УДК 624.075.23:666.973+69.058.8+624.042.6

*ПЛЯСКИН АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ, аспирант,*
*plyaskinandrei@mail.ru*
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,*
*634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

# РАСЧЕТ МОДЕЛИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНОЙ СЖИМАЮЩЕЙ СИЛЫ И ПОПЕРЕЧНОГО УДАРА*

В статье приводятся результаты расчета моделей железобетонных колонн при совместном действии осевой сжимающей силы и поперечного удара. Предлагается алгоритм расчета модели колонны, выполненной из мелкозернистого бетона. На первом этапе решается ударно-волновая задача с использованием пакета программ РАНЕТ-3. В результате расчета определяются форма разрушения, кинематические параметры и остаточный импульс от движения модели. На втором этапе эти результаты используются в качестве начальных условий для расчета сжатой колонны в среде пакета программ APM Civil Engineering-11. В зоне локального разрушения принята эквивалентная поперечная нагрузка, заменяющая действие остаточного импульса удара. Полученные результаты приводятся в виде картин напряженного состояния и деформаций модели. Сопоставление результатов расчетов с данными экспериментов показало их удовлетворительную сходимость.

***Ключевые слова***: моделирование; модель железобетонной колонны; удар; разрушение; напряженное состояние.

*ANDREY S. PLYASKIN, Graduate Student,*
*plyaskinandrei@mai.ru*
*Tomsk State University of Architecture and Building,*
*2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

# SIMULATION OF REINFORCED CONCRETE COLUMN MODEL UNDER AXIAL COMPRESSING FORCE AND SHEAR LOAD

This article presents the model simulation results of reinforced concrete columns under a joint action of axial compressing force and shear load. A computation algorithm has been proposed for a column model made of sand concrete. The first phase has included solving an shock-wave problem using software package RANET-3. Further, a collapse mode, kinematic parameters, and residual pulse of the model moving have been determined. At the second stage the results obtained have been used to compute the compressed column using software package APM Civil Engineering-11. In the local collapse area an equivalent collision load has been assumed to replace the residual pulse effect. The experimental findings are presented as a stress and strain state of the model. It has been shown that computation results as compared to experimental data turned to be in a good agreement.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.

© А.С. Пляскин, 2013

**Keywords**: simulation; reinforced concrete column; dynamic loads; collapse; stress and strain state.

В практических расчетах железобетонных колонн каркаса на действие ударной или взрывной нагрузки возникает необходимость учета действия статических сжимающих сил от эксплуатационных нагрузок.

Расчеты конструкций на ударно-волновое нагружение реализуются путем решения динамических уравнений, не учитывающих действие статических сил. Поэтому расчет сжатой колонны на действие поперечного удара или взрыва в полной трехмерной постановке представляет собой весьма сложную задачу. Решение этой задачи с некоторым приближением может быть выполнено последовательно в два этапа. Сначала решается ударно-волновая задача, в результате решения которой определяется схема разрушения конструкции и ее кинематические параметры. Полученные результаты принимаются в качестве начальных условий для решения квазистатической задачи. На втором этапе расчет проводится на действие сжимающей силы от эксплуатационной нагрузки. При этом расчетная схема квазистатического решения принимается по результатам расчета на ударно-волновое нагружение. Реализация задачи выполняется путем использования двух расчетных комплексов, в нашем случае РАНЕТ-3 [3] и APM Civil Engineering-11 [2].

В пакете программ РАНЕТ-3 [3] реализуются методы, основанные на принципах механики сплошной среды для решения задач на ударно-волновое нагружение. Это позволяет оценить напряженно-деформированное состояние колонны при ударно-волновом нагружении и получить схему ее разрушения, а также определить кинематические параметры, включая скорость и ускорение конечных элементов (КЭ), составляющих расчетную схему.

При локальном разрушении действием удара выносится часть бетонного сечения и деформируются или разрушаются арматурные стержни, попавшие в зону действия нагрузки. Помимо локального разрушения происходит движение конструкции в целом. Расчетом на ударно-волновое нагружение могут быть определены скорости конечных элементов, находящихся вне зоны локального разрушения. Количество движения для этих элементов определяется умножением их массы на скорость. В результате может быть получена картина распределения остаточного импульса по объему всей конструкции при действии нагрузки, вызвавшей локальное разрушение. Результаты этих расчетов принимаются в качестве исходных для дальнейшего решения задачи в среде APM Civil Engineering-11 [Там же].

Рассмотрим расчет несущей способности модели железобетонной колонны на действие статической продольной сжимающей силы и поперечного удара. На первом этапе выполним расчет модели на действие поперечной ударной нагрузки [4]. Используя эти результаты, проведем расчет на действие статической сжимающей силы и квазистатической нагрузки от действия остаточного после выноса сечения импульса.

Расчет выполнен методом конечных элементов [1, 2]. В основу реализации положен метод перемещений. Перемещения конечного элемента в произвольной точке описываются набором функций – полиномами от координат

точки. Подстановка в эти функции координат узловых точек конечного элемента позволяет записать перемещения $u(x)$ произвольной точки элемента через неизвестные перемещения его узловых точек:

$$\vec{u}(x) = \sum_{i=1}^{n} N_i(x)\vec{u} \text{ или } \vec{u}(x) = N(x)\vec{U},$$

где $N_i(x)$ – функция формы элемента; $\vec{u}(x)$ – вектор перемещения $i$-го узла элемента; $N(x)$ – матрица функций форм элемента; $\vec{U}$ – вектор всех узловых перемещений элемента.

Связь напряжений $\sigma(x)$ с деформациями $\varepsilon(x)$ для линейного поведения материала описывается уравнением

$$\vec{\sigma} = D\vec{\varepsilon},$$

где $D$ – матрица упругости.

Выражение деформаций через узловые перемещения элемента

$$\vec{\varepsilon} = B\vec{u}.$$

Полная потенциальная энергия элемента определяется выражением

$$\Pi^{(e)} = \frac{1}{2}\int_v \vec{\varepsilon}^T D\vec{\varepsilon} dV - \int_v \vec{u}^T \vec{p} dV - \int_s \vec{u}^T \vec{q} dS,$$

где $\vec{p}$ и $\vec{q}$ – векторы объемных и поверхностных сил соответственно.

Подставляя вектор деформации через узловые перемещения

$$\Pi^{(e)} = (\frac{1}{2}\vec{U}^T \int_v (BN)^T DBNdV)\vec{U} - (\int_v \vec{p}^T NdV + \int_s \vec{q}^T NdS)\vec{U},$$

выражение для потенциальной энергии запишем в виде

$$\Pi^{(e)} = \frac{1}{2}\vec{U}^T K\vec{U} - f^T\vec{U},$$

где $K^e = \int_v (BN)^T DBNdV$ – матрица жесткости; $f^T = \int_v \vec{p}^T NdV + \int_s \vec{q}^T NdS$ – вектор приведенных перемещений.

Полная потенциальная энергия системы получается суммированием по всем ее элементам:

$$\Pi = \sum_e \Pi^{(e)}.$$

Минимизация функционала потенциальной энергии дает систему уравнений МКЭ

$$KU = F,$$

где $K$ – глобальная матрица жесткости и $F$ – вектор узловых сил, полученные путем суммирования соответствующих членов матриц жесткости $K^{(e)}$ и векторов $f$ отдельных конечных элементов.

Для построения матриц жесткости и массы, а также геометрической матрицы элемента используются функции формы, позволяющие представить перемещения любой точки в элементе через перемещения его узлов.

Моделирование железобетонной колонны и расчеты проведены с использованием пакета программ APM Civil Engineering-11 [2]. Расчетная схема и конструкция рассматриваемой модели приняты по результатам проведенных ранее экспериментальных исследований [5]. Бетонное тело и арматурный каркас модели железобетонной колонны моделировались объемными элементами (солидами) в форме параллелепипеда с 24 степенями свободы, по три в каждом узле. В общей сложности расчетная модель состоит из 303 900 КЭ. Граничные условия для опорной части – запрет перемещений по осям *x*, *y*, *z* (жесткая заделка), для оголовка запрет перемещений по осям *x*, *y* (ползун). Сжимающая осевая сила моделировалась давлением на грань объемного элемента. Физико-механические свойства материалов расчетной модели, значение осевой сжимающей силы и параметры динамической нагрузки приняты из эксперимента.

Результаты расчета на ударно-волновое нагружение в начальный момент времени показаны на рис. 1. Здесь изображены поля напряжений и соответствующая схема разрушения.

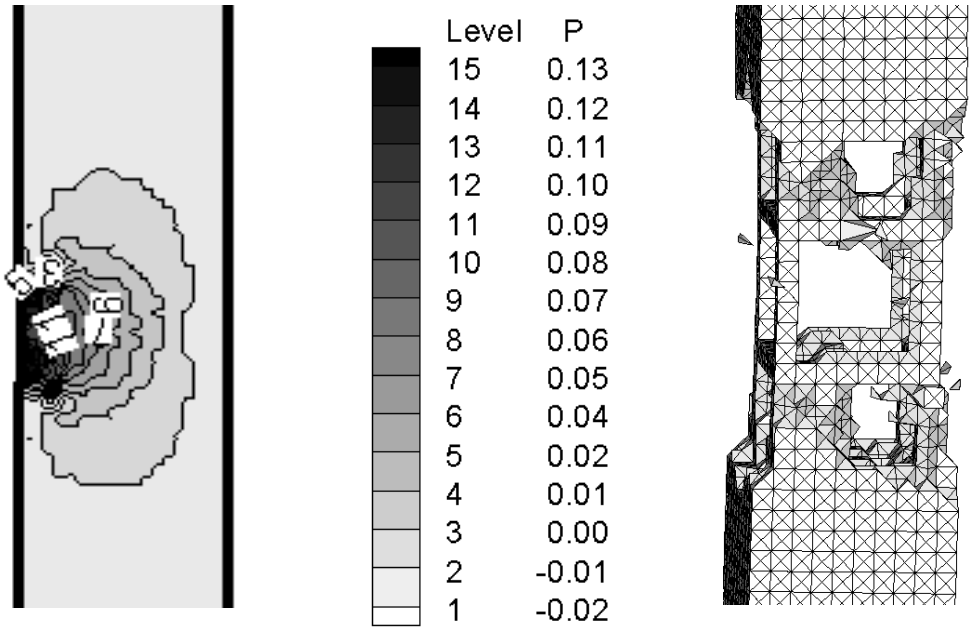


Рис. 1. Напряжения в модели от действия удара и схемы разрушения, полученные расчетом в среде РАНЕТ-3

Полученные результаты приняты в качестве начальных условий для решения квазистатической задачи, в которой расчетная схема модели соответствует локальному разрушению, а распределенный по высоте модели остаточный импульс приложен в виде эквивалентной нагрузки в зоне разрушения.

Разрушенная часть сечения конструкции моделировалась удалением объемных элементов (рис. 2). Значение остаточного импульса может быть принято в зависимости от процента армирования модели колонны и скорости полета ударника в соответствии с данными таблицы [4].

**Величина остаточного поперечного импульса $I_1$(кг м/с) в колоннах после удара недеформируемым индентором**

| Остаточный поперечный импульс, кг м/с | Скорость удара, м/с | | | | | Процент армирования |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 15 | 30 | 54,8 | 63,3 | 100 | |
| $I_1$ | 4,565 | 9,257 | 6,893 | 5,825 | 4,658 | 3,0 |
| $I_1$ | 3,984 | 8,880 | 7,385 | 6,207 | 4,890 | 4,0 |
| $I_1$ | 2,358 | 8,248 | 6,945 | 4,870 | 2,438 | 5,0 |

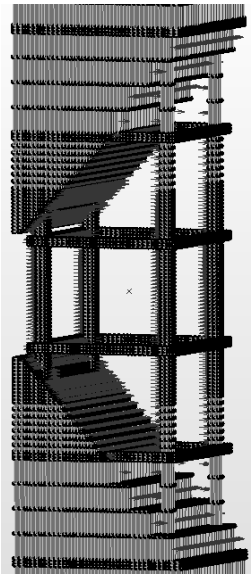

Рис. 2. Расчетная модель колонны после выноса бетонного сечения

В расчете принимаем значение импульса для модели с процентом армирования 3 %.

Используем расчетную схему модели колонны с вынесенным сечением для расчета в APM Civil Engineering-11. Основное уравнение, описывающее поведение модели:

$$M \cdot \ddot{\Delta} + C \cdot \dot{\Delta} + K \cdot \Delta = P(t),$$

где $M$ – матрица масс системы; $C$ – матрица демпфирования; $K$ – матрица жесткости конструкции; $\Delta$ – вектор узловых перемещений конструкции; $P(t)$ – вектор внешней нагрузки, зависящий от времени.

Для приближенного учета демпфирования матрица $C$ представляется в виде линейной комбинации матриц $M$ и $K$:

$$C = \beta_1 K + \beta_2 M,$$

где коэффициенты $\beta_1$ и $\beta_2$ подбираются таким образом, чтобы при различных собственных частотах декременты колебаний были постоянны. Этим обеспе-

чивается частотно-независимое демпфирование, характерное для железобетонных конструкций.

Согласно записи уравнения равновесия все силовые факторы изменяются по одному закону. При решении этой задачи используется метод разложения решения в ряд по собственным формам колебания конструкции:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{n} \vartheta_i q_i(t),$$

где $\vartheta_i$ – вектор $i$-й собственной формы; $q_i$ – обобщенное перемещение по $i$-й форме.

Используя такое представление, исходное матричное уравнение можно свести к $n$ независимым уравнениям типа

$$\ddot{q}_i + \gamma \dot{q}_i + \omega^2 q_i = R_i(t),$$

где $\omega_i$ – частота колебаний по $i$-й форме; $\gamma$ – коэффициент неупругого сопротивления, который в свою очередь можно представить:

$$\gamma = \frac{\delta}{\pi},$$

где $\delta$ – коэффициент затухания, численно равный логарифму отношения амплитуд для двух моментов времени, отличающихся на период:

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}.$$

Задача решается исходя из нулевых начальных условий в виде интеграла Дюамеля. Для большинства нагрузок вклад в решение различных форм колебаний уменьшается с ростом номера частоты $i$.

Карта эквивалентных напряжений в конструкции модели колонны показана на рис. 3. Максимальные напряжения возникли в арматурных стержнях, испытывающих растяжение и сдвиг.

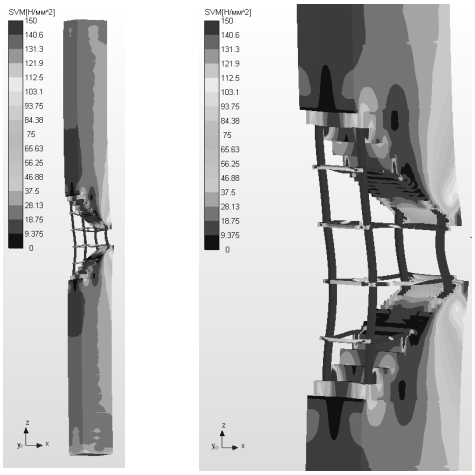


Рис. 3. Карта эквивалентных напряжений на деформированной модели

Соответствующая картина деформаций приведена на рис. 4. Слева показаны деформированная модель колонны и участок локального разрушения от действия ударника. Справа дана картина разрушения модели колонны, полученная экспериментально.

Помимо локального разрушения модели наблюдаются значительные деформации по месту защемления конструкции в опорах. Максимальные расчетные перемещения модели составили 3 мм в зоне закрепления. Арматурные стержни получили смещение до трех и более мм. В большей степени деформировались стержни рабочей арматуры, прилегающие к месту удара.

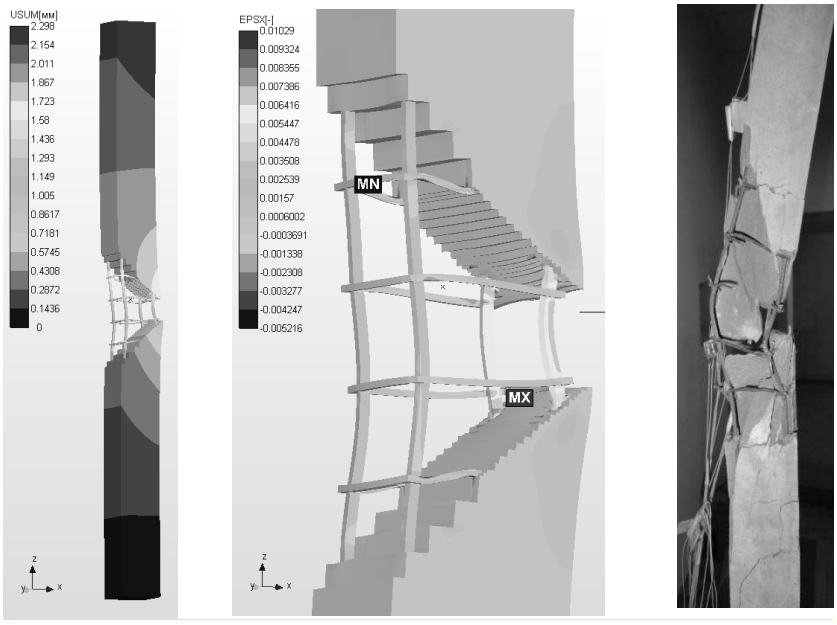


Рис. 4. Деформации модели колонны при одновременном действии сжимающей силы и поперечной ударной нагрузки, полученные расчетом и экспериментально

Полученные результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными данными. Сравнивались значения и формы деформаций. Показано, что экспериментальные величины перемещений превышают расчетные значения не более чем на 24 %. Это подтверждает возможность использования предложенного алгоритма расчета для определения напряженно-деформированного состояния железобетонных колонн, испытывающих одновременное действие продольной сжимающей силы и поперечной ударной нагрузки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галлагер, Р.* Метод конечных элементов. Основы: [пер. с англ.] / Р. Галлагер. – М. : Мир, 1984. – 423 с.
2. *Замрий, А.А.* Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure3D / А.А. Замрий. – М. : Изд-во АПМ, 2006. – 228 с.

3. *Югов, Н.Т.* Расчёт адиабатических нестационарных течений в трёхмерной постановке (РАНЕТ-3) / Н.Т. Югов, Н.Н. Белов, А.А. Югов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201 061 104 2. – Москва, 2010.
4. *Расчет остаточного поперечного импульса* в железобетонной колонне при ударно-волновом нагружении ее боковой поверхности / Н.Н. Белов, Н.Т. Югов, Д.Г. Копаница, С.Л. Капарулин, А.С. Пляскин // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 4. – С.179–190.
5. *Копаница, Д.Г.* Экспериментальные исследования моделей железобетонных колонн при ударном воздействии / Д.Г. Копаница, А.С. Пляскин // Вестник ТГАСУ. – 2011. – № 4. – С. 91–96.

## REFERENCES

1. *Gallagher, R.* Metod konechnykh elementov [Finite element analysis. Fundamentals]. Moscow : Mir, 1984. 423 p. (transl. from Engl.)
2. *Zamriy, A.A.* Proyektirovaniye i raschet metodom konechnykh elementov trekhmernykh konstruktsiy v srede APM Structure3D [Three-dimensional structure design and finite element method using APM Structure3D medium]. Moscow : Izd-vo APM [APM Publishing House], 2006. 228 p. (rus)
3. *Yugov, N.T., Belov, N.N., Yugov, A.A.* Raschet adiabaticheskikh nestatsionarnykh techeniy v trekhmernoy postanovke (RANET-3) [Computation of adiabatic nonstationary flows using 3D device (RANET-3)]. Federalnaya sluzhba po intellektualnoy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM № 201 061 104 2. Moskva [State Registration Certificate for IBM N 201 061 104 2]. Moscow, 2010. (rus)
4. *Belov, N.N., Yugov, N.T., Kopanitsa, D.G., Kaparulin, S.L., Plyaskin, A.S.* Raschet ostatochnogo poperechnogo impulsa v zhelezobetonnoy kolonne pri udarno-volnovom nagruzhenii yeye bokovoy poverkhnosti [Computation of residual transverse pulse in reinforced concrete column under shock-wave collision load]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. No. 4. P. 179–190. (rus)
5. *Kopanitsa, D.G., Plyaskin, A.S.* Eksperimentalnyye issledovaniya modeley zhelezobetonnykh kolonn pri udarnom vozdeystvii [Experimental studies of reinforced concrete columns models under impact]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 4. P. 91–96. (rus)