

Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD

Аспирант Н.А. Чернуха,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Аннотация. Статья посвящена способам расчета сооружений на взрывные воздействия методом конечных элементов в среде SCAD.

Приведена классификация взрывов и рассмотрены особенности их воздействия на сооружения. Описаны методы расчета конструкций на взрывные воздействия. Рассмотрены вопросы определения параметров ударных волн при их дифракции с сооружением.

Показан процесс задания импульсных нагрузок от ударных волн в SCAD. Представлен вариант использования модуля «Прямое интегрирование уравнений движения» в SCAD для решения задач динамики взрывов. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния сооружения при его расчете в SCAD по различным методикам. Сделаны выводы о преимуществах и недостатках описанных методов, а также функциональных возможностях SCAD при решении задач динамики взрывов.

Ключевые слова: виды взрывов; динамика сооружений; квазистатический метод; импульсное воздействие; прямое интегрирование; дифракция волны; конечно-элементный расчет; SCAD

Введение

Расчетный анализ любой конструкции начинается с попытки установить, что в рассматриваемом случае является существенным, а чем можно смело пренебречь. Общая тенденция видна в том, чтобы учесть лишь немногие важнейшие эффекты и получить наиболее простую модель. Цель инженера-расчетчика – найти разумный компромисс между требованиями к полноте и точности модели и располагаемыми вычислительными возможностями [1].

При построении расчетной модели сооружения одной из важнейших процедур является идеализация нагрузок. Более трудным становится моделирование нагрузок, изменяющихся во времени, ведь принятые инженером-расчетчиком решения могут в значительной мере повлиять на динамическое поведение модели конструкции, точность и достоверность результатов расчета.

При проектировании зданий и сооружений, входящих в состав комплексов опасных нефтехимических производств и предприятий атомной энергетики, а также сооружений гражданской обороны, в отечественной [2, 3] и мировой практике [4–7] предусматривается выполнять расчет строительных конструкций на взрывное воздействие с помощью норм.

Аварийный внешний взрыв – экстремальное воздействие, которое обязательно должно приниматься во внимание при проектировании объектов повышенной ответственности [8–11].

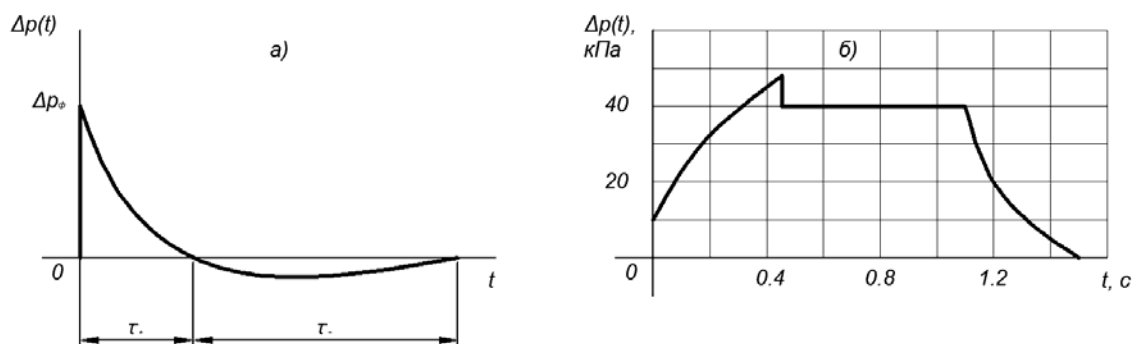
1. Обзор литературы

Под взрывом понимается быстрое выделение большого количества энергии, вызванное внезапным изменением состояния вещества или его параметров [12]. Результатом взрыва являются распространяющиеся в пространстве воздушные ударные волны (ВУВ) и волны сжатия в грунте, взаимодействующие с препятствиями, зданиями и сооружениями. Физике процесса взрыва, определению его параметров и воздействия на живых существ и сооружения посвящено множество исследований [13–16].

Методики определения нагрузок от взрывов в различных отраслях промышленности иногда не совпадают, а сами нагрузки зависят от многих факторов: вида и агрегатного состояния вещества, типа окружающего пространства и др. [2–4, 7].

При классификации взрывов выделяют два основных типа – детонационный и дефлаграционный (вспышка, мгновенное возгорание [5]). Первый тип характерен для концентрированных взрывчатых веществ, а также возможен в облаках газо- и паровоздушных смесей (ГПВС) при распространении горения со сверхзвуковой скоростью. Второй тип наблюдается только в облаках ГПВС, как правило, при скоростях горения ниже скорости звука [17].

Характер воздействия взрывов двух указанных типов различен (см. рис. 1). Нагрузка при детонационном взрыве характеризуется мгновенным приложением и малым временем действия, чем определяется ее динамический характер. При дефлаграции действие нагрузки ближе к статическому.



**Рисунок 1. Изменение избыточного давления во фронте волны при:
а) детонационном взрыве б) дефлаграционном взрыве [17]**

Важным обстоятельством является то, что сразу предсказать, какой из типов взрывного воздействия более опасен для конкретного сооружения, не представляется возможным, так как требуется оценка динамических характеристик проектируемого сооружения [18, 19].

В современной практике расчетов сооружений существуют различные методы моделирования особой нагрузки от взрыва. Каждый из них в разной степени является приближенным описанием реальной картины взаимодействия ударной волны и сооружения, обладает различной точностью и достоверностью и требует различных вычислительных ресурсов.

В связи со стремительным развитием информационных технологий и численных методов расчета становится возможным создание более сложных моделей и алгоритмов, учитывающих значительно большее количество факторов и условий, тем самым приближая модель к реальности и увеличивая точность и достоверность результатов [20–25]. Производительная способность современных персональных компьютеров (ПК) позволяет проводить относительно быстро динамические расчеты пространственных схем большой размерности.

Рынок современного программного обеспечения для расчета строительных конструкций предлагает значительное количество вычислительных комплексов, различающихся по специфике и сложности решаемых задач, потребности в вычислительных ресурсах и стоимости. Одной из наиболее популярных и доступных систем прочностного анализа строительных конструкций в России является интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций Structure CAD Office (SCAD), позволяющая решать задачи большой размерности как при статических, так и при динамических воздействиях [26–28].

2. Постановка задачи

Цель исследования – провести анализ напряженно-деформированного состояния строительных конструкций сооружения при действии особой нагрузки от ударной волны, смоделированной по различным методикам, определить их достоинства и недостатки при решении задач динамики взрывов.

В качестве иллюстративного примера выбрано отдельно стоящее полузаглубленное обвалованное убежище гражданской обороны на атомной станции. Нагрузки от ударной волны вычислены в соответствии с требованиями норм проектирования защитных сооружений гражданской обороны и объектов атомной промышленности [2, 3]. Для определенности рассматривался случай нормального отражения ударной волны при детонационном взрыве в неограниченном пространстве [17].

3. Квазистатический метод расчета конструкций

При расчете сооружений на динамические нагрузки зачастую на практике нет необходимости устанавливать характер движения конструкции и определять внутренние усилия в любой момент действия нагрузки. Как правило, требуется определить максимальные перемещения и усилия в элементах конструкций сооружения, которые можно найти посредством упрощенных квазистатических расчетов, то есть с помощью коэффициентов динамичности.

Чернуха Н.А. Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD

Квазистатический метод расчета основан на схематизации конструкции как системы с одной степенью свободы (эквивалентного линейного осциллятора) и задании приближенного закона перемещений системы с точностью до одного неизвестного параметра, зависящего от времени (эквивалентной координаты). Динамический прогиб в любой момент времени пропорционален прогибу при статическом действии максимальной нагрузки [29–30]. Коэффициентом пропорциональности является искомый коэффициент динамичности, зависящий от времени.

Такой подход наиболее часто используют при упрощенных квазистатических расчетах конструкций на импульсивные и ударные нагрузки. Однако стоит отметить, что точность результатов при таких расчетах сильно зависит от принятого закона перемещений системы и его близости к действительному, при этом сама система не должна быть слишком велика по сравнению с «пятном» нагрузки. Предположение о том, что динамические и статические перемещения системы пропорциональны во все моменты времени действия нагрузки, окажется близким к истине только в том случае, если имеют место нагрузки достаточно длительные и медленно нарастающие по сравнению с периодом первого тона колебаний системы.

В рассматриваемом примере убежища динамические нагрузки от ударной волны и коэффициенты динамичности были определены в соответствии с действующими нормами проектирования защитных сооружений гражданской обороны [2].

При квазистатическом расчете сооружения приняты следующие предпосылки:

- сооружение рассматривается полностью погруженным в ударную волну, то есть динамические нагрузки действуют на все элементы сооружения одновременно;
- нагрузки имеют максимальные значения;
- нагрузки равномерно распределены по площадям;
- нагрузки приложены нормально к поверхностям конструкций.

Нагрузки от ударной волны в общем случае зависят от вида и количества взрывчатых веществ, класса сооружения, типа конструкции, степени герметизации, инженерно-геологических и гидрогеологических условий, уклонов откосов обвалования и площади проемов в наружных ограждающих конструкциях [2, 17, 31].

Безусловным достоинством квазистатических методов является сведение расчета на динамическое воздействие к решению относительно простой статической задачи [17, 25]. Отклик конструкций сооружения может быть определен с использованием простейших конечно-элементных программ, не позволяющих производить строгий динамический расчет.

Однако квазистатическим методам расчета присущ ряд недостатков. Так, например, для получения максимального отклика необходимо вычислить и сложить модальные отклики конструкции (изгибающие моменты, поперечные силы), но при квазистатических расчетах вообще невозможно говорить о векторе максимальных суммарных откликов, так как в разных точках конструкции максимумы сдвинуты во времени [17]. Поэтому для суммирования модальных откликов и получения максимального отклика необходимо прибегать к специальным формулам (суммирование по модулю, метод «корень квадратный из суммы квадратов» (ККСК), метод «Ten percent rule», метод «Complete quadratic combination» (CQC) и др.) [33–35]. Также важно, что при квазистатическом методе невозможно оценить «упругую отдачу» конструкции, из-за чего, например, может быть ошибочно произведен расчет армирования.

4. Импульсное воздействие

Как было сказано выше, нагрузки на сооружения при детонационном взрыве имеют ярко выраженный динамический характер, поэтому колебания и прочность конструкций часто можно определять по теореме импульсов [36, 37].

В рассматриваемом примере избыточное давление во фронте ударной волны является заданной нормами [38] величиной, а продолжительность действия нагрузки θ определена по нормам проектирования объектов атомной промышленности [3].

При решении задачи в более общей постановке параметры волны могут быть определены по методикам, описанным во многих источниках [12, 39–41].

В процессе обтекания сооружения ударной волной выделяют фазы сжатия и разрежения.

Удельный импульс i и продолжительность фазы разрежения τ существенно меньше, чем в фазе сжатия, поэтому ими часто пренебрегают.

Удельный импульс фазы сжатия i_+ численно равен площади под кривой давления в этой фазе. Считая эпюру давления в фазе сжатия треугольной, удельный импульс может быть приближенно (с запасом) вычислен по формуле:

$$i_+ = \frac{\Delta p_{\phi} \tau}{2}.$$

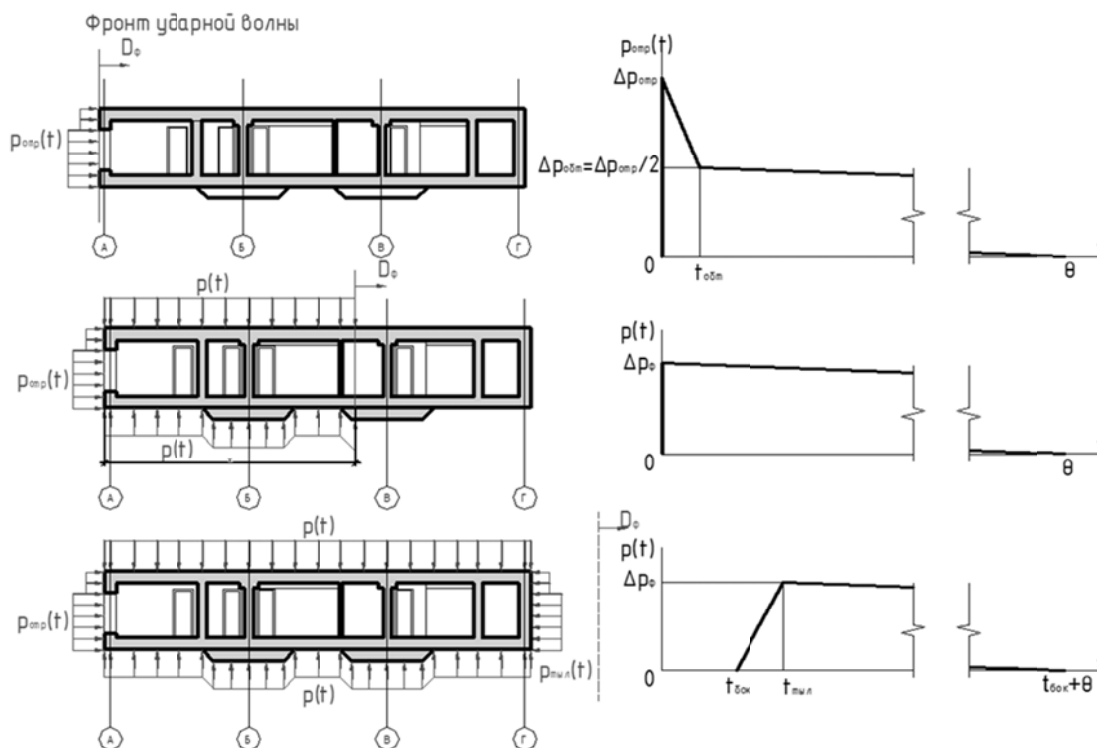
Часто также в запас продолжительность действия нагрузки принимают равной продолжительности фазы сжатия, т. е. $\theta = \tau_+$.

5. Прямое интегрирование уравнений движения

Параметры волны, определенные, например, согласно [12, 39–41], при ее контакте и обтекании сооружения сильно изменяются во времени, и именно эти параметры требуется знать для расчетов прочности и колебаний строительных конструкций [44, 45]. Действительные законы изменения параметров ударных волн при *дифракции* сложны [46].

В практике при динамическом расчете сооружения реальные законы изменения нагрузок во времени заменяют упрощенными, расчетными. Наиболее часто используемые законы изменения нагрузки во времени приведены в работах [1, 12, 17, 31].

Стадии дифракции ударной волны и графики изменения давления на строительные конструкции представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. Дифракция ударной волны.
Графики изменения давления во фронте волны**

Как было сказано выше, рассматривается случай *нормального отражения* ударной волны при детонационном взрыве в неограниченном пространстве [17]. Распространение ударной волны в пространстве горизонтальное [3].

Для определения характерных точек графиков изменения давления на строительные конструкции сооружения необходимо определить следующие величины:

- скорость распространения фронта ударной волны D_{ϕ} , зависящая от давления во фронте Δp_{ϕ} [МПа]:

$$D_{\phi} = 340 \sqrt{1 + 8.3 \Delta p_{\phi}}, \text{ м/с};$$

- отраженное давление при падении ударной волны на фронтальную стену сооружения, складывающееся из собственно отраженного давления и давления скоростного напора воздуха:

$$\Delta p_{omp} = 2\Delta p_{\phi} + \frac{6(\Delta p_{\phi})^2}{\Delta p_{\phi} + 0.72}, \text{ МПа (при площади проемов в стене менее 10\%);}$$

$$\Delta p_{omp} = \Delta p_{\phi} + \frac{2.5(\Delta p_{\phi})^2}{\Delta p_{\phi} + 0.72}, \text{ МПа (при площади проемов в стене более 10\%);}$$

- время от начала отражения до установления режима обтекания:

$$t_{обт} \approx \frac{3H}{D_{\phi}}, \text{ с;}$$

- момент времени $t_{бок}$:

$$t_{бок} = \frac{b}{D_{\phi}}, \text{ с;}$$

- время от $t_{бок}$ до $t_{мыл}$ (выбирается наименьшее:)

$$t_{мыл} = \frac{4h}{D_{\phi}}, \text{ с, или } t_{мыл} = \frac{2b}{D_{\phi}}, \text{ с.}$$

Уравнения движения конечно-элементной модели представлены в виде:

$$\begin{cases} M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \\ x(0) = x_0 \\ \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \end{cases},$$

где K, M – соответственно матрица жесткости и матрица масс;

C – матрица демпфирования, определяемая исходя из гипотезы Релея $C = \alpha M + \beta K$.

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \text{ и } \beta = \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2},$$

где $\omega_1, \omega_2, \xi_1, \xi_2$ – первые две собственные циклические частоты [рад/с] и модальное демпфирование для первой и второй собственных частот (в долях от критического демпфирования).

1. α и β – коэффициенты пропорциональности Релея, отвечающие за затухание по низким модам и по высоким модам соответственно.

2. В модуле реализован безусловно устойчивый вариант метода пошагового интегрирования Ньюмарка [47].

3. Весь временной интервал разбивается на конечное число шагов $N_{step} = \frac{T_{dur}}{\Delta t + 1}$, где

$T_{dur} = t_{end} - t_{start}$. Шаг интегрирования Δt в пределах одной постановки задачи постоянен. Запись результатов (перемещений, усилий) осуществляется в определенные моменты времени, совпадающие с точками интегрирования.

Шаг интегрирования рекомендуется принимать в пределах $(0.01 - 0.001) T_1$, где T_1 – период первого тона колебаний сооружения.

6. *Ход и результаты расчета*

Автоматизированный расчет выполнялся в SCAD (версия 11.5), реализующем метод конечных элементов. На рисунке 3 представлена расчетная схема сооружения в SCAD; планировка помещений убежища условно не показана.

Конструктивная схема убежища – одноэтажное трехпролетное сооружение из монолитного железобетона с жесткими узлами, образованными наружными и внутренними стенами, внутренними колоннами, фундаментной плитой, балками и плитой покрытия.

Рассматривается упругая стадия работы конструкций, не допускающая развития остаточных деформаций.

Характеристики грунтового основания вычислены в программе КРОСС, использующей билинейную модель основания, и экспортированы в SCAD. Методом последовательных итераций произведено сведение моделей основания и фундамента, чем и реализована совместная работа системы «сооружение – основание».

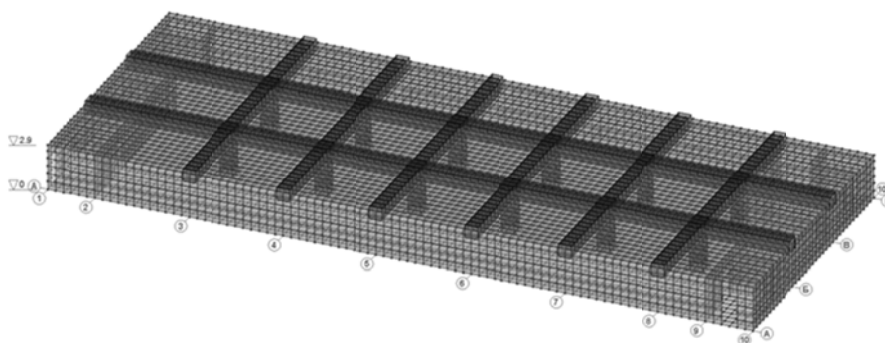


Рисунок 3. Расчетная схема в SCAD

Расчет на действие ударной волны в SCAD выполнен по трем методикам, описанным выше.

Схема загрузки сооружения ударной волной при квазистатическом методе расчета представлена на рисунке 4. Обозначения эквивалентной статической нагрузки на различные конструкции сооружения приняты согласно [2].

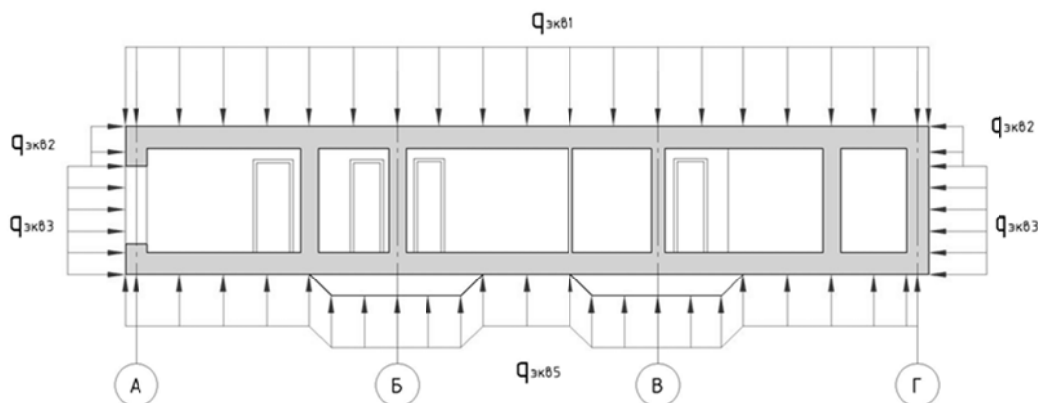


Рисунок 4. Схема приложения нагрузки от ударной волны (квазистатический метод)

Для учета кратковременных и мгновенных нагрузок в SCAD предусмотрено задание импульсных загрузок в модуле «Динамика» [42, 43] (см. рисунок 5).

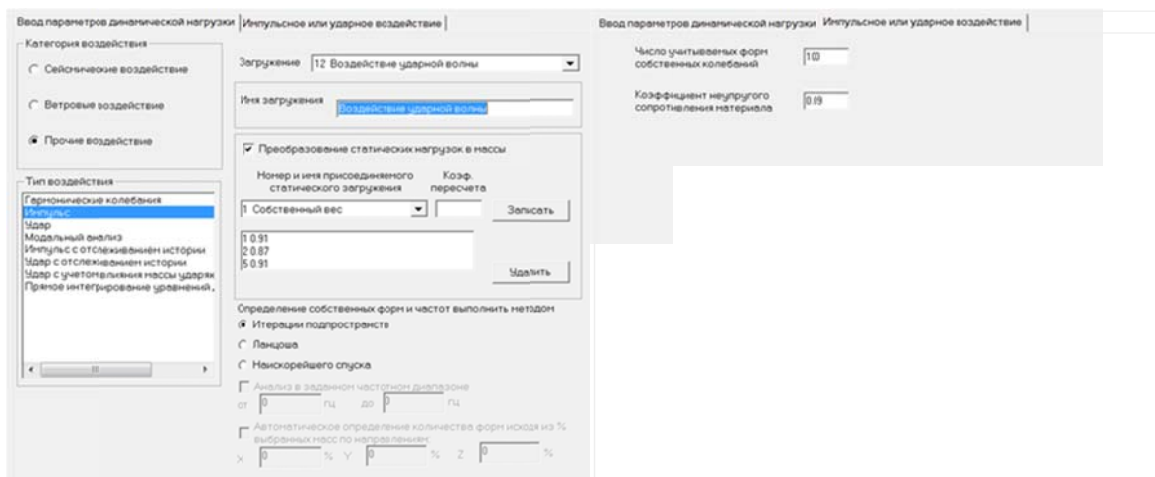


Рисунок 5. Ввод параметров динамической нагрузки. Импульсное воздействие

При задании импульсного нагружения необходимо указать форму и направление воздействия, а также его параметры (вес массы в узле, значение импульса или амплитуду силы воздействия, продолжительность воздействия, период и количество повторений) (см. рисунок 6).

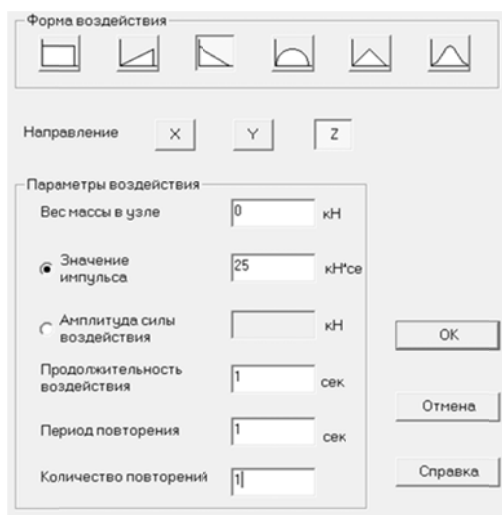


Рисунок 6. Параметры импульсного воздействия в SCAD

Для моделирования переменной особой нагрузки от ударной волны в среде SCAD использовался встроенный модуль «Прямое интегрирование уравнений движения» (см. рис. 7). Учет инерционных характеристик реализуется преобразованием статических нагружений в массы с соответствующими коэффициентами.

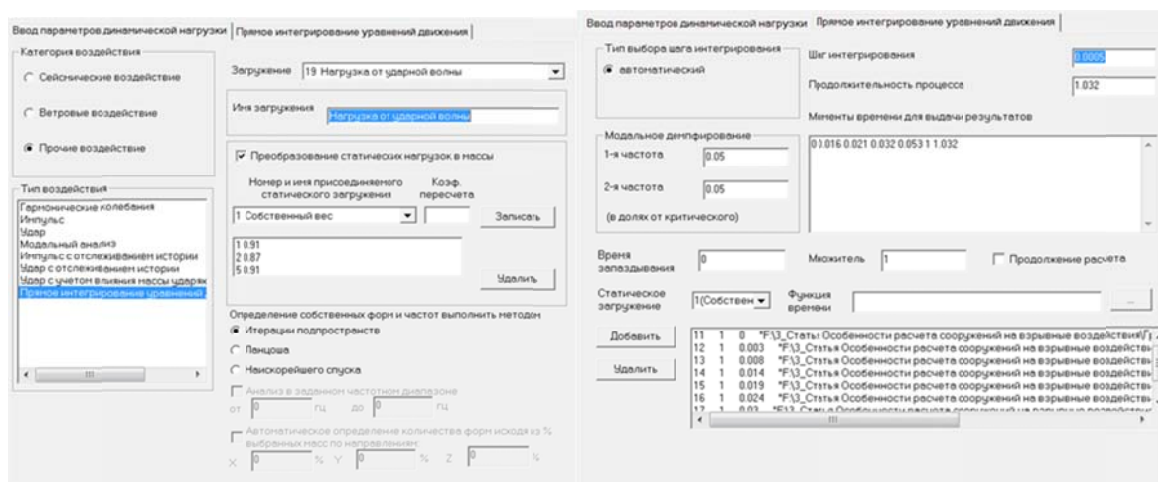


Рисунок 7. Модуль «Прямое интегрирование уравнений движения» в SCAD

Результаты расчета сооружения получены в виде перемещений узлов и усилий в элементах расчетной модели в SCAD.

Результаты расчета сооружения по трем методикам удобно представить в таблице 1.

Таблица 1. Анализ результатов расчета сооружения в SCAD

Метод расчета Позиция сравнения	Квазистатический метод (по СНиП II-11-77*)		Импульсное воздействие		Прямое интегрирование уравнений движения	
		%		%		%
Максимальное перемещение Z плиты покрытия, мм	11.08	100	19.22	173	6.38	58
Максимальное продольное усилие N_{max} в колоннах, кН	16577.62	100	18607.59	112	10814.82	65
Максимальный изгибающий момент M_{y_max} в колоннах, кН*м	164.51	100	2667.84	1622	312.64	190
Максимальный изгибающий момент M_{z_max} в колоннах, кН*м	735.72	100	5872.25	798	2195.59	298
Минимальный изгибающий момент M_{y_min} в колоннах, кН*м	-2597.27	100	-		-501.86	19
Минимальный изгибающий момент M_{z_min} в колоннах, кН*м	-733.14	100	-		-3203.88	437
Максимальная поперечная сила Q_{z_max} в колоннах, кН	337.33	100	1916.34	568	234.97	70
Максимальная поперечная сила Q_{y_max} в колоннах, кН	464.3	100	3977.96	857	2686.1	578
Минимальная поперечная сила Q_{z_min} в колоннах, кН	-3064.85	100	-		-479.94	16
Минимальная поперечная сила Q_{y_min} в колоннах, кН	-290.34	100	-		18.32	7
Максимальный изгибающий момент M_{x_max} в плите покрытия, кН*м/м	529.82	100	1183.78	223	459.15	87
Максимальный изгибающий момент M_{y_max} в плите покрытия, кН*м/м	527.31	100	1104.61	209	325.76	62
Минимальный изгибающий момент M_{x_min} в плите покрытия, кН*м/м	-645.83	100	-		-620.19	96
Минимальный изгибающий момент M_{y_min} в плите покрытия, кН*м/м	-609.39	100	-		-387.83	64
Максимальная поперечная сила Q_{y_max} в плите покрытия, кН/м	767.03	100	1218.27	159	589.33	77
Максимальная поперечная сила Q_{x_max} в плите покрытия, кН/м	747.59	100	1118.31	150	462.83	62
Минимальная поперечная сила Q_{y_min} в плите покрытия, кН/м	-732.08	100	-		-600.91	82
Минимальная поперечная сила Q_{x_min} в плите покрытия, кН/м	-802.95	100	-		-492.46	61

Расчет по трем методикам позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимальный прогиб конструкций покрытия не превышает предельно допустимых значений при расчете по трем методикам; условие ограничения деформаций выполнено.

2. Железобетонные конструкции сооружения обладают достаточными размерами сечений для восприятия поперечных сил; усилия, полученные в результате расчета сооружения, могут быть использованы в качестве основания для расчета армирования и конструирования строительных конструкций сооружения.

3. Расчет сооружения при задании особой нагрузки от ударной волны в виде импульсного нагружения показал завышенные значения перемещений узлов и внутренних усилий в элементах модели. Это объясняется тем, что продолжительность фазы сжатия, принятая в запас и равная длительности воздействия импульсной нагрузки, $\tau_+ = \theta = 1c$ [2, 3, 17], можно охарактеризовать как большую (не малую) величину, вследствие чего нагрузка от ударной волны не имеет ярко выраженного динамического характера, а ее действие ближе к статическому. В рассматриваемом случае моделирование динамической нагрузки от ударной волны в виде импульсного воздействия приводит к неправдоподобным результатам.

4. Перемещения и усилия в стенах и плитах при более точном и строгом динамическом расчете сооружения с использованием модуля «Прямое интегрирование уравнений движения» значительно меньше, чем при расчете по нормативной методике. Увеличившиеся значения изгибающих моментов и поперечных сил в колоннах объясняются отсутствием взаимной компенсации эквивалентных статических нагрузок (см. рисунок 3), имеющей место при квазистатическом методе расчета.

Заключение

На основании анализа результатов расчета можно сделать следующие выводы.

1. Очевидным преимуществом квазистатического расчета является его относительная простота и высокая скорость выполнения, что полезно на ранних этапах вариантного проектирования с целью выбора наиболее удачного технического решения.

2. Допущения и абстракции, принимаемые при квазистатическом расчете, рекомендованном [2], приводят к значительному запасу прочности несущих стен и плит и перерасходу материалов в строительных конструкциях.

3. Рассматривалась упругая стадия работы конструкций, не допускающая развития остаточных деформаций. Модальный анализ, являющийся частным случаем динамического метода, не применим при нелинейном динамическом анализе.

4. Избыточное давление во фронте ударной волны, действующее по поверхностям боковых стен, плит фундамента и покрытия и изменяющееся по координате и по времени, в SCAD следует задавать дискретными нагружениями. Каждому нагружению соответствует свой график изменения значений и время запаздывания.

5. SCAD позволяет учесть относительное демпфирование к коэффициентам Релея только для первой и второй собственных частот, что приводит к завышению демпфирования и занижению отклика для частот возмущения выше второй собственной. Данное обстоятельство может привести к ошибочным результатам при расчете сложных механических систем при высокочастотных возмущениях (например, взрыв).

6. Динамические расчеты сооружений на взрывное воздействие, выполняемые в модуле «Прямое интегрирование уравнений движения» SCAD, позволят снизить расход материалов и сметную стоимость строительства.

7. Остается открытым вопрос внедрения рассмотренной инновационной методики в практику проектирования и ее регламентирования в строительных нормах.

Литература

1. Кабальнов Ю.С., Кузьмина Е.А. Моделирование как основной метод решения задач на компьютере // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Информатика и информатизация образования. 2007. №10. С. 15–29.
2. Защитные сооружения гражданской обороны: СНиП II-11-77*. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987.

Чернуха Н.А. Особенности расчета сооружений на взрывные воздействия в среде SCAD

3. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа: ПИН АЭ-5.6. М.: Минатомэнерго СССР, 1986.
4. Eurocode 1: Actions on structures. Pt. 1–4: General actions – Wind actions. BS EN 1991-1-4:2005. Brussels: CEN / European Committee for Standardization. April 2005.
5. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-3.1 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002.
6. External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plant. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.5 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2003.
7. Eurocode No. 2. Design of Concrete Structures. Pt. 1: General Rules and Rules for Buildings (Revised Final Draft). October 1990.
8. Скоробогатов С.М. Место человеческого фактора в классификации техногенных катастроф железобетонных сооружений // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2008. №1. С. 94–97.
9. Назаров В.П., Коротовских Я.В. Компьютерные технологии прогнозирования пожаровзрывоопасности производственных объектов // Технологии техносферной безопасности. 2010. №5. С. 21–26.
10. Ефремов К.В., Лисанов М.В., Софьин А.С., Самусева Е.А., Сумской С.И., Кириенко А.П. Расчет зон разрушения зданий и сооружений на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2011. №9. С. 70–77.
11. Yan S., Wang J.-H., Wang D., Zhang L. Mechanism analysis on progressive collapse of RC frame structure under blast effect // Gongcheng Lixue – Engineering Mechanics. 2009. № 26 (SUPPL. 1). Pp. 119–123, 129.
12. Барштейн М.Ф., Бородачев Н.М., Блюмина Л.Х. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
13. Chen H.L., Xia Z.C., Zhou J.N., Fan H.L., Jin F.N. Dynamic responses of underground arch structures subjected to conventional blast loads: Curvature effects // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2013. Vol. 13. Issue 3. Pp. 322–333.
14. Lu Y., Wang Z., Chong K. A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2005. Vol. 25. Issue 4. Pp. 275–288.
15. Jayasooriya R., Thambiratnam D.P., Perera N.J., Kosse V. Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Issue 12. Pp. 3483–3495.
16. Yin X., Gu X., Lin F., Huang Q., Kuang X. Numerical simulation for collapse responses of RC frame structures under blast loads // Proceedings of the 8th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures. 2009. Pp. 739–745.
17. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 594 с.
18. Копаница Д.Г., Капарулин С.Л., Васильева Е.В. Влияние жесткости колонн на динамические параметры пространственного железобетонного каркаса в процессе ремонта // Вестник ТГАСУ. 2006. №1. С. 164–169.
19. Kabantsev O., Perelmuter A. Modeling transition in design model when analyzing specific behaviors of structures // Procedia Engineering. 2013. No. 57. Pp. 479–488.
20. Фиалко С.Ю. Прямые методы решения систем линейных уравнений в современных МКЭ-комплексах. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2009. 160 с.
21. Фиалко С.Ю. Применение многофронтального метода в программе SCAD для анализа большеразмерных расчетных моделей зданий и сооружений // Бюллетень строительной техники. 2005. №9. С. 61–63.
22. Перельмутер А.В., Фиалко С.Ю. Прямые и итерационные методы решения большеразмерных конечно-элементных задач строительной механики // XX международная конференция «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов». 24 – 26 сентября, Санкт-Петербург. Санкт-Петербург, 2003.
23. Фиалко С.Ю. Применение современных вычислительных технологий к расчету многоэтажных зданий SCAD // Вестник одесской государственной академии строительства и архитектуры. 2003. №9. С. 189–193.

24. Фиалко С.Ю. Агрегатный многоуровневый метод конечных элементов для анализа больших задач – моделей строительных зданий и сооружений // Вестник одесского национального морского университета. 2003. №10. С. 112–118.
25. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Фиалко С.Ю. Блочный метод Ланцоша со спектральными трансформациями для решения больших МКЭ задач собственных колебаний // Вестник одесского национального морского университета. 2003. №10 С. 93–99.
26. Фиалко С.Ю. О методах решения большеразмерных задач строительной механики на многоядерных компьютерах // Инженерно-строительный журнал. 2013. №5(40). С. 116–124.
27. Fialko S. Iterative methods for solving large-scale problems of structural mechanics using multi-core computers // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2014. №14(1). Pp. 190–203.
28. Fialko S. Parallel finite element solver for multi-core computers // 2012 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2012. Art. no. 6354298. Pp. 525–532.
29. Anderson C.E., Baker W.E., Wauters D.K., Morris B.L. Quasi-static pressure, duration, and impulse for explosions (e.g. HE) in structures // International Journal of Mechanical Sciences. 1983. Vol. 25. Issue 6. Pp. 455–464.
30. Nassr A.A., Razaqpur A.G., Tait M.J., Campidelli, M. Foo S. Strength and stability of steel beam columns under blast load // International Journal of Impact Engineering. 2013. Vol. 55. Pp.34–48.
31. Котляревский В.А., Ганушкин В.И., Костин А.А. Убежища гражданской обороны: Конструкции и расчет. М.: Стройиздат, 1989. 606 с.
32. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979. 320 с.
33. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.
34. Hashin Z. Expanding the Capabilities of the Ten-Percent Rule for Predicting the Strength of Fibre–Polymer Composites // Composites Science and Technology. 1980. Vol. 62. No. 12-13. Pp. 1515–1544.
35. Xi-Yuan Zhou, Rui-Fang Yu, Liang Dong. The complex-complete-quadratic-combination (CCQC) method for seismic responses of non-classically damped linear mdof system // 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada. 2004. Paper No.848.
36. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1995. 416 с.
37. Маркеев А. П. Теоретическая механика. М.: ЧеРО, 1999. 572 с.
38. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны: СНиП 2.01.51-90. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.
39. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. Взрывные явления. Оценка и последствия. М.: Мир, 1986. 319 с.
40. Попов Н.Н. Расчет конструкций специальных сооружений. М.: Стройиздат. 1974. 194 с.
41. Шамин В.М. Расчет защитных сооружений на действие взрывных нагрузок. М.: Стройиздат. 1989. 71 с.
42. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD М.: Издательство СКАД СОФТ, 2011. 656 с.
43. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Карпиловский В.С., Маляренко А.А. Интегрированная система для расчета и проектирования несущих конструкций зданий и сооружений SCAD OFFICE. Новая версия, новые возможности // Инженерно-строительный журнал. 2009. №2. С. 10–12.
44. Копаница Д.Г., Гринкевич М.А. Динамика железобетонной модели пространственного сооружения, заглубленной в песчаный грунт // Вестник ТГАСУ. 2007. №1. С. 126–136.
45. Гринкевич М.А. Собственные колебания модели пространственного железобетонного сооружения в деформируемой среде // Вестник ТГАСУ. 2007. №2. С. 157–160.
46. Сушков Ю.В., Данилов В.Л. Влияние геологических и климатических условий на прочность транспортных тоннелей при сейсмозрывных воздействиях // Наука и техника транспорта. 2008. №3. С. 31–41.
47. Юдаков А.А., Бойков В.Г. Численные методы интегрирования уравнений движения многокомпонентных механических систем, основанные на методах прямого интегрирования уравнений динамики метода конечных элементов // Вестник Удмуртского университета. 2013. Вып. 1. С. 131–144.

*Никита Антонович Чернуха, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(906)225-2579; эл. почта: chernukha.n@mail.ru*

© Чернуха Н.А., 2014

doi: 10.5862/MCE.45.3

Structural Analysis of Buildings at Explosive Actions in SCAD

N.A. Chernukha*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(906)225-2579; e-mail: chernukha.n@mail.ru*

Key words

types of explosions, structural dynamics, quasi-static method, impulse action, direct integration, wave diffraction, FEM, SCAD

Abstract

This article deals with the methods of structural analysis of buildings and structures at explosive actions. In introduction, there is a review of types of explosions and the features of their action on structures. In the theoretical part of the study the main issue was to present different methods of structural analysis of buildings at explosions.

Determination of wave parameters and process of wave diffraction are presented. Impulse loading of building structures in SCAD is described. The article also shows how module «Direct integration of motion equations» in SCAD can be used for solving problems of explosion dynamics. In the empirical part of the study the main concern was to compare stress-strain condition of building structures at explosions, using different methods of structural analysis. Automatic analysis was performed in SCAD, which implements finite element method (FEM). The results of the study demonstrate the advantages and disadvantages of described methods, as well as the functional abilities of SCAD, when solving the problems of explosion dynamics.

References

1. Kabalnov Yu.S., Kuzmina Ye.A. *Vestnik Moscow city teacher training university. Series "Informatics and Information of Education"*. 2007. No.10. Pp. 15–29. (rus)
2. *Zashchitnyye sooruzheniya grazhdanskoj oborony* [Civil defense structures]: SNiP II-11-77*. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR. 1987. (rus)
3. *Normy stroitel'nogo proyektirovaniya AS s reaktorami razlichnogo tipa* [Rules for designing nuclear power plants with different reactors]: PiN AE-5.6. Moscow: Minatomenergo SSSR, 1986. (rus)
4. Eurocode 1: Actions on structures. Pt. 1–4: General actions – Wind actions. BS EN 1991-1-4:2005. Brussels.: CEN / European Committee for Standardization. April 2005.
5. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No.NS-G-3.1 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2002.
6. External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plant. IAEA Safety Standards Series. Safety Guide No. NS-G-1.5 / International Atomic Energy Agency. Vienna, 2003.
7. Eurocode No. 2. Design of Concrete Structures. Pt. 1: General Rules and Rules for Buildings (Revised Final Draft). October 1990.
8. Skorobogatov S.M. *AKADEMICHESKIY VESTNIK URALNIIPROEKT RAASN*. 2008. No.1. Pp. 94–97. (rus)
9. Nazarov V.P., Korotovskikh Ya.V. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti*. 2010. No. 5. Pp. 21–26. (rus)
10. Efremov K.V. [et al]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2011. No. 9. Pp. 70–77. (rus)
11. Yan S., Wang J.-H., Wang D., Zhang L. Mechanism analysis on progressive collapse of RC frame structure under blast effect. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*. 2009. No.26 (SUPPL. 1). Pp. 119–123, 129.
12. Barshteyn M.F., Borodachev N.M., Blyumina L.Kh. *Dinamicheskij raschet sooruzheniy na spetsialnyye vozdeystviya* [Dynamic analysis of structures on special actions]. Moscow: Stroyizdat, 1981. 215 p. (rus)
13. Chen H.L., Xia Z.C., Zhou J.N., Fan H.L., Jin F.N. Dynamic responses of underground arch structures subjected to conventional blast loads: Curvature effects. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2013. Vol. 13. Issue 3. Pp. 322–333.

14. Lu Y., Wang Z., Chong K. A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2005. Vol. 25. Issue 4. Pp. 275–288
15. Jayasooriya R., Thambiratnam D. P., Perera N. J., Kosse V. Blast and residual capacity analysis of reinforced concrete framed buildings. *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33. Issue 12. Pp. 3483–3495.
16. Yin X., Gu X., Lin F., Huang Q., Kuang X. Numerical simulation for collapse responses of RC frame structures under blast loads. *Proceedings of the 8th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures*. 2009. Pp. 739–745.
17. Birbraer A.N., Roleder A.J. *Ekstremalnyye vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme Actions on Structures]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekh. un-ta, 2009. 594 p. (rus)
18. Kopaniitsa D.G., Kaparulin S.L., Vasilyeva Ye.V. *VESTNIK of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2006. No.1. Pp. 164–169. (rus)
19. Kabantsev O., Perelmuter A. Modeling transition in design model when analyzing specific behaviors of structures. *Procedia Engineering*. 2013. No.57. Pp. 479–488.
20. Fialko S.Yu. *Pryamyye metody resheniya sistem lineynykh uravneniy v sovremennykh MKE-kompleksakh* [Direct methods of solving sets of linear equations in modern FEM complexes]. Moscow: Izd-vo SKAD SOFT, 2009. 160 p. (rus)
21. Fialko S.Yu. *Byulleten stroitelnoy tekhniki*. 2005. No.9. Pp. 61–63. (rus)
22. Perelmuter A.V., Fialko S.Yu. *XX mezhdunarodnaya konferentsiya "Matematicheskoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred. Metody granichnykh i konechnykh elementov"* [XX International conference "Mathematical modeling in mechanics of continua. Boundary element and finite element method]. Saint-Petersburg, 2003. (rus)
23. Fialko S.Yu. *Vestnik odesskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arkhitektury*. 2003. No.9. Pp. 189–193. (rus)
24. Fialko S.Yu. *Vestnik odesskogo natsionalnogo morskogo universiteta*. 2003. No.10. Pp. 112–118. (rus)
25. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Fialko S.Yu. *Vestnik odesskogo natsionalnogo morskogo universiteta*. 2003. No.10. Pp. 93–99. (rus)
26. Fialko S.Yu. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No.5(40). Pp. 116–124. (rus)
27. Fialko S. Iterative methods for solving large-scale problems of structural mechanics using multi-core computers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014. No.14(1). Pp. 190–203.
28. Fialko, S. Parallel finite element solver for multi-core computers. *2012 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2012*. Art. no. 6354298. Pp. 525–532.
29. Anderson C.E., Baker W.E., Wauters D.K., Morris B.L. Quasi-static pressure, duration, and impulse for explosions (e.g. HE) in structures. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1983. Vol. 25. Issue 6. Pp. 455–464.
30. Nassr A.A., Razaqpur A.G., Tait M.J., Campidelli M., Foo S. Strength and stability of steel beam columns under blast load. *International Journal of Impact Engineering*. 2013. Vol. 55. Pp. 34–48.
31. Kotlyarevskiy V.A., Ganushkin V.I., Kostin A.A. *Ubezshishcha grazhdanskoy oborony: Konstruktsii i raschet* [Civil defense shelters: Structures and analysis]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 606 p. (rus)
32. Clough R. W., Penzien J. *Dinamika sooruzheniy* [Dynamics of structures]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 320 p.
33. Birbraer A.N. *Raschet konstruktsiy na seysmostoykost* [Seismic Analysis of Structures]. Saint-Petersburg: Nauka, 1998. 255 p. (rus)
34. Hashin Z. Expanding the Capabilities of the Ten-Percent Rule for Predicting the Strength of Fibre-Polymer Composites. *Composites Science and Technology*. 1980. Vol. 62. No.12–13. Pp. 1515–1544.
35. Xi-Yuan Zhou, Rui-Fang Yu, Liang Dong. The complex-complete-quadratic-combination (CCQC) method for seismic responses of non-classically damped linear mdof system. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B.C., Canada. 2004. Paper No.848.
36. Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Short course of theoretical mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1995. 416 p. (rus)
37. Markeyev A.P. *Teoreticheskaya mekhanika* [Theoretical mechanics]. Moscow: CheRO, 1999. 572 p. (rus)

38. *Inzhenerno-tekhnicheskiye meropriyatiya grazhdanskoy oborony* [Engineering activities of civil defense]: SNiP 2.01.51-90. Moscow: TsITP Gosstroya SSSR, 1985. (rus)
39. Beyker U., Koks P., Uestayn P. *Vzryvnyye yavleniya. Otsenka i posledstviya* [Explosion Hazards and Evaluation]. Moscow: Mir, 1986. 319 p. (rus)
40. Popov N.N. *Raschet konstruksiy spetsialnykh sooruzheniy* [Structural analysis of special structures]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 194 p. (rus)
41. Shamin V.M. *Raschet zashchitnykh sooruzheniy na deystviye vzryvnykh nagruzok* [Structural analysis of defense structures on explosive loads]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 72 p. (rus)
42. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A. *SCAD Office. Vychislitelnyy kompleks SCAD* [Computing complex SCAD]. Moscow: Izdatelstvo SKAD SOFT, 2011. 656 p. (rus)
43. Perelmuter A.V., Kriksunov E.Z., Karpilovskiy V.S., Malyarenko A.A. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No.2. Pp. 10–12.
44. Kopanitsa D.G., Grinkevich M.A. *VESTNIK of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007. No.1. Pp. 126–136. (rus)
45. Grinkevich M.A. *VESTNIK of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007. No.2. Pp. 157–160. (rus)
46. Sushkov Yu.V., Danilov V.L. *Science and Technology in Transport*. 2008. No.3. Pp. 31–41. (rus)
47. Yudakov A.A., Boykov V.G. *Bulletin of Udmurt University*. 2013. No.1. Pp. 131–144. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 12–22