух, $U_n=0,8$ м/с
- 3 - пропан + воздух, $U_n=0,44$ м/с
- 4 - пропан + воздух, $U_n=0,29$ м/с
- 5 - пропан + воздух, $U_n=0,14$ м/с
- 6 - водород + воздух, $U_n=0,60$ м/с

Из соотношения (1.2.1) следует, что уровни взрывных нагрузок зависят от начальной турбулизации смеси. Очевидно, что степень начальной турбулизации смеси (и соответственно коэффициент α_1) зависит от сценария развития аварийной ситуации. При аварийной разгерметизации оборудования в помещении возможны два сценария развития аварии. Первый вариант развития аварии возможен при незначительной разгерметизации оборудования. Это приводит к загазованности помещения нетурбулизированной газовоздушной смесью. В этом случае коэффициент интенсификации процесса горения из-за начальной турбулизации

смеси α_l равен единице ($\alpha_l=1$). Второй вариант развития аварии связан со значительной разгерметизацией оборудования, приводящей к струйному истечению газа через аварийное отверстие. В этом случае скорость выгорания увеличивается и зависит от амплитуды турбулентных пульсаций свежей смеси.

Для количественного определения параметров турбулентных пульсаций рассмотрим некоторые экспериментальные результаты [23,24]. На рисунке 1.2.2 приведена схема затопленной струи и распределение пульсационных составляющих скорости в различных ее сечениях.

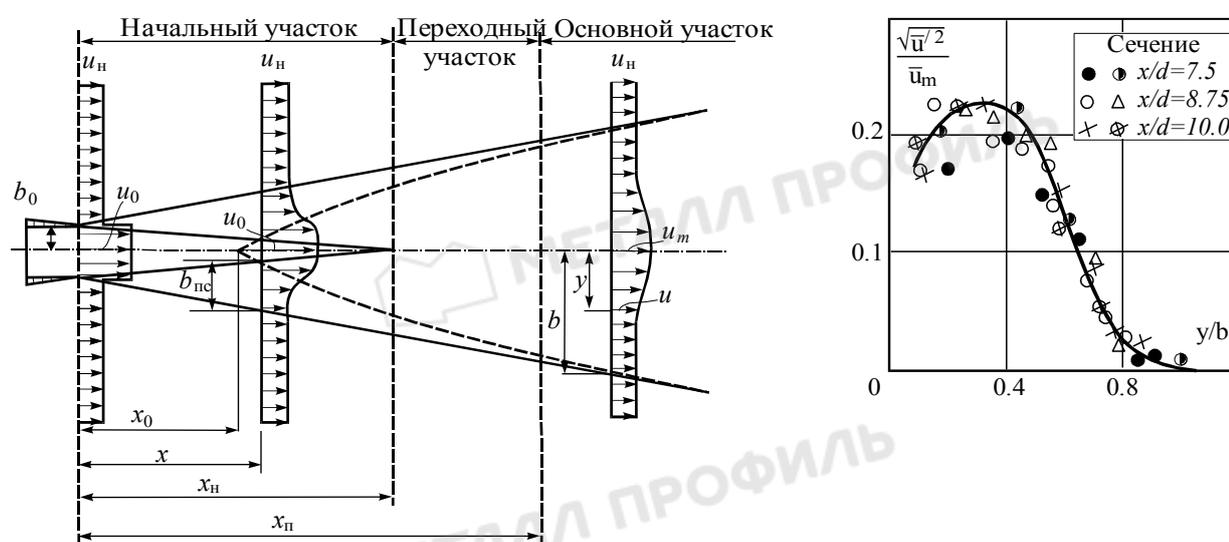


Рисунок 1.2.2 - Схема струи и распределение пульсационных составляющих скорости в различных ее сечениях

Как показывают экспериментальные данные, среднее значение величины турбулентных пульсаций составляет около 20% от значения скорости на оси струи, т.е. $\overline{u'} = 0.2 \cdot u_m$. Кроме того, экспериментально получено, что изменение скорости вдоль оси струи происходит по закону [23]:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{0.96}{\frac{a \cdot x}{b_0} + 0.29}, \quad (1.2.2)$$

где u_m - осевая скорость струи на расстоянии x от сопла; b_0 - начальный радиус струи; u_0 - начальная скорость струи; a - эмпирическая константа ($a=0.066-0.076$).

Приведенные соотношения позволяют оценить среднее (по пространству) значение пульсационной составляющей скорости свежей смеси при значительной

разгерметизации оборудования в помещениях, приводящей к струйному истечению горючей смеси.

Проведенные оценки показывают, что для наиболее неблагоприятного сценария развития взрывной аварии коэффициент интенсификации процесса горения из-за начальной турбулизации смеси в помещениях (α_1) не превышает значения 1.5, т.е. при консервативных расчетах следует принять, что параметр $\alpha_1=1.5$.

Влияние оборудования на взрывные нагрузки

В формулу (1.1.1) входит коэффициент $\alpha = \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2$, включающий коэффициент интенсификации, связанный с наличием в помещении местных сопротивлений - α_2 (оборудования, строительных конструкций и т.д.).

В этом случае интенсификация горения газоздушных смесей определяется как ускорение процесса горения, вызванного турбулизацией несгоревшей смеси перед фронтом пламени. Например, при обтекании холодной смесью различных препятствий.

Механизм обтекания различных тел дозвуковым потоком достаточно хорошо изучен. Опираясь на экспериментальные и теоретические исследования в области обтекания тел дозвуковым потоком, можно выявить основные причины интенсификации горения при взаимодействии пламени с телом [4]. При обтекании потоком газа препятствия наблюдается: искривление в сечениях потока эпюры скоростей; интенсивная турбулизация потока; образование крупномасштабных вихрей, соизмеримых с характерным размером препятствия; образование области неподвижного газа («аэродинамическая тень»). Аналогичным образом движется холодная (несгоревшая) газоздушная смесь при ее взаимодействии с препятствием. Наличие значительной пульсационной составляющей скорости в следе за телом (рисунок 1.2.2) приводит к увеличению скорости горения.

Поэтому в области повышенных турбулентных пульсаций процесс выгорания происходит с турбулентной скоростью горения U_t , определяемой по соотношению (1.2.1). Из рисунка 1.2.2 следует, что амплитуда турбулентных пульсаций в

непосредственной близости к обтекаемому телу составляет не более 3% от скорости набегающего потока.

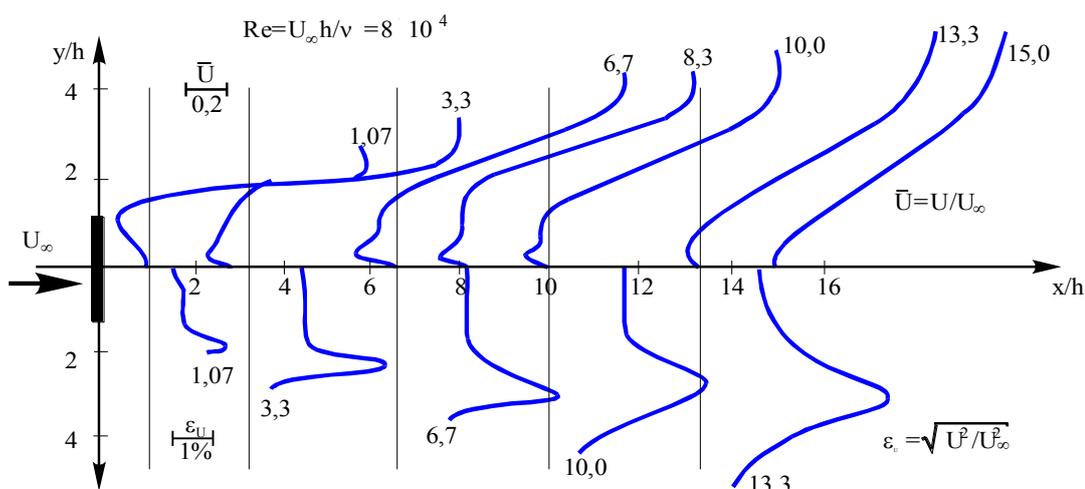


Рисунок 1.2.2 - Распределение средних (U) и пульсационных (U') скоростей в следе за диском

Учитывая, что начальная скорость распространения пламени большинства смесей составляет около 3 м/с [4], из соотношения (1.2.1) следует, что заметное отличие турбулентной скорости выгорания смеси от нормальной скорости горения будет только в том случае, если турбулизирующие процесс горения препятствия будут расположены в тех местах, где видимая скорость пламени более, чем в 5-10 раз будет превышать начальную скорость распространения пламени. Опыт показывает, что подобные скорости реализуются только в вытянутых объемах при сосредоточенном расположении сбросных проемов и удаленном от них источнике зажигания [6].

В обычных (типовых) помещениях основной причиной ускорения пламени при наличии на его пути препятствий является не турбулизация процесса, как это принято считать, а выгорание газовых областей, сформировавшихся в застойных зонах за препятствиями. При их выгорании образуются дополнительные продукты взрыва (причем за основным фронтом пламени), которые в процессе выгорания (появляются дополнительные источники) повышают давление и локально повышают скорость пламени.

На рисунке 1.2.3 приведены экспериментальные осциллограммы взрывного давления в свободном кубическом объеме и в объеме, заполненном оборудованием (ребро куба - 680мм), моделирующем оборудование в котельной. Видно, что взрывные нагрузки возросли в два раза, а общее время взрыва осталось практически без изменения [5].

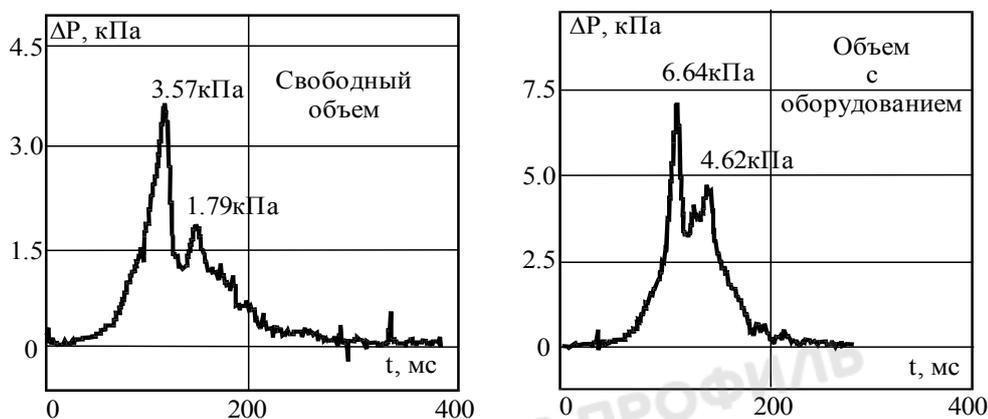


Рисунок 1.2.3 - Избыточное давление в свободном и загроможденном кубическом объеме (h=680мм)

Проведенные расчеты и результаты экспериментов показывают, что для наиболее неблагоприятного сценария развития взрывной аварии коэффициент интенсификации процесса горения в помещении БМК-3,0 за счет наличия на пути пламени препятствий - α_2 не превысит значения 1.5, т.е. при расчетах следует принять, что максимальное значение параметра $\alpha_2=1.5$.

Как указывалось ранее, для взрывного горения смеси концентрация горючей компоненты должна находиться между нижним и верхним концентрационными пределами. На рисунке 1.1.1 были приведены пределы воспламеняемости некоторых горючих смесей, а также зависимости скорости нормального горения от концентрации горючего в смеси. На рисунке 1.1.11 была приведена экспериментальная зависимость скорости нормального горения от объемной концентрации метана в смеси. Основными физическими параметрами процесса взрывного горения газовой смеси (ГВС) являются: скорость нормального горения U_n и степень расширения продуктов сгорания ε , которые существенным образом зависят от концентрации газа в смеси. Максимальное значение скорости

нормального горения U_n наблюдается при определенном процентном содержании горючего газа в смеси.

Основные физико-химические свойства некоторых газоздушных смесей приведены в таблице 1.2.1 [25].

Таблица 1.2.1 - Физико-химические параметры некоторых горючих веществ

Наименование горючего вещества	Смеси с концентрацией горючего, соответствующей U_{nmax}				Смеси на нижнем концентрационном пределе		
	C_{max} , г/м ³	ρ_{max} , кг/м ³	ε_{max}	U_{nmax} , м/с	$C_{нкп}$, г/м ³	$\rho_{нкп}$, кг/м ³	$\varepsilon_{нкп}$
1	2	3	4	6	7	8	9
Акрилонитрил	117,3	1,26	8,1	0,50	58,6	1,23	5,3
Аллиловый спирт	120,8	1,24	8,1	0,41	60,4	1,23	5,2
Амилен	79,5	1,25	8,1	0,43	40,0	1,22	5,2
Аммиак	163,4	1,09	7,2	0,10	102,5	1,23	4,8
Ацетальдегид	141,2	1,25	8,1	0,42	70,6	1,23	5,2
Ацетилен	90,1	1,19	8,6	1,61	26,7	1,20	3,3
Ацетон	121,0	1,24	8,1	0,44	59,0	1,22	5,3
Бензол	104,6	1,27	7,8	0,47	62,3	1,23	5,1
Бутан	75,8	1,24	8,0	0,43	38,0	1,22	5,2
Бутилацетат	123,9	1,23	8,2	0,38	62,9	1,22	5,2
Бутилен	79,0	1,25	8,2	0,44	38,0	1,23	5,1
Бутиловый спирт	92,7	1,26	8,2	0,39	46,3	1,23	5,2
Винилацетат	160	1,29	8,3	0,42	80	1,24	5,1
Винилацетилен	87,4	1,24	8,3	0,61	43,7	1,22	5,1
Водород	24,7	0,85	6,9	2,67	3,5	1,14	2,1
Гексан	82,0	1,29	7,9	0,39	41,0	1,24	5,1
Гексин	83,7	1,25	8,2	0,53	41,8	1,23	5,0
Гептан	93,5	1,26	8,1	0,41	46,8	1,23	5,1
Гептин	82,4	1,25	8,2	0,52	41,2	1,23	5,1
Декан	79,3	1,25	8,1	0,39	39,6	1,23	5,1
Диметиловый эфир	125,5	1,24	8,3	0,49	62,8	1,22	5,1
1,4-диоксан	147,9	1,28	8,1	0,40	80,0	1,23	5,0
Дихлорметан	509,3	1,56	7,5	0,25	425,0	1,47	5,7
Дихлорэтан	312,2	1,41	7,8	0,28	173,3	1,32	5,6
Диэтиламин	90,6	1,24	8,1	0,37	45,3	1,21	5,3
Диэтиловый эфир	79,1	1,23	7,7	0,50	40,0	1,22	5,1
Изопетан	77,1	1,23	8,1	0,39	38,5	1,20	5,1
Изопропиламин	94,8	1,23	8,2	0,32	47,4	1,22	5,1
Изопропилбензол	84,1	1,24	8,3	0,38	43,1	1,21	5,1
Крахмал	160,0	1,37	6,4	0,30	40,0	1,25	2,5

Ксилол	87.0	1.47	8.1	0.34	43.5	1.21	5.1
Метан	63.5	1.13	7.6	0.28	31.7	1.15	5.0
Метиловый спирт	163.7	1.23	8.1	0.54	81.8	1.19	5.2
Метилэтикетон	110.6	1.28	8.2	0.43	55.3	1.24	5.2
Мука (1 сорт)	209.1	1.38	9.5	0.30	42.6	1.22	3.3
Неогексан	77.7	1.23	8.2	0.40	38.8	1.21	5.1
Неопентан	77.0	1.23	8.1	0.35	38.5	1.21	5.1
Нитрометан	477.8	1.46	8.6	0.45	239	1.34	5.5
Нитропропан	196.7	1.34	9.4	0.48	98.4	1.24	5.2
Нонан	79.2	1.24	8.2	0.43	39.6	1.21	5.1
Нонен	80.5	1.24	8.3	0.43	40.3	1.21	5.1
Октан	78.1	1.24	8.3	0.45	39.2	1.21	5.1
Октен	80.4	1.24	8.4	0.45	40.2	1.21	5.1
Окись углерода	345.3	1.15	7.3	0.85	172.7	1.18	4.6
Пентан	76.8	1.23	8.2	0.42	38.4	1.20	5.1
Пропадиен	87.8	1.21	8.6	0.38	43.9	1.17	5.1
Пропан	74.1	1.21	8.1	0.45	37.1	1.20	5.1
Пропилен	78.2	1.24	8.2	0.58	39.1	1.22	5.0
Сероуглерод	302.0	1.40	7.2	0.59	31.7	1.20	2.2
Стирол	89.3	1.24	8.4	0.57	31.7	1.20	2.2
Толуол	87.6	1.24	8.3	0.39	43.8	1.21	5.1
Фуран	126.5	1.26	8.5	0.63	63.3	1.22	5.2
Фурфурол	161.4	1.29	8.6	0.27	80.7	1.25	5.2
Хлористый метил	258.5	1.29	7.9	0.29	130.0	1.24	5.4
Хлористый этил	175.9	1.28	8.1	0.25	88.0	1.23	5.3
Хлорпропан	146.0	1.27	8.2	0.28	73.8	1.23	5.3
Циклогексан	60.0	1.23	8.1	0.43	40.0	1.22	5.1
Циклогексанон	104.2	1.26	8.2	0.70	52.1	1.22	5.2
Циклопентан	79.6	1.23	8.1	0.38	39.8	1.21	5.1
Циклопропан	83.9	1.22	8.3	0.50	42.0	1.19	5.2
1.2-Эпоксиэтан	142.0	1.28	8.3	0.90	71.0	1.24	5.1
Этан	72.6	1.19	7.9	0.45	36.3	1.20	5.1
Этиламин	81.0	1.24	8.1	0.32	42.0	1.21	5.2
Этилацетат	147.6	1.28	8.2	0.37	73.8	1.24	5.2
Этилен	73.8	1.18	8.3	0.74	36.9	1.18	5.1
Этиленамин	92.6	1.24	8.1	0.46	46.8	1.21	5.2
Этиловый спирт	125.5	1.27	8.1	0.56	62.7	1.21	5.2
Этилформиат	174.5	1.28	8.1	0.40	87.3	1.24	5.3

Где: $U_{n \max}$ - максимальная нормальная скорость распространения пламени; S_{\max} - стехиометрическая концентрация горючего вещества в воздухе при $U_{n\max}$; ρ_{\max} - плотность смеси горючего с воздухом при $U_{n \max}$; ε_{\max} - максимальная степень расширения горючей смеси при сгорании; $S_{нкл}$ - концентрация горючего вещества в воздухе при нижнем концентрационном пределе распространения пламени; $\rho_{нкл}$ - плотность смеси горючего с воздухом при нижнем

концентрационном пределе распространения пламени; $\varepsilon_{\text{нкл}}$ - степень расширения горючей смеси при сгорании при нижнем концентрационном пределе распространения пламени.

Примечание. Приведенные характеристики для пылевоздушных смесей при наличии соответствующих данных (о крупности частиц, влажности и т.п.) следует уточнять применительно к конкретным условиям горения.

1.3 Общие принципы обеспечения устойчивости строительных конструкций при аварийных взрывах в зданиях, оборудованных ЛСК в виде сэндвич-панелей

Одной из основных задач, возникающих при обеспечении взрывоустойчивости зданий, является задача определения необходимой площади сбросных проемов и выбор параметров предохранительных конструкций, которыми оборудованы сбросные проемы. Эта задача должна решаться с учетом допускаемой в здании (помещении) величины максимального давления. С другой стороны параметры предохранительных конструкций оказывают решающее влияние на величину взрывного давления в зданиях и помещениях.

Применительно к вопросу использования в качестве ЛСК сэндвич-панелей можно сказать следующее. Чаще всего ЛСК используются в необслуживаемых помещениях, для которых вопросы освещенности помещения, как правило, не стоят или играют второстепенную роль. Поэтому для таких помещений можно предусмотреть ЛСК достаточно большой площади, что заведомо снизит взрывные нагрузки до минимальных значений при условии удовлетворительного вскрытия ЛСК. Другими словами, основными параметрами, определяющими максимальные уровни взрывных нагрузок, в этом случае будут: инерционность ЛСК, тип горючего вещества, сценарий развития аварии (тип аварийной утечки), загроможденность помещения и его габариты. Первые три фактора: инерционность ЛСК, тип горючего вещества и сценарий развития аварии (тип аварийной утечки), как было показано ранее в разделе 1.1.2, входят в основной параметр моделирования процесса формирования взрывных нагрузок - $G_{\text{ЛСК}}$. Параметр $G_{\text{ЛСК}}$ является основным параметром, определяющим пик давления, вызванного ЛСК. Параметр $G_{\text{ЛСК}} = G \cdot V^2$

$(G = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot h}{2} \cdot \frac{1}{\Delta P_{ИНЕР}}, B = \sqrt{\frac{P_{атм}}{\rho_1 \cdot (\varepsilon \cdot U_n)^2}})$ представляет собой безразмерное ускорение, с

которым перемещается ЛСК под действием сил давления, возникающих при взрыве определенного типа смеси, характеризующейся безразмерным параметром B .

На рисунке 1.3.1 приведены зависимости максимального взрывного давления, соответствующие определенному значению безразмерного параметра $G_{ЛСК}$. По данному графику легко определить максимальное избыточное давление ($P_{МАКС}$), соответствующее определенному значению параметра $G_{ЛСК} = G \cdot B^2$. График, приведенный на рисунке 3.3.4, получен для дискретного набора значений $\Delta P_{ВСКР} = 0-4 \text{ кПа}$.

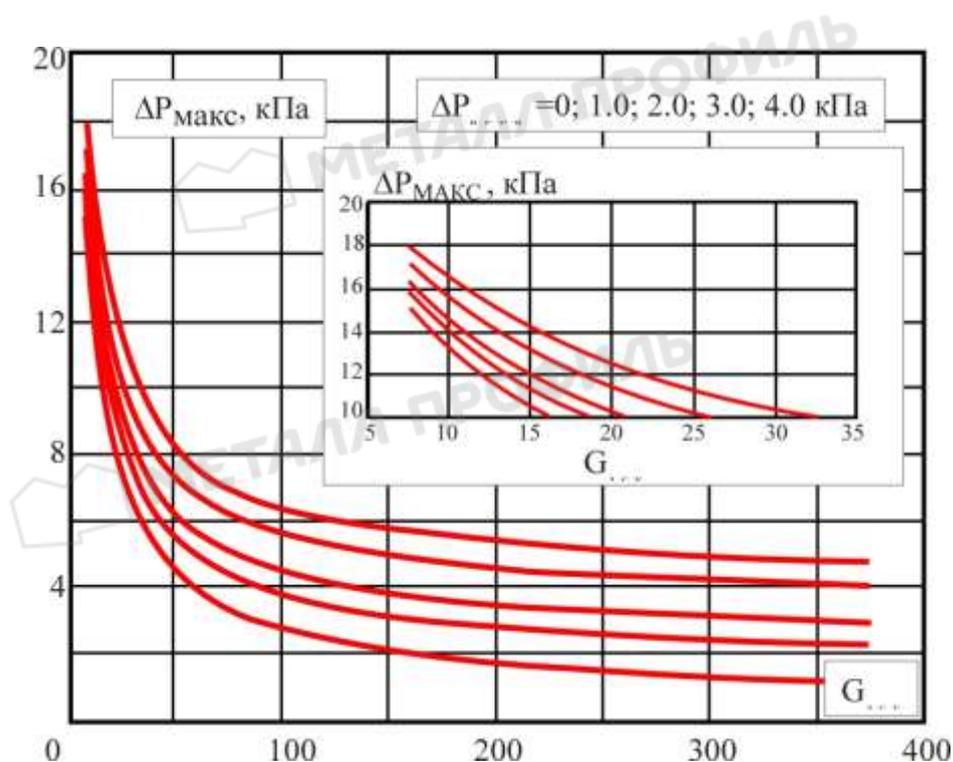


Рисунок - 1.3.1 Зависимость максимального взрывного давления, вызванного наличием ЛСК, от параметра $G_{ЛСК}$

Сэндвич-панели характеризуются достаточно малой инерционностью. Например, максимальное значение параметра инерционности ($\Delta P_{ИНЕР} = \frac{m \cdot g}{S}$) для сэндвич-панелей составляет не более $\Delta P_{ИНЕР} = 0.36 \text{ кПа}$ [27]. Для пропановоздушной смеси и даже для достаточно малых помещений ($H=3\text{м}$) параметр $G_{ЛСК}$,

характеризующий способность вскрытия сэндвич-панелей под действием взрывного давления, составляет около 300. Из рисунка 1.3.1 следует, что при давлении вскрытия $\Delta P_{ВСКР}=1кПа$ максимальное взрывное давление, обусловленное наличием ЛСК в виде сэндвич-панелей, составит около $\Delta P_{МАКС}=2.5кПа$, а при давлении вскрытия в $\Delta P_{ВСКР}=2кПа$ максимальное взрывное давление составит около $\Delta P_{МАКС}=3.0кПа$.

Подробнее о методике расчета взрывного давления в помещениях, оборудованных ЛСК, будет сказано ниже.

Здесь следует только отметить, что остальные ограждающие конструкции здания и его каркас должны гарантированно выдерживать полученные при расчетах максимальные взрывные нагрузки. Другими словами, для обеспечения устойчивости здания при аварийном взрыве определенная часть сэндвич-панелей, выполняющих роль ЛСК, должна вскрыться и вскрывшиеся сэндвич-панели должны повиснуть на тросах (для исключения их разлета при взрыве). Остальные сэндвич-панели и несущий каркас здания должны выдержать расчетные значения максимального взрывного давления.

В этом заключается основная идея обеспечения взрывоустойчивости здания. Ремонтным работам (из ограждающих конструкций) подлежат только выбитые панели - ЛСК, а само здание должно сохранить устойчивость.

2 Методическое пособие для определения динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей

2.1 Исходные данные для определения параметров взрывной нагрузки в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей

Параметры, характеризующие инерционность сэндвич-панелей, приведены в таблице 2.1.1 [27].

Таблица 2.1.1 - Весовые характеристики панелей

Толщина панели, мм	Удельный вес панели, кг/м ²
	1000мм, 1160мм, 1190мм
50	14.46
80	17.86
100	19.61
120	22.42
150	25.12
200	30.63
250	36.12
300	41.62

Примечание - Длина панели от 2000мм до 14000мм. Удельный вес панели приведен для толщины металла облицовок 0.5 мм и минеральной ваты плотностью 105кг/м³.

Из приведенной таблицы следует, что сэндвич-панели характеризуются достаточно малой инерционностью, что говорит о возможности их использования в качестве ЛСК. Максимальное значение параметра инерционности составляет $\Delta P_{ИНЕР} = \frac{m \cdot g}{S}$ не более 0.42кПа, что значительно меньше нормативных значений материалов и конструкций, рекомендуемых к использованию в качестве ЛСК (до 0,70 кПа) [21].

2.2 Общие положения методики определения динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей

Из соотношения (1.1.1) следует, что для определения динамических параметров взрывного давления в помещениях необходимо знать временную зависимость фронта пламени. Фронт пламени в помещениях имеет форму эллипсоида, оси которого вытянуты в направлении сбросных проемов. Это хорошо видно на рисунке 2.2.1, где приведены фотографии взрывного горения газовой смеси во взрывной камере [6].



Рисунок 2.2.1 - Фотография процесса взрывного горения в момент начала истечения продуктов сгорания в атмосферу через сбросные проемы

Временные зависимости положения фронта пламени для двух характерных направлений были приведены ранее на рисунке 1.1.2, из которого следует, что скорость пламени замедляется в сторону стен без сбросных проемов и увеличивается в сторону стен со сбросными проемами.

Результаты проведенных расчетов газодинамической задачи, определяющей движение газовой среды в ограниченном объеме при наличии на границах сбросных отверстий, приведены на рисунке 2.2.2. Расчеты выполнены в безразмерном виде, где за характерный линейный размер принято ребро камеры.

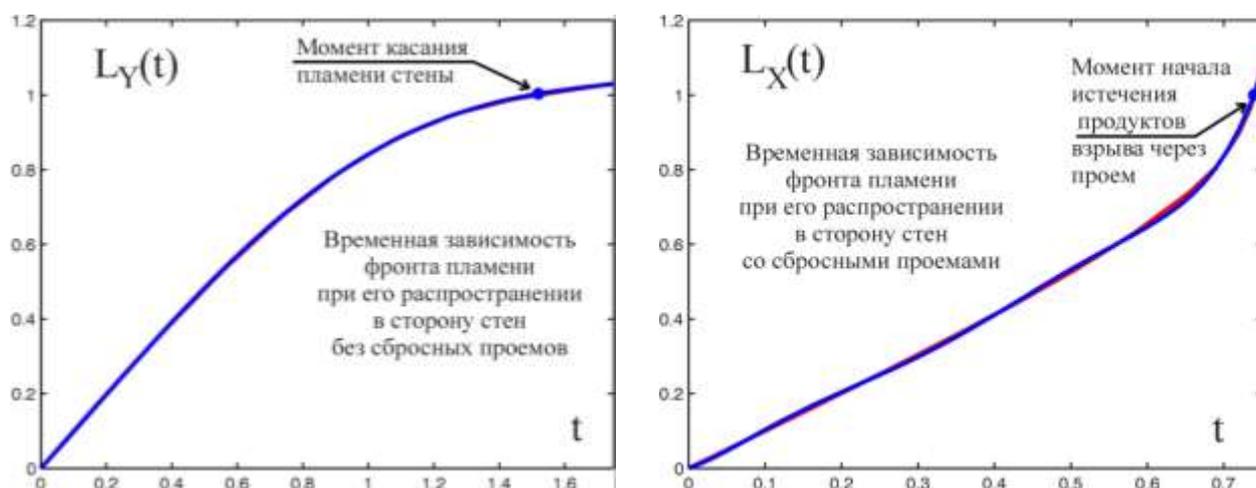


Рисунок 2.2.2 - Расчет динамических параметров фронта пламени для двух характерных направлений

На рисунке 2.2.2 приведены результаты численного расчета (красная кривая) и аппроксимация численного решения (синяя кривая) по полиному шестой степени для перемещения фронта пламени в «глухую» стенку: $L_Y(t) = \sum A_n \cdot t^n$ и по полиному четвертой степени для перемещения фронта пламени в сторону сбросного проема: $L_X(t) = \sum B_n \cdot t^n$. Коэффициенты полинома A_n (в порядке убывания): $A_6=123.4748$ $A_5=-239.6068$ $A_4=172.5027$ $A_3=-55.7480$ $A_2=7.8125$ $A_1=0.6489$ $A_0=0.0009$. Коэффициенты полинома B_n (в порядке убывания): 0.1139 -0.4394 0.2090 0.9573 0.0004 .

Зная зависимости скорости пламени для трех характерных направлений – $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ и аппроксимируя фронт пламени эллипсоидом, можно определить временную зависимость площади фронта пламени от времени:

$$S(t) \approx 4\pi \cdot (X^M \cdot Y^M + X^M \cdot Z^M + Z^M \cdot Y^M)^{1/M}, \quad (2.2.1)$$

где $M=1.6075$.

Кроме этого из графиков, приведенных на рисунке 2.2.1, следует, что фронта пламени сохраняет форму сферы вплоть до середины помещения. Эта особенность позволяет проводить расчет взрывного давления, связанного с процессом вскрытия ЛСК, исходя из условия, что фронт пламени в начальные моменты времени, когда происходит вскрытие ЛСК, имеет форму сферы [5].

Рассмотрим математическую модель, описывающую процесс вскрытия ЛСК под действием сил взрывного давления. В общих чертах расчетная схема для вышибных ЛСК была приведена ранее, см. уравнения (1.1.3)-(1.1.5).

Остановимся на методе расчета поворотных ЛСК, представляющих наибольший практический интерес, т.к. их использование предпочтительнее в силу значительных отлетов вышибных (сбросных) ЛСК при аварийных взрывах.

Как указывалось ранее, взрывное давление в помещении, оборудованном легкобрасываемыми конструкциями (ЛСК) любого типа, описывается следующим обыкновенным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\alpha \cdot S(t) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot U_n - \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_j}} \cdot S_{\text{ПР}} \cdot f(t)}{\frac{V_1}{\gamma_1} + \frac{V_2}{\gamma_2}} \cdot P(t), \quad (2.2.2)$$

где $P(t)$ - текущее значение давления; ΔP - избыточное давление; $S(t)$ - текущее значение площади поверхности фронта пламени; $S_{\text{ПР}}$ - суммарная площадь сбросных проемов; ρ_j - плотность холодной смеси (ρ_1) или продуктов сгорания (ρ_2); ε - степень расширения смеси при сгорании; γ_j - показатель адиабаты свежей смеси (γ_1) или продуктов сгорания (γ_2); U_n - нормальная скорость распространения пламени; V_j - текущий объем свежей смеси (V_1) или продуктов сгорания (V_2); $\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2$ - коэффициент интенсификации процесса горения (α_1 - интенсификация, вызванная начальной турбулизацией смеси, α_2 - интегральный коэффициент интенсификации горения, вызванной наличием на пути пламени препятствий); μ - коэффициент расхода, истекающих через сбросной проем газов; $f(t) = \frac{S^{\text{OCB}}_{\text{ПР}}(t)}{S_{\text{ПР}}}$ - функциональная зависимость степени освобождения сбросных проемов от предохранительных конструкций; $S^{\text{OCB}}_{\text{ПР}}(t)$ - текущее значение площади проемов, свободных от предохранительных конструкций.

Для помещений, оборудованных поворотными (распашными) ЛСК, функциональная зависимость степени освобождения сбросных проемов от ЛСК определяется как:

$$f(t) = 0, \text{ при } \Delta P < \Delta P_{ВСКР};$$

$$f(t) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cdot \left[1 + \frac{c}{d} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right], \text{ при } \Delta P > \Delta P_{ВСКР}; \quad (2.2.3)$$

$$f(t) \leq 1; \quad S_{ПП}^{OCB}(t) = S_{ПП} \cdot f(t),$$

где $S_{ПП} = c \cdot d$ - площадь единичного проема, c, d - размеры смещаемой единичной ЛСК, $\varphi(t)$ - угол смещения ЛСК, $\Delta P_{ВСКР}$ - избыточное давление, при котором происходит вскрытие ЛСК (см. рисунок 2.2.3) [5].

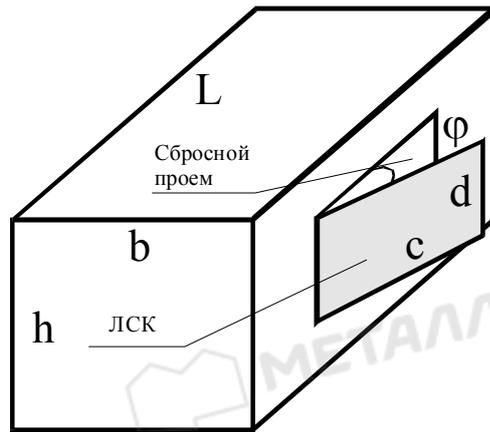


Рисунок 2.2.3 -
Условные обозначения,
используемые при расчете
поворотных ЛСК

Из (2.2.3) следует, что для определения $f(t)$ необходимо знать функциональную зависимость смещения ЛСК от времени - $\varphi(t)$. Для ее определения уравнение (2.2.2) нужно дополнить системой из двух обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{3 \cdot g \cdot \left[\Delta P + P_0 \cdot \left(1 - \frac{M_T}{M_0} \cdot \frac{2\varphi}{\pi}\right) \right]}{2 \cdot c \cdot \Delta P_{ИНЕР}}, \end{cases} \quad (2.2.4)$$

где $\omega(t)$ - угловая скорость перемещения ЛСК; $c \cdot \omega(t)$ - скорость перемещения крайней грани ЛСК; $\Delta P_{ИНЕР} = \frac{m \cdot g}{S_{ПП}}$ - параметр, характеризующий инерционность легкобрасываемых конструкций; при наличии торсионов, вскрывающих ЛСК, $M(t) = M_0 - M_T \cdot \varphi / (\pi/2)$ - вскрывающий момент, который начинает действовать при $\Delta P > \Delta P_{ВСКР}$, или $M(t) = P_0 \cdot S_{ПП} \cdot c/2 \cdot (1 - M_T/M_0 \cdot \varphi / (\pi/2))$, где $M_0 = P_0 \cdot S_{ПП} \cdot c/2$; g - ускорение

свободного падения; при отсутствии торсионов $P_0=0$; m - масса единичной легкобрасываемой конструкции.

Систему из трех уравнений (2.2.2) и (2.2.4) необходимо решать при следующих начальных условиях [5]:

$$\begin{aligned} \Delta P &= 0 && \text{при } t=0 \\ \varphi(t) &= 0 && \text{при } \Delta P < \Delta P_{\text{ВСКР}} \\ \omega(t) &= 0 && \text{при } \Delta P < \Delta P_{\text{ВСКР}}, \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

где $\Delta P_{\text{ВСКР}}$ - давление начала вскрытия ЛСК.

В дальнейшем при расчетах и при определении критериев моделирования будем использовать уравнения, записанные в безразмерном виде. Уравнение (2.2.2) в безразмерном виде, где за характерную скорость принята видимая скорость пламени в свободном пространстве $u_0 = \varepsilon \cdot U_n$, за характерный линейный размер - половина высоты здания - $r_0 = \frac{h}{2}$, за характерное время - $t_0 = \frac{r_0}{\varepsilon \cdot U_n}$, за характерную плотность - плотность свежей смеси $\rho_0 = \rho_l$, за характерное давление - $P_0 = 1 \text{ кПа}$, имеет вид:

$$\frac{d\Delta P_*}{dt_*} = \left(\frac{\alpha \cdot \gamma \cdot (\varepsilon - 1)}{8 \cdot L_* \cdot b_* \cdot \varepsilon} \cdot S_*(t) - \frac{\mu \cdot \gamma \cdot S_{*np} \sqrt{2 \cdot Z \cdot P_{*амм}} \cdot \sqrt{\Delta P_*} \cdot f(t, \Delta P_*)}{8 \cdot L_* \cdot b_*} \right) \cdot (101.3 + \Delta P_*), \quad (2.2.6)$$

где γ - показатель адиабаты; $L_* = \frac{L}{h}$, L - длина здания; $b_* = \frac{b}{h}$, b - ширина здания;

$S_{*np} = \frac{S_{np}}{r_0^2}$, S_{np} - площадь сбросных проемов; $t_* = \frac{t}{t_0}$ - безразмерное время; $Z=1$ до

момента начала истечения продуктов взрыва в атмосферу; $Z=1/\varepsilon$ - после начала

истечения продуктов взрыва в атмосферу; $P_{*амм} = \frac{P_0}{\rho_0 \cdot (U_n \cdot \varepsilon)^2}$ - безразмерное

атмосферное давление; ΔP_* - безразмерное (избыточное) давление, нормированное к

$$P_0 \left(\Delta P_* = \frac{\Delta P}{P_0} \right).$$

Рассмотрим влияние различных параметров на уровни взрывных нагрузок, вызванных наличием ЛСК на ограждающих конструкциях здания. Ранее

указывалось (см. раздел 1.1.2), что основным параметром, определяющим пик давления, который реализуется в процессе вскрытия ЛСК, является параметр $G_{ЛСК} = G \cdot B^2$ ($G = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot h}{2} \cdot \frac{1}{\Delta P_{ИНЕР}}$, $B = \sqrt{\frac{P_{амм}}{\rho_1 \cdot (\varepsilon \cdot U_n)^2}}$), который представляет собой безразмерное ускорение, с которым перемещается ЛСК под действием сил давления, возникающих при взрыве определенного типа смеси, характеризующейся безразмерным параметром B .

На рисунке 2.2.4 приведены временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК с давлением вскрытия $\Delta P_{ВСКР} = 0.5 \text{ кПа}$, для 10 значений параметра $G_{ЛСК}$: 207.8 323.2 438.6 554.1 669.5 784.9 900.3 1015.8 1131.2 1246.6. Минимальное значение $G_{ЛСК} = 207.8$ соответствует взрыву пропановоздушной смеси ($B = \sqrt{\frac{P_{амм}}{\rho_1 \cdot (\varepsilon \cdot U_n)^2}} = \sqrt{\frac{101300}{1.24 \cdot (8.1 \cdot 0.45)^2}} = 78.4$) в помещении с характерным размером $H = 2 \text{ м}$, оборудованном сэндвич-панелями с максимальной инерционностью $\Delta P_{ИНЕР} = \frac{m \cdot g}{S} = 0.36 \text{ кПа}$. Для этой ситуации параметр

$G = \frac{\rho_1 \cdot g \cdot h}{2} \cdot \frac{1}{\Delta P_{ИНЕР}} = \frac{1.24 \cdot 9.81 \cdot 2}{2} \cdot \frac{1}{360} = 0.0338$ и, соответственно, параметр $G_{ЛСК} = G \cdot B^2$ принимает значение: $G_{ЛСК} = 0.0338 \cdot 78.4^2 = 207.8$.

Максимальное значение $G_{ЛСК} = 1246.6$ соответствует аварийному взрыву пропановоздушной смеси в помещении с характерным размером $H = 12 \text{ м}$. Для этой аварийной ситуации параметр $G_{ЛСК}$ будет в 6 раз больше и составит $G_{ЛСК} = 1246.6$. Расчеты выполнены для относительного большого количества вскрываемых проемов, обеспечивающих при их вскрытии незначительные уровни взрывных нагрузок – около 0.5 кПа.

На рисунках 2.2.5-2.2.8 приведены результаты аналогичных расчетов, проведенных для ЛСК в виде сэндвич-панелей, но имеющих другие значения давления вскрытия $\Delta P_{ВСКР} = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 \text{ кПа}$.

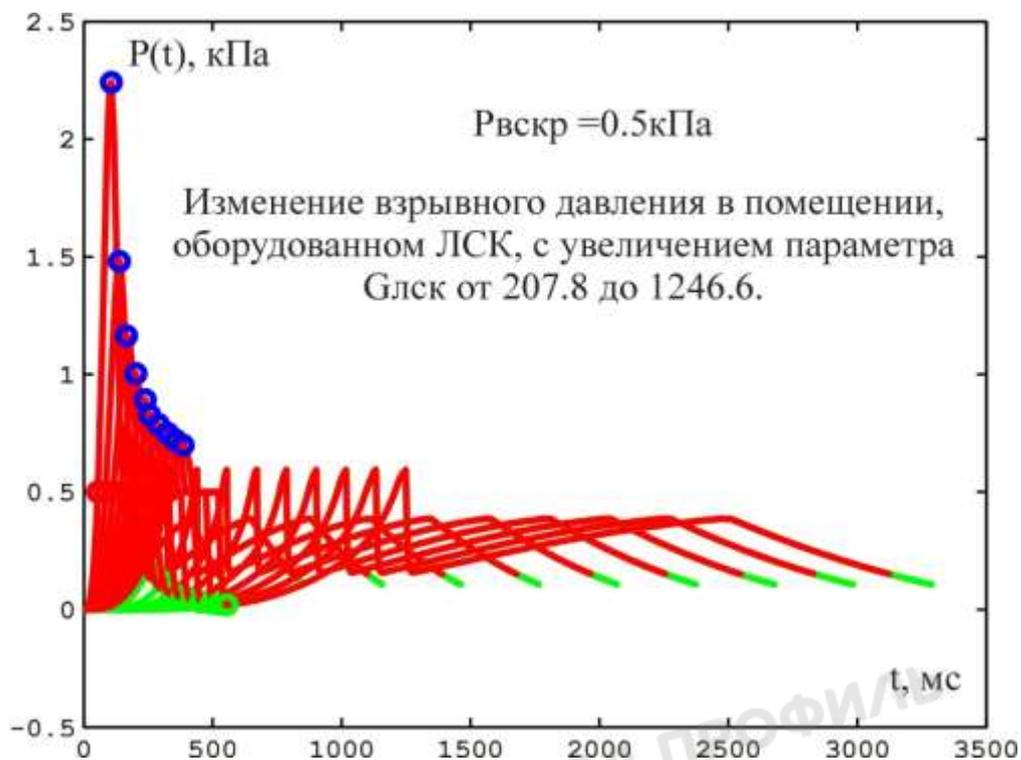


Рисунок 2.2.4 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях параметра $G_{ЛСК}$

На рисунке 2.2.5 приведены результаты расчетов для ЛСК в виде сэндвич-панелей с давлением вскрытия $\Delta P_{вскр} = 1.0 \text{ кПа}$.

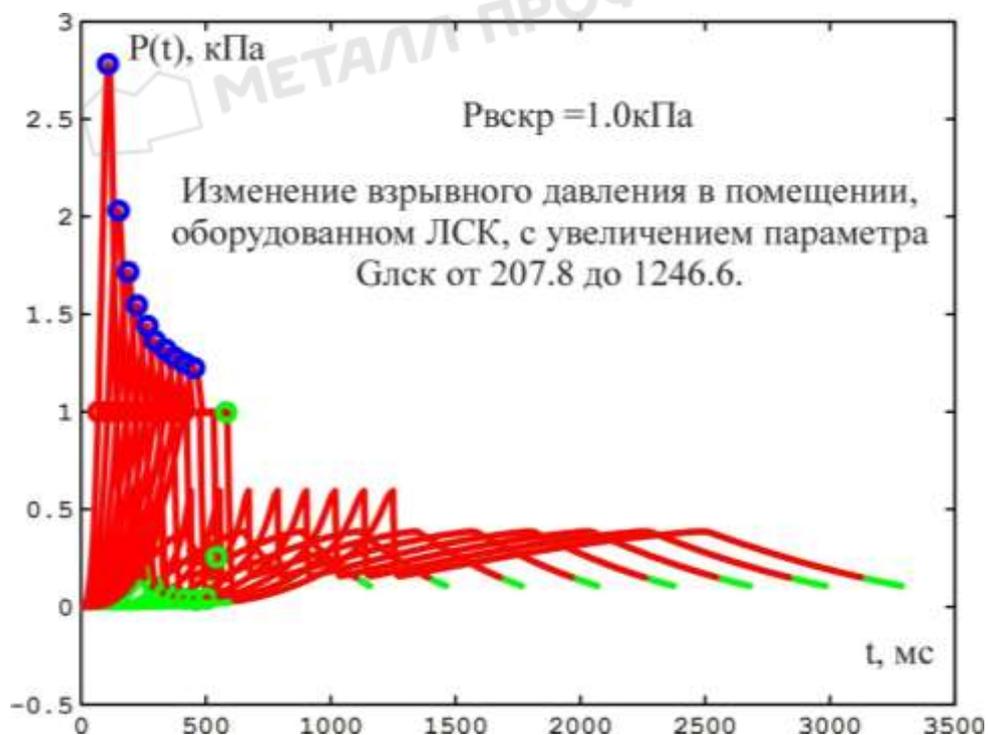


Рисунок 2.2.5 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях параметра $G_{ЛСК}$

На рисунке 2.2.6 приведены результаты расчетов для ЛСК в виде сендвич-панелей с давлением вскрытия $\Delta P_{ВСКР}=1.5\text{кПа}$.

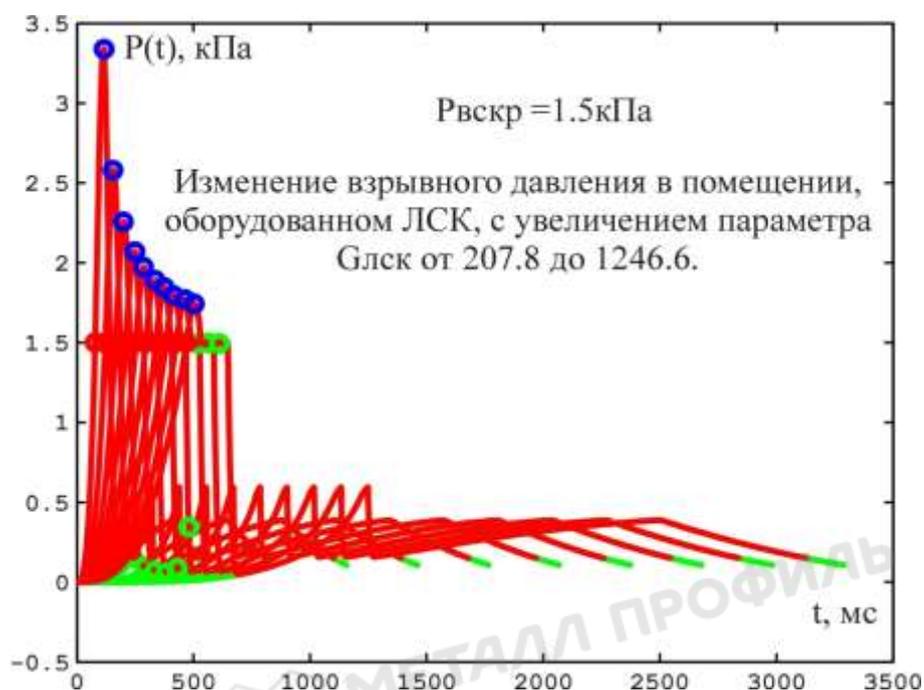


Рисунок 2.2.6 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях параметра $G_{ЛСК}$

На рисунке 2.2.7 приведены результаты расчетов для ЛСК в виде сендвич-панелей с давлением вскрытия $\Delta P_{ВСКР}=2.0\text{кПа}$.

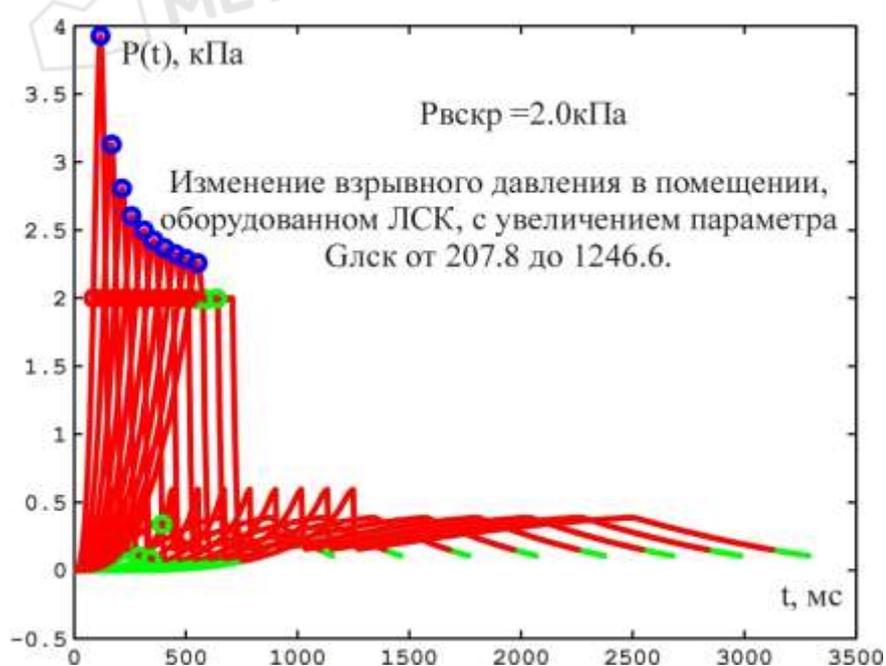


Рисунок 2.2.7 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях параметра $G_{ЛСК}$

На рисунке 2.2.8 приведены результаты расчетов для ЛСК в виде сендвич-панелей с давлением вскрытия $\Delta P_{\text{вскр}}=2.5\text{кПа}$.

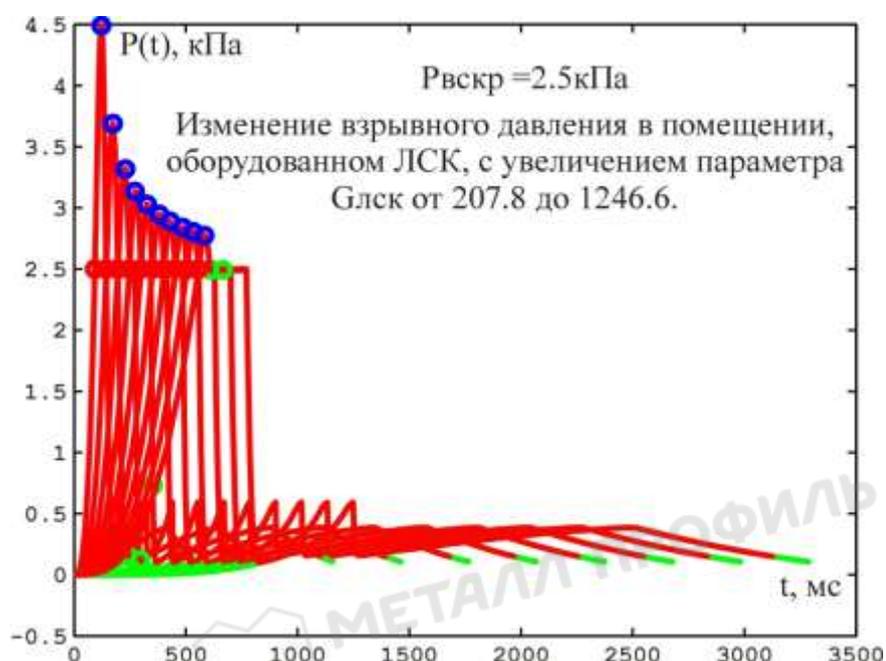


Рисунок 2.2.8 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях параметра $G_{\text{ЛСК}}$

Сводная таблица зависимости максимального взрывного давления, обусловленного наличием ЛСК, будет приведена в следующем разделе. Там же будут приведены графические зависимости для экспертного определения максимальных уровней взрывной нагрузки в помещениях, оборудованных ЛСК в виде сендвич-панелей.

Рассмотрим влияние на уровни взрывного давления других исходных параметров.

На рисунке 2.2.9 приведены временные зависимости взрывного давления в здании, оборудованном ЛСК, для трех вариантов развития аварии, которые определяют параметр начальной турбулизации смеси или коэффициент α_1 (см. раздел 1.2). Если подходить формально, то данный параметр фактически определяет степень отличия реальной скорости горения от значения нормальной скорости горения в ламинарном режиме.

Исходные параметры при расчетах были следующими: взрыв пропановоздушной смеси в помещении кубической формы с характерным линейным размером 6м, инерционность ЛСК составляла $P_{ИНЕР}=0.36\text{кПа}$, давление вскрытия ЛСК было принято $\Delta P_{ВСКР}=1.0\text{кПа}$, а площадь сбросных проемов составляла 12м^2 (площадь проемов составляла 5.56% от его объема, что соответствует нормам).

Из приведенных на рисунке 2.2.9 данных следует, что сценарий развития взрывной аварии, что сводится к формальному изменению скорости горения смеси, существенно влияет на уровень взрывных нагрузок. Однако, учитывая, что скорость горения входит в параметр $G_{ЛСК}$, данная характеристика аварийного взрыва может быть учтена путем изменения параметр $G_{ЛСК}$. Другими словами вместо нормальной скорости горения U_n в параметр $G_{ЛСК}$ следует подставлять турбулентную скорость горения, равную $\alpha_1 * U_n$, где α_1 - коэффициент интенсификации, вызванный начальной турбулизацией смеси в помещении.

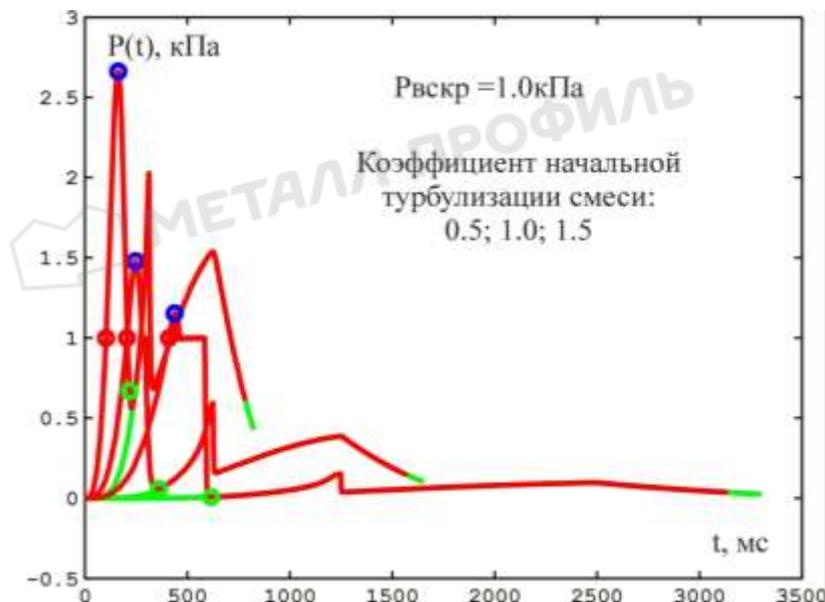


Рисунок 2.2.9 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях коэффициента начальной турбулизации смеси

На рисунке 2.2.10 приведены временные зависимости взрывного давления в здании, оборудованном ЛСК, для трех вариантов заполнения помещения разного

рода препятствиями, которые определяют степень интенсификации процесса горения или параметр α_2 (см. раздел 1.2).

Видно, что интенсификация процесса горения на внутренних препятствиях оказывает существенное влияние на взрывное давление при полностью открытых проемах, а на пики давления, связанные со вскрытием ЛСК, этот параметр оказывает второстепенное значение.

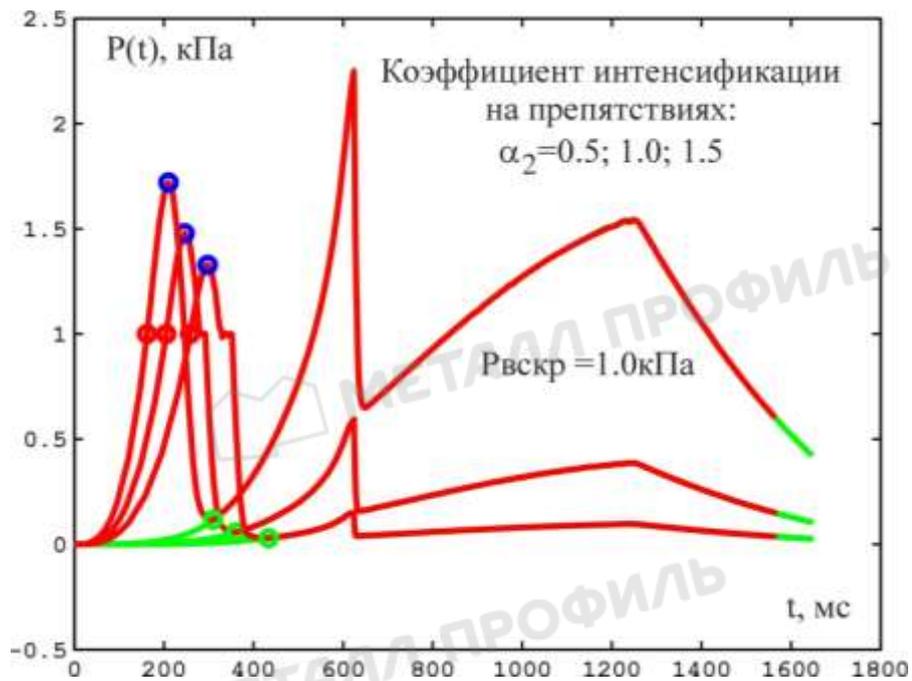


Рисунок 2.2.10 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях коэффициента турбулизации смеси за счет препятствий

На рисунке 2.2.11 приведены временные зависимости взрывного давления в здании, оборудованном ЛСК, для четырех вариантов инерционности ЛСК (удельной массы ЛСК).

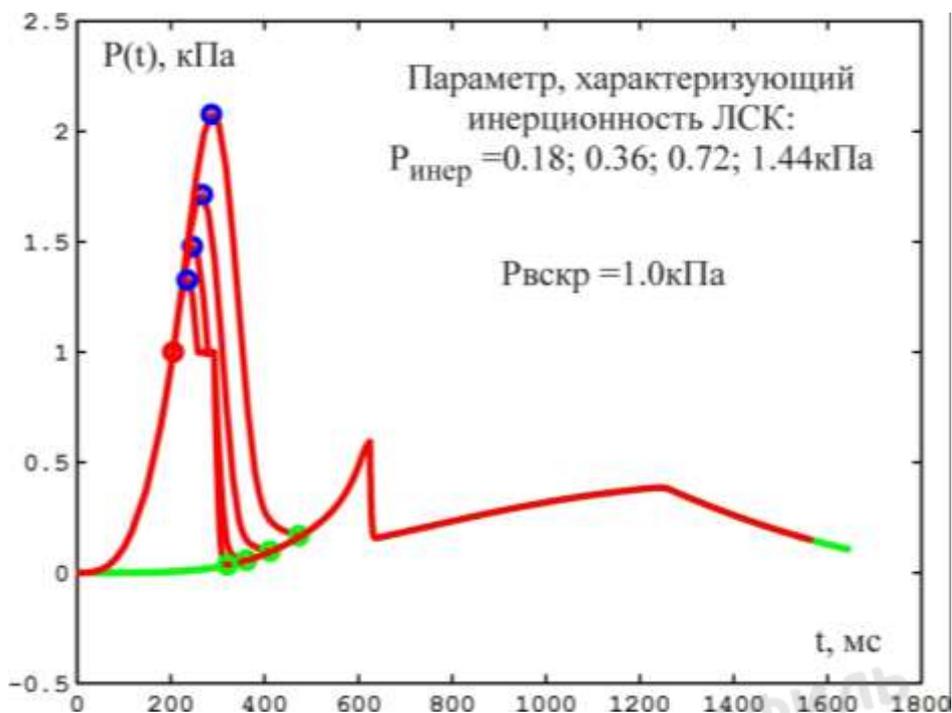


Рисунок 2.2.11 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных значениях ее инерционности

Как следует из рисунка 2.2.11, инерционность ЛСК оказывает решающее значение на пиковые значения взрывной нагрузки. Особое значение инерционность оказывает при малых площадях сбросных проемов.

На рисунке 2.2.12 приведены временные зависимости взрывного давления в здании, оборудованном ЛСК, для трех вариантов объемно-планировочного решения здания: кубической формы; длина здания составляет две его высоты и три его высоты.

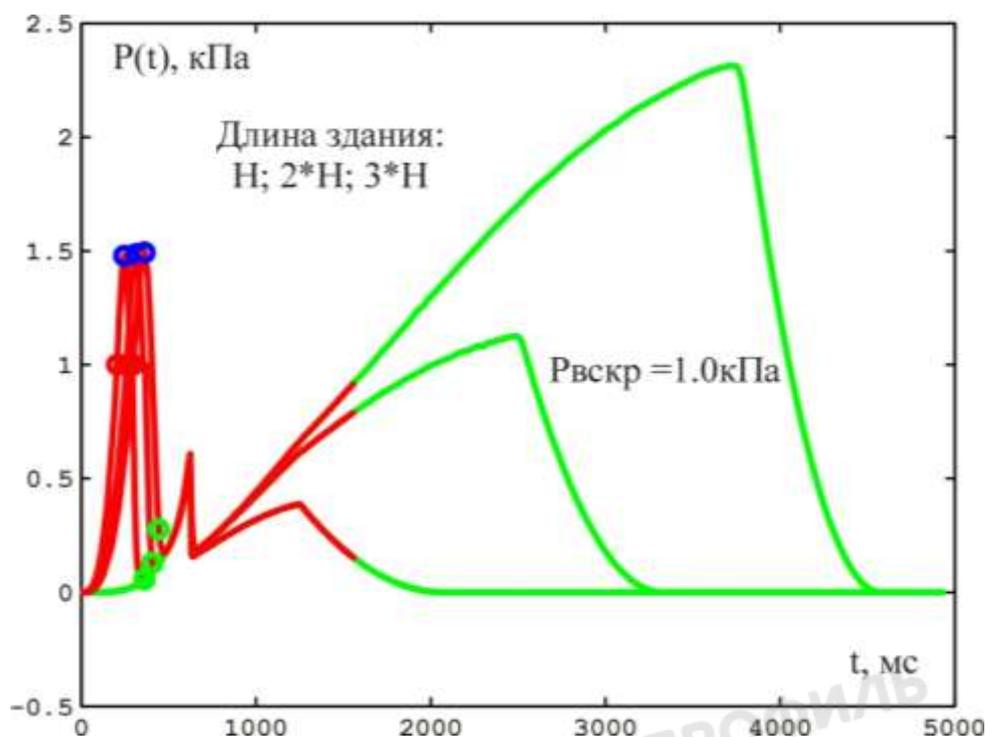


Рисунок 2.2.12 - Временные зависимости взрывного давления в помещении, оборудованном ЛСК, при различных объемно-планировочных решениях

Из представленного рисунка следует, что объемно-планировочные решения влияют только на взрывное давление, реализующееся при полностью вскрытых сбросных проемах. На пики давления, связанные со вскрытием ЛСК, объемно-планировочные решения здания практически не оказывают влияния.

Приведенный выше анализ влияния на взрывные нагрузки в зданиях, оборудованных ЛСК, различных факторов позволил разработать методические указания по расчету необходимых параметров сэндвич-панелей, выполняющих роль ЛСК, которые обеспечивают устойчивость основных строительных конструкций при аварийном взрыве.

2.3 Методическое пособие по определению динамических параметров взрывной нагрузки при аварийном внутреннем взрыве в зданиях, оборудованных ЛСК из сэндвич-панелей

Исходя из материалов, изложенных ранее, можно сформулировать *приближенную* (экспертную) и *инженерную* (более точную, но и более трудоемкую) методики расчета параметров взрывных нагрузок, в зданиях, оборудованных ЛСК.

Предварительно необходимо располагать следующими исходными данными. Высота (Н, м), ширина (В, м) и длина (L, м) здания. Под шириной здания следует понимать его размер с предполагаемыми под ЛСК сбросными проемами по краям.

Определяется максимальное значение избыточного давления, которое выдерживают основные конструктивные элементы здания. То есть определяется давление, при котором ограждающие конструкции (кроме тех, которые должны выполнять роль ЛСК) и сам каркас здания сохраняют устойчивость - $P_{доп}$.

Определяется тип горючего, способного к взрыву. По таблице 1.2.1 определяются свойства горючей смеси: плотность - ρ , скорость нормального горения - U_H , степень расширения при сгорании - ϵ . При наличии нескольких видов горючих веществ выбирается тот, который имеет максимальную скорость горения. Определяется наихудший сценарий развития взрывной аварии, исходя из которого, назначаются параметры турбулизации смеси при взрыве - α_1 и α_2 .

При сценарии развития аварии, предполагающей загазованность помещения спокойной, т.е. не турбулизированной смесью, коэффициент α_1 принимается равным 1. При авариях, связанных со струйным истечением газа или с разрывом сосудов, находящихся под давлением, значение коэффициента α_1 принимается равным 1.2-1.5. Параметр α_2 назначается в зависимости от степени загроможденности помещения.

В таблице 2.3.1 [4] приведены значения коэффициентов интенсификации горения α_2 , полученные на основании экспертных заключений и лабораторных исследований.

Таблица 2.3.1 - Значения коэффициента интенсификации α_2

Условия, приводящие к интенсификации горения	α_2
Свободное помещение (в зависимости от объема)	1,0...1,1
Объем помещения незначительно заполнен крупногабаритным оборудованием и строительными конструкциями (заполнение объема до 5%)	1,0...1,5
То же (заполнение объема от 5% до 20%)	1,5...1,7
То же (заполнение объема от 20% до 40%)	1,7...2,0
То же (заполнение объема свыше 40%)	2,0...2,5
Объем помещения значительно заполнен мало- и крупногабаритным оборудованием и строительными конструкциями: трубопроводы, этажерки, насосы, компрессоры, колонны, выступающие потолочные балки, фермы, мостовые краны и т.п.	2,5...3,0

Оценивается интегральный коэффициент интенсификации, связанный с масштабным эффектом (коэффициент α_0). Этот параметр не оказывает значительного влияния на уровни взрывного давления, связанные со вскрытием ЛСК, и определяется в зависимости от характерных размеров помещения. Для помещений с характерным размером до 6м значение коэффициента α_0 равно $\alpha_0 = 1.0$, т.е. самоускорением пламени в таких помещениях можно пренебречь. При больших размерах помещений значение коэффициента α_0 равно $\alpha_0 = 1.225$, что равносильно увеличению скорости нормального горения смеси на 22.5% или росту взрывного давления в 1.5 раза за счет разгона пламени. Допускается увеличивать значение параметра α_2 в α_0 раз, т.е. принимать, что реальное значение $\alpha_2 = \alpha_2 * \alpha_0$, где правое значение α_2 определено по таблице 2.3.1.

Определяют давление вскрытия ЛСК, которое должно превышать допустимые для данной местности ветровые нагрузки - $\Delta P_{ВСКР}$.

Определяются инерционные параметры ЛСК.

Приближенная методика

Обезразмеривают линейные параметры помещения:

$b=V/H$; $l=L/H$; $s_{ПР}=S_{ПР}/(H/2)^2$ – малыми символами будем обозначать безразмерные переменные.

Предварительно принимают, что $s_{\text{ПР}}$ численно (в м^2) равна 5% от объема помещения (в м^3).

Определяется скорость пламени: $U_0 = \alpha_1 * U_H * \varepsilon$.

Определяются уровни взрывных нагрузок при полностью открытых сбросных проемах по формулам:

$\text{КОЕФ} = 1000(\text{Па})/\rho / U_0^2$ - безразмерная величина;

$\mu = 0.6$;

$e1 = (\varepsilon - 1) / \varepsilon$;

$e2 = 1 / \varepsilon$;

$p_{\text{st}} = 1.6075$;

$A_{\text{ТΥR B}} = 2.0$;

$a_{\text{sbr}} = A_{\text{ТΥR B}} * e2$;

$sf_{\text{max2}} = 4 * pi * ((b^{p_{\text{st}}} * l^{p_{\text{st}}} + b^{p_{\text{st}}} + l^{p_{\text{st}}}) / 3)^{1/p_{\text{st}}}$;

$v_{\text{in}} = \alpha_2 * sf_{\text{max2}} * e1$;

$v_{\text{out}} = \mu * s_{\text{ПР}} * (2 * \text{КОЕФ} / a_{\text{sbr}})^{1/2}$;

$p_{\text{РПК2}} = v_{\text{in}}^2 / v_{\text{out}}^2$ - значение 2-го пика давления в кПа.

$a_{\text{sbr}} = 1$;

$T_{\text{SBRS}} = 0.74 * b$;

$t1 = T_{\text{SBRS}} / l$;

Если $t1 > 1.5$, тогда $t_{\text{DLN}} = 1.0$. В противном случае $t_{\text{DLN}} = 1 * L_Y(t1)$ определяется по графику на рисунке 2.3.1.

$t_{\text{BN}} = b$;

Если $T_{\text{SBRS}} > 1.5$, тогда $t_{\text{H}} = 1.0$. В противном случае $t_{\text{H}} = L_Y(T_{\text{SBRS}})$ определяется по графику на рисунке 2.3.1.

$sf_{\text{max1}} = 4 * pi * ((t_{\text{BN}}^{p_{\text{st}}} * t_{\text{DLN}}^{p_{\text{st}}} + t_{\text{BN}}^{p_{\text{st}}} * t_{\text{H}}^{p_{\text{st}}} + t_{\text{DLN}}^{p_{\text{st}}} * t_{\text{H}}^{p_{\text{st}}}) / 3)^{1/p_{\text{st}}}$;

$v_{\text{in}} = \alpha_2 * sf_{\text{max1}} * e1$;

$v_{\text{out}} = \mu * s_{\text{ПР}} * (2 * \text{КОЕФ} / a_{\text{sbr}})^{1/2}$;

$p_{\text{РПК1}} = v_{\text{in}}^2 / v_{\text{out}}^2$ - значение 1-го пика давления в кПа.

Выбирают максимальное число из двух полученных значений 1-го и 2-го пиков давления: $p_{\text{РПК}} = \text{Max}\{p_{\text{РПК1}} p_{\text{РПК2}}\}$. Если полученное значение давления больше

половины давления вскрытия ЛСК ($p_{РЛК} > \Delta P_{ВСКР}/2$), то принятую в расчетах площадь сбросных проемов увеличивают в $(p_{РЛК}/(\Delta P_{ВСКР}/2))^2$ раз и принимают это значение за необходимую для данного помещения площадь сбросных проемов, которую требуется перекрыть ЛСК. В противном случае считается, что для данного помещения необходима площадь сбросных проемов, принимавшаяся в расчетах.

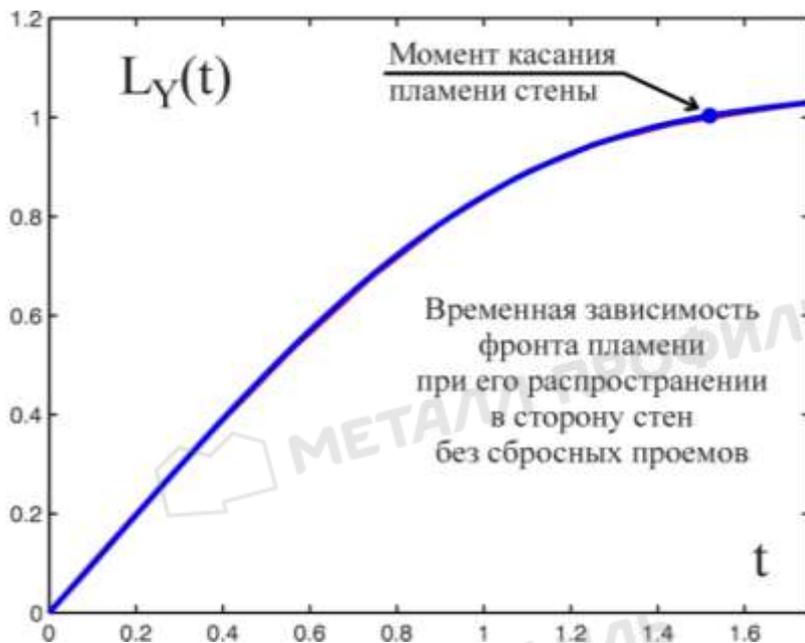


Рисунок 2.3.1 - График перемещения фронта пламени. Используется для интерполяции положения фронта пламени

Определяется параметр $G_{ЛСК} = G \cdot B^2$ по формулам:

$$B = \sqrt{\frac{P_{АТМ}}{\rho \cdot U_0^2}}, \text{ где } P_{АТМ} = 101300 \text{ Па};$$

$$G = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{2} \cdot \frac{1}{\Delta P_{ИНЕР}}, \text{ где } \Delta P_{ИНЕР} = \frac{m \cdot g}{S_{ЛСК}}, \text{ где } m - \text{ масса ЛСК, } S_{ЛСК} - \text{ ее площадь, } g -$$

ускорение свободного падения, 9.81 м/с^2 .

По графику, приведенному на рисунке 2.3.2, находится максимальное значение избыточного давления, развиваемое в рассматриваемом помещении при вскрытии ЛСК в момент аварийного взрыва.

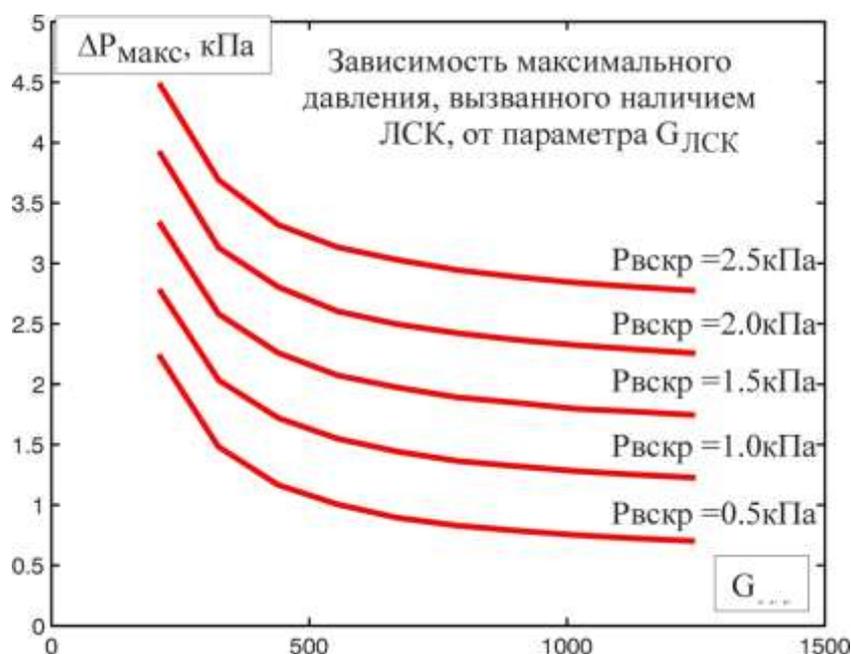


Рисунок 2.3.2 - Зависимость максимального давления, реализуемого при вскрытии ЛСК, от параметра $G_{ЛСК}$

Численное значение давления находится путем интерполяции. Для более точной интерполяции можно использовать данные таблицы 2.3.2, где в численном виде приведены результаты расчета, представленные на рисунке 2.3.2 в графической форме.

Таблица 2.3.2 - Максимальные давления в зависимости от $G_{ЛСК}$ и давления вскрытия ЛСК

$G_{ЛСК}$	207.8	323.2	438.6	554.1	669.5	784.9	900.3	1015.8	1131.2	1246.6
$\Delta P_{\text{вскр}}$ 0.5 кПа	2.2414	1.4800	1.1637	1.0032	0.8923	0.8282	0.7866	0.7493	0.7211	0.6986
1.0 кПа	2.7817	2.0306	1.7165	1.5464	1.4401	1.3634	1.3192	1.2784	1.2493	1.2247
1.5 кПа	3.3389	2.5799	2.2575	2.0705	1.9727	1.8903	1.8456	1.7953	1.7710	1.7436
2.0 кПа	3.9268	3.1288	2.8063	2.6027	2.4978	2.4248	2.3686	2.3242	2.2897	2.2571
2.5 кПа	4.4905	3.6901	3.3178	3.1343	3.0296	2.9459	2.8892	2.8394	2.8054	2.7749

Если полученное максимальное значение взрывного давления превышает допустимый уровень взрывной нагрузки - $P_{\text{доп}}$, то либо уменьшают инерционность ЛСК и повторяют расчеты, либо проводят усиление конструкции здания с целью увеличения $P_{\text{доп}}$.

Инженерная методика

Для более детальных расчетов параметров взрывной нагрузки, возникающей в момент срабатывания ЛСК, можно использовать инженерную методику, основанную на приближенном решении уравнений (2.2.1), (2.2.2) и (2.2.3).

Суть ее сводится к следующим вычислениям. Предполагается, что предварительные расчеты по приближенной методике уже проведены и исходные данные заданы. Для подробного расчета потребуется задание геометрических размеров ЛСК (см. рисунок 2.2.3): C и D . Необходимо эти размеры привести к безразмерному виду: $c = C/(H/2)$ и $d = D/(H/2)$.

По формулам (исходные данные так же как и для случая приближенного расчета предварительно должны быть обезразмерены) определяется безразмерное время начала вскрытия ЛСК - t_{vskr} .

$$e1 = (\varepsilon - 1) / \varepsilon;$$

$$Q = 1.4 * 4 * \pi * e1 * \alpha_2 / 8 / l / b;$$

$$t_{vskr} = (3 * \Delta P_{вскр} / 101.3 / Q)^{0.333}$$

Безразмерное время начала вскрытия ЛСК - t_{vskr} и давление вскрытия ЛСК - $\Delta P_{вскр}$ принимаются в качестве начальных данных для пошагового решения системы уравнений (2.2.1), (2.2.2) и (2.2.3), записанной в безразмерном виде. В дальнейшем будут приняты следующие обозначения: текущее значение избыточного давления – $P(t) = x(1)$ в кПа; текущий угол смещения ЛСК – $\varphi(t) = x(2)$ в радианах; текущая угловая скорость ЛСК - $\omega(t) = x(3)$ в радиан/сек. Тогда начальные условия запишутся в виде:

$$P(1) = \Delta P_{вскр}; \quad \varphi(1) = 0; \quad \omega(1) = 0; \quad \text{для момента времени } t(1) = t_{vskr} .$$

Назначается шаг по времени - dt . Предварительно может быть принято следующее значение $dt = 0.01$. Чем мельче шаг по времени, тем точнее вычисления.

Пошаговое решение системы уравнений (2.2.1), (2.2.2) и (2.2.3), записанной в безразмерном виде, выглядит следующим образом:

Для следующего момента времени $t(i+1) = t(i) + dt$ вычисляются приращения давления, угла поворота ЛСК и приращение его угловой скорости:

$$КОЕФ = 1000(\text{Па})/\rho / U_0^2 - \text{безразмерная величина};$$

$$\mu = 0.6;$$

$$a_{sbr} = 1;$$

$$e1 = (\varepsilon - 1) / \varepsilon;$$

$$xx1 = 1.4 * (101.3 + x(1)) / 8 / b;$$

$$ff = 2 * c * \sin(x(2)/2) * (d + c * \cos(x(2)/2)) / c / d;$$

$$v_{out} = \mu * ff * s_{ГП} * (2 * x(1) * KOEF / a_{sbr})^{1/2};$$

$$sf = 4 * \pi * t^2;$$

$$v_{in} = \alpha_2 * sf * e1;$$

$$dx(1) = xx1 * (v_{in} - v_{out}) * dt; \quad \text{- приращение давления}$$

$$dx(2) = x(3) * dt; \quad \text{- приращение угла}$$

$$dx(3) = 1.5 * GNOR / DPINER / CN * (x(1) + DPNL * (1 - MT / MNL / \pi * x(2))) * dt;$$

- приращение угловой скорости

Тогда на момент времени $t(i+1)$ давление, угол поворота ЛСК и его угловая скорость будут примерно равны:

$$P(t+dt) = P(i+1) = x(1) + dx(1);$$

$$\varphi(t+dt) = \varphi(i+1) = x(2) + dx(2);$$

$$\omega(t+dt) = \omega(i+1) = x(3) + dx(3);$$

Указанная процедура повторяется для следующего шага по времени.

Результаты расчета по вышеизложенной расчетной схеме приведены на рисунках 2.3.3-2.3.5. Были приняты следующие исходные данные для расчета. Высота здания $H = 6\text{м}$, ширина $B = 6\text{м}$ и длина $L = 6\text{м}$. Параметры турбулизации смеси при взрыве – $\alpha_1 = 2$ и $\alpha_2 = 1$. Взрыв метана. Плотность смеси $\rho = 1.13\text{кг/м}^3$, степень расширения продуктов взрыва $\varepsilon = 7.6$, скорость нормального горения $U_H = 0.38\text{м/с}$. Инерционность ЛСК составляла $P_{ИНЕР} = 0.5\text{кПа}$, давление вскрытия ЛСК было принято $\Delta P_{ВСКР} = 1.5\text{кПа}$, площадь сбросных проемов составляла 9м^2 , ширина ЛСК – $C = 1.0\text{м}$ и длина ЛСК – $D = 3.0\text{м}$ (использовалось три ЛСК).

На рисунке 2.3.3 приведены результаты пошагового расчета трех величин: избыточного давления – $P(t)$ в кПа; текущий угол смещения ЛСК (значение угла поворота ЛСК приведено в градуса) – $\varphi(t)$; текущая скорость дальнейшей точки ЛСК в

м/с (угловая скорость ЛСК умножается на линейный размер С ЛСК). Безразмерное время t приводится к размерному значению в мс. по формуле $1000 * t * (H/2/U_0)$.

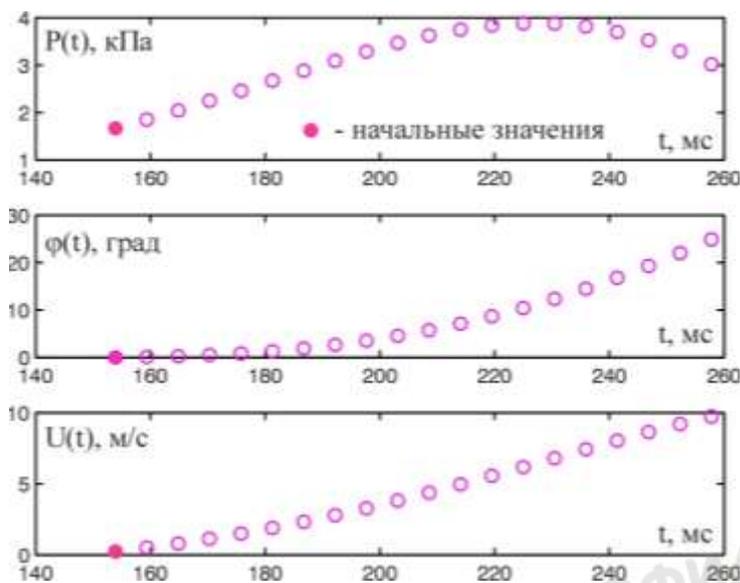


Рисунок 2.3.3 - Результаты пошагового расчета параметров взрыва в здании, оборудованном ЛСК, по инженерной методике

Приведенные на рисунке точки соответствуют пошаговому расчету взрывного давления в помещении и параметров вскрытия ЛСК.

На рисунке 2.3.4 приведено сравнение результатов расчета взрывного давления, выполненного по инженерной методике, с результатами численных расчетов.

Наблюдается удовлетворительное согласие между численными расчетами (точность вычислений 10^{-8}) и расчетами по инженерной методике.

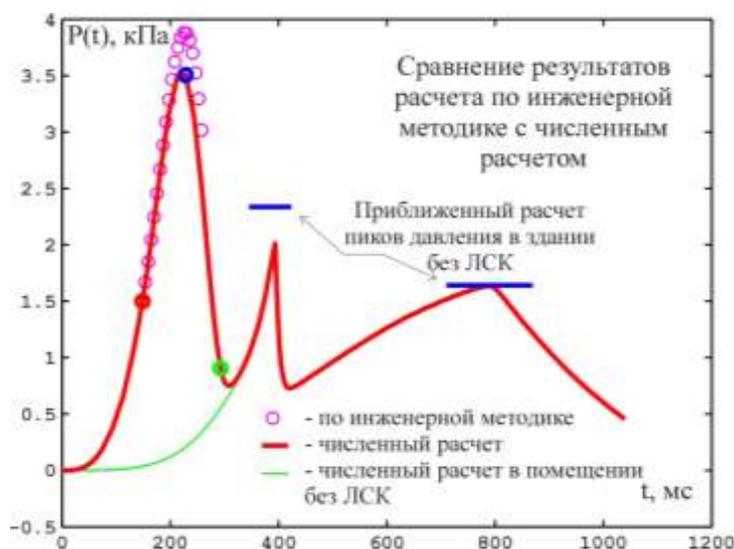


Рисунок 2.3.4 - Сравнение результатов расчета взрывного давления в здании, оборудованном ЛСК, по инженерной методике с результатами численных расчетов

На рисунке 2.3.5 приведено сравнение результатов расчета динамических параметров взрыва, выполненных по инженерной и численной методикам.

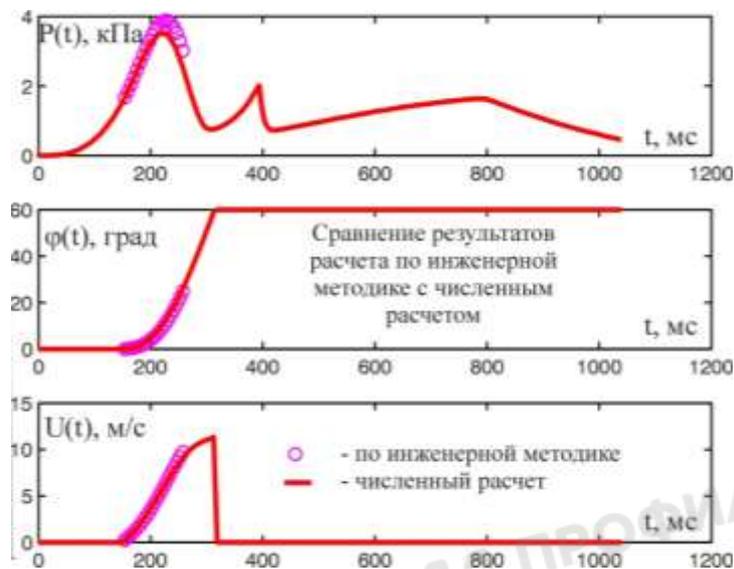


Рисунок 2.3.5 - Сравнение результатов расчета динамических параметров взрыва в здании, оборудованном ЛСК, по инженерной методике с результатами численных расчетов

Удовлетворительное согласие между результатами численных расчетов и результатами расчетами по инженерной методике говорит о применимости последней для расчета параметров взрыва в зданиях, оборудованных ЛСК.

3 Экспертное заключение о возможности применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций

Анализ существующих нормативных документов в области взрывобезопасности, а также данных о российском и зарубежном опыте применения ЛСК для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений [7, 28, 29, 30-35, 36] позволили специалистам НТЦ «Взрывоустойчивость» МГСУ выделить ряд критериев, позволяющих оценить возможность применения конструкций различного типа в качестве ЛСК. Все критерии связаны с конструктивными особенностями конкретных моделей легкобрасываемых конструкций.

Инерционность конструкции – один из основных критериев, характеризующий скорость освобождения сбросных проемов от ЛСК.

Чем ниже инерционность ЛСК (удельный вес, кг/м²), тем более эффективно происходит сброс конструкции под воздействием избыточного давления внутреннего аварийного взрыва ГПВС (см. рисунок 1.1.4).

Параметры, характеризующие инерционность сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл Профиль», приведены в таблице 3.1 [27].

Таблица 3.1 - Весовые характеристики панелей

Толщина панели, мм	Удельный вес панели, кг/м ²
	1000мм, 1160мм, 1190мм
50	14.46
80	17.86
100	19.61
120	22.42
150	25.12
200	30.63
250	36.12
300	41.62

Примечание - Длина панели от 2000мм до 14000мм. Удельный вес панели приведен для толщины металла облицовок 0.5 мм и минеральной ваты плотностью 105кг/м³.

Из приведенной таблицы следует, что сэндвич-панели характеризуются достаточно малой инерционностью, что говорит о возможности их использования в качестве ЛСК. Максимальное значение параметра инерционности составляет $\Delta P_{инер} = \frac{m \cdot g}{S}$ не более 0,42кПа, что значительно меньше нормативных значений материалов и конструкций, рекомендуемых к использованию в качестве ЛСК (до 0,70 кПа) [21].

Избыточное давление вскрытия – критерий, характеризующий способность крепежных элементов ЛСК разрушаться, деформироваться или срабатывать при воздействии на них избыточного давления изнутри помещения, для освобождения сбросных проемов в начальный момент аварийного взрыва.

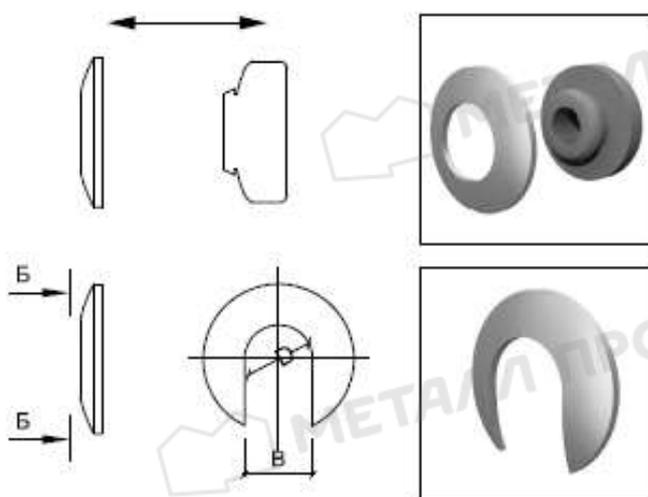
От значения избыточного давления вскрытия ЛСК напрямую зависит первый пик максимального избыточного давления в помещении (см. рисунки 2.2.5 – 2.2.8).

В соответствии с техническим описанием конструктивных решений ООО «Компания Металл Профиль» [26], для крепления трехслойных сэндвич-панелей, используемых в качестве ЛСК, применяется два варианта: саморезы с ослабленной шайбой SmartBOLT® (SB) (см. рисунок 3.1) или саморезы со сточенной шляпкой и ослабленной стопорной шайбой, типа Scorpion® (SC) (см. рисунок 3.2), производства Sheh Fung Screws CO, Ltd No.810, Fusing W.Rd., Ciaotou, Kaohsiung 825, Taiwan.

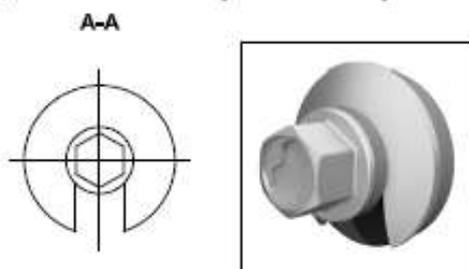
Вариант 1 (SmartBOLT)



Ослабленная шайба



Общий вид шляпки самореза в сборе



Прижимная шайба отделяется от ЭПДМ прокладки откусывается или отпиливается на расстояние равное диаметру ее отверстия ($\text{ØD}=\text{B}$).

После этого шайба собирается обратно с ЭПДМ-прокладкой и одевается на саморез SmartBOLT.

При монтаже шайбу располагать откусанной или отпилиной стороной вниз для предотвращения затекания и скапливания воды.

Для предотвращения попадания влаги и возможной коррозии рекомендуется на незащищенные фасонными изделиями саморезы устанавливать декоративные колпачки в цвет фасада.

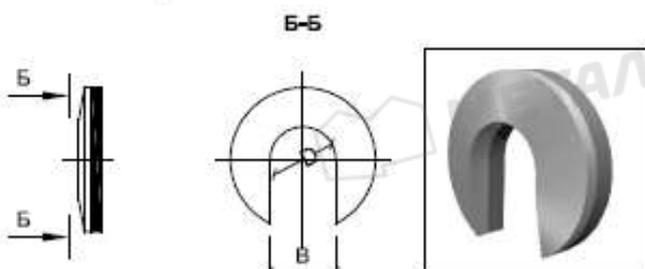
Для крепления панели определяется расчетом.

Рисунок 3.1 – Элемент крепления ЛСК (вариант 1)

Вариант 2 (Scorplon)



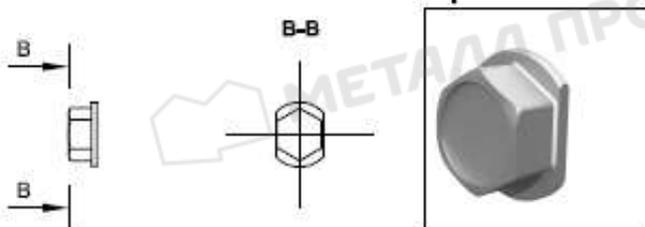
Стопорная ослабленная шайба



Прижимная шайба с ЭПДМ прокладкой откусывается или отпиливается на расстояние равное диаметру ее отверстия ($\varnothing D=B$).

При монтаже шайбу располагать откусанной или отпилиной стороной вниз для предотвращения затекания и скапливания воды.

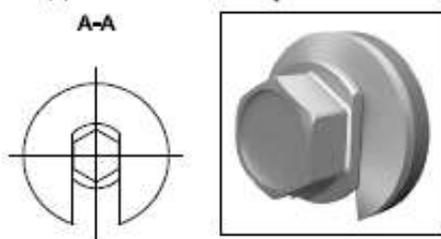
Сточная шляпка самореза



Шляпку рекомендуется стачивать с двух сторон до основания головки, это позволит обеспечивать легкосбрасываемость конструкции при взрыве и давлении 0,7 кПа.

Для предотвращения попадания влаги и возможной коррозии рекомендуется на незащищенные фасонными изделиями саморезы устанавливать декоративные колпачки в цвет фасада.

Общий вид шляпки самореза



Для крепления панели необходимо 6 ослабленных саморезов.

Рисунок 3.2 – Элемент крепления ЛСК (вариант 2)

Анализ конструкции крепления ООО «Компания Металл Профиль» показал целесообразность их использования для обеспечения заданного (расчетного) давления вскрытия ЛСК. В зависимости от степени ослабления прижимной или стопорной шайбы могут достигаться различные значения разрушающей нагрузки элемента крепления. Надежность срабатывания крепления ЛСК может быть подтверждена с помощью расчетов и испытаний.

Наряду с обеспечением заданного давления вскрытия ЛСК, крепления, предлагаемые ООО «Компания Металл Профиль», способны обеспечить устойчивость ограждающей конструкции к естественным нагрузкам (например, обратному ветровому воздействию), возникающим в процессе эксплуатации здания или сооружения.

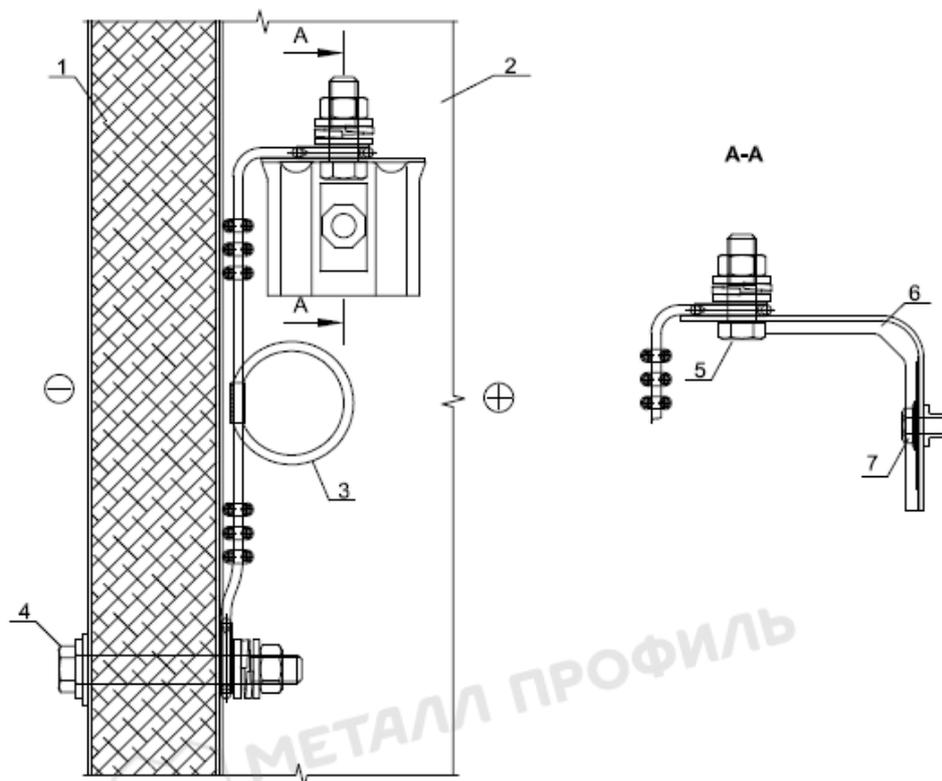
Безопасность ЛСК для людей и объектов, находящихся снаружи здания – критерий, отвечающий за минимизацию или полное предотвращение поражения людей или важных объектов от самой ЛСК при ее срабатывании.

Для предотвращения срыва ЛСК при аварийном взрыве используются различные способы ее удержания вблизи сбросного проема: горизонтальные или вертикальные шарниры (петли), различные фиксирующие устройства (цепи, тросы и т.п.)

ЛСК ООО «Компания Металл Профиль» оборудованы стальными удерживающими тросами с демпфирующими петлями, предотвращающими свободный разлет конструкции при аварии (рисунки 3.3 и 3.4) [26].

Такие конструкции надежно удерживают ЛСК после срабатывания и позволяют обеспечить безопасность людей от поражения самой конструкцией при аварийном взрыве.

Узел крепления демпфирующей петли



1. Трехслойная сэндвич-панель МП ТСП-Z
2. Металлическая стойка или ж/б колонна
3. Демпфирующая петля М20 (узел 4)
4. Крепежное изделие КД 3
5. Крепежное изделие КД 4
6. Кронштейн крепежный межэтажный ККМ-90 или стальной уголок (по проекту)
7. Крепежный анкер (подбирается в зависимости от вида колонны)

На одну закрепленную сэндвич - панель необходимо закрепить 4 демпфирующие петли.

Затяжка гаек на всех демпфирующих петлях должна быть одинакова или постоянна, что бы обеспечить равномерное и достаточное сухое трение (скольжение) без концентрации напряжений в одном узле с демпфирующим эффектом при промышленном взрыве во время разматывания демпфирующей петли.

Длина демпфирующего каната для зависания сэндвич-панелей во время аварийного взрыва составляет 2000 мм.

Рисунок 3.3 – Узел крепления демпфирующей петли

Демпфирующая петля М20

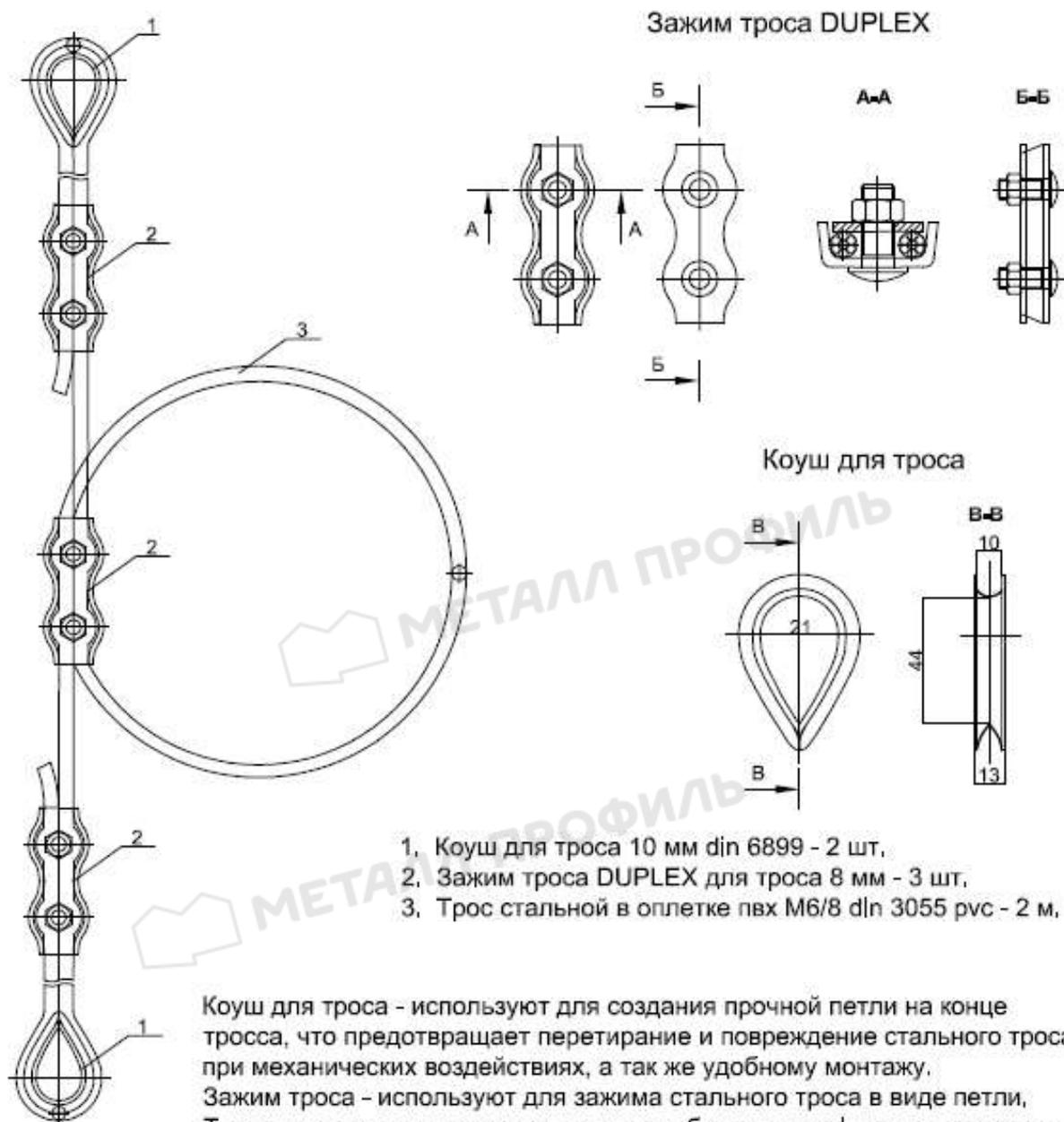


Рисунок 3.4 – Демпфирующая петля

Функциональность – критерий оценки ЛСК с точки зрения ее соответствия эксплуатационным характеристикам здания или сооружения. Такие свойства ЛСК как, например, теплопроводность, светопрозрачность и др. позволяют существенно расширить дополнительные полезные свойства конструкции, наряду с главным – обеспечением взрывоустойчивости здания.

Теплоизоляционные показатели трехслойных сэндвич-панелей [27], используемых ООО «Компания Металл Профиль» в качестве ЛСК, позволяют использовать их в качестве ограждающих конструкций без дополнительных энергозатрат (рисунок 3.5). Такая характеристика положительно влияет на функциональность ЛСК.

Филиал ООО «Завод ТЕХНО» г.Занеск
423520, РТ, г.Занеск, ул.Автозаводская, д.7
Отдел контроля качества
Тел.(85558) 5-86-28

Свидетельство №093-16
о состоянии измерений в лаборатории
от 11.10.16

Паспорт качества № 2 411
7020793

**ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МИНЕРАЛОВАТНЫЕ ПЛИТЫ
ТЕХНОСЭНДВИЧ С(пл 110)**

ТУ 5762-010-74182181-2012 нзм.1

Дата изготовления	05.05.17	Длина	2400
Номер партии	316 227	Ширина	1200
Количество, м3	1 098,662	Толщина	102

Физико-механические показатели

Наименование показателей	ТУ	ФАКТ
Прочность на сдвиг(срез), кПа, не менее	60	76,7
Теплопроводность при 25 град., Вт/(м град. С), не более	0,041	0,041
Предел прочности при растяжении, кПа, не менее	100	215
Модуль упругости при растяжении, МПа, не менее	5,2	17,5
Модуль сдвига, МПа, не менее	2,5	4
Плотность, кг/м3	115 ± 5	119,771
Содержание органических веществ,% по массе, не более	4,3	4,2
Водопоглощение, % по объему, не более	1,5	0,2
Влажность, % по массе, не более	0,5	0,2
Предел прочности на сжатие, кПа, не менее	60	116
Модуль упругости при сжатии, МПа, не менее	5,6	7
Водопоглощение при кратковременном и частичном погружении, кг/м2, не более	1	0,19

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов А эфф 96 Бк/кг
Класс пожарной опасности строительных материалов ННО, негорючие (НГ)
Дата выдачи паспорта 06.05.17

Начальник лаборатории _____
(Подпись, печать)

Заключение: Продукция соответствует ТУ 5762-010-74182181-2012 нзм.1

Изделия минераловатные теплоизоляционные предназначены для использования в качестве теплоизоляционного слоя в строительных конструкциях и системах зданий и сооружений различного назначения.

Изделия должны храниться в крытых складских помещениях, защищающих продукт от попадания влаги.

Должна быть обеспечена защита изделий от воздействия атмосферных осадков.

Гарантийный срок хранения изделий не более 6 месяцев с момента их изготовления.

При истечении гарантийного срока хранения изделия могут быть использованы по назначению после предварительной проверки качества на соответствие требованиям настоящих технических условий.

Рисунок 3.5 – Теплоизоляционные характеристики сэндвич-панелей ООО «Компания Металл Профиль»

Соответствие требованиям нормативных документов – удовлетворение данному критерию позволяет формально использовать ЛСК на территории РФ в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений.

ЛСК на основе сэндвич-панелей ООО «Компания Металл Профиль» удовлетворяют требованиям ГОСТ 32603-2012 «Панели металлические трехслойные с утеплителем из минеральной ваты. Технические условия» [37].

В соответствии со СП 56.13330.2011 Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 [21]:

«...5.10 В помещениях категорий А и Б по взрывопожарной и пожарной опасности следует предусматривать наружные легкобрасываемые ограждающие конструкции. В качестве легкобрасываемых конструкций следует, как правило, использовать одинарное остекление окон и фонарей. При недостаточной площади остекления допускается в качестве легкобрасываемых конструкций использовать конструкции покрытий с кровлей из стальных, алюминиевых, хризолитцементных и битумных волнистых листов, из гибкой черепицы, металлочерепицы, хризолитцементных и сланцевых плиток и **эффективного негорючего утеплителя**. Площадь легкобрасываемых конструкций следует определять расчетом. При отсутствии расчетных данных площадь легкобрасываемых конструкций должна составлять не менее $0,05 \text{ м}^2$ на 1 м^3 объема помещения категории А и не менее $0,03 \text{ м}^2$ - помещения категории Б».

Примечания

1 Оконное стекло относится к легкобрасываемым конструкциям при толщине 3, 4 и 5 мм и площади не менее (соответственно) 0,8, 1 и 1,5 м². Армированное стекло, стеклопакеты, триплекс, сталинит и поликарбонат к легкобрасываемым конструкциям не относятся.

2 Рулонный ковер на участках легкобрасываемых конструкций покрытия следует разрезать на карты площадью не более 180 м² каждая.

3 Расчетная нагрузка от массы легкобрасываемых конструкций покрытия должна составлять не более 0,7 кПа.

Таким образом, ЛСК на основе сэндвич-панелей ООО «Компания Металл Профиль» удовлетворяют всем требованиям СП 56.13330.2011:

- являются эффективным негорючим утеплителем;
- площадь ЛСК возможно определить расчетом (с помощью методики, изложенной в разделе 2 настоящего отчета);
- избыточное давление вскрытия ЛСК (0,7 кПа) можно обеспечить с помощью предлагаемых узлов крепления сэндвич панелей.

Вывод: Анализ технических особенностей ЛСК на основе сэндвич-панелей ООО «Компания Металл Профиль» показал, что они удовлетворяют всем критериям, позволяющим положительно оценить возможность применения конструкций в качестве ЛСК:

- соответствуют требованиям нормативных документов РФ: ГОСТ 32603-2012 «Панели металлические трехслойные с утеплителем из минеральной ваты. Технические условия»; СП 56.13330.2011 Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001;

- выполняют функцию теплоизоляции взрывоопасного помещения;
- способны обеспечить безопасность конструкции для людей и объектов, находящихся снаружи здания;
- обладают низкой инерционностью;
- позволяют настроить требуемое значение избыточного давления вскрытия.

Соответствие критериям показывает способность ЛСК обеспечить неразрушающие нагрузки при аварийном взрыве газопаропылевоздушных смесей.

В связи с этим, специалисты НТЦ «Взрывоустойчивость» МГСУ пришли к выводу о целесообразности и эффективности использования конструкции на основе сэндвич-панелей ООО «Компания Металл Профиль» в качестве ЛСК для обеспечения взрывоустойчивости зданий и сооружений категории А и Б различного типа и назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий отчет содержит общие положения, относящиеся к прогнозированию взрывных нагрузок в помещениях, оборудованных ЛСК, и методическое пособие для расчета необходимой площади легкобрасываемых конструкций и количества креплений, обеспечивающих безопасные нагрузки при аварийных взрывах, с учетом объемно-планировочных решений зданий, типа взрывоопасного вещества, характеристик сэндвич-панелей и избыточного давления вскрытия ЛСК.

В отчете обосновывается возможность применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций. Определены монтажные схемы и количество креплений панелей, обеспечивающих безопасные нагрузки в помещении при аварийном взрыве.

На основании выполненных работ выдано экспертное заключение о возможности применения стеновых трехслойных сэндвич-панелей производства ООО «Компания Металл профиль» в качестве легкобрасываемых конструкций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комаров А.А., Шлег А.М. Прогнозирование последствий аварийных взрывов в промышленных цехах. Международный симпозиум «Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки специалистов к действиям в чрезвычайных условиях». Тезисы докладов. Секция 4. «Научные основы защиты человека от катастроф». 2 июня 1999г. ИМАШ РАН. С.39.
2. Адушкин В.В., Когарко С.М., Лямин А.Г. – Расчет безопасных расстояний при газовом взрыве в атмосфере. В сборнике Взрывное дело. №75/32, М., Недра, 1975.
3. Абросимов А.А., Комаров А.А. Мероприятия, обеспечивающие безопасные нагрузки при аварийных взрывах в зданиях со взрывоопасными технологиями. «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», №4, 2002г. С.48-51.
4. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М. МГСУ. 2001. -460с.
5. Шлег А.М. Определение параметров легкобрасываемых конструкций. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. МГСУ. 2002. -201с.
6. Казеннов В.В. Динамические процессы дефлаграционного горения во взрывоопасных зданиях и помещениях. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М. ВНИИПО. 1997. 426с.
7. Федотов В.Н. Основные факторы, определяющие нагрузки на строительные конструкции при аварийных взрывах газовых смесей.- Дисс. к.т.н.- М.- МИСИ им. В.В. Куйбышева.- 1988.-147с.
8. Комаров А.А. Научные основы нормативной базы по обеспечению взрывоустойчивости объектов. Материалы конференции, посвященной 80-летию МГСУ, 2001г.
9. Комаров А.А., И.Ю. Варламова. Определение степени взрывоустойчивости зданий при внутреннем взрыве. Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции «Пожарная безопасность - история, состояние, перспективы», МВД, ВНИИПО, М., 1997г. Стр.200-202.
10. Мишуев А.А., Комаров А.А., Д.З. Хуснутдинов. Общие закономерности развития аварийных взрывов и методы снижения взрывных нагрузок до безопасного уровня. Журнал «Пожаровзрывобезопасность», т.10, №6, 2001г. С.8-19.
11. Разработка методов оценки безопасности и обеспечения комплексной защиты критически важных объектов, населения и территорий г.Москвы, прилегающих к техногенно-, пожаро- и взрывоопасным объектам. Отчет по этапу 2 договора № 5-БЗ/04 от 05.04.2004г.

12. Комаров А.А. Анализ последствий аварийного взрыва природного газа в жилом доме. Журнал «Пожаровзрывобезопасность». т.8, №4, 1999г. С.49-53.
13. Комаров А.А., Г.В.Чиликина Условия формирования взрывоопасных облаков в газифицированных жилых помещениях. Журнал «Пожаровзрывобезопасность», т.11, №4, 2002г. С.24-28.
14. Комаров А.А. Расчет газодинамических характеристик потоков при аварийных дефлаграционных взрывах на наружных установках. Журнал «Пожаровзрывобезопасность», т.11, №5, 2002г. с.15-18.
15. Комаров А.А. Обеспечение защиты человека при аварийных взрывах. Международный симпозиум «Человек и катастрофы: проблемы обучения новым технологиям и подготовки специалистов к действиям в чрезвычайных условиях». Тезисы докладов. Секция 4. «Научные основы защиты человека от катастроф». 2 июня 1999г. ИМАШ РАН. С.40-41.
16. Мишуев А.В., Казеннов В.В., Комаров А.А. Моделирование динамических нагрузок, действующих на строительные конструкции при аварийном взрыве газоздушных смесей внутри здания. Пожаровзрывобезопасность. 1996. т.5. №1. С.34-40.
17. Комаров А.А. Анализ нормативно-методической базы по прогнозированию последствий аварийных взрывов на территориях энергоемких объектов. Научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». 23 октября 2002г. Москва. Сборник докладов. с.49-50.
18. Мишуев А.В., Комаров А.А., Хуснутдинов Д.З. Общие закономерности развития аварийных взрывов и методы снижения взрывных нагрузок до безопасного уровня. // Пожаровзрывобезопасность. т.10. №6. 2001. С.8-19.
19. Мишуев А.А., Комаров А.А. Динамические нагрузки при аварийных взрывах газопаровоздушных смесей в зданиях. «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений», №3, 2001г. С.49-52.
20. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Динамический расчет железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1974. 219с.
21. СП 56.13330.2011 «Производственные здания».
22. Полетаев Н.Л. Эмпирическая оценка турбулентной скорости выгорания. Ж. Пожаровзрывобезопасность. №1, 1998, с.19-23.
23. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М. Издательство Ф-М. 1960. С.715.
24. Турбулентное смешивание газовых струй. Под ред. Абрамовича Г.Н. М. Наука. 1994. С.272
25. Семенов Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов. УФН. 1940. т.24, вып.4. - С. 433-486.
26. Легкосбрасываемые конструкции стен из трехслойных сэндвич-панелей «Металл-Профиль». Альбом технических решений. М.: Металл профиль, 2016 г.

27. Трехслойные сэндвич-панели. Технический каталог. М.: Металл профиль, 2015 г.
28. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве. // Под ред. Н.А. Стрельчука. - М.: Стройиздат, 1970.- 127 с.
29. НПБ 105-03 «Определение категорий наружных установок по пожарной опасности». - М.: МЧС РФ, 2003 г.
30. Расторгуев Б.С. Методические указания по проектированию новых и обследованию существующих строительных конструкций зданий взрывоопасных производств (1 редакция) - М., 1996. 227
31. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. (Дополнения. Разд.10. Прогибы и перемещения).
32. СНиП 2.03.01-84 Бетонные и железобетонные конструкции. - М., 1985. 245
33. СНиП 2.09.04-87* «Административные и бытовые здания».
34. СНиП 2.11.03-93 «Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы».
35. СНиП II-89-80* «Генеральные планы промышленных предприятий».
36. Стрельчук Н.А., Орлов Г.Г. Определение площади вышибных конструкций в зданиях взрывоопасных производств. Промышленное строительство. 1969. №6. С.19-22.
37. ГОСТ 32603-2012 «Панели металлические трехслойные с утеплителем из минеральной ваты. Технические условия»