

*А.В. Васильченко, к.т.н., доцент, НУГЗУ,
Т.М. Ковалевская, ст. преподаватель, НУГЗУ*

ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ «ВЗРЫВ-ПОЖАР»

(представлено д.т.н. Поздеевым С.В.)

Расчеты на примере стальной колонны показали, что при комбинированном воздействии взрыва, вызывающего деформацию, и последующего пожара даже без повреждения огнезащитного покрытия происходит значительное снижение предела огнестойкости конструкции за счет уменьшения критической температуры. Показано, что на основании методики предложенной в данной работе для объектов повышенной опасности можно прогнозировать устойчивость стальных колонн при аварийных взрывах с последующим пожаром, а также рекомендовать величины рабочих нагрузок и параметры огнезащитных покрытий, обеспечивающих необходимую устойчивость.

Ключевые слова: стальные конструкции, предел огнестойкости, критическая температура, огнезащитное покрытие, вспучивающееся покрытие.

Постановка проблемы. Объекты повышенной опасности (ОПО) проектируются с учетом эпизодических (особых) воздействий, отражающих специфику производственных процессов [1–3]. А в случае производственного процесса, не исключая взрыва, строительные конструкции рассчитываются на воздействие ударной волны.

С другой стороны, пожарно-технические характеристики строительных конструкций ОПО должны соответствовать требуемой степени огнестойкости. При этом рассчитываются пределы огнестойкости и распространения огня по конструкциям без учета их механических повреждений.

Известно, что аварийные взрывы кроме повреждения строительных конструкций могут вызывать пожары [4]. То есть, следует ожидать, что деформации несущих строительных конструкций при взрыве повлияют на их несущую способность и, следовательно, на предел огнестойкости.

Проблема состоит в том, насколько сильно влияет деформация при взрыве строительной конструкции на её предел огнестойкости, нужно ли это учитывать при проверке степени огнестойкости здания и возможна ли дальнейшая эксплуатация здания после подобного комбинированного воздействия.

Анализ последних исследований и публикаций. Комбинированным особым воздействием (СНЕ) принято называть чрезвычайную ситуацию, связанную с возникновением и развитием нескольких видов особых воздействий на объект. Обычно имеются в виду такие техногенные воздействия как удар (I), взрыв (E), пожар (F).

Вопросам поведения конструкций зданий при комбинированных воздействиях СНЕ IEF посвящены работы [5–7]. В них рассматриваются инженерные аспекты аварий высотных гражданских зданий и утверждается, что обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара является базовым элементом системы обеспечения комплексной безопасности объектов.

Поскольку на объектах повышенной опасности аварийные взрывы, сопровождающиеся возникающими после них пожарами (СНЕ EF), весьма вероятны, то изучение особенностей поведения строительных конструкций в этих условиях является актуальным.

Значительная часть промышленных зданий представляет собой стальные каркасные конструкции. Поэтому имеет смысл изучить поведение именно таких конструкций при СНЕ EF. Известны работы, посвященные этим исследованиям [8, 9]. Однако в них изучаются, в основном, причины деградации конструкций и не уделяется достаточно внимания условиям сохранения несущей способности при СНЕ EF. В данной работе рассматривается комбинированное воздействие взрыва и последующего пожара на примере стальной центрально сжатой колонны не только с точки зрения условий сохранения ее устойчивости, но и возможности дальнейшей эксплуатации.

Постановка задачи и ее решение. Задачей работы является расчет критических температур и пределов огнестойкости стальной колонны при деформациях, не вызывающих потери ее устойчивости.

Такую колонну можно представить схематично в виде центрально сжатого шарнирно закрепленного на концах стержня. При взрыве действие на стержень ударной волны можно представить как кратковременный изгибающий момент (КИМ), вызывающий деформацию изгиба в средней части стержня.

При слабом воздействии, когда достигается только I стадия напряженно-деформированного состояния (НДС), стержень после КИМ полностью восстанавливает свою форму, и расчет на огнестойкость производится как для центрально сжатого стержня.

При более сильном воздействии КИМ, когда достигается II стадия НДС, в стержне после КИМ сохраняется остаточная деформация (изгиб) $e_{ост}$. Стержень в этом случае следует рассматривать как сжато-изогнутый с эксцентриситетом $e_{ост}$ [10]. Устойчивость стержня (его несущая способность) будет зависеть от параметров сечения, механических свойств материала и эксцентриситета. При пожаре, возникшем после взрыва, огнестойкость стержня будет определяться соотношением рабочей нагрузки N_p и несущей способности $N_{нс}$, параметрами сечения и условиями обогрева [11].

Основная опасность при нагреве стальных строительных конструкций состоит в значительных деформациях и быстрой потере ими прочности, начиная уже с 350 °С. Поэтому при возведении зданий для защиты стальных конструкций применяют различные способы

огнезащиты, обеспечивающие необходимую степень огнестойкости сооружения.

Однако при аварийном взрыве огнезащита может быть повреждена. Гарантировать сохранность или повреждение огнезащиты при взрыве невозможно. Поэтому оценивать огнестойкость стальных конструкций целесообразно не по пределу огнестойкости, а по их критической температуре.

В качестве стальной конструкции рассматривается одноопорная центрально сжатая колонна, обогреваемая в случае пожара с 4-х сторон. Колонна представляет собой трубу высотой $H = 8$ м, диаметром $d = 426$ мм, с толщиной стенки $z = 12$ мм. Площадь сечения $A_K = 156$ см², радиус инерции $r = 14,7$ см. Предел сопротивления материала колонны $R_S = 21$ кН·см⁻².

На основании представленных данных для центрально сжатой колонны по методам, рекомендованным в [10, 11] можно найти значение коэффициента продольного изгиба φ и определить для нее критические температуры при различных рабочих нагрузках N_p , вычислив коэффициент снижения несущей способности

$$\gamma_T = \frac{N_p}{\varphi A_K R_S \gamma_c}, \quad (1)$$

где γ_c – коэффициент условий работы.

После деформации колонны в результате взрыва, когда она рассматривается как сжато-изогнутый стержень с эксцентриситетом e_{ocm} , можно по [10] вычислить условную гибкость

$$\lambda_e = \frac{H}{r} \sqrt{\frac{R_s}{E}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала, кН·см⁻².

Далее, для различных значений эксцентриситета e_{ocm} вычисляются величины приведенных эксцентриситетов

$$\mu = \eta e_{ocm} \frac{A}{W}, \quad (3)$$

где η – коэффициент формы сечения; W – момент сопротивления сечения, см³;

Затем по [10] можно найти коэффициенты понижения напряжения при внецентренном продольном изгибе φ_B . Подставив эти значения в (1) и вычислив коэффициенты снижения несущей способности γ_T , можно по [11] определить для значений эксцентриситета e_{ocm} критические тем-

пературы при различных рабочих нагрузках N_p .

Результаты вычислений приведены в виде графиков на рис. 1.

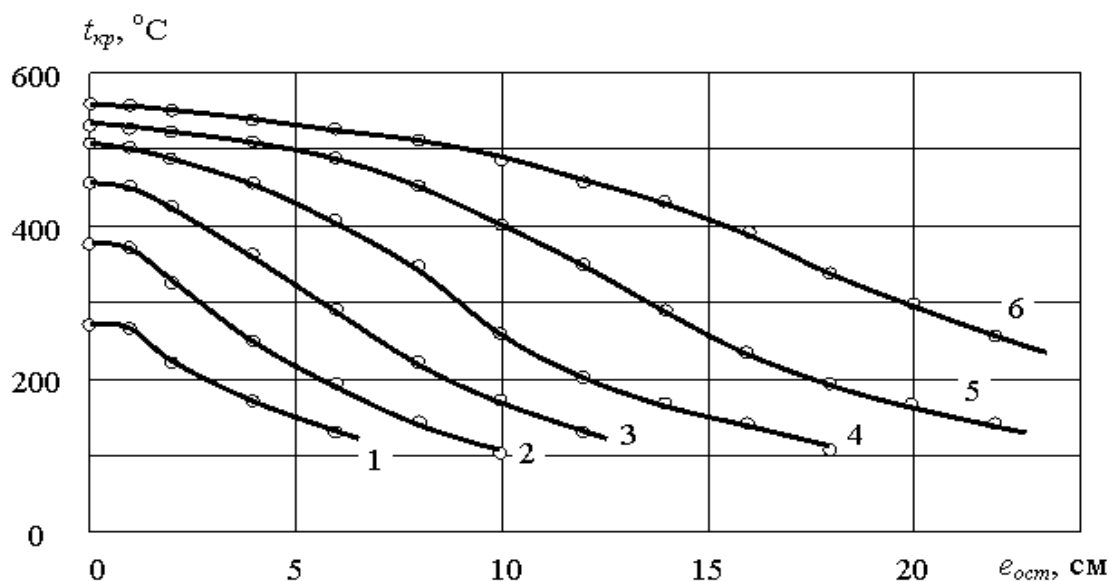


Рис. 1. Зависимости критической температуры стальной колонны от величины остаточного эксцентриситета (изгиба) при рабочих нагрузках N_p (кН): 1 – 2200 кН; 2 – 2000 кН; 3 – 1800 кН; 4 – 1600 кН; 5 – 1400 кН; 6 – 1200 кН

Приведенный пример показывает, что при взрыве деформация 8-метровой стальной колонны, которая не вызывает потери несущей способности, тем не менее, ведет к снижению ее критической температуры на 200-300 $^\circ\text{C}$. В зависимости от рабочей нагрузки критическая температура при прогибе 10-12 см может достигать от 100 до 200 $^\circ\text{C}$. По результатам расчетов предел огнестойкости незащищенной стальной колонны даже при минимальной нагрузке не более R15, что не соответствует требуемой степени огнестойкости. Поэтому, не говоря о случае повреждения огнезащитного покрытия, следует заметить, что обычно такие покрытия рассчитываются на достижение стальной колонной критической температуры 450-500 $^\circ\text{C}$. Вспучивающиеся покрытия начинают работать с температуры 140 $^\circ\text{C}$ [12], когда колонна уже может находиться на грани потери несущей способности. То есть, деформация стальной колонны при взрыве даже без повреждения огнезащитного покрытия приведет к значительному снижению предела огнестойкости конструкции.

С другой стороны из таблицы видно, что на стадии проектирования ОПО можно рассчитать рабочую нагрузку на конструкции, для которой при условии сохранения огнезащитного покрытия при взрыве будет обеспечена необходимая устойчивость.

Выводы. Таким образом, на примере показано влияние остаточной деформации стальной колонны после аварийного взрыва на ее огнестойкость. Деформация колонны при взрыве ведет к снижению ее несущей способности и, следовательно, к снижению критической температуры и предела огнестойкости.

При деформации колонны снижается эффективность огнезащит-

ных покрытий, т.к. даже без их повреждения происходит снижение предела огнестойкости конструкции. Особенно это относится к вспучивающимся покрытиям.

На основании методики рассмотренной в данной работе для объектов повышенной опасности можно прогнозировать устойчивость стальных колонн при аварийных взрывах с последующим пожаром, а также рекомендовать величины рабочих нагрузок и параметры огнезащитных покрытий, обеспечивающих необходимую устойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kadri F. Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites: A Review of Methodologies and Software Tools / Farid Kadri E. Chatelet // *International Journal of Computers and Distributed Systems*.– 02 (III).– 2013.– P. 1-10.

2. IKhan F. An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries / Faisal IKhan, S.AAbbasi // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.– Volume 14.– Issue 4.– 2001.– P. 283-306.

3. Hope S. Methodologies for hazard analysis and risk assessment in the petroleum refining and storage industry / S. Hope, B. W. Eddershaw, L. Joanny and others // *Fire Technology*.– Volume 20.– Issue 3.– 1984.– P. 23-38.

4. Pettersson O. Practical need of scientific material models for structural fire design / Ove Pettersson // *Fire Safety Journal*.– Volume 13.– Issue 1.– 1988.– P. 1-8.

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

6. 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.

7. Васильченко А.В. Учет комбинированного воздействия взрыва и пожара на железобетонные изгибаемые конструкции / Васильченко А.В. // *Матеріали II Всеукраїнської наук.-практ. конференції "Проблеми цивільного захисту: управління, попередження, аварійно-рятувальні та спеціальні роботи"*. – Харків: НУЦЗУ, 2013. – С.150-152.

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

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

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

11. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре: Учебник / В.Н.Демехин, И.Л.Мосалков, Г.Ф.Плюснина и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 656 с.

12. Ройтман В.М. К вопросу об оценке долговечности огнезащитных покрытий / Ройтман В.М., Щербина С.В., Габдулин Р.Ш. // Наука и безопасность. – № 4. – 2012.

Получено редколлегией 13.03.2018

О.В. Васильченко, Т.М. Ковалевська

Вогнестійкість сталеві колони при комбінованому впливі «вибух-пожежа»

Розрахунки на прикладі сталеві колони показали, що при комбінованому впливі вибуху, що викликає деформацію, і подальшої пожежі навіть без пошкодження вогнезахисного покриття відбувається значне зниження межі вогнестійкості конструкції за рахунок зменшення критичної температури. Показано, що на підставі методики запропонованої в даній роботі для об'єктів підвищеної небезпеки можна прогнозувати стійкість сталевих колон при аварійних вибухах з наступною пожежею, а також рекомендувати величини робочих навантажень і параметри вогнезахисних покриттів, що забезпечують необхідну стійкість.

Ключові слова: сталеві конструкції, межа вогнестійкості, критична температура, вогнезахисне покриття, покриття, що спучується.

A. Vasilchenko, T. Kovalevskaya

Fire resistance of the steel column at the combined influence "explosion-fire"

Calculations on the example of a steel column have shown that at the combined impact of the explosion causing deformation and the subsequent fire even without damage of a fireproof covering there is a considerable decrease in a limit of fire resistance of a design due to reduction of critical temperature. Undesirability of use of the distending fireproof coverings for steel structures at threat of emergency explosions is explained. It is shown that on the basis of a technique offered in this work for objects of the increased danger it is possible to predict stability of steel columns at emergency explosions with the subsequent fire and also to recommend sizes of working loadings and parameters of the fireproof coverings providing necessary stability.

Keywords: steel structures, fire resistance limit, critical temperature, fireproof covering, distending covering.