

*А. В. Васильченко, к.т.н., доцент, доц. каф., НУГЗУ,
А. В. Рубан, ст. преподаватель каф., НУГЗУ,
Т. А. Луценко, к.гос.упр., ст. преподаватель каф., НУГЗУ,
А. В. Анацкая, ст. преподаватель каф., ДНАСА*

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОГО КОЛИЧЕСТВА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО СОХРАНЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА ПРИ ВЗРЫВЕ

(представлено д.т.н. Басмановым А. Е.)

Предложена методика оценки безопасного количества взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества, не приводящего при аварийном взрыве и последующем пожаре к критическому снижению огнестойкости деформированных конструкций металлического каркаса. Методика основывается на оценке стойкости ближайших к эпицентру взрыва конструкций металлического каркаса по параметрам ударной волны, соответствующей нижней границе зоны сильных разрушений, и принятия для них значений коэффициента понижения напряжения при внецентренном продольном изгибе (для вертикальных конструкций) и относительных прогибов (для изгибаемых конструкций), близких к предельным. Это позволяет: оценить безопасное количество взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества в технологическом процессе; проверить соответствие параметров конструкций металлического каркаса промышленного здания требованиям сохранения огнестойкости при аварийном взрыве; обосновать требуемое усиление конструкций каркаса, если количество взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества в технологическом процессе превышает расчетное.

Ключевые слова: огнестойкость, критическая температура, взрывчатое вещество, металлический каркас.

Постановка проблемы. К потенциально опасным объектам и объектам повышенной опасности, в которых обращаются или хранятся взрывчатые или легковоспламеняющиеся вещества должны предъявляться повышенные требования безопасности. Это связано с повышенной вероятностью взрывов и пожаров на этих объектах, которые регулярно происходят, несмотря на профилактические мероприятия.

Поскольку здания современных потенциально опасных объектов и объектов повышенной опасности представляют собой в основном каркасные конструкции, то одной из важных задач является обеспечение механической устойчивости, как отдельных элементов, так и совокупного каркаса при возможных аварийных ситуациях, например взрыве и пожаре.

При проектировании каркасных зданий потенциально опасных объектов и объектов повышенной опасности учитываются противопожарные требования к конструкциям. Это особенно важно для

конструкций металлического каркаса, как наименее огнестойких. Существующие методы расчета позволяют оценить огнестойкость конструкций металлического каркаса с огнезащитным покрытием [1–4].

Однако при аварийном взрыве конструкции могут деформироваться, не теряя существенно несущей способности, но это приведет к изменению жесткости и огнестойкости всей системы.

Это обстоятельство нужно учитывать при проектировании объектов повышенной опасности, в которых обращаются или хранятся взрывчатые или легковоспламеняющиеся вещества. Конструкции следует рассчитывать таким образом, чтобы при аварийном взрыве они не только сохранили несущую способность, но и выдержали воздействие пожара, который может возникнуть после взрыва. Чтобы надежно прогнозировать поведение конструкций в этом случае нужно сопоставить их прочностные характеристики с опасным количеством взрывающегося вещества.

Поэтому возникает проблема выбора критериев для расчета количества взрывающегося вещества, не приводящего к быстрой потере огнестойкости конструкций или требований к конструкциям, повышающих их механическую и пожарную стойкость в условиях технологического процесса с опасностью аварийного взрыва.

Анализ последних исследований и публикаций. Металлический каркас здания представляет собой систему несущих рам с шарнирным и/или жестким соединением элементов. Жесткость каркаса обеспечивается связевыми конструкциями.

При эксплуатации детали каркаса испытывают механические воздействия в виде постоянной нагрузки от других деталей и конструкций здания, а также временных статических и динамических воздействий от грузов, механизмов, ветра, технологических операций.

Проектирование промышленных зданий осуществляется так, чтобы напряжения от этих прогнозируемых воздействий не вызывали необратимых деформаций, выходящих за допустимые пределы.

Исследование механизмов формирования напряженно-деформированного состояния элементов каркаса для обеспечения устойчивости зданий потенциально опасных объектов и объектов повышенной опасности проводят методом исключения прогрессивного обрушения несущих конструкций [5–10]. Важным дополнением к этому методу является исследование влияния пожара на строительные конструкции после ударных воздействий [11–15].

В [16] было показано, что при аварийном взрыве детали каркаса, подвергшиеся необратимым деформациям и сохранившие несущую способность, значительно теряют в огнестойкости, что может вызвать их преждевременное разрушение при последующем после взрыва пожаре.

Поведение рамы при механическом воздействии отличается от поведения отдельных деталей, т.к. необходимо дополнительно учитывать взаимодействие составляющих ее деталей и жесткость рамы. С этой точки зрения представляет интерес изучение комбинированного воздействия

«взрыв-пожар» на металлический каркас здания. Причем, оценку комбинированного воздействия «взрыв-пожар» необходимо проводить на стадии проектирования объекта для определения соответствия параметров каркаса и допустимого количества взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества, не вызывающих опасных деформаций каркаса, способных значительно снизить его огнестойкость.

Постановка задачи и её решение. Задачей работы является разработка методики оценки безопасного количества взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества, не приводящего при аварийном взрыве и последующем пожаре на потенциально опасных объектах или объектах повышенной опасности к критическому снижению огнестойкости деформированных конструкций металлического каркаса.

В каркасных зданиях потенциально опасных объектов и объектов повышенной опасности каркас представляет собой систему рам, состоящую из колонн, стропильных конструкций покрытия и связей.

При анализе стойкости каркаса здания в нормальных условиях и при пожаре используются известные методики [11, 12, 17], заключающиеся в следующей последовательности действий:

1. Определение для конструкций каркаса при нормальных условиях механических и геометрических параметров, обеспечивающих несущую способность (предельных нагрузок, критических эксцентриситетов и прогибов, соответствующих предельным нагрузкам, жесткости, частоты собственных колебаний).

2. Определение критических температур конструкций каркаса и расчет пределов их огнестойкости.

3. Оценка механической стойкости и огнестойкости конструкций каркаса на основе сопоставления расчетных значений с нормативными.

Аварийный взрыв может привести к деформациям конструкций каркаса различной тяжести в зависимости от их удаленности от места взрыва. Это в разной степени влечет изменение геометрических параметров конструкций каркаса, а значит – жесткости, частоты собственных колебаний и критических температур, что делает часть конструкций более уязвимыми в случае возникновения пожара, снижая их огнестойкость.

При аварийном взрыве конденсированного взрывчатого вещества или газовоздушной смеси конструкции рам могут подвергаться деформациям, обусловленным воздействием воздушной и сейсмической ударной волны.

Для того чтобы оценить количество конденсированного взрывчатого вещества или газовоздушной смеси, не приводящие при взрыве и последующем пожаре к потере несущей способности и критическому снижению огнестойкости деформированной конструкции предлагается следующая методика в виде последовательности действий.

1. Определение критических температур конструкций каркаса, исходя из требований огнестойкости.

2. Определение коэффициентов снижения несущей способности при повышении температуры, соответствующих критическим температурам конструкций.

3. Определение коэффициентов продольного изгиба для вертикальных элементов и прогибов для изгибаемых элементов.

4. Определение параметров ударной волны (избыточное давление, скоростной напор), создающих рассчитанные деформации.

5. Определение условий возникновения параметров ударной волны (количество конденсированного взрывчатого вещества или газовой смеси), безопасных для геометрии каркаса здания.

Предложенная методика реализуется при известных значениях геометрических и механических характеристик металлических конструкций, таких как их размеры, формы сечений, нагрузки, предельные сопротивления и модули упругости материалов, и др.

Критическую температуру $t_{кр}$ незащищенной металлической конструкции для требуемого предела огнестойкости $\tau_{кр}$, зная параметры ее сечения (т.е. приведенную толщину $\delta_{пр}$), можно найти из графика зависимости температуры незащищенных металлических деталей от времени прогрева и их приведенной толщины. В случае, если металлическая конструкция имеет огнезащиту, ее критическую температуру можно найти по методу [3, 4].

Коэффициент снижения несущей способности при повышении температуры γ_T находится таблично по рассчитанной критической температуре.

Предположив, что при взрыве металлическая колонна деформируется и представляет собой сжато-изогнутый стержень с эксцентриситетом $e_{ост}$, можно оценить коэффициенты понижения напряжения при внецентренном продольном изгибе φ_B согласно [16, 18] из соотношения:

$$\varphi_B = \frac{N}{\gamma_T A_s R_s \gamma_c}, \quad (1)$$

где N – расчетная нагрузка на колонну; A_s – площадь сечения колонны; R_s – предел сопротивления колонны; γ_c – коэффициент условий работы.

Для изгибаемых элементов относительный прогиб f/l можно найти из соотношения:

$$\frac{f}{l} = \frac{M_n l_1}{10 \cdot E \cdot I}, \quad (2)$$

где M_n – изгибающий момент от нормативной нагрузки; l_1 – приведенная длина изгибаемого элемента; E – модуль упругости стали; I – момент инерции сечения.

Логично принять, что устойчивость каркаса будет достаточна, если деформация ближайших к месту взрыва элементов не будет превышать допустимую (или, в крайнем случае, незначительно превышать). Для вертикальных несущих металлических элементов это возможно при φ_B близком, но не равном 1, а для изгибаемых элементов – при относительном прогибе $f/l \approx 1/250$.

Также если в качестве критериальной оценки принять, что эти значения при взрыве должны соответствовать нижней границе зоны сильных разрушений, то по таблице повреждений строительных объектов можно оценить величину избыточного давления на фронте ударной волны ΔP_{Φ} в местах расположения ближайших к эпицентру взрыва элементов каркаса (для промышленных зданий со стальным каркасом $\Delta P_{\Phi} = 20 \dots 30$ кПа).

По величине избыточного давления на фронте ударной волны можно оценить массу конденсированного взрывчатого вещества, исходя из эмпирической формулы Садовского [19]:

$$\Delta P_{\Phi} = \frac{84}{R_{\text{ГР}}} + \frac{270}{R_{\text{ГР}}^2} + \frac{700}{R_{\text{ГР}}^3}, \quad (3)$$

где $R_{\text{ГР}}$ – приведенный радиус взрыва:

$$R_{\text{ГР}} = \frac{r}{\sqrt[3]{M_T}}, \quad (4)$$

где r – расстояние до эпицентра взрыва; M_T – тротиловый эквивалент взрывчатого вещества.

Рассчитать избыточное давление на фронте ударной волны при разгерметизации емкости и взрыве газозвушной смеси можно из полу-эмпирической формулы [19]:

$$\lg P_{\text{ГР}} = 0,65 - 2,18 \lg R_{\text{ГР}} + 0,52 (\lg R_{\text{ГР}})^2, \quad (5)$$

в которой $P_{\text{ГР}}$ – приведенное давление на фронте ударной волны, равное:

$$P_{\text{ГР}} = \frac{\Delta P_{\Phi}}{P_0}, \quad (6)$$

где P_0 – атмосферное давление; $R_{\text{ГР}}$ рассчитывается как в (4), а M_T находят из соотношения:

$$M_T = 2\delta M_{\text{ХР}} \frac{Q}{Q_T}, \quad (7)$$

где $M_{\text{ХР}}$ – масса вещества, хранившегося в емкости; δ – коэффициент, зависящий от способа хранения вещества; Q – теплота, выделяющаяся при взрыве вещества; Q_T – теплота взрыва тротила.

На основании предложенного метода для обеспечения требуемой огнестойкости можно, учитывая особенности технологического процесса, рассчитать параметры вертикальных и стропильных конструкций ме-

таллического каркаса промышленного здания, относящегося к потенциально опасным объектам или объектам повышенной опасности.

С другой стороны, можно сформулировать требования к технологическому процессу, в котором обращаются взрывчатые вещества и легковоспламеняющиеся вещества, если технологический процесс планируется размещать в существующем здании с металлическим каркасом. В этом случае также при необходимости можно обосновать требуемое усиление конструкций каркаса.

Выводы. Таким образом, предложена методика оценки безопасного количества взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества, не приводящего при аварийном взрыве и последующем пожаре к критическому снижению огнестойкости деформированных конструкций металлического каркаса.

Особенностью метода является оценка стойкости ближайших к эпицентру взрыва конструкций металлического каркаса по параметрам ударной волны, соответствующей нижней границе зоны сильных разрушений, и принятия для них значений коэффициента понижения напряжения при внецентренном продольном изгибе (для вертикальных конструкций) и относительных прогибов (для изгибаемых конструкций) близких к предельным. Это позволяет:

во-первых, оценить безопасное количество взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества в технологическом процессе;

во-вторых, проверить соответствие параметров конструкций металлического каркаса промышленного здания требованиям сохранения огнестойкости при аварийном взрыве;

в-третьих, обосновать требуемое усиление конструкций каркаса, если количество взрывчатого вещества или легковоспламеняющегося вещества в технологическом процессе превышает расчетное.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голоднов О. І., Антошина Т. В., Отрош Ю. А. Про необхідність розрахунку будівель зі сталевим каркасом на температурні впливи // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. 2017. № 20. С. 65–84.

2. Otrosh Y., Kovalov A., Semkiv O., Rudeshko I., Diven V. Methodology remaining lifetime determination of the building structures // MATEC Web of Conferences, 2018, 230, 02023. URL : <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002023>

3. Ковальов А. І., Зобенко Н. В., Отрош Ю. А., Хмиров І. М., Данілін О. М. Точність визначення параметрів покриттів сталевих конструкцій при вуглеводневому режимі пожежі // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. 2018. Вып. 43. С. 73–79.

4. Vasilchenko A., Otrosh Y., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent

coating // MATEC Web of Conferences, 2018, 230, 02036. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002036>

5. Еремеев П. Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях // Стр. мех. и расч. соор. 2006. № 2. С. 65–72.

6. Григорьев С. М. Обеспечение устойчивости к прогрессирующему обрушению каркасных многоэтажных зданий // Строительные материалы оборудование и технологии XXI века. 2010. № 6. С. 40–41.

7. UFC 4-023-03. Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse Text. Department of Defense USA, 2010. 176 p.

8. Burnett E.F.P. The avoidance of progressive collapse: Regulatory approaches to the problem. Gaithersburg: National bureau of standards, MD 20899. 1975.

9. Brian I. Song, Halil Sezen. Experimental and analytical progressive collapse assessment of a steel frame building // Engineering Structures. 2013. Vol. 56. P. 664–672.

10. G. Kaewkulchai, E. B. Williamson. Modeling the Impact of Failed Members for Progressive Collapse Analysis of Frame Structures // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2006. Vol. 20. Iss. 4.

11. Spencer E. Q., Shalva M. M. Fire resistance of a damaged steel building frame designed to resist progressive collapse // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2012. Vol. 26(4). P. 402–409.

12. Chen H., Liew J. Y. Explosion and fire analysis of steel frames using mixed element approach // Journal of Engineering Mechanics. 2005. 131(6). P. 606–616.

13. Ройтман В. М. Стойкость зданий и сооружений против прогрессирующего обрушения при комбинированных особых воздействиях участием пожара // Вестник МГСУ. М.: МГСУ, 2009. Спец. вып. № 2. С. 37–59.

14. Roytman V. V., Pasman H. J., Lukashevich I. E. The Concept of Evaluation of Building Resistance against combined hazardous Effects «Impact-Explosion-Fire» after Aircraft Crash // Fire and Explosion Hazards: Proceedings of the Fourth International Seminar. 2003. Londonderry, NI, UK. P. 283–293.

15. Теличенко В. И., Ройтман В. М. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара – базовый элемент системы комплексной безопасности. Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации // Мат-лы I Национального конгресса «Комплексная безопасность в строительстве-2010», ВВЦ, 18–21 мая 2010 г.: Москва, ВВЦ. Сб. научн. трудов. Вып. 9. М., 2010 г.

16. Vasilchenko A., Doronin E., Ivanov B., Konoval V. Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure "explosion-fire" // Materials Science Forum. 2019. Vol. 968. P. 288–293.

17. Shnal T., Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S. Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions // Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. P. 107–116.

18. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов. Под общей редакцией А. П. Беленя. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.

19. Селиванов В. В., Соловьев В. С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Изд-во МГУ, 1990. 256 с.

О. В. Васильченко, А. В. Рубан, Т. О. Луценко, А. В. Анацька

Оцінка безпечної кількості вибухових речовин, що забезпечують збереження вогнестійкості металевго каркасу під час вибуху

Запропоновано методика оцінки безпечного кількості вибухової речовини або легкозаймистої речовини, що не призводить при аварійному вибуху і подальший пожежі до критичного зниження вогнестійкості деформованих конструкцій металевго каркаса. Методика ґрунтується на оцінці стійкості найближчих до епіцентру вибуху конструкцій металевго каркаса за параметрами ударної хвилі, що відповідає нижній межі зони сильних руйнувань, і прийняття для них значень коефіцієнта зниження напруги при відцентровому поздовжньому згині (для вертикальних конструкцій) і відносних прогинів (для згинальних конструкцій) близьких до граничних. Це дозволяє: оцінити безпечну кількість вибухової речовини або легкозаймистої речовини в технологічному процесі; перевірити відповідність параметрів конструкцій металевго каркаса промислової будівлі вимогам збереження вогнестійкості при аварійному вибуху; обґрунтувати потрібне посилення конструкцій каркаса, якщо кількість вибухової речовини або легкозаймистої речовини в технологічному процесі перевищує розрахункову.

Ключові слова: вогнестійкість, критична температура, вибухова речовина, металевий каркас.

A. Vasilchenko, A. Ruban, T. Lutsenko, A. Anatskaya

Evaluation of a safe quantity of explosives providing the retention of the fire resistance of the metal frame in explosion

A method for assessing the safe amount of an explosive or a flammable substance that does not lead to a critical decrease in the fire resistance of deformed metal frame structures in an emergency explosion and subsequent fire is proposed. A feature of the method is assessment of the resistance of structures of the metal frame closest to the epicenter of the explosion by parameters of the shock wave corresponding to the lower boundary of the zone of severe destructions, and the adoption for them of the values of the stress reduction coefficient for eccentric lateral deflection (for vertical structures) and relative deflections (for bending structures) close to the limit. This allows: to estimate the safe amount of an explosive or flammable substance in the technological process; check the compliance of parameters of the structures of metal frame of an industrial building with the requirements for maintaining fire resistance in an emergency explosion; justify the required reinforcement of the frame structures if the amount of explosive or flammable substance in the technological process exceeds the calculated one.

Keywords: fire resistance, critical temperature, explosive, metal frame.