

Зотова Екатерина Валерьевна, аспирант кафедры технической механики Ростовского государственного строительного университета, т.: 89287502225, e-mail: egitica@yandex.ru;

Панасюк Леонид Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики Ростовского государственного строительного университета, т.: 89282294780, (863)2277569, e-mail: panasjuk_1@rambler.ru;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин ФГБОУ ВПО «Майкопский государственный технологический университет».

РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ НА ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ (рецензирована)

В статье рассматриваются результаты расчетов и моделирование поведения конструкции при воздействии ударных и импульсных нагрузок.

Ключевые слова: экстремальные воздействия (ударные и импульсные нагрузки), колебания, жизненный цикл, динамика работы сооружения.

Zotova Catherine Valerjevna, postgraduate of the Department of Technical Mechanics, Rostov State University of Civil Engineering, tel.: 89287502225, e-mail: egitica@yandex.ru;

Panasjuk Leonid Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Technical Mechanics of the Rostov State University of Civil Engineering, tel.: 89282294780, (863) 2277569, e-mail: panasjuk_1@rambler.ru;

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Construction and General Professional disciplines of FSBEI HPE "Maikop State Technological University".

CALCULATION OF CONSTRUCTIONS FOR IMPULSE PRESSURE (reviewed)

The article deals with the results of calculations and modeling of the behavior of designs under the influence of stroke and impulse loads.

Keywords: extreme effects (stroke and impulse loads), variations, life cycle, dynamics of the structure functioning.

Человечество, на сегодняшний день, развивается довольно быстро и целеустремленно во всех направлениях своей жизнедеятельности. Прогресс затронул современный мир своими инновациями не только в плане информационных технологий, но и в социальных, экономических направлениях. Постепенно человек привыкает к благам цивилизации и стремится расположиться к ним поближе. Что, в свою очередь, способствует территориальному росту крупных городов.

Так как территория расположения наиболее крупных городов занимает гораздо меньшую площадь, чем необходимо для нормального сосуществования его жителей, городские постройки растут не вширь, а ввысь. Что уже таит в себе определенную угрозу при каких-либо аварийных ситуациях.

Современные блага цивилизации предполагают, что население того, или иного города должно быть всем обеспечено. Следовательно, в пределах одного города, на территории в несколько кварталов, «по соседству» могут находиться как жилые, так и промышленные комплексы. Поэтому, возникает угроза «цепной реакции» в случае какого-либо ЧП. Появление так называемой «цепной реакции» может зависеть от факторов возникновения, а так же масштаба того, или иного ЧП. Но существенным параметром является местоположение «очага» и наличие возможных объектов в предполагаемой зоне поражения. Т.е., если результатом возникшего ЧП будет какое-либо разрушение, оно может затронуть близлежащие застройки, способствуя появлению в них определенных повреждений, либо деформаций.

Чрезвычайные воздействия на здания могут быть не только техногенного, но и природного характера. К таким воздействиям можно отнести сейсмические колебания, ураганы, смерчи, и т.п.

Исходя из вышеизложенного, можно с уверенностью сказать, что при проектировании каких-либо конструкций необходимо учесть в расчетах все возможные варианты развития сложившихся ситуаций по тем, или иным причинам, чтобы обеспечить максимально продолжительный жизненный

цикл рассматриваемой конструкции. Поэтому в современных нормативных документах оговорены нормы и правила расчета конструкции на все виды нагрузок. Если же та, или иная рассматриваемая конструкция предполагает наличие определенных специфических нагрузок, то ее расчет ведется с учетом этих нагрузок. Так, например, если мы проектируем промышленное здание по производству каких-то сплавов, то должны учесть помимо стандартных воздействий и нагрузок еще и ударные, взрывные, и т.п. нагрузки от технического оборудования. Если же район проектируемой конструкции предполагает наличие сейсмической активности, то обязательным пунктом является расчет на сейсмостойкость.

Проблемы защиты зданий от воздействий экстремального характера вполне актуальны и данный вопрос нередко становится предметом определенных дискуссий на различных научных конференциях, или мероприятиях. Например, на одной из таких конференций в г. Москве в Московском государственном строительном университете (МГСУ), было заслушано, проанализировано и разобрано несколько работ по данной тематике:

- доклад «Мероприятия по обеспечению взрывоустойчивости и взрывобезопасности промышленных, энергетических, транспортных и гражданских объектов» д.т.н., проф. А.В. Мишуева – руководителя НИЦ «Взрывоустойчивость» (МГСУ), содержащий конкретные рекомендации по защите зданий и сооружений от этих воздействий [1].

- доклад профессоров А.Я. Корольченко, В.В. Холщевникова, В.М. Ройтмана (МГСУ) содержал ряд ключевых проблем в области инженерной безопасности [1].

Однако, на сегодняшний день, расчеты на ударные и импульсные нагрузки хоть и применяются, но обусловлены некоторыми ограничениями и упрощениями. Поэтому данная область оставляет возможность дальнейшего изучения.

Некоторые виды экстремальных воздействий можно моделировать импульсными нагрузками. Существенным здесь является знание закона изменения нагрузки во времени (импульсные нагрузки от взрывов, или порывов ветра), или наличие информации об ударном импульсе. Эти характеристики определяются в ходе наблюдений за природными процессами и накапливаются для дальнейшей статической обработки. Т.е. какая-либо выбранная нагрузка действует на конструкцию не постоянно, а с определенной частотой на заданном промежутке времени. Позволяет выявить все необходимые характерные точки на графиках колебаний элементов конструкции.

На рисунках 1, 2 отражены зависимости различных экстремальных воздействий на конструкции зданий.

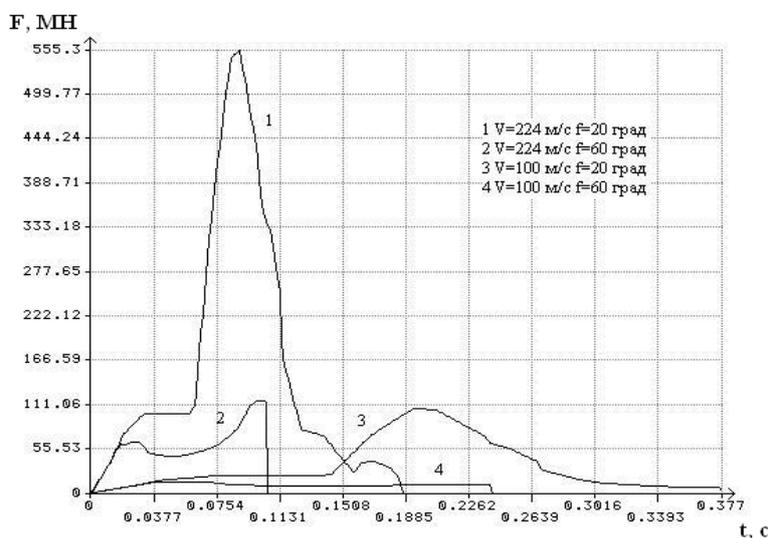


Рис. 1 – Пример определения нагрузки на строительные конструкции при ударе гражданского самолета первой группы массой 130 тонн

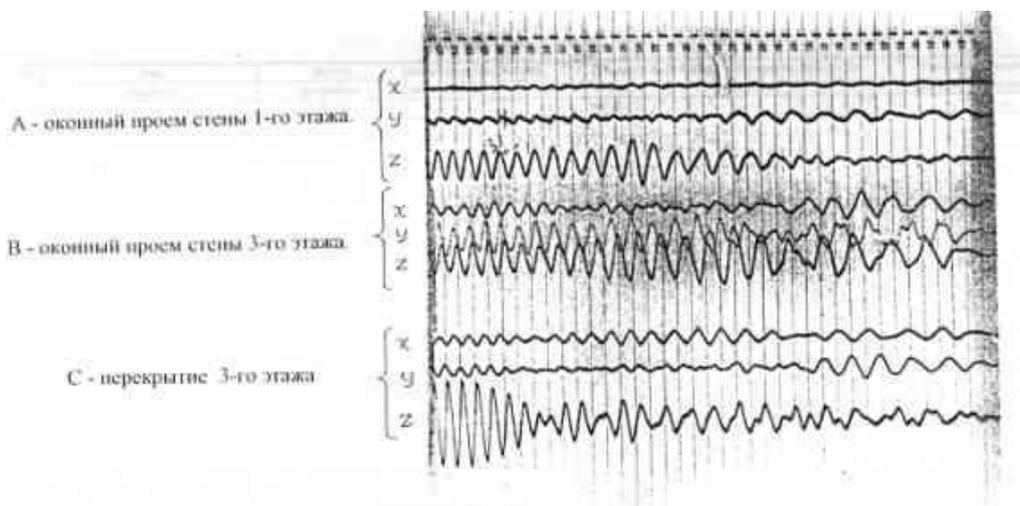


Рис. 2 – Типичная осциллограмма колебаний конструкций дома 390 при вибропогружении свай при остановке двигателя вибратора

Изучение и проведение специальных расчетов тех, или иных конструкций позволяет максимально учесть все возможные факторы от экстремальных воздействий и последствия их влияния на рассматриваемые конструкции. Это обеспечивает прогнозирование жизненного цикла конструкции, что в свою очередь позволяет заранее подготовить ряд мер для устранения каких-либо последствий от этих воздействий. А так же подготовить план с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности людей, оказавшихся в зоне риска.

В современных программных комплексах расчета сооружений заложены возможности динамического расчета на некоторые частные варианты импульсных нагрузок. Ниже приведен график воздействия взрыва на здания и сооружения, полученный средствами пакета LS-DYNA [2].

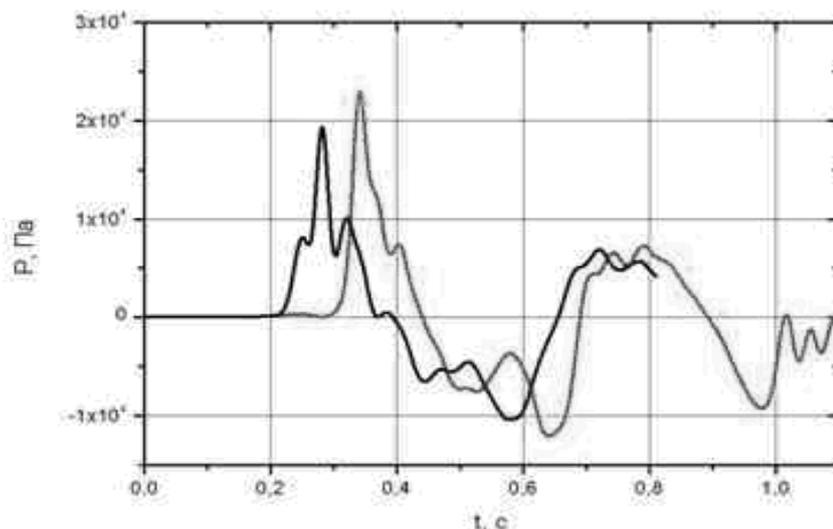


Рис. 3 – Избыточное давление на фасад здания для двух режимов детонации

На данном рисунке (рис. 3) представлена часть диаграммы, на которой можно отметить первичный всплеск, с последующим затуханием амплитуды. Что позволяет понять и проанализировать действие единичной импульсной нагрузки.

Динамический расчет конструкций требует значительных затрат ресурсов компьютера – времени и памяти. Снижение потребностей в ресурсах можно добиться на уровне совершенствования численных методов. Перспективным является использование явных безусловно устойчивых методов прямого интегрирования уравнений движения. Варианты абсолютно устойчивых схем прямого интегрирования с тривиально обрабатываемой матрицей системы получены в [4, 5]:

$$\left\{ \begin{aligned}
& \left[2M + \frac{\alpha \Delta t}{\sqrt{\alpha-1}} \cdot C_D + \frac{\alpha \lambda \Delta t^2}{2(\alpha-1)} \cdot K_D \right] \cdot q^{n+1} = \\
& \left[2M + \frac{\alpha \Delta t}{\sqrt{\alpha-1}} \cdot C_D + \frac{\alpha \lambda \Delta t^2}{2(\alpha-1)} \cdot K_D + \frac{\alpha \Delta t^3}{\sqrt{\alpha-1}} \cdot (C - C_D) \cdot R^{-1} \cdot K - \Delta t^2 \cdot K + \frac{\alpha^2 \cdot \Delta t^4}{2(\alpha-1)} \cdot \left(K - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot K \right] \cdot q^n + \\
& \left[2M + \frac{\alpha \Delta t}{\sqrt{\alpha-1}} \cdot C_D + \frac{\alpha \lambda \Delta t^2}{2(\alpha-1)} \cdot K_D - \Delta t \cdot C - \frac{\alpha \Delta t^2}{2\sqrt{\alpha-1}} \cdot K - \frac{\alpha \Delta t^3}{\sqrt{\alpha-1}} \cdot (C - C_D) \cdot R^{-1} \cdot \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot C + \frac{\alpha}{2} \cdot K \right) \right. \\
& \left. + \frac{\alpha^2 \cdot \Delta t^4}{2(\alpha-1)} \cdot \left(K - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot C + \frac{\alpha}{2} \cdot K \right) \right] \cdot s^{n+1} + \\
& \left[\left(1 - \frac{\alpha}{2\sqrt{\alpha-1}} \right) \cdot \Delta t^2 \cdot E - \frac{\alpha \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \Delta t^3}{\sqrt{\alpha-1}} \cdot (C - C_D) \cdot R^{-1} - \frac{\alpha^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) \cdot \Delta t^4}{2(\alpha-1)} \cdot \left(K - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \right] \cdot p^n + \\
& \left[\frac{\alpha \Delta t^2}{2\sqrt{\alpha-1}} \cdot E - \frac{\alpha^2 \cdot \Delta t^3}{2\sqrt{\alpha-1}} \cdot (C - C_D) \cdot R^{-1} - \frac{\alpha^3 \Delta t^4}{4(\alpha-1)} \cdot \left(K - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \right] \cdot p^{n+1} , \\
& s^{n+1} = -s^n + 2 \left(q^{n+1} - q^n \right) , \\
& R = 2M + \alpha \Delta t \cdot C_D + \frac{\alpha^2 \Delta t^2}{2} \cdot K_D , \quad \alpha \in [1..2] \\
& 0.5 \Delta t^2 \cdot K_D \cdot q^{n+1} = \left[0.5 \Delta t^2 \cdot K_D + 0.5 \Delta t^4 \cdot \left(K - \lambda \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot K \right] \cdot q^n + \\
& \left[0.5 \Delta t^2 \cdot K_D + 0.5 \Delta t^4 \cdot \left(K - \lambda \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot C + 0.5 K \right) \right] \cdot s^n - 0.25 \Delta t^4 \cdot \left(K - \lambda \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot \left(p^n + p^{n+1} \right) , \\
& s^{n+1} = -s^n + 2 \left(q^{n+1} - q^n \right) , \quad R := 2M + \Delta t \cdot C_D + 0.5 \Delta t^2 \cdot K_D
\end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned}
& 0.5 \Delta t^2 \cdot K_D \cdot q^{n+1} = \left[0.5 \Delta t^2 \cdot K_D + 0.5 \Delta t^4 \cdot \left(K - \lambda \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot K \right] \cdot q^n + \\
& \left[0.5 \Delta t^2 \cdot K_D + 0.5 \Delta t^4 \cdot \left(K - \lambda \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot \left(\frac{1}{\Delta t} \cdot C + 0.5 K \right) \right] \cdot s^n - 0.25 \Delta t^4 \cdot \left(K - \lambda \cdot K_D \right) \cdot R^{-1} \cdot \left(p^n + p^{n+1} \right) , \\
& s^{n+1} = -s^n + 2 \left(q^{n+1} - q^n \right) , \quad R := 2M + \Delta t \cdot C_D + 0.5 \Delta t^2 \cdot K_D
\end{aligned} \right. \quad (2)$$

На каждом шаге интегрирования по времени можно проверять условие достижения предельного состояния в каждом элементе модели и при нарушении критерия «выключать» эти элементы из ансамбля конечных элементов. Достаточно апробированы для реальных типов материала следующие гипотезы [6, 7, 8]:

$$(3) \left\{ \begin{aligned}
& \text{Критерий Мора (растяжение - сжатие):} \\
& \sigma_1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_{\text{н\acute{a}e}}} \cdot \sigma_3 = \sigma_b \\
& \text{Критерий Мора (растяжение - сдвиг):} \\
& \sigma_1 - \frac{\sigma_b - \tau_b}{\tau_b} \cdot \sigma_3 = \sigma_b \\
& \text{Критерий Писаренко – Лебедева:} \\
& \frac{\sigma_b}{\sigma_{\text{н\acute{а}e}}} \cdot \sigma_i + \frac{\sigma_{\text{н\acute{а}e}} - \sigma_b}{\sigma_{\text{н\acute{а}e}}} \cdot \sigma_1 = \sigma_b \\
& \text{Критерий Гениева (для бетонов):} \\
& J_2 \leq \frac{1}{3} \left[\sigma_{\text{сж}} \cdot \sigma_b - (\sigma_{\text{сж}} - \sigma_b) \cdot J_1 \right] \cdot \left[1 - \left[1 - \frac{3 \cdot (\tau_b)^2}{\sigma_{\text{сж}} \cdot \sigma_b} \right] \cdot \left[1 - \frac{J_3}{2} \cdot \left(\frac{J_2}{3} \right)^{-1.5} \right] \right] \\
& \text{Критерий Баландина (скальные породы и каменные материалы):} \\
& J_2 \leq \frac{1}{3} \left[\sigma_{\text{сж}} \cdot \sigma_b - (\sigma_{\text{сж}} - \sigma_b) \cdot J_1 \right] \\
& \text{Критерий Мизеса – Шлейхера – Боткина (для грунтов):} \\
& \sigma_i = \frac{6 \cdot \sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)} \cdot \left(-\sigma_0 + \frac{c}{\text{tg}(\phi)} \right) ,
\end{aligned} \right.$$

где J_1, J_2, J_3 – инварианты тензора напряжений, σ_i – интенсивность напряжений, σ_c – среднее напряжение, $\sigma_b, \sigma_{\text{сж}}, \tau_b$ – модули предельных значений растягивающих, сжимающих и касательных напряжений соответственно, c – сцепление, ϕ – угол внутреннего трения

При статических расчетах алгоритм определения предельной нагрузки можно представить так:

На первом этапе формируется матрица жесткости для линейно-упругой среды и решается система уравнений МКЭ при «единичном» внешнем воздействии:

$$K_0^0 \bar{q}^{(1)} = \bar{P} \rightarrow \bar{q}^{(1)} = (K_0^0)^{-1} \bar{P}$$

По вектору узловых перемещений от «единичного» воздействия $\bar{q}^{(1)}$ определяются во всех расчетных точках деформации и напряжения: $(\bar{\varepsilon})^{(1)} = \hat{O} \cdot (\bar{q})^{(1)}$, $\bar{\sigma}^{(1)} = D_0^0 \cdot \bar{\varepsilon}^{(1)}$. Параметр предельной нагрузки для каждой расчетной точки определяется из условия равенства интенсивности напряжений

предельному значению σ_T : $\beta_{пр,r}^{(1)} \bar{\sigma}_{i,r}^{(1)} = \sigma_{T,r}$, откуда $\beta_{пр,r}^{(1)} = (\sigma_{T,r}) / (\bar{\sigma}_{i,r}^{(1)})$. Здесь индекс r соответствует очередной расчетной точке области. Из множества значений параметров предельной нагрузки по всем

точкам области выбирается наименьший $\beta_{пр}^{(1)} = \min_{r=1...e} \{\beta_{пр,r}^{(1)}\}$, где e – общее количество расчетных точек. На втором этапе учитываются зоны пластических деформаций, полученные после первого этапа. При формировании матриц жесткости в расчетных точках, в которых наступило предельное состояние, в соответствии с диаграммой деформирования:

$$G_k = 0, \quad G_c = \frac{\sigma_T}{3 e_i}$$

Затем определяется приращение перемещений, деформаций и напряжений от единичного приращения нагрузки (4).

$$\left\{ \begin{array}{l} (\hat{E}_{\hat{e}})^{(1)} \Delta \cdot (\bar{q})^{(2)} = \Delta \cdot \bar{P}, \\ \text{или} \\ (\hat{E}_{\hat{e}})^{(1)} \Delta \cdot (\bar{q})^{(2)} = P^{(1)} + \Delta \cdot \bar{P} - (K_c)^{(1)} \cdot q^{(1)} \\ \Delta \cdot (\bar{\varepsilon})^{(2)} = \hat{O} \cdot \Delta \cdot (\bar{q})^{(2)} \\ \Delta \cdot (\bar{\sigma})^{(2)} = H^{(1)} \Delta \cdot (\bar{\varepsilon})^{(2)} \end{array} \right. \quad (4)$$

Приращения деформаций и напряжений линейны относительно параметра нагружения β , однако приращение интенсивности напряжений и деформаций является нелинейной функцией относительно β . Поэтому в каждой точке расчетной области для определения значения приращения нагрузки решается нелинейное относительно β уравнение (5) численным методом (в разработанном комплексе ПОЛЮС использован метод половинного деления с автоматическим выбором границ). Затем из множества значений β по всем расчетным точкам выбирается минимальное – см. (5).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{i,r}^{(2)} = \sigma_{i,r}^{(1)} (\sigma_{i,r}^{(1)} + \beta_r^{(2)} \Delta \bar{\sigma}_{i,r}^{(2)}) = \sigma_{T,r}, \quad r = 1...e \\ \beta^{(2)} = \min_{(r)} \{\beta_r^{(2)}\} \end{array} \right. \quad (5)$$

При динамических расчетах с учетом образования зон предельного состояния необходимо на каждой итерации предварительно уточнять величину шага интегрирования по времени для того, чтобы не в пределах одного временного шага не образовывалось большого количества зон пластики, т.к. в этом случае будет большой погрешность линеаризации на шаге интегрирования. Разумеется, информация об этом автоматически получается после прохождения очередного временного слоя. Однако, можно предложить следующий алгоритм, который позволит априори приближенно оценить величину шага. Для чего перед выполнением очередной итерации по времени согласно какой-либо схеме прямого интегрирования выполняются дополнительно следующие действия.

Во-первых, «грубо» оценивается приращение вектора перемещений как (6).

$$\Delta \cdot q^{n+1} \approx \Delta \cdot t \cdot \dot{q}^n \quad (6)$$

Очевидно, что (6) по форме совпадает с зависимостями для приращения параметров НДС системы с формальной заменой $\beta \leftrightarrow \Delta t$ и $\Delta \bar{q} \leftrightarrow \Delta \dot{q}$. Поэтому оценку величины Δt можно провести аналогично оценке β .

Если выбранный для достаточной точности интегрирования линеаризованной задачи динамики временной шаг превышает полученное из проведенной оценки, то в этой временной точке интегрирование следует проводить с меньшим значением шага, полученным аналогично β .

Следующим примером является моделирование процесса прогрессирующего разрушения конструкции при сейсмических и аварийных воздействиях в нелинейной динамической постановке.

На рис. 4 показан процесс разрушения здания во времени [3].

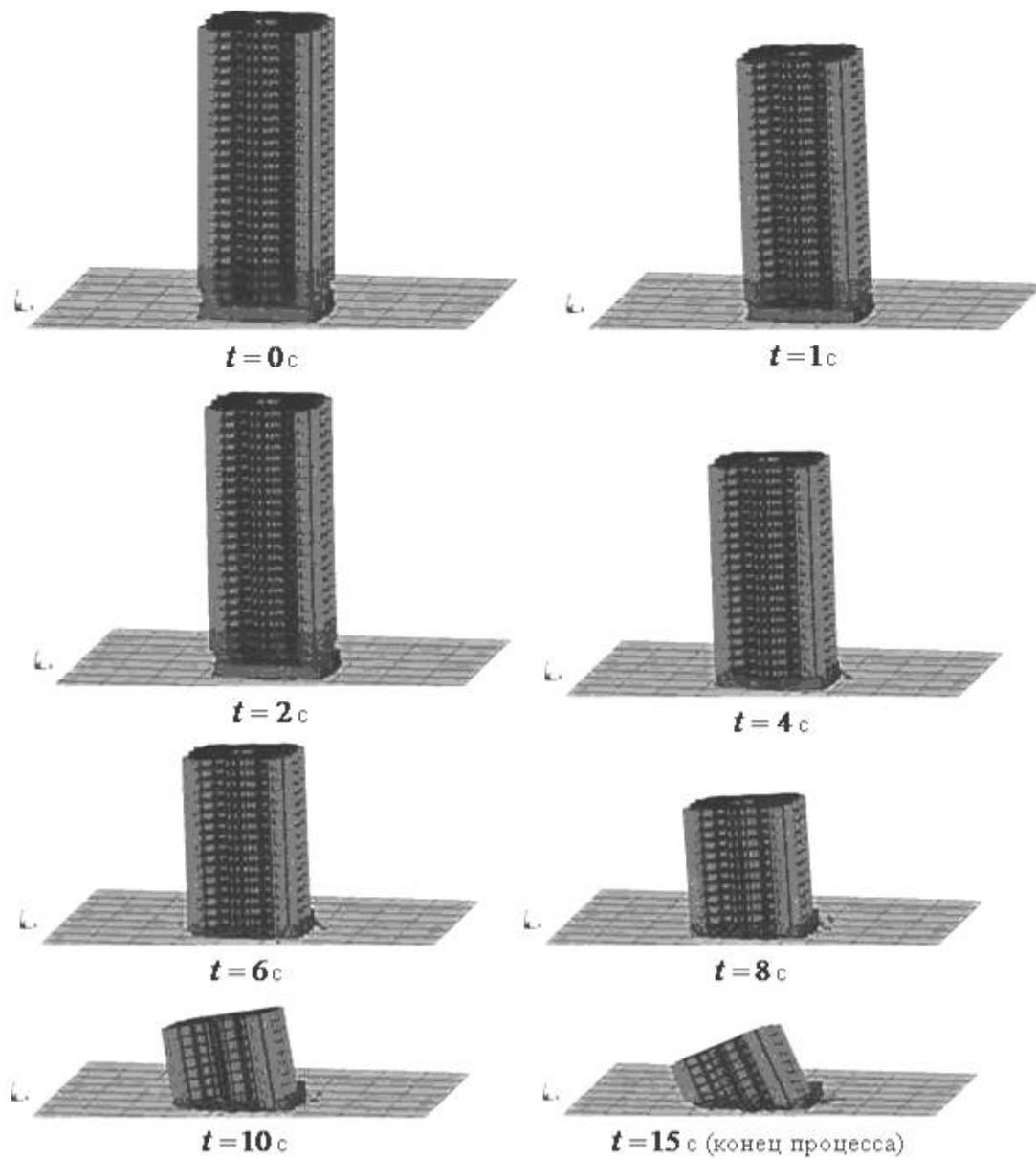
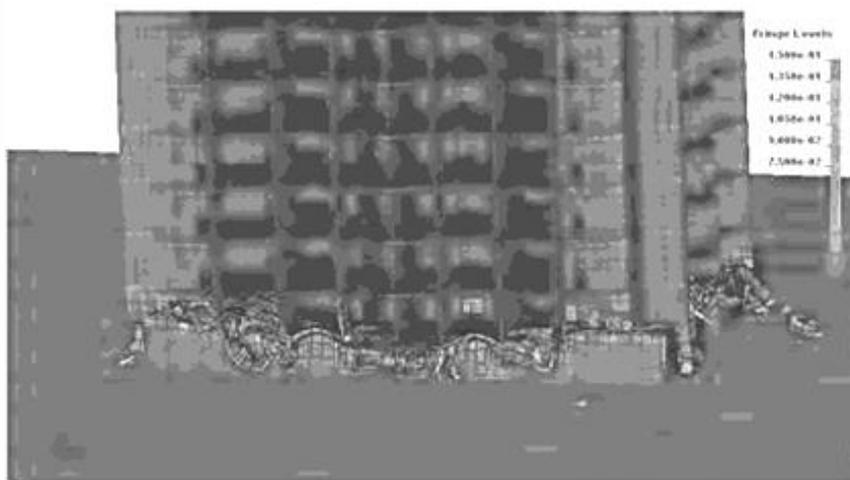


Рис. 4 – Процесс разрушения здания во времени

На рис. 5 более подробно показана картина разрушения в момент времени $t = 4\text{c}$ – а) и соответствующие данному моменту времени пластические деформации в элементах – б).



а) картина разрушения



б) изополю пластических деформаций

Рис. 5 – Детальная картина разрушения здания в момент времени $t = 4$ с

Из выше представленного можно сделать следующие выводы:

На сегодняшний день система расчетов конструкции на экстремальные воздействия (ударные, взрывные, сейсмические и др. нагрузки), устойчивость к последующему прогрессирующему обрушению довольно таки отработана и позволяет учесть работу здания, а так же прогнозировать его жизненный цикл, и ряд мероприятий для защиты конструкции, для ее последующего восстановления.

Современные методы позволяют учесть динамику работы пространственного сооружения на чрезвычайные импульсные воздействия. Однако, расчеты в динамической постановке на сегодняшний день достаточно нераспространены. Большая часть расчетов ведется в упрощенной квазистатической постановке. Объясняется это значительной трудоемкостью динамического расчета на импульсную нагрузку.

Поэтому совершенствование методов, алгоритмов и программных средств динамических расчетов является на сегодня актуальной задачей, что послужило мотивацией для диссертационной работы на тему «Нелинейный расчет строительных конструкций на импульсные воздействия».

Литература:

1. Теличенко В.И. О некоторых итогах научно-практической конференции «Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан»: доклад ректора МГСУ. URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-351017.html>
2. LS-DYNA. Воздействие взрыва на здания и сооружения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.procae.ru/gallery-of-works/ls-dyna-raschet/153-vzriv-ls-dyna.html>
3. Мкртычев О.В., Мкртычев А.Э. Расчет большепролетных и высотных сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению при сейсмических и аварийных воздействиях в нелинейной динамической постановке [Электронный ресурс]. URL: <http://mkrttychev.ru/htm/OVM.htm>
4. Васильков Г.В., Панасюк Л.Н. О решении физически нелинейных задач динамики сооружений прямыми методами // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1988. №5. С. 39-43.

5. Васильков Г.В., Панасюк Л.Н., Кудинов О.А. О решении нестационарных задач строительной механики прямыми методами // СМиРС. 1989. №1.
6. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Соппротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.
7. Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Маслов Г.С. Прикладная механика. М.: Высшая школа, 1989. 351 с.
8. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.

References:

1. *Telichenko V.I. On some results of scientific-practical conference "City building complex and livelihood security of the citizens": report of the rector of MSSU. URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-351017.html>*
2. *LS-DYNA. The impact of the explosion on buildings. URL: <http://www.procae.ru/gallery-of-works/ls-dyna-rasht/153-vzriv-ls-dyna.html>*
3. *Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.E. Calculation of large and high-rise buildings for resistance to progressive collapse under seismic and accidental effects in nonlinear dynamic formulation. URL:<http://mkrtychev.ru/htm/OVM.htm>*
4. *Vasylykov G.V., Panasyuk L.N. On the solution of physically nonlinear structural dynamics problems by direct methods // Proceedings of universities. Construction and Architecture. 1988. №5. P. 39-43.*
5. *Vasylykov G.V., Panasyuk L.N., Kudinov O.A. On the solution of non-stationary problems of structural mechanics using direct methods // SmiRS. 1989. №1.*
6. *Birger I.A., Mavlyutov R.R. Strength of Materials. M.: Nauka, 1986. 560 p.*
7. *Iosilevich G.B., Stroganov G.B., Maslov G.S. Applied mechanics. M: High School, 1989. 351 p.*
8. *Vyalov S.S. Rheological fundamentals of soil mechanics. M.: Higher School. 1978. 447 p.*