УДК 531.3:69

Ф.Л. Доронин, Л.Н. Труханова, М.В. Фомина
ФГБОУ ВПО «МГСУ»

РЕАКЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ С ОКОННЫМ БЛОКОМ НА ВЗРЫВНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ

При проектировании жилых зданий и непроизводственных помещений часто не предусматриваются дополнительные меры по обеспечению прочности от динамического воздействия внутри помещения. Крепления стен сооружения в каркас оказываются не рассчитаны на ударную волну, возникающую вследствие взрыва бытового газа или газового баллона. Обычно при проектировании здания задача на специальную динамическую нагрузку сводится к расчету безопасного ударного давления, превышение которого приводит к разрушению сооружения. Стена с оконным проемом при динамическом воздействии на нее является своего рода легкосбрасываемой конструкцией, уменьшающей значения избыточного давления внутри помещения. Окна с установленными в них стеклопакетами обладают достаточной прочностью, что лишает конструкцию этого преимущества при сопротивлении на ударную нагрузку. Предложенная методика расчета конструкции с оконным блоком позволяет определить динамическую реакцию стены сооружения на взрывной импульс и возникающее при этом деформационное состояние конструкции.

Ключевые слова: импульсная нагрузка, легкосбрасываемая конструкция, максимальная деформация, уравнение динамики, демпферная система, численное решение, упругопластическое состояние, жесткость, линейное ускорение, коэффициент динамичности, взрывное воздействие, оконный блок.

Промышленные и жилые здания и сооружения воспринимают динамические нагрузки (ударные, взрывные) по сравнению со статическими значительно хуже. Импульсные нагрузки характерны непродолжительным главным импульсом, вследствие чего затухание проявляется в меньшей степени, чем при периодических нагрузках. Сооружения рассчитываются главным образом на действие вертикальных статических нагрузок и обеспечиваются достаточной прочностью. Расчет в горизонтальном направлении ограничивают действием ветровых и ряда других внешних конструктивных нагрузок. При действии динамических импульсных сил сооружения, не имеющие достаточной прочности, теряют устойчивость. За короткий промежуток времени действия импульса силы затухания не успевают поглотить значительную долю энергии, выделяемой при взрыве [1].

Нормативная методика, применяемая при расчете зданий и сооружений, основана на квазистатической теории или на численных методах, не позволяющих учитывать изменение упругих характеристик материалов в процессе нагружения системы. Часто при проектировании сооружений на динамические нагрузки ограничиваются определением допустимого давления ударной волны, превышение которого приводит к началу неотвратимых деформаций конструкций и их разрушению [2].

© Доронин Ф.Л., Труханова Л.Н., Фомина М.В., 2013

За последние годы зафиксирован ряд случаев в жилых зданиях, не относящихся к взрывоопасным, когда в результате взрыва природного газа на кухне или взрывов баллонов при производстве ремонтных работ происходило выдавливание панелей или обрушение конструкций с последующим разрушением всего подъезда дома.

В настоящее время преимущественно экспериментально установлены предельно допустимые избыточные давления, при которых большинство зданий получают одну из четырех возможных степеней разрушения [3]. Результаты экспертных оценок, взятые при обследовании аварийных объектов, подтвердили полученные данные [4]. При этом не изучается механизм разрушения объектов, особенности работы материалов сооружения в упругопластической стадии, остаточные деформации. Эксперты отмечают значительные разрушения жилых зданий в случае установки оконных стеклопакетов, стекла которых имеют толщину свыше 4 мм и малое расстояние между стеклами. Такие стеклопакеты в результате перераспределения нагрузок выдерживают значительно большее давление по сравнению с обычными оконными стеклами [5].

Кирпичная кладка так же подвержена значительным разрушениям по сравнению с бетонными панелями, так как практически не сопротивляется действию горизонтальных нагрузок. При сравнительно небольшом прогибе при действии эксплуатационных вертикальных нагрузок, приложенных с эксцентриситетом, происходит потеря устойчивости верхних этажей и конструкций крыши. Крепления стеновых панелей, как правило, рассчитаны без учета действия внутренних динамических нагрузок [6].

Динамическая реакция конструкций с одной или несколькими степенями свободы определяется максимально допустимой деформацией ν_{max} и динамическим коэффициентом

$$K_d = \frac{\nu_{max}}{p_0 / K},$$

где p_0 — первоначальная нагрузка на систему; K — жесткость конструкции здания.

При небольшой продолжительности действия нагрузки величина перемещения ν_{max} зависит от величины приращения импульса и его формы, следовательно, является более важной характеристикой реакции сооружения, чем коэффициент динамичности [7].

Приближенный метод оценки реакции при импульсной нагрузке недемпфированной системы описывается интегралом Дюамеля

$$V(t) = \frac{1}{mw}\int_0^t p(\tau)\sin w(t-\tau)d\tau \qquad (1)$$

или в виде интеграла

$$V(t) = \frac{1}{mw}\int_0^t p(\tau)h(t-\tau)d\tau, \qquad (2)$$

где $h(t-\tau) = \frac{1}{mw}\sin w(t-\tau)d\tau;$ (3)

m — масса системы; w — частота собственных колебаний системы.

На практике в большинстве случаев нагрузка $p(\tau)$ определяется экспериментально, а реакцию следует вычислять численными методами.

После преобразований выражения (2), (3) с учетом начальных условий приобретают вид

$$V(t) = A(t)\sin wt - B(t)\cos wt, \tag{4}$$

где $$A(t) = \frac{1}{mw}\int_0^t p(\tau)\cos wt d\tau; \tag{5}$$

$$B(t) = \frac{1}{mw}\int_0^t p(\tau)\sin wt d\tau. \tag{6}$$

При использовании численного метода величина интегралов $A(t)$ и $B(t)$ определяется суммой этих ординат, умноженной на весовые коэффициенты

$$A(t) \approx \frac{\Delta\tau}{mw}\frac{1}{\zeta}\sum_{\zeta}^{A}(t); \tag{7}$$

$$B(t) = \frac{\Delta\tau}{mw}\frac{1}{\zeta}\sum_{\zeta}^{B}(t). \tag{8}$$

Форма интеграла Дюамеля с учетом затухания аналогична анализу системы без учета затухания. При этом свободные колебания испытывают затухание по экспоненциальной зависимости

$$V(t) = A(t)\sin w(t) - B(t)\cos w(t), \tag{9}$$

где $$A(t) = \frac{1}{mw}\int_0^t p(\tau)\mathrm{EXP}\left(\zeta\omega\tau/\zeta\omega t\right)\cos w\tau d\tau; \tag{10}$$

$$B(t) = \frac{1}{mw}\int_0^t p(\tau)\mathrm{EXP}\left(\zeta\omega\tau/\zeta\omega t\right)\sin w\tau d\tau. \tag{11}$$

Изложенная методика численного решения уравнения динамики применяется только при анализе упругих систем, в которых динамические характеристики остаются неизменными на всем протяжении процесса реакции[1]. В случае кратковременных нагрузок при сильных взрывах конструкции работают в упругопластической стадии.

Предлагается развитие методики для расчета неупругой реакции, изложенной в [8]. При шаговом интегрировании уравнения колебаний реакция сооружения вычислялась для ряда последовательных интервалов времени $\Delta\tau$, которые выбирались из сходимости процесса. Неупругий характер работы учитывается определением в начале каждого интервала времени новых динамических характеристик, соответствующих изменяемому деформированному состоянию. Процесс вычисления является шаговым и продолжается от начала приложения нагрузки до любого момента времени с аппроксимацией неупругой работы конструкций. Полная реакция сооружения определялась интегрированием уравнений состояния.

Конструкция имеет параметры: масса m, жесткость K, затухание C и реакция $P(t)$, которые следует рассматривать в качестве обобщенных величин, а не

[1] СНиП 2.01.07—85. Дополнения, разд. 10 «Прогибы и перемещения». М., 1989.

локальных характеристик. На массу системы действуют инерциальные силы f_u, силы затухания f_s и силы жесткости f_c

$$f_u(t) + f_c(t) + f_s(t) = p(t), \tag{12}$$

или в приращениях получаем

$$\Delta f_u(t) + \Delta f_c(t) + \Delta f_s(t) = \Delta p(t), \tag{13}$$

где $\Delta f_u(t) = m\Delta\nu(t)$;

$\Delta f_c(t) = c\Delta\nu(t)$;

$\Delta f_s(t) = k(t)\Delta\nu(t)$;

$\Delta p(t) = p(t + \Delta t) - p(t)$.

При этом функции затухания $c(t)$ и жесткости $k(t)$ изменяются по определенным законам и могут быть установлены в конце этапа итерации, выражая нелинейный характер материалов сооружения

$$c(t) \approx \frac{df}{d\nu};$$

$$k(t) \approx \left(\frac{df_s}{d\nu}\right). \tag{14}$$

Нелинейный гистерезисный характер работы материалов конструкций определяется как всей историей деформирования, так и текущим распределением перемещений.

При подстановке в выражение (13) получим

$$m\Delta\nu(t) + c(t)\Delta\nu(t) + k(\tau)\Delta\nu(t) = \Delta p(t). \tag{15}$$

В процессе решения задачи во внимание принималась нелинейность затухания и жесткости конструкций в зависимости от степени нагружения. Коэффициент затухания был принят постоянным, а нелинейный характер работы конструкции определялся только изменением жесткости в соответствии с принятой упругопластической зависимостью.

При численном интегрировании уравнения (15) предполагалось, что в пределах каждого интервала времени ускорение меняется линейно, а затухание и жесткость остаются неизменными. При рассмотрении движения изменение ускорения принималось линейным, а изменение скорости и перемещения — по квадратичной и кубической зависимостям.

В результате преобразований выражение (15) было сведено к виду

$$k(t)\Delta\nu(t) = \Delta p(t); \tag{16}$$

$$\tilde{k}(t) = k(t) + \frac{G}{t}m + \frac{3}{t}c(t); \tag{17}$$

$$\Delta p(t) = \Delta p(t) + m\left[\frac{G}{\Delta t}m + 3\nu(t)\right] + c(t)\left[3\nu(t) + \frac{\Delta t}{2}\nu(t)\right]. \tag{18}$$

Изложенный метод был опробован при расчете кирпичной стены высотой 4 м с оконным проемом 1×1,2 м. В процессе вычислений определялась обобщенная жесткость всей конструкции *EJ* (рис. 1).

Вертикальная сила N_0 от веса конструкции крыши приложена с эксцентриситетом e = 0,1 м. Оконный проем выбран стандартный, высотой *h* = 1,1 м, с толщиной стеклопакета *t* = 8 см.

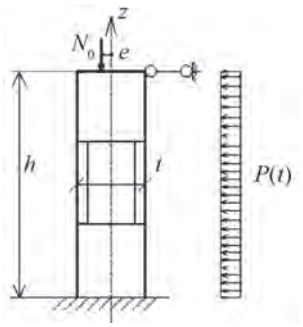


Рис. 1. Расчетная схема каменной стены с оконным блоком

Изменение давления внутри помещения $P(t)$ представлено в виде треугольного импульса. Максимальное избыточное давление составило 3,4 кПа, продолжительность действия 0,5 с.

Суммарная обобщенная жесткость стены с учетом осевой нагрузки N_0 вычислялась по формуле

$$\tilde{k}^* = k^* - k = \int_0^t EJ(\varphi)dz - \int_0^t N(\varphi)dz. \quad (19)$$

Максимальный прогиб стены с учетом условий закрепления и наличия оконного проема приходится на середину рамы, в соответствии с граничными условиями была принята форма прогиба в виде функции [9]

$$\Psi(z) = \sin\frac{\pi z}{h}. \quad (20)$$

С использованием шагового метода линейного ускорения была определена упругопластическая реакция конструкций кирпичной стены с оконным застекленным проемом (стеклопакет).

Расчет проведен с шагом интегрирования $\tau = 0{,}05$ с, что оказалось вполне достаточным для получения достоверного результата.

В соответствии с полученными результатами предел упругости материала наблюдается при перемещении рамной конструкции $\nu_{упр} = 2{,}67$ см в течение времени с начала действия нагрузки $\tau = 0{,}3$ с для места предполагаемых максимальных перемещений в центре оконного проема. Остаточное неупругое перемещение составит $\nu_{ост} = 3{,}6$ см после прекращения действия нагрузки от треугольного импульса (рис. 2).

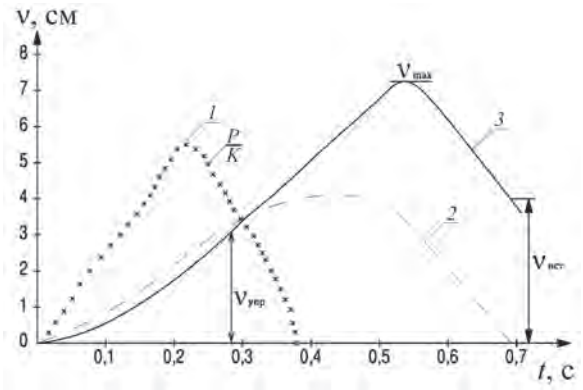


Рис. 2. Сравнение упругопластической и упругой реакций стены с рамной конструкцией на импульс: *1* — статическое перемещение; *2* — упругопластическая реакция; *3* — упругая реакция

По стандартной методике на основе использования динамического коэффициента K_d значение максимального перемещения конструкции было определено 5,8 см. В результате расчетов стеновой панели с учетом упругопласти-

ческой работы материалов и изменений их прочностных характеристик уточнили значение максимальной деформации v_{max} = 7,3 см, наблюдаемой в конце первого этапа нагружения по прошествии 0,55 с от начала действия импульса. Аналогичные деформации и перемещения были получены по изложенной методике при расчете сплошной кирпичной стены [10].

Предложенная методика численного решения уравнения динамики на основе теории шагового интегрирования позволяет оценить динамическую работу сооружений в упругопластической стадии развития деформаций и изменении прочностных свойств материалов в процессе нагружения.

Реакция на динамическую нагрузку может быть установлена и для немонолитных конструкций, состоящих из разных материалов с различными условиями закрепления. Расчет, выполненный для определения деформационного состояния кирпичной стены с оконным проемом с установленным в нем стеклопакетом, определил прочностные свойства конструкции, близкие к монолитному варианту. Изложенная методика расчетов конструкций на ударные нагрузки позволяет наглядно проследить за изменением инерционных сил и перемещений на любом этапе динамической реакции.

Библиографический список

1. *Абросимов А.А., Комаров А.А.* Мероприятия, обеспечивающие безопасные нагрузки при аварийных взрывах в зданиях со взрывоопасными технологиями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002. № 4. С. 48—51.

2. *Комаров А.А.* Разрушение зданий при аварийных взрывах бытового газа // Пожаробезопасность. 2004. Т. 13. № 5. С. 15—23.

3. *Пилюгин Л.П.* Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Пожнаука, 2000. 224 с.

4. *Мишуев А.В., Комаров А.А., Хуснутдинов Д.З.* Общие закономерности развития аварийных взрывов и методы снижения взрывных нагрузок до безопасного уровня // Пожаровзрывобезопасность. 2001. Т. 10. № 6. С. 8—19.

5. *Комаров А.А.* Анализ последствий аварийного взрыва природного газа в жилом доме // Пожаробезопасность. 1999. Т. 8. № 4. С. 49—53.

6. *Newmark Natan M., Rosenblueth Emilio.* Fundamentals of earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. New York, 1971, 344 p.

7. Справочник проектировщика. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций / Ю.К. Амбриашвили, А.И. Ананьин, А.Г. Барченков и др. М. : Стройиздат, 1986. 462 с.

8. *Clough Ray W., Penzien Josepf.* Dynamics of Structures. World Book Company. New York. 1977, 320 p.

9. *Korn G.A. and Korn T.M.* Mathematical Handbook for Scientists and Engineers, Second Edition, Dover. New York, 2000, 943 p.

10. *Доронин Ф.Л., Ляпин А.Ю.* Расчет конструкций сооружений на взрывную нагрузку на основе численного решения уравнения движения // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 72—78.

Поступила в редакцию в декабре 2013 г.

Об авторах: **Доронин Федор Леонидович** — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и водных ресурсов, **Московский государственный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, doronin.fl@yandex.ru;

Труханова Людмила Николаевна — кандидат технических наук, доцент кафедры физики, **Московский государственный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, phystruh@gmail.com;

Фомина Марина Васильевна — кандидат технических наук, профессор кафедры физики, **Московский государственный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, fomina1946@gmail.com.

Для цитирования: *Доронин Ф.Л., Труханова Л.Н., Фомина М.В.* Реакция конструкции здания с оконным блоком на взрывное воздействие на основе решения уравнения динамики // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 33—40.

F.L. Doronin, L.N. Truchanova, M.V. Fomina

THE REACTION OF THE BUILDING STRUCTURE WITH WINDOW UNIT TO THE EXPLOSIVE IMPACT ON THE BASIS OF DYNAMIC EQUATION SOLUTION

When designing residential buildings, additional measures for increasing the strength at dynamic effects indoors are not foreseen. The walls of the structure fixed in the framework are not designed for shock wave caused by explosion of utility gas. When designing a building, the task of the special dynamic load is often reduced to the calculation of the safe shock pressure, exceeding of which leads to the destruction of the structures. The wall with the window area under dynamic effects is a blast relief panel, which reduces the excess pressure inside the room. The proposed method of calculating a design with a window unit allows determining the dynamic reaction of the wall on explosive pulse. The proposed calculation technique of the constructions at shock loads allows tracing the changes of the inertial forces and displacements at any stage of dynamic response. The reaction to dynamic loads can be also set for non-monolithic structures, consisting of different materials with different conditions of fastening. Elastoplastic reaction of a brick wall with glass units was determined using step-by-step method of linear acceleration. The calculation of stress-strain state of brick walls with window panes determined the strength properties of the structures close to the monolithic version. The proposed technique of numerical solution of dynamic equations is applied only in the analysis of elastic systems, in which the dynamic characteristics remain unchanged throughout the reaction process.

Key words: pulse load, blast relief panel, peak strain, dynamic equation, damper system, numerical solution, elastoplastic state, rigidity, linear acceleration, dynamic factor, explosion load, window unit.

References

1. Abrosimov A.A., Komarov A.A. Meropriyatiya, obespechivayushchie bezopasnye nagruzki pri avariynykh vzryvakh v zdaniyakh so vzryvoopasnymi tekhnologiyami [Measures Providing Proof Loads at Accidental Explosions in the Buildings with Explosion Hazardous Technologies]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Antiseismic Construction. Security of Structures]. 2002, no. 4, pp. 48—51.

2. Komarov A.A. Razrushenie zdaniy pri avariynykh vzryvakh bytovogo gaza [Destruction of Buildings Subject to Accidental Explosions of the Utility Gas]. *Pozharobezopasnost* [Fire Safety]. 2004, vol. 13, no. 5, pp. 15—23.

3. Pilyugin L.P. *Obespechenie vzryvoustoychivosti zdaniy s pomoshch'yu predokhranitel'nykh konstruktsiy* [Ensuring Blast Resistance of Buildings with the Help of Protecting Structures]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000, 224 p.

4. Mishuev A.V., Komarov A.A., Khusnutdinov D.Z. Obshchie zakonomernosti razvitiya avariynykh vzryvov i metody snizheniya vzryvnykh nagruzok do bezopasnogo urovnya [Common Patterns of Accidental Explosions Development and Methods of Reducing Explosive Loads up to the Safe Level]. *Pozharobezopasnost* [Fire Safety]. 2001, vol. 10, no. 6, pp. 8—19.

5. Komarov A.A. Analiz posledstviy avariynogo vzryva prirodnogo gaza v zhilom dome [The Analysis of the Consequences of Natural Gas Explosions in Residential Building]. *Pozharobezopasnost* [Fire Safety]. 1999, vol. 8, no. 4, pp. 49—53.

6. Newmark N.M., Rosenblueth E. Fundamentals of Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New York, 1971, 344 p.

7. Ambriashvili Yu.K., Anan'in A.I., Barchenkov A.G. and others. *Spravochnik proektirovshchika. Dinamicheskiy raschet spetsial'nykh inzhenernykh sooruzheniy i konstruktsiy* [Designer's Guidance. Dynamic Calculation of Special Engineering Structures and Constructions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 462 p.

8. Clough R.W., Penzien J. Dynamics of Structures. World Book Company, New York, 1977, 320 p.

9. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Second Edition. Dover, New York, 2000, 943 p.

10. Doronin F.L., Lyapin A.Yu. Raschet konstruktsiy sooruzheniy na vzryvnuyu nagruzku na osnove chislennogo resheniya uravneniya dvizheniya [Calculation of Building Structures for the Explosive Load Basing on Numerical Solutions of Motion Equation]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010, no. 4, pp. 72—78.

About the authors: **Doronin Fedor Leonidovich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydraulics and Water Resources, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU),** 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russian Federation; doronin.fl@yandex.ru;

Trukhanova Lyudmila Nikolaevna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Physics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU),** 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russian Federation; phystruh@gmail.com;

Fomina Marina Vasilyevna — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Physics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russian Federation; fomina1946@gmail.com.

For citation: Doronin F.L., Trukhanova L.N., Fomina M.V. Reaktsiya konstruktsii zdaniya s okonnym blokom na vzryvnoe vozdeystvie na osnove resheniya uravneniya dinamiki [The Reaction of the Building Structure with Window Unit to the Explosive Impact on the Basis of Dynamic Equation Solution]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 1, pp. 33—40.