

*А.В. Васильченко, к.т.н., доцент, доцент каф., НУГЗУ,
Т.М. Ковалевская, преподаватель, НУГЗУ,
О.А. Стельмах, к.т.н., доцент, зам. нач. центра, НУГЗУ,
В.А. Метелев, ст. преподаватель, НТУ «ХПИ»*

ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РЕБРИСТОЙ ПЛИТЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ «ВЗРЫВ-ПОЖАР»

(представлено д.т.н. Поздеевым С.В.)

Расчеты на примере железобетонной ребристой плиты показали, что происшедшее в результате взрыва из-за возникших трещин выключение из работы части сжатого слоя бетона сильно сказывается на снижении огнестойкости плиты. Показано, что на основании предложенной методики исследования поведения изгибаемых элементов при комбинированном воздействии "взрыв-пожар", можно учитывать необходимые параметры железобетонных ребристых плит при проектировании и эксплуатации конструкций объектов повышенной опасности. Также предложенная методика позволяет прогнозировать относительно безопасное количество взрывчатого вещества в технологическом процессе объекта повышенной опасности, не приводящее к катастрофическим последствиям.

Ключевые слова: железобетонная ребристая плита, комбинированное особое воздействие, критическая температура, предел огнестойкости, трещина.

Постановка проблемы. На многих объектах повышенной опасности (ОПО) осуществляются технологические процессы с веществами, способными при определенных условиях взрываться и вызывать пожар. Поэтому строительные конструкции таких объектов должны проектироваться с учетом опасности аварийных взрывов, а также соответствовать требуемой степени огнестойкости [1–4].

Промышленные здания, в которых располагаются ОПО, в основном относятся к каркасной конструктивной системе. Можно ожидать, что при взрыве и пожаре последствия для несущих конструкций каркаса и ограждающих конструкций будут различаться [4, 5]. Если несущие конструкции выдержат такое воздействие, то ограждающие конструкции, обладающие меньшим запасом прочности, но выбранные по принципу соответствия класса огнестойкости могут не выдержать комбинированного воздействия.

В современных каркасных зданиях с несущим стальным или железобетонным каркасом ограждающие конструкции выполняются из железобетона. Оценить огнестойкость изделий из этого материала не представляет большой сложности.

Проблемой, требующей решения, является оценивание влияния деформации ограждающих железобетонных конструкций и трещинообразования в результате аварийного взрыва на их огнестойкость.

Анализ последних исследований и публикаций. Среди публикаций последнего времени значительное место занимают работы, посвященные защите объектов от чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с комбинированными особыми воздействиями (СНЕ – от англ. Combined Hazardous Effect) с участием удара (I), взрыва (E), пожара (F). В них основное внимание уделяется методам оценки огнестойкости несущих конструкций, зависимости изменения их критической температуры от уровня нагружения, особенностям обеспечения безопасности людей в зданиях в условиях СНЕ IEF [6].

Тем же вопросам относительно ограждающих конструкций посвящено значительно меньше внимания, хотя с точки зрения обеспечения безопасности людей и предотвращения распространения пожара эти вопросы нельзя игнорировать [7].

В промышленных зданиях ОПО в качестве ограждающих конструкций покрытия часто и в большом количестве используют железобетонные ребристые плиты. Изучение их поведения при СНЕ EF может представлять интерес как для проектирования ОПО, так и для прогнозирования их состояния после чрезвычайных ситуаций [8].

В данной работе рассматривается комбинированное воздействие взрыва и последующего пожара на примере железобетонной ребристой плиты не только с точки зрения условий сохранения ее устойчивости, но и возможности дальнейшей эксплуатации.

Постановка задачи и ее решение. Задачей работы является оценка потери прочности, особенностей образования трещин, расчет критических температур арматуры и пределов огнестойкости железобетонной ребристой плиты при СНЕ EF.

При взрыве действие на плиту ударной волны можно представить как кратковременный изгибающий момент (КИМ), вызывающий деформацию изгиба, направленную вверх. Если плита надежно удерживается в местах крепления, то в верхней части плиты образуется растянутая зона бетона. При этом в бетоне развиваются пластические деформации и образуются трещины, глубина которых зависит от силы воздействия ударной волны. После взрыва плита возвращается в первоначальное положение, но образовавшиеся трещины выключают из работы слой бетона равный глубине трещин. Таким образом, после взрыва полезная толщина плиты уменьшится, что приведет к снижению несущей способности и вызовет увеличение коэффициента сопротивления рабочей арматуры. При пожаре это приведет к уменьшению критической температуры рабочей стальной арматуры и снижению предела огнестойкости плиты.

Исходя из вышесказанного, для исследования поведения железобетонной ребристой плиты при СНЕ EF необходимо:

- оценить давление, при котором нарушается крепление плиты ($p_{отр}$);
- проверить прочность плиты при обратном изгибе, когда давление ударной волны p не нарушает крепление плиты ($p < p_{отр}$);
- оценить трещинообразование на верхней грани плиты при обратном изгибе (при $p < p_{отр}$) [9];
- проверить при нормальных условиях прочность плиты с образовавшимися трещинами на верхней грани (при уменьшенной полезной толщине плиты h_0) [9];
- оценить коэффициент снижения сопротивления рабочей арматуры γ_{st} при уменьшенной полезной толщине плиты и критическую температуру рабочей арматуры $t_{кр}$ [10];
- оценить предел огнестойкости плиты $\tau_{кр}$ [11].

Для примера использования предложенного метода выбрана железобетонная ребристая плита со следующими параметрами: номинальные размеры плиты $6 \times 1,5 \times 0,45$ м, толщина полки $0,05$ м, средняя толщина продольного ребра $0,085$ м; коэффициент условий работы $\gamma_f = 0,9$; коэффициент надежности по назначению $\gamma_n = 0,95$; бетон класса В40 ($R_b = 22$ МПа); стальная арматура продольных ребер $2\text{Ø}18\text{Ат-V}$ ($A_{sp} = 5,09$ см²; $R_s = 680$ МПа); стальная арматура полки: сетка С1 3Вр-1-100/3Вр-1-100 ($A_s = 0,71/A_s = 0,71$ см², $R_s = 365$ МПа); сетка С2 4Вр-1-150/3Вр-1-250 ($A_s = 0,75/A_s = 0,28$ см²).

Расчетная равномерная нагрузка на плиту $23,2$ кН/м², расчетная равномерная нагрузка на полку плиты $21,275$ кН/м².

Плита приварена в четырех крайних точках по периметрам закладных деталей электродом Э46 с длиной шва по $25,5$ см и толщиной $1,0$ см.

При этих условиях усилие разрыва сварного шва составит $N_{кр} = 146000$ кН, т.е. для отрыва плиты потребуются давление $p_{он} = 18230$ кПа.

Проверка прочности полки ребристой плиты для обратного КИМ проводится с учетом упругого защемления полки в продольных ребрах и полезной толщины бетона, исчисляемой от арматурной сетки С1 до нижней грани полки:

$$M_n = \frac{p_{KM} b_n l_n^2}{48}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{M_n}{b_n h_{0nB}^2 R_b}, \quad (2)$$

где M_n – изгибающий момент полки при обратном изгибе; p_{KM} – давление при обратном изгибе; b_n – ширина полки между продольными ребрами в свету; l_n – длина полки между поперечными ребрами в свету; α – коэффициент высоты сжатой зоны бетона; h_{0nB} – полезная толщина бетона полки при обратном КИМ; R_b – нормативное сопротивление бетона.

Проверка прочности продольного ребра ребристой плиты при обратном КИМ проводится с учетом шарнирного опирания на опоры и полезной толщины бетона, исчисляемой оценочно от нейтральной оси до нижней грани ребра:

$$M_p = \frac{P_{\text{КМ}} b_p l^2}{8}, \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{M_p}{b_p h_{\text{орВ}}^2 R_b}, \quad (4)$$

где M_p – изгибающий момент продольного ребра в середине пролета при обратном изгибе; b_p – ширина плиты по эквивалентному сечению для сжатой зоны бетона; l – расчетный пролет плиты; $h_{\text{орВ}}$ – полезная толщина бетона по эквивалентному сечению при обратном КИМ.

Проверка прочности ребристой плиты в ее частях показывает, что полка и продольное ребро разрушаются при давлении ударной волны меньшем давления отрыва плиты. Поэтому в дальнейшем расчеты следует вести для двух случаев давления: когда конструкция выдерживает обратный КИМ без значительной пластической деформации и когда деформации обратного КИМ вызывают образование трещин.

Ширина раскрытия трещин $a_{\text{срс}}$ вычисляется по [9]:

$$a_{\text{срс}} = l_{\text{bs}} \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (5)$$

где l_{bs} – расстояние между смежными нормальными трещинами, $l_{\text{bs}} = 40$ см; $\varphi_1 = 1$, $\varphi_2 = 1$, $\varphi_3 = 1$ – коэффициенты, зависящие от длительности действия нагрузки, вида арматуры, вида нагрузки; E_s – модуль упругости, $E_s = 190000$ МПа; σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре:

$$\sigma_s = \frac{M_p}{z_s A_s}, \quad (6)$$

z_s – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне элемента, $z_s = 33,6$ см; A_s – площадь сечения арматуры в растянутой зоне, $A_s = 1,45$ см²; ψ – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами в бетоне

$$\psi = 1 - 0,8 \frac{M_{\text{срс}}}{M_p}, \quad (7)$$

M_{crc} – момент образования трещин

$$M_{\text{crc}} = R_{\text{btс}} W_{\text{pl}} + M_{\text{lm}}, \quad (8)$$

$R_{\text{btс}}$ – сопротивление бетона растяжению, $R_{\text{btс}} = 2,1$ МПа; W_{pl} – упруго-пластический момент сопротивления по растянутой зоне, $W_{\text{pl}} = 29845$ см³; M_{lm} – ядровый момент усилия обжатия, $M_{\text{lm}} = 47,8$ кН·м.

Оценочные расчеты по [9] показывают, что трещины шириной 1 см на верхней грани продольных ребер ребристой плиты образуются при давлении на фронте ударной волны порядка $\Delta p = 46$ кПа. Относительно безопасным для ребристой плиты будет давление $\Delta p = 4$ кПа, при котором не образуются трещины более 1 мм. Для промышленного здания ОПО с высотой этажа 9 м указанные давления достигаются при взрыве вещества с тротиловым эквивалентом 9 кг и 0,2 кг, соответственно.

Определить глубину образовавшихся трещин расчетными методами затруднительно. Можно предположить на основании наблюдений [12, 13], что при ширине трещин до 1 мм их глубина будет в пределах 1...2 см, а при ширине 1 см – в пределах 10...20 см.

При этих обстоятельствах проверка по I предельному состоянию показывает, что полка выдерживает рабочую нагрузку при глубине трещин не более 2,6 см, а продольное ребро – при глубине трещин не более 4,1 см.

В зависимости от глубины распространения трещин будет изменяться и предел огнестойкости плиты.

Пределы огнестойкости τ железобетонной ребристой плиты с трещинами различной глубины по верхней грани полки и продольных ребер оценивались с учетом несущей способности по методике [11]

$$\operatorname{erf} \frac{k\sqrt{a_b} + \delta}{2\sqrt{a_b}\tau} = \operatorname{erf} X_b = \frac{t_1 - t_{\text{crS}}}{t_1 - t_0}, \quad (9)$$

где k – коэффициент плотности бетона; a_b – коэффициент температуропроводности; δ – толщина защитного слоя бетона; t_1 – температура стандартного пожара, $t_1 = 1250$ °С; t_0 – начальная температура, $t_0 = 20$ °С; t_{crS} – критическая температура арматуры.

Определение критической температуры рабочей арматуры t_{crS} осуществлялось на основании расчета коэффициента снижения сопротивления стали

$$\gamma_{\text{st}} = \frac{M}{R_s \cdot A_s \cdot h_0 (1 - 0,5\xi)}, \quad (10)$$

где M – изгибающий момент от расчетной рабочей нагрузки на полку

или продольное ребро; R_s – нормативное сопротивление стали арматуры полки или продольного ребра; h_{0c} – полезная толщина бетона полки или продольного ребра по эквивалентному сечению с учетом образовавшихся трещин; ξ – коэффициент относительной высоты сжатой зоны бетона.

Результаты оценочных расчетов пределов огнестойкости частей железобетонной ребристой плиты после воздействия ударной волны взрыва показаны в табл. 1.

Табл. 1. Расчетный предел огнестойкости в зависимости от глубины трещин при воздействии ударной волны взрыва на железобетонной ребристой плиты

Части ребристой плиты	Давление ударной волны, Δp , кПа	Обратный КИМ, M_{KM} , кН·м	Ширина раскрытия трещины, $a_{срс}$, см	Расчетная глубина трещины, h_T , см	Расчетный предел огнестойкости, τ , мин
Полка	0	0	0	0	40
	4	25	0,1	2,5	10
Продольное ребро	0	0	0	0	30
	4	25	0,1	2,5	18
	10	50	0,2	4,5	10
	45	240	1,0	> 5	–

Предложенная методика исследования поведения железобетонной ребристой плиты при СНЕ EF позволила показать, что прочность сварного крепления ребристой плиты превышает ее прочность при обратном изгибе. Поэтому можно рассчитать силу взрыва, не разрушающего плиту, и исследовать ее части как изгибаемые элементы с соответствующими закреплениями. Исходя из этого, можно вычислить давление ударной волны, при котором плита не претерпит образования значительных трещин на верхней грани и давление, при котором появятся глубокие трещины.

Согласно расчетной оценке при трещинах глубиной до 2,5 см в полке и продольных ребрах плита сохраняет несущую способность, но значительно теряет в огнестойкости. При трещинах глубиной около 5 см плита теряет целостность (за счет полки), но можно предположить, что это не вызовет ее обвала. Об огнестойкости в этом случае можно говорить только в смысле недопущения разрушения поврежденной плиты. При глубине трещин более 5 см, как показывают расчеты, плита разрушается при нормальных условиях.

Выводы. В работе предложена методика исследования поведения железобетонной ребристой плиты при СНЕ EF, которая подходит и для других изгибаемых конструкций. Оценочные расчеты показали, что происшедшее в результате взрыва из-за возникших трещин выключение из работы части сжатого слоя бетона железобетонной ребристой плиты сильно сказывается на снижении ее огнестойкости. На основании этих расчетов появляется возможность учитывать необходимые параметры ребристых плит при проектировании и эксплуатации конструкций ОПО.

Расчеты по предложенной методике позволяют обосновывать мероприятия по повышению безопасности ограждающих железобетонных конструкций перекрытия каркасных промышленных зданий ОПО в случае аварийного взрыва и пожара. Также они позволяют прогнозировать относительно безопасное количество взрывчатого вещества в технологическом процессе ОПО, не приводящее к катастрофическим последствиям.

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. Васильченко А.В. Огнестойкость стальной колонны при комбинированном воздействии "взрыв-пожар" /Васильченко А.В., Ковалевская Т.М.// *Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, НУЦЗУ, 2018.– Вып. 43. – С.25-30. – Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7009>.*

5. 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.

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

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. 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.*

9. Кумпяк, О.Г. Железобетонные и каменные конструкции: учебник / О.Г. Кумпяк [и др.]. – М. : Изд-во АСВ, 2011. – 672 с.

10. 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.

11. МДС 21-2.2000. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. Госстрой России, 2000.

12. Broms B.B. Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members / Broms B.B. and Lutz L.A.// J.ACJ Jornal, 1965.– Vol.62. – №10.– P.20.

13. Уткин В.С. Определение надежности железобетонных элементов при наличии в них силовых трещин, нормальных к продольной оси / Уткин В.С., Уткин Л.В. // Бетон и железобетон. 1999.– №5. – С. 15-16.

Получено редколлегией 02.10.2018

О.В. Васильченко, Т.М. Ковалевська, О.А. Стельмах, В.О. Метелев

Оцінка вогнестійкості залізобетонної ребристої плити при комбінованому впливі «вибух-пожежа»

Розрахунки на прикладі залізобетонної ребристої плити показали, що виключення з роботи частини стиснутого шару бетону, яке сталося в результаті вибуху із-за виниклих тріщин, сильно позначається на зниженні вогнестійкості плити. Показано, що на підставі запропонованої методики дослідження поведінки згинальних елементів при комбінованій дії "вибух-пожежа", можна враховувати необхідні параметри залізобетонних ребристих плит при проектуванні і експлуатації конструкцій об'єктів підвищеної небезпеки. Запропонована методика також дозволяє прогнозувати відносно безпечну кількість вибухової речовини в технологічному процесі об'єкту підвищеної небезпеки, що не призводить до катастрофічних наслідків.

Ключові слова: залізобетонна ребриста плита, комбінований особливий вплив, критична температура, межа вогнестійкості, тріщина.

A. Vasilchenko, T. Kovalevska, O. Stelmah, V. Metelev

Estimation of fire resistance of reinforced concrete ribbed plate at the combined influence «explosion-fire»

Calculations on an example of reinforced concrete ribbed plate have shown that as a result of explosion because of the arisen cracks the part of compressed concrete layer is switched off from work, and it strongly affects decrease in fire resistance of a ribbed plate. It is shown that the offered method of research of behaviour of bending elements at the combined influence "explosion-fire", allows to consider necessary parameters of reinforced concrete ribbed plate at designing and operation of designs of high threat location. The offered method also allows to predict rather safe quantity of explosive in technological process of high threat location which does not lead to catastrophic consequences.

Keywords: reinforced concrete ribbed plate, combined special influences, critical temperature, fire resistance limit, crack.