

УДК 624.074.5

И. С. Талантов**КОМБИНИРОВАННЫЙ СПЕКТРАЛЬНО-ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ НА ВНЕЗАПНОЕ УДАЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
НА ПРИМЕРЕ СТАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ. ЧАСТЬ 2**

Дата поступления: 28.08.2015

Решение о публикации: 20.10.2015

Цель: Исследовать возможность применения спектрального анализа, лишенного недостатков численного интегрирования, в расчетах на прогрессирующее обрушение на этапе линейного деформирования систем. Предложить алгоритм, сочетающий в себе достоинства аналитического и численного решений дифференциального уравнения движения. **Методы:** Применялось решение задачи на собственные значения, использовались нормальные координаты при снижении размерности задачи, явное численное интегрирование по методу Адамса. **Результаты:** Предложен комбинированный динамический метод расчета стержневых систем с выключающимися элементами, основанный на разложении по формам колебаний до момента достижения пластических деформаций и численном решении при переходе в физическую нелинейность. В первой (теоретической) части изложены общая методика расчета и принятые в рамках задачи допущения. Описан потенциал линейного динамического расчета в форме задачи на собственные значения при анализе поведения реальных металлических структур, подверженных внезапному выключению элементов. Изложена основная идея и допущения предложенного подхода. Описаны расчетные предпосылки при анализе живучести покрытия павильона № 5а ОАО «ЛЕНЭКСПО». **Практическая значимость:** Описанный метод служит альтернативой и верификацией широко применяемым численным методам, используемым при проектировании особо ответственных зданий, позволяя сократить объем необходимых вычислений и получить аналитическое решение на этапе линейного деформирования.

Динамика сооружений, прогрессирующее обрушение, спектральный анализ, численное интегрирование, живучесть металлоконструкций.

Ivan S. Talantov, postgraduate student, i.talantov@yandex.ru (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering) MULTIMODAL SPECTRUM-NUMERICAL APPROACH TO PROBLEM OF SUDDEN ELEMENT DELETION ON THE EXAMPLE OF STEEL SPACE GRID STRUCTURES. PART 2

Objective: To study the possibility of applying spectrum analysis, devoid of drawbacks of numerical integration, in progressive collapse calculations during linear deformations stage. To suggest an algorithm combining advantages of analytical and numerical calculations of differential equation of motion. **Methods:** Free vibrations problem, usage of generalised co-ordinates for reducing system degree of freedom amount, explicit numerical integration by the Adams method. **Results:** A combined dynamic design method for bar system with failing elements, based on mode decomposition until plastic deformations appear, and numerical integration after reaching physical nonlinearity is considered in the article. In the first theoretical part base calculations method and assumptions are described. Potential of linear dynamic calculation in form of free vibrations problem in analysis of real steel space grid structures affected by sudden element failure is described. Basic idea and assumptions of suggested approach are

described. Calculation factors in robustness analysis of steel space grid coating of Lenexpo 5a pavilion are described. **Practical importance:** Described method is an alternative and a verification for the widely used numerical methods in unique and particularly important structures design. It reduces the amount of necessary calculations, and permits getting analytical solution during linear deformation stage.

Structure dynamics, progressive collapse, spectrum analysis, numerical integration, robustness of steel structures.

Для примера использования разработанного алгоритма и метода, описанного в первой части статьи [4], проведены расчеты реальной конструкции – структурного металлического покрытия павильона № 5а ОАО «ЛЕНЭКСПО» (рис. 1). Схема узловых нагрузок на покрытие сведена в таблицу.

Материал – сталь Ст20 по ГОСТ 1050-74 (Предел текучести $R_y = 25,0 \text{ кН/см}^2$). Сечения

профилей: трубы электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-75. Условные обозначения профилей указаны на рис. 2.

На рис. 3–5 представлены, соответственно, схема верхнего пояса, решетки и нижнего пояса структурного покрытия.

Расчетные предпосылки. Сопряжение элементов – идеально шарнирное, минимальный период, учитываемый в расчете собствен-

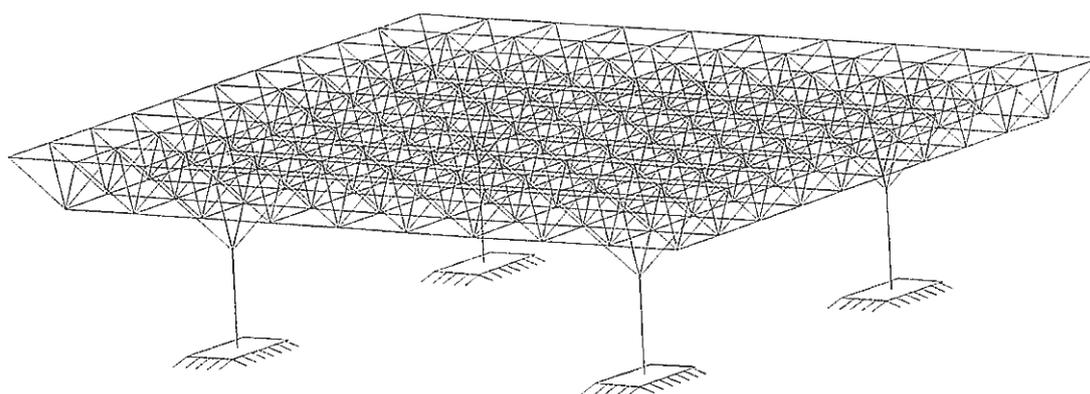


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы

Узловые нагрузки на покрытие

Тип нагрузки	Узел	Нормативное значение, кН	Расчетное значение, кН
Постоянная	Центральный	7,47	9,90
	Боковой	3,74	4,95
	Угловой	1,87	2,48
Снеговая	Центральный	9,00	14,40
	Боковой	4,50	7,20
	Угловой	2,25	3,60
Световой фонарь*	–	3,88	4,27

Примечание. * нагрузка постоянная и приложена к восьми узлам в центре структуры.

ной формы, выбирается наименьшим из двух значений:

- соответствующий частоте 33 Гц [1];
- равный удвоенному времени распространения упругих волн между двумя наиболее удаленными друг от друга точками конструкции:

$$T_{\text{lim}} = \frac{4 \cdot L_{\text{max}}}{V_0},$$

где T_{lim} – минимальный период собственной формы, учитываемой в расчете; L_{max} – рассто-

яние между двумя наиболее удаленными друг от друга узлами конструкции; V_0 – скорость распространения звука в материале.

Потеря устойчивости/разрушение элемента происходят мгновенно. Обрыв первого элемента происходит в состоянии статического положения равновесия полной системы. Массами в узлах нижнего пояса пренебрегаем. Общее количество узлов – 225, независимых узловых перемещений – 675, динамических степеней свободы – 363, элементов в полной системе – 816 (стойки учтены в виде податливых связей в месте сопряжения

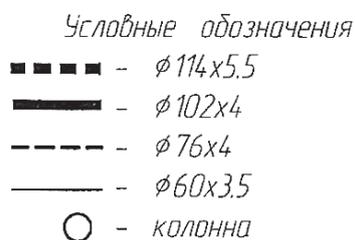


Рис. 2. Условные обозначения профилей для рис. 3–5

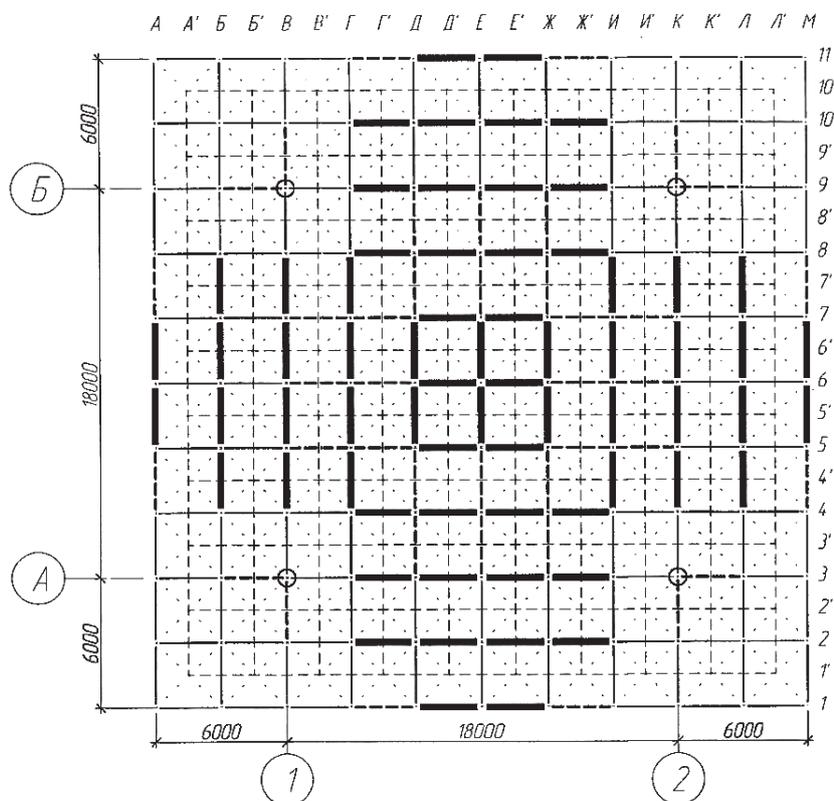


Рис. 3. Схема элементов верхнего пояса

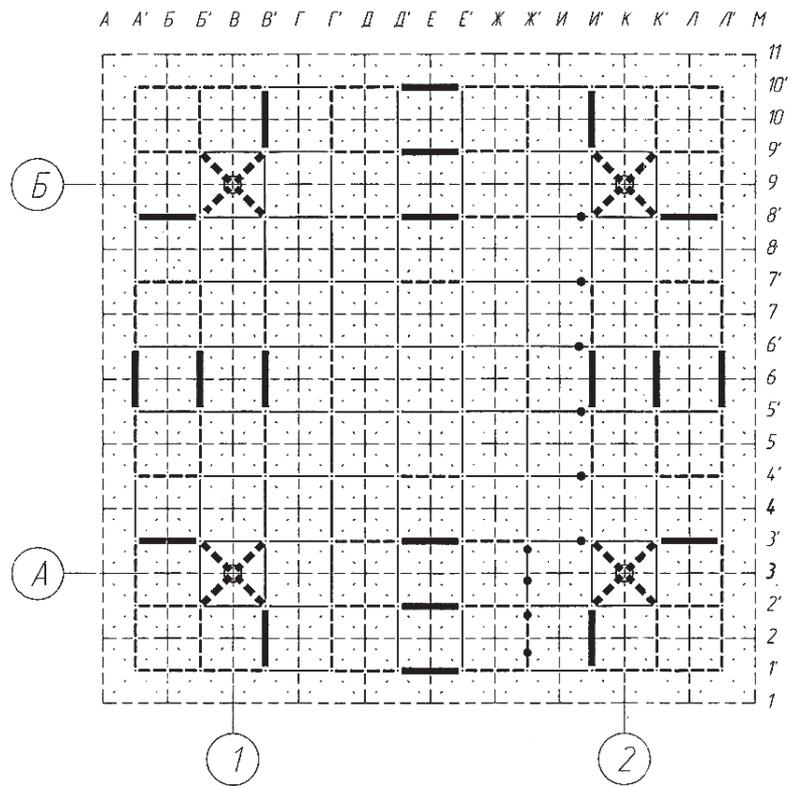


Рис. 4. Схема элементов решетки

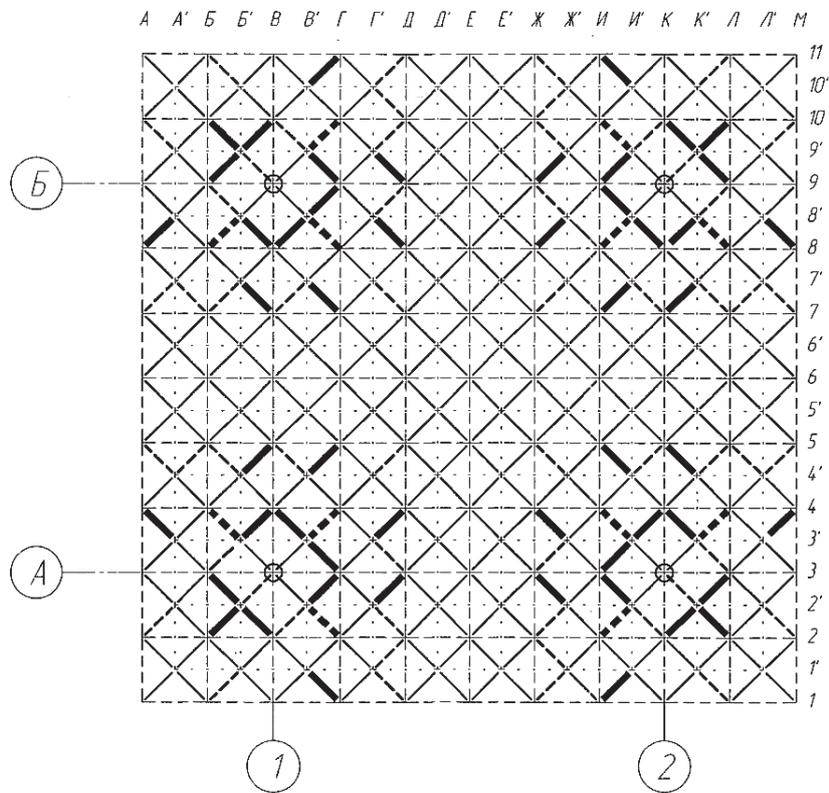
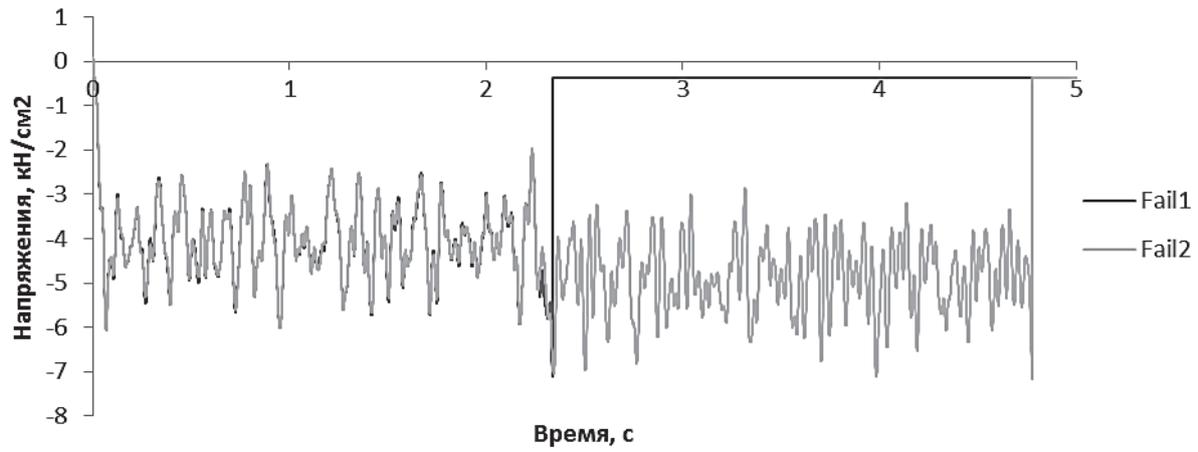
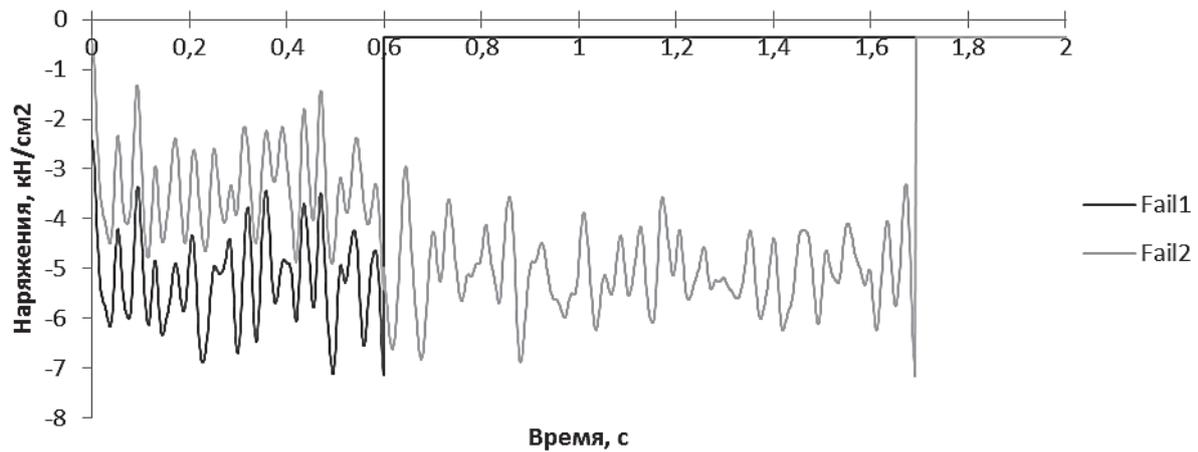


Рис. 5. Схема нижнего пояса

а



б



в

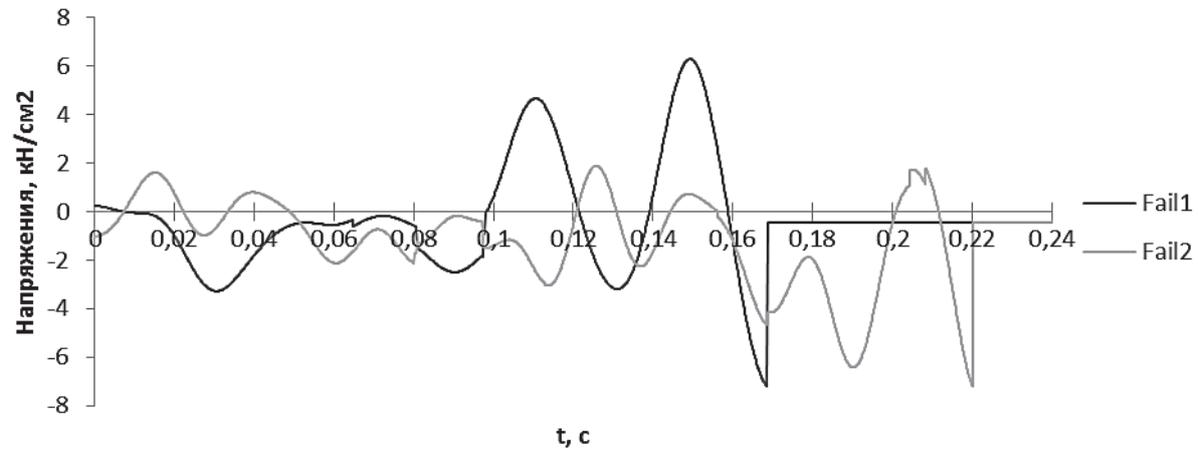


Рис. 6. Напряжения в характерных элементах:
а) сценарий 1; б) сценарий 2; в) сценарий 3

с капителями). Расчет ведется в среде MathCad Prime 2.0 по оригинальному алгоритму. Коэффициент уменьшения жесткости ζ принят в долях от величины, полученной экспериментально.

Рассмотрены три расчетных сценария:

1) удаление наиболее растянутого элемента сечением Тр. 102×4 (координаты концов 5'/И'-6'/И'), коэффициент уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента $\zeta = 0,05$. Величина масс соответствует полной расчетной нагрузке. Число учитываемых форм – 339;

2) удаление наиболее сжатого элемента сечением Тр. 102×4 (координаты концов 5/К-6/К), коэффициент уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента $\zeta = 0,05$. Величина масс соответствует полной расчетной нагрузке. Число учитываемых форм – 339;

3) удаление сечением Тр. $114 \times 5,5$, коэффициент уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента $\zeta = 0,0625$. Величина масс соответствует пониженной нагрузке, применяемой в расчетах на сейсмостойкость [3]. Число учитываемых форм 296.

В статье не приведены результаты расчетов по сценариям, предполагающим отказ одной из стоек, как приводящим к почти мгновенному лавинообразному разрушению конструкции. Отметим, что последовательный квазистатический расчет (с учетом приложения удвоенной реакции во вновь удаленном элементе) для каждого сценария приводит к разрушению всей конструкции.

На графиках (рис. 6) изображено изменение напряжений в двух элементах (Fail1 и Fail2), отказ которых наступает в последнюю очередь перед прекращением обрушения (сценарии 1 и 2, соответственно, рис. 6а, б) и наступлением геометрической изменяемости (сценарий 3, рис. 6в).

Первые два сценария приведены для наглядной демонстрации живучести металлической структуры даже при приложении полных расчетных нагрузок, при этом предпола-

гается, что потерявший устойчивость элемент полностью перестает воспринимать нагрузку. Сценарий 3 – как пример расчета, приводящего к потере геометрической неизменяемости системы.

Результаты расчета по каждому сценарию:

сценарий 1 – потеря устойчивости восьми элементов;

сценарий 2 – потеря устойчивости двух элементов;

сценарий 3 – последовательная потеря устойчивости 12 элементов.

Ни в одном из оставшихся элементов по всем трем сценариям напряжения растяжения не достигают предела текучести.

Выводы

На основе подхода, описанного в первой части статьи, и расчетных предпосылок рассчитано структурное металлическое покрытие павильона № 5а ОАО «ЛЕНЭКСПО». В результате выяснилось, что структура в целом способна удовлетворять условиям прочности и устойчивости при локальных повреждениях ряда элементов за исключением капителей и опорных стоек.

Для всех трех приведенных расчетных сценариев не потребовалось перехода к трудоемкому прямому численному интегрированию. Как следствие, аналитическое решение, основанное на разложении по собственным формам, рационально при анализе поведения металлических пространственных покрытий.

Библиографический список

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – СПб. : Наука, 1998. – 255 с.

2. Литвинский Г. Г. Экспериментальные исследования потери устойчивости несущих элемен-

тов крепи из коробчатого профиля / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – 2013. – № 40. – С. 8–13.

3. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81 / ФГУП «НИЦ „Строительство“». Введ. 2011-05-20. – М. : Стандартинформ, 2011.

4. Талантов И. С. Комбинированный спектрально-численный подход к решению задачи на внезапное удаление элементов на примере стального структурного покрытия. Часть 1 / И. С. Талантов // Изв. ПГУПС. – 2015. – № 3. – С. 201–206.

References

1. Birbrayer A. N. Raschet konstruktсий na seysmoykost [Calculation of Construction Elements' Seismic Stability]. St. Petersburg, Nauka, 1998. 255 p.

2. Litvinskiy G. G. *Sbornik nauchnykh trudov DonGTU – Proc. Donbas State Technical Univ.*, 2013, no. 40, pp. 8-13.

3. SP 14.13330.2011. *Stroitelstvo v seismicheskikh rayonakh* [Construction in Seismic Regions]. Intr. 2011-05-20. Moscow, Standartinform, 2011.

4. Talantov I. S. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 3, pp. 201-206.

Автор выражает благодарность ЗАО «Эркон» и лично Г. И. Белому за предоставленные исходные данные для расчета.

ТАЛАНТОВ Иван Сергеевич – аспирант, i.talantov@yandex.ru (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет).