

УДК 624.012.45

**К ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ,
ОПЕРТЫХ ПО КОНТУРУ,
ПРИ ДЕЙСТВИИ ОСОБОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
В ВИДЕ МГНОВЕННОГО ИМПУЛЬСА**

**TO THE EVALUATION OF THE SAFETY OF REINFORCED CONCRETE SLABS
SUPPORTED ON THE CONTOUR
UNDER THE ACTION OF A SPECIAL DYNAMIC LOAD
IN THE FORM OF AN INSTANTANEOUS PULSE**

Д.С. ВАНУС
D.S. VANUS

(Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(Moscow State (National Research) University of Civil Engineering)
E-mail: dahiws@gmail.com

В статье излагается метод определения безопасности железобетонных плит при удовлетворении требования сохранения несущей способности при достаточно большой вероятности. Рассмотрено деформирование плит в упругой и пластической стадиях.

Для расчета в упругой стадии применен приближенный метод, основанный на использовании статического прогиба плиты.

Безопасность конструкции определяется как свойство сохранения несущей способности в соответствии с первой группой предельных состояний при достаточно большой вероятности.

Мгновенный импульс является расчетной моделью динамической нагрузки большой интенсивности с малым временем действия.

The article describes the method for determining the safety of reinforced concrete slabs, while satisfying the requirement of maintaining the bearing capacity for a sufficiently high probability.

Deformation of plates in the elastic and plastic stages is considered. For calculation in the elastic stage, an approximate method is used, based on the use of the static deflection of the plate.

The safety of the structure is defined as the property of maintaining the carrying capacity in accordance with the first group of limit states at a sufficiently high probability.

Instantaneous impulse is a computational model of a dynamic load of high intensity with a short action time.

Ключевые слова: безопасность железобетонных плит в вероятностной форме, метод динамического расчета железобетонных плит, опертых по контуру, действие особой динамической нагрузки в виде мгновенного импульса.

Keywords: safety of reinforced concrete slabs in probabilistic form, the method of dynamic calculation of reinforced concrete slabs supported on the contour, the action of a special dynamic load in the form of an instantaneous pulse.

Наиболее распространенными конструкциями перекрытий многоэтажных зданий являются плиты (оперты по контуру на отдельные колонны), которые особенно эффективны для восприятия особых динамических нагрузок, возникающих при техногенных чрезвычайных воздействиях (взрывы различных веществ, удары и т.д.).

Безопасность конструкции определяется как свойство сохранения несущей способности в соответствии с первой группой предельных состояний с достаточно большой вероятностью [1...8].

При арматуре с большим запасом пластических деформаций деформирование плиты происходит последовательно, в упругой и пластичной стадиях, и после разрушения бетона в сжатых зонах арматура деформируется как вантовая система, состоящая из арматурных сеток.

Мгновенный импульс является расчетной моделью динамической нагрузки большой интенсивности с малым временем действия θ , не превышающим четверти периода колебаний конструкции, что представляется в виде $\omega\theta \leq \frac{\pi}{2}$, где ω – круговая частота колебаний плиты.

Величина импульса: $i = 0,5p\theta$.

Рассмотрим прямоугольную плиту со сторонами l_1 и l_2 , причем $l_1 \leq l_2 \leq 2l_1$, когда плита изгибается в двух направлениях. Закрепления сторон плиты возможно шарнирное, жесткое и податливое. Плита

армируется сетками из арматуры с физическими пределами текучести, обладающими большим запасом пластических деформаций, обеспечивающих наибольшую эффективность при восприятии особых динамических нагрузок, а следовательно, и безопасность. Для динамического расчета использованы методы, изложенные в работах [9], [10], причем в [11], [12] содержатся сведения о параметрах особых динамических нагрузок, возникающих при взрыве различных веществ.

Нагрузки – статическая q_{st} и мгновенный импульс i – равномерно распределены по площади плиты.

Осуществим расчет плиты в пластичной стадии.

В пластичной стадии плита разбивается линейными пластическими шарнирами на четыре жестких диска. Диагональные пластические шарниры приняты направленными под углом 45° к сторонам плиты. Тогда углы поворота всех дисков одинаковы. Обозначим их $\varphi(t)$.

Уравнение движения плиты в пластичной стадии имеет вид [13], [14]:

$$mI\ddot{\varphi} = (p(t) + q_{st} + q_n) S, \quad (1)$$

где $I = \sum_{i=1}^4 J_i$, $S = \sum_{i=1}^4 S_i$, S_i, J_i – момент инерции и статический момент относительно оси вращения i -го диска.

Для прямоугольного диска $S = \frac{bh^2}{2}$, $J = \frac{bh^3}{3}$,

для треугольного диска $S = \frac{bh^2}{6}$, $J = \frac{bh^3}{12}$.

Расчет на действие постоянной нагрузки следующий.

Для постоянной во времени нагрузки будет:

$$p\dot{T}_1(t_1) \iint \omega_{st}(x, y) dx dy = p\dot{T}_1(t_1) p z_0 \int F_1(x) dx \int F_2(y) dy = S\dot{\varphi}_0, \quad (3)$$

то есть $\dot{\varphi}_0 = \frac{p z_0}{S} \int F_1 dx \int F_2 dy \dot{T}_1(t_1)$. (4)

Обозначим

$$\int_0^{\ell_1} F_1(x) dx = \frac{\ell_1^5}{c_1},$$

$$\int_0^{\ell_2} F_2(y) dy = \frac{\ell_2^5}{c_1},$$

учитывая соотношения [15]. Для постоянной во времени нагрузки, учитывая зависимости [16] и $\dot{T}_1(t_1) = \omega \sqrt{\gamma_0(2 - \gamma)}$, получим:

$$\varphi_{\max} = e \frac{(2 - \gamma_n)(q_{nd} - q_{st})}{\gamma_{st} - 1},$$

где $e = \frac{\lambda_1^4 \lambda_2^2 J}{c_1^2 c_2^2 2S^3 B_1} \frac{\ell_1^6 \ell_2^6}{B_1}$. (5)

Значения коэффициентов C_1, C_2 равны:

- для элементов с шарнирными концами $C_1=120$;
- с защемленными концами $C_1=720$;
- при податливых опорах $C_1=320$;
- при одном защемленном и другим шарнирном $C_1=320$. Аналогично обозначим и для C_2 .

Предельные состояния плиты возникают после достижения максимального угла раскрытия в пластических шарнирах предельного значения ψ_u [16], [17]. В рассматриваемой прямоугольной плите углы раскрытия ψ_{\max} будут равны:

- φ_{\max} - в защемленных опорах сечения,
- $\sqrt{2}\varphi_{\max}$ - в диагональных пластических шарнирах,
- $2\varphi_{\max}$ - в пролетном пластическом шарнире, возникающем при $\ell_2 > \ell_1$.

$$\dot{\varphi} = -A_1, \quad A_1 = \frac{Sp}{mI}(\gamma_p - 1); \quad \varphi_{\max} = \frac{\varphi_0^2}{2A_1}. \quad (2)$$

Начальная угловая скорость $\dot{\varphi}_0$ находится из равенства количеств движения в конце упругой и начале пластической стадии:

Обозначим $\psi_{\max} = \chi \varphi_{\max}$, где параметр χ зависит от рассматриваемого участка пластических шарниров.

Условия прочности плиты представляются в виде:

$$\psi_{\max} = \chi \varphi_{\max} \leq \psi_{\max}, \quad (6)$$

где ψ_u - предельный угол раскрытия в рассматриваемом пластичном шарнире:

$$\psi_{\max} = e_1 \frac{(2 - \gamma_p)(q_n - q_{st})}{\gamma_p - 1}, \quad e_1 = \chi e. \quad (7)$$

Для предельного угла раскрытия ψ_u использована зависимость $\psi_u = \frac{K_0}{\xi}$, $K_0 = 0,004$, полученная в результате аппроксимации опытной зависимости ψ_u , приведенной в материалах ЕКБ.

Относительная высота сжатой зоны ξ зависит от направления стержней арматуры в пластическом шарнире.

Наклонные пластические шарниры, например, диагонально пересекающиеся со взаимно-перпендикулярными стержнями, направленными вдоль осей OX и OY , с площадями сечений A_x и A_y соответственно [18]. Продольная сила в наклонном сечении равна:

$$N = N_x \sin^2 \alpha + N_y \cos^2 \alpha,$$

где $N_x = R_s A_x$, $N_y = R_s A_y$; α - угол между направлениями $N_x(OX)$ и наклонными сечениями.

Условие равновесия в наклонном сечении:

$$R_b b x = R_s (A_s \sin^2 \alpha + A_y \cos^2 \alpha), \xi = \frac{R_s}{R_c} \left(\frac{A_x}{b h_0} \sin^2 \alpha + \frac{A_y}{b h_0} \cos^2 \alpha \right) = \frac{R_c}{R_c} (\mu_x \sin^2 \alpha + \mu_y \cos^2 \alpha).$$

Тогда:

$$\xi = \xi_1 \sin^2 \alpha + \xi_2 \cos^2 \alpha, \\ \xi_1 = \frac{R_s}{R_b} \mu_x, \xi_2 = \frac{R_s}{R_b} \mu_y$$

При $\alpha=45^\circ$ $\xi = \frac{1}{2} (\xi_1 + \xi_2)$. (8)

Расчет при действии мгновенного импульса.

Согласно приведенным в работе зависимостям [15] имеем:

$$\omega_1(x, y, t) = \omega_{st}(x, y) T_1(t), \\ \omega_{st}(x, y) = z_0 F_1(x) F_2(y), z_0 = \frac{1}{\beta_1}, \\ T_1(t) = i \omega \sin \omega t, \dot{T}_1(1) = i \omega^2 \cos \omega t.$$

Контур упругой стадии находится из выражения $\sin \omega t = \gamma_i$, то есть должно быть: $\gamma_i < 1$.

Уравнение движения плиты в пластичной стадии имеет вид:

$$\ddot{\varphi} = -A_2, A_2 = \frac{S}{J_m} (q_{nd} - q_{st}). \quad (10)$$

Начальная скорость находится из равенства количеств движения:

$$\iint \omega_{st}(x, y) dx dy T_1(t_1) = S \dot{\varphi}_0.$$

Отсюда:

$$\dot{\varphi}_0 = \frac{z_0 \ell_1^5 \ell_2^5}{S C_1 C_2} i \omega^2 \sqrt{1 - \gamma_i^2}. \quad (11)$$

Максимальный угол поворота рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{max} = \frac{\dot{\varphi}_0^2}{2A_2} = \frac{e(1-\gamma_i^2)(q_{nd}-q_{st})}{\gamma_i^2}, \quad (12)$$

где e принимается по формуле (5). Максимальный угол расхождения в пластичном шарнире равен:

$$\psi_{max} = \gamma \varphi_{max} = \frac{e(1-\gamma_i^2)(q_{nd}-q_{st})}{\gamma_i^2}. \quad (13)$$

Условия прочности плиты имеют вид:

$$\psi_{max} \leq \psi_u, \psi_u = \frac{0,004}{\xi}. \quad (14)$$

Целью проводимого исследования является оценка безопасности плит при особых воздействиях. В качестве меры безопасности обычно применяется вероятность безотказной работы.

ВЫВОДЫ

При воздействии обоих видов нагрузок (постоянные во времени и мгновенный импульс) при нагрузках, меньше предельных (удовлетворяющих уравнению предельных состояний), возможен отказ, вероятность которого увеличивается с ростом коэффициента вариации воздействия. Указанные явления могут появиться при больших количествах элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тамразян А.Г., Манаенков И.К. К расчету плоских железобетонных перекрытий с учетом фактической жесткости сечения // Научное обозрение. – 2015, № 8. С. 87...92.
2. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Структура целевой функции при оптимизации железобетонных плит с учетом конструкционной безопасности // Промышленное и гражданское строительство. – 2013, № 9. С. 14...15.
3. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2011, № 2-1. С. 21...27.
4. Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G. Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behavior // Magazine of Civil Engineering. – 49 (5), 2014. P. 15...26; 123...124.
5. Tamrazyan A.G. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // Applied Mechanics and Materials. – V. 475...476, 2014. P. 1563...1566.
6. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Estimation of load bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in fire conditions // Applied Mechanics and Materials. – Pt 1. V. 638...640, 2014. P. 62...65.

7. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Experimental and Theoretical Study of Reinforced Concrete Elements under Different Characteristics of Loading at High Temperatures // *Procedia Engineering*. – 153, 2016. P. 721...725.

8. Тамразян А.Г. Огнеударостойкость несущих железобетонных конструкций высотных зданий // *Жилищное строительство*. – 2005. № 1. С. 7.

9. Расторгуев Б.С., Ванус Д.С. Оценка безопасности железобетонных конструкций при чрезвычайных ситуациях техногенного характера // *Строительство и реконструкция*. – 2014, №6 (56).

10. Расторгуев Б.С. Динамика железобетонных плит при взрывных нагрузках // *Аварии и Катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий*. – Том 6. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2003. С. 343...365.

11. Гольшев А.Б., Бачинский В.Я., Полищук В.П., Харченко А.В., Руденко И.В. Проектирование железобетонных конструкций. – Киев: Будивельник, 1990.

12. Кодекс-образец ЕКБ/ФИП для норм по железобетонным конструкциям. – Том. II. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984.

13. Тамразян А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности // *Вестник МГСУ*. – 2012, №10. С.109...115.

14. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Забегаяев А.Б. Расчет конструкции на динамические специальные нагрузки. – М.: Высшая школа, 1992.

15. Ванус Д.С. Оценка безопасности железобетонных плит, опертых по контуру, при техногенных воздействиях // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2017, №2.

16. Тамразян А.Г., Долганов А.И., Калеев Д.И., Жихарев Ф.К., Звонов Ю.Н., Зубарева С.Э., Убыш А. К вероятностной оценке надежности железобетонных многопустотных панелей перекрытий // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2017, № 4. С. 267...271.

17. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching Method of Optimization of Bending Reinforced Concrete Slabs with Simultaneous Assessment of Criterion Function and the Boundary Conditions // *Applied Mechanics and Materials*. – Vol. 467, 2014. P. 404...409.

18. Расторгуев Б.С., Ванус Д.С. Расчет железобетонных конструкций по предельным состояниям с применением вероятностного метода // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2016, № 7. С.11...15.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K. K raschetu ploskih zhelezobetonnyh perekrytij s uchetom fakticheskoj zhestkosti secheniya // *Nauchnoe obozrenie*. – 2015, № 8. S. 87...92.

2. Tamrazyan A.G., Filimonova E.A. Struktura celevoj funkicii pri optimizacii zhelezobetonnyh plit s uchetom konstrukcionnoj bezopasnosti // *Promysh-*

lennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2013, № 9. S.14...15.

3. Tamrazyan A.G. Osnovnye principy ocenki riska pri proektirovanii zdaniij i sooruzhenij // *Vestnik MGSU*. – 2011, № 2-1. S. 21...27.

4. Kabantcev O.V., Tamrazyan A.G. Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behavior // *Magazine of Civil Engineering*. – 49 (5), 2014. P. 15...26; 123...124.

5. Tamrazyan A.G. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // *Applied Mechanics and Materials*. – V. 475...476, 2014. P.1563...1566.

6. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Estimation of load bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in fire conditions // *Applied Mechanics and Materials*. – Pt 1. V. 638...640, 2014. P. 62...65.

7. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Experimental and Theoretical Study of Reinforced Concrete Elements under Different Characteristics of Loading at High Temperatures // *Procedia Engineering*. – 153, 2016. P.721...725.

8. Tamrazyan A.G. Ogneudarostojkost nesushih zhelezobetonnyh konstrukcij vysotnyh zdaniij // *Zhilishnoe stroitelstvo*. – 2005. № 1. S. 7.

9. Rastorguev B.S., Vanus D.S. Ocenka bezopasnosti zhelezobetonnyh konstrukcij pri chrezvychajnyh situacijah tehnogenogo haraktera // *Stroitelstvo i rekonstrukciya*. – 2014, №6 (56).

10. Rastorguev B.S. Dinamika zhelezobetonnyh plit pri vzryvnyh nagruzkah // *Avarii i Katastrofy. Preduprezhdenie i likvidaciya posledstvij*. – Том 6. – М.: Izd-vo Associacii stroitelnyh vuzov, 2003. S.343...365.

11. Golyshev A.B., Bachinskij V.Ya., Polishuk V.P., Harchenko A.V., Rudenko I.V. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij. – Киев: Budivelnik, 1990.

12. Kodeks-obrazec EKB/FIP dlya norm po zhelezobetonnym konstrukcijam. – Том. II. – М.: NIIZhB Gosstroya SSSR, 1984.

13. Tamrazyan A.G. Raschet elementov konstrukcij pri zadannoj nadezhnosti i normalnom raspredelenii nagruzki i nesushej sposobnosti // *Vestnik MGSU*. – 2012, №10. S.109...115.

14. Popov N.N., Rastorguev B.S., Zabegaev A.B. Raschet konstrukcii na dinamicheskie specialnye nagruzki. – М.: Vysshaya shkola, 1992.

15. Vanus D.S. Ocenka bezopasnosti zhelezobetonnyh plit, opertyh po konturu, pri tehnogennyh vozdeystviyah // *Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti*. – 2017, №2.

16. Tamrazyan A.G., Dolganov A.I., Kaleev D.I., Zhiharev F.K., Zvonov Yu.N., Zubareva S.E., Ubysh A. K veroyatnostnoj ocenke nadezhnosti zhelezobetonnyh mnogopustotnyh panelej perekrytij // *Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti*. – 2017, № 4. S. 267...271.

17. Tamrazyan A., Filimonova E. Searching Method of Optimization of Bending Reinforced Concrete Slabs with Simultaneous Assessment of Criterion Function and the Boundary Conditions // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 467, 2014. P. 404...409.

18. Rastorguev B.S., Vanus D.S. Raschet zhelezo-betonnyh konstrukcij po predelnym sostoyaniyam s

primeneniem veroyatnostnogo metoda // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo. – 2016, № 7. S. 11...15.

Рекомендована кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИМГСУ. Поступила 06.04.18.
