

УДК 69.036.3

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111164>

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОЕ СОСТОЯНИЕ АРХИТЕКТУРНО-КОМПОЗИЦИОННОГО КОМПЛЕКСА В ФОРМЕ ЛЕНТЫ МЕБИУСА

Кандидаты техн. наук Л. В. Гапонова, П. А. Резник,
О. А. Калмыков (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова),
С. С. Гребенчук (ООО «Строитель»)

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН АРХІТЕКТУРНО-КОМПОЗИЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ У ФОРМІ СТРІЧКИ МЕБІУСА

Кандидати техн. наук Л. В. Гапонова, П. А. Резник,
О. О. Калмиков (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова),
С. С. Гребенчук (ООО «Будівельник»)

STRAIN-STRESS STATE OF ARCHITECTURAL-COMPOSITE COMPLEX IN THE FORM OF MOBIUS STRIP

PhD Tech. L. Gaponova, PhD Tech. P. Reznik., PhD Tech. O. Kalmykov,
S. Grebenchuk

В данной работе проведено численное исследование НДС сложного архитектурно-композиционного сооружения в форме ленты Мебиуса, выполненного из тяжелого конструкционного бетона с вкладышами из пенополистирола. Анализ НДС проведен методом конечных элементов (МКЭ) в специализированных программных комплексах с дополнительной обработкой выходных данных. Приведена методика анализа НДС больших объемных КЭ моделей строительных конструкций с учетом концентраторов напряжений и возможности появления вырожденных КЭ в результате автоматической триангуляции.

Ключевые слова: МКЭ, напряженно-деформируемое состояние, лента Мебиуса.

У даній роботі проведено чисельне дослідження НДС складної архітектурно-композиційної споруди у формі стрічки Мебіуса, виконаної з важкого конструкційного бетону з вкладишами з пінополістиролу. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів (МСЕ) в спеціалізованих програмних комплексах з додатковою обробкою вихідних даних. Наведено методику аналізу НДС великих об'ємних КЕ моделей будівельних конструкцій з урахуванням концентраторів напружень і можливості появи вироджених КЕ в результаті автоматичної триангуляції.

Ключові слова: програмні комплекси, напружено-деформований стан, стрічка Мебіуса.

In this paper, a numerical study of the strain-stress state of a complex architectural and composite structure in the form of a Mobius strip, made of heavy structural concrete with polystyrene void formers, was carried out. The analysis of strain-stress state is carried out by the finite element method (FEM) in specialized software packages with additional processing of output data. The procedure for analyzing the strain-stress state of large volumetric FE models of building structures, taking into account the stress concentrators and the possibility of appearance, degenerate finite elements as a result of automatic triangulation, is given. Verification of the proposed algorithm by numerical and qualitative comparison of the results of calculations by

different software packages was carried out. The fields of stress and displacement displacements obtained in different program packages showed sufficient convergence. The possibility of using this algorithm for the analysis of strain-stress state for other complex structures.

Keywords: FEM, strain-stress state, Mobius strip.

Введение. С развитием науки в области строительства, изобретением новых технологий возведения зданий и материалов значительно расширяются возможности инженеров. Вместе с этим также растут и требования, предъявляемые к зданиям. Инженеры и архитекторы стремятся удовлетворять не только функциональным требованиям, но и эстетическим. Каждое здание рассматривается как уникальное произведение искусства. Именно поэтому простые формы отходят на второй план, а на смену им приходят более сложные пространственные конфигурации.

Но не стоит забывать, что каждое здание должно отвечать необходимым требованиям, таким как: прочность, устойчивость, надежность, экономичность и т. д. Но принятые ранее сложные конфигурации влекут за собой необходимость решения большого

количества уравнений, выполнения ряда сложнейших математических операций, которые вручную осуществить представляется практически невозможным. Определение и анализ напряженно-деформируемого состояния (НДС) в таких конструкциях является сложной и востребованной задачей [1].

Анализ последних исследований. Архитектурно-композиционный комплекс в форме ленты Мебиуса может использоваться в качестве элемента игровых и спортивных площадок, парковых комплексов и прочего. Но главным предназначением данного сооружения является демонстрация возможностей строительной отрасли. Конструкция имеет как сложную внешнюю конфигурацию (рис. 1), так и не менее интересное внутреннее строение (рис. 2), для реализации которых используется способ безопалубочного бетонирования, а именно – торкретирование.

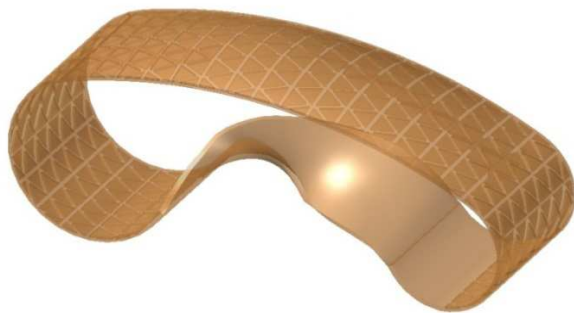


Рис. 1. Общий внешний вид



Рис. 2. Расположение вкладышей

В результате нанесения раствора образуется уплотненный слой торкрета, свойства которого отличаются от свойств бетона (торкрет обладает повышенной механической прочностью, морозостойкостью, водонепроницаемостью, характеризуется лучшим сцеплением с

поверхностью обрабатываемой конструкции). Поскольку создание криволинейной опалубки дорогостоящий, непростой и длительный процесс, требующий высококвалифицированных работников, то полный отказ от опалубки любого типа позволяет значительно

снизить финансовые расходы и временные затраты на возведение сооружения.

Раствор наносится непосредственно на арматурный каркас, сформированный таким образом, чтобы повторять очертания возводимой конструкции. Между стержнями каркаса находятся пенополистироловые вкладыши-пустотообразователи. Промежутки между вкладышами при бетонировании образуют ребра жесткости, которые обеспечивают распределение усилий и совместную работу внешних и внутренних обшивок.

Использование вкладышей позволяет облегчить конструкцию и сэкономить большой объем бетона. Но данные включения в железобетонную конструкцию меняют привычный характер работы и принцип расчета, поскольку образуется многослойная конструкция. Все эти закономерности изложены в работе «Трехслойные железобетонные конструкции» [2], написанной Майбородой и Карпюком. Необходимо учитывать характер работы связей между этими слоями. Идеальным вариантом является

обеспечение общей работы различных слоёв в местах их контакта. Эти нюансы также учитываются при расчете конструкции в ПК «ЛИРА-САПР».

Цель и задачи исследования. Цель – исследовать НДС сложного архитектурно-композиционного сооружения в форме ленты Мебиуса, выполненного из тяжелого конструкционного бетона с вкладышами из пенополистирола.

Для достижения поставленной цели решена задача сравнения НДС конструкции, модель которой выполнена из объемных конечных элементов, в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР».

Основная часть. Лента Мебиуса имеет сложное геометрическое строение (рис. 3). Внутреннее строение обусловлено наличием вкладышей-пустотообразователей, захороненных в тело конструкции. Общая, конструктивная толщина составляет 200 мм, приведенная – всего лишь 110 мм (с учетом ребер). Толщина наружной и внутренней обшивок – 50 мм каждая. Толщина пенополистирольных вкладышей – 100 мм.

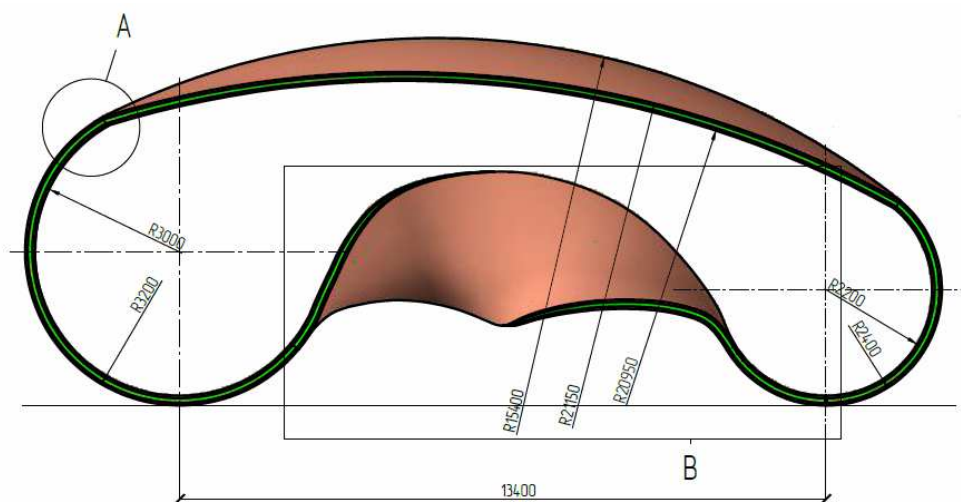


Рис. 3. Геометрические характеристики

Вкладыши-пустотообразователи имеют форму правильного треугольника, размеры которого подобраны с учетом унификации, общих габаритов

конструкции, необходимой толщины образуемых ребер жесткости.

Сооружение является многослойным только в верхней его части. Начало отсчета

положения пустотообразователей определяется величиной 1 м, которая откладывается наружу от обоих опор. Остальная часть комплекса является однослойной железобетонной.

После воплощения данного проекта в жизнь он примет вид, представленный на рис. 4.



Рис. 4. Визуализация

Моделирование. Для анализа НДС рассматриваемой конструкции был выбран ПК «ЛИРА-САПР», но для создания объемной контактно-элементной (КЭ) модели было принято решение произвести триангуляцию в ПК «Ansys», а затем осуществить импортирование полученной модели в ПК «ЛИРА-САПР», для дальнейшего расчета.

Единственный формат данных объемных КЭ, поддерживаемых и ПК Ansys, и ПК ЛИРА-САПР, является .msh. К сожалению, при импорте модели, выполненной из объемных КЭ, с помощью данного формата не было получено желаемого результата.

Процедура импортирования в ПК ЛИРА-САПР из ПК «Ansys» [3, 4, 5] обычно реализуется при помощи файла с расширением .msh. При конвертации данного объекта исследования объемные элементы КЭ модели преобразовались в плоские, что делало невозможным дальнейший расчет. Следовательно,

возникла необходимость конвертации модели на входном языке процессора ПК «ЛИРА-САПР».

Последовательность действий, прежде чем исследуемая модель конструкции обрела свой окончательный вид в ПК «ЛИРА-САПР» (рис. 5):

1) возникновение идеи – разработка плоской модели будущей конструкции. Определение формы, габаритов, назначения;

2) Autodesk 3DS MAX – создание 3Д модели по разработанным ранее чертежам для визуализации и дальнейшего импорта. Модель композиционного сооружения в виде ленты Мебиуса сложно описать определенной математической закономерностью, поэтому структура формировалась графически. Как итог, получили модель, которая описана криволинейными плоскостями, но не имеет внутренней структуры [5];

3) Autodesk AUTOCAD – задание объема, внутренней структуры модели,

размещение вкладышей-пустотообразователей. Подготовка модели для дальнейшего импорта [5];

4) ПК «Ansys» – автоматическое преобразование объемной модели в КЭ модель при помощи триангуляции. Задание материалов, нагрузок и дальнейший расчет;

5) IDE Microsoft Visual Studio – написание программ для конвертации КЭ

сетки из ПК «Ansys» в ПК «ЛИРА-САПР» путем извлечения данных об узлах и элементах из модели ПК «Ansys» и преобразование их на входный язык ПК «ЛИРА-САПР»;

6) ПК «ЛИРА-САПР» – анализ полученной модели. Задание материалов, нагрузок и дальнейший расчет [6, 7, 8].

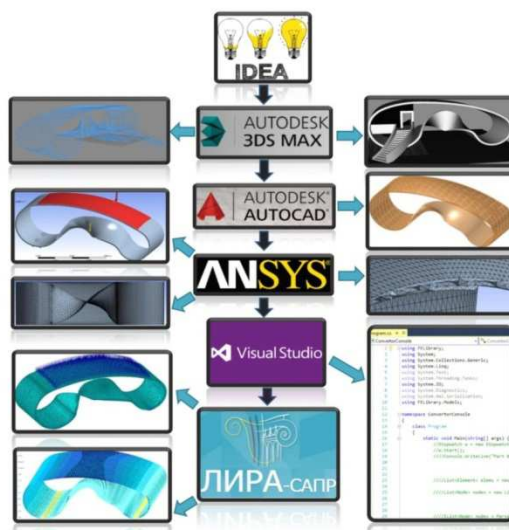


Рис. 5. Блок-схема, отображающая последовательность действий

Конечноэлементная модель содержит 41484 узла и 158226 элементов. Тип конечных элементов – 32 (тетраэдр) (рис. 6, 7).

Данный КЭ предназначен для прочностного расчета континуальных объектов и массивных пространственных конструк-

ций. В каждом из узлов КЭ имеется по три степени свободы U , V , W , представляющие собой линейные перемещения вдоль осей $X1$, $Y1$, $Z1$, положительные направления которых совпадают с направлением соответствующих осей [8].

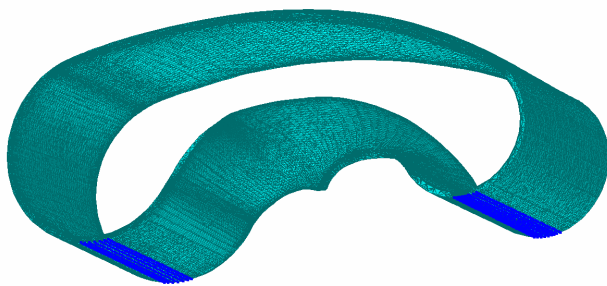


Рис. 6. Закрепления конечно-элементной модели

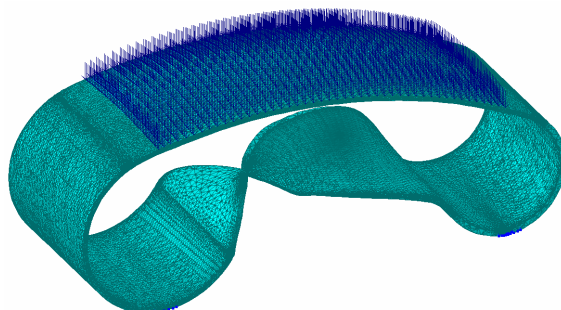


Рис. 7. Конечноэлементная модель с приложенной равномерно распределенной нагрузкой

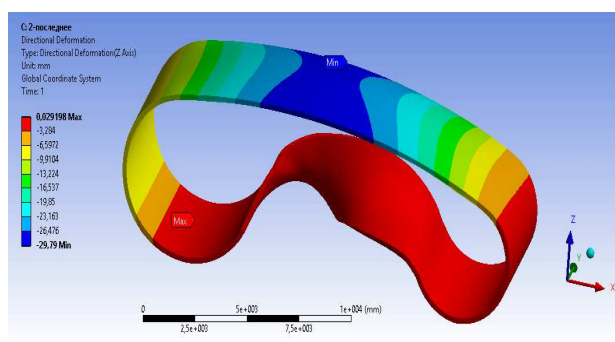
К КЭ модели были приложены равномерно распределенная нагрузка 160 кг/м^2 и собственный вес. Так как в ПК «ЛИРА-САПР» еще не реализована возможность задания распределенной нагрузки по криволинейной поверхности, нагрузка была задана в виде сосредоточенных сил, приложенных к узлам, лежащим на данной поверхности. Поскольку расположение узлов на верхней грани равномерное, то возможно моделирование равномерно

распределенной нагрузки с интенсивностью $N = q \cdot A / 2300 = 6.18 \text{ кг}$.

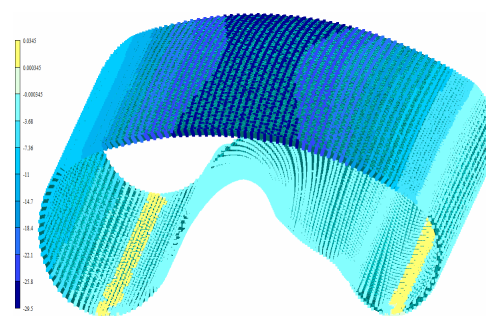
После задания жесткости, связей и нагрузки был произведен линейный расчет.

Анализ результатов. Разница при расчете перемещений (рис. 8) в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР» в общем составила не более 1 %.

Разница при расчете главных напряжений σ_1 (рис. 9, а, б) в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР» в общем составила не более 20 %.

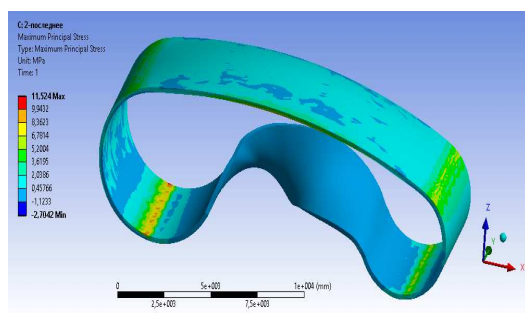


а)

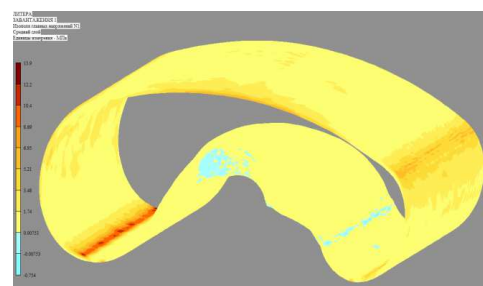


б)

Рис. 8. Изополя перемещений по оси Z: а – ПК «Ansys»; б – ПК «ЛИРА-САПР»



а)



б)

Рис. 9. Изополя максимальных главных напряжений σ_1 : а – ПК «Ansys»; б – ПК «ЛИРА-САПР»

Разница при расчете главных напряжений σ_2 (рис. 10) в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР» в общем составила не более 20%.

Разница при расчете главных напряжений σ_3 (рис. 11) в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР» в общем составила не более 20 %.

Полученные результаты расчета были проанализированы, нами были определены минимальные и максимальные значения главных напряжений и процентное соотношение элементов в зависимости от величины главных напряжений. По этим соотношениям построены столбчатые графики, показанные на рис. 12-14.

Графики наглядно показывают, что количество элементов, имеющих значения главных напряжений, близкие к

максимальным и минимальным значениям, составляет менее 0,1 %.

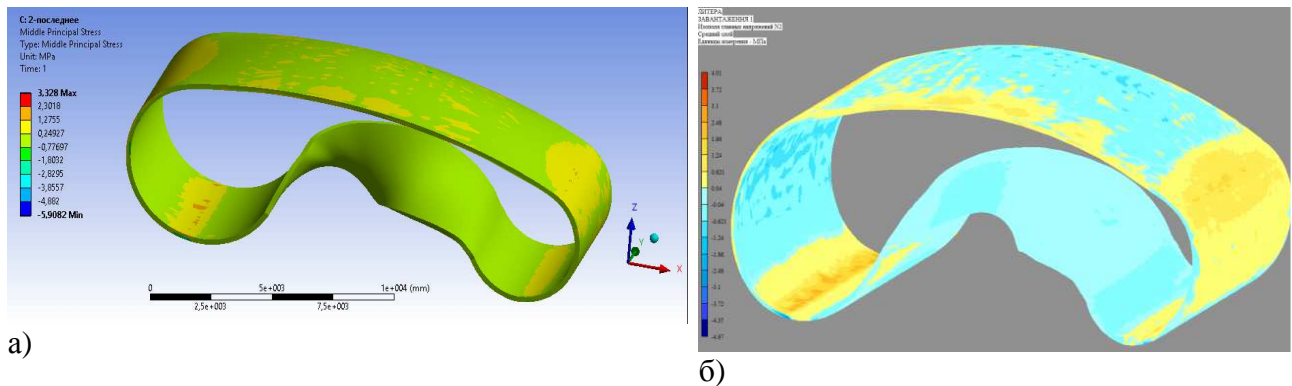


Рис. 10. Изополю главных напряжений σ_2 : а – ПК «Ansys»; б – ПК «ЛИРА-САПР»

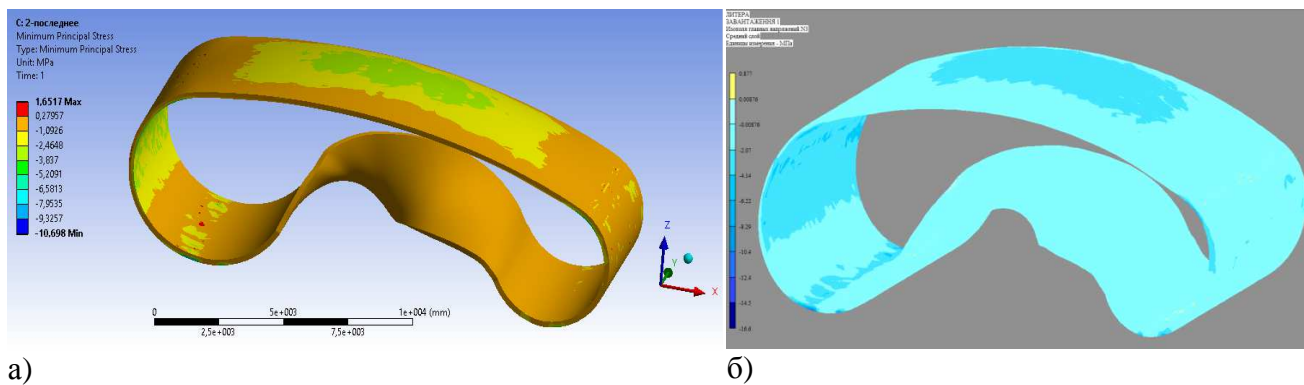


Рис. 11. Изополю минимальных главных напряжений σ_3 : а – ПК «Ansys»; б – ПК «ЛИРА-САПР»

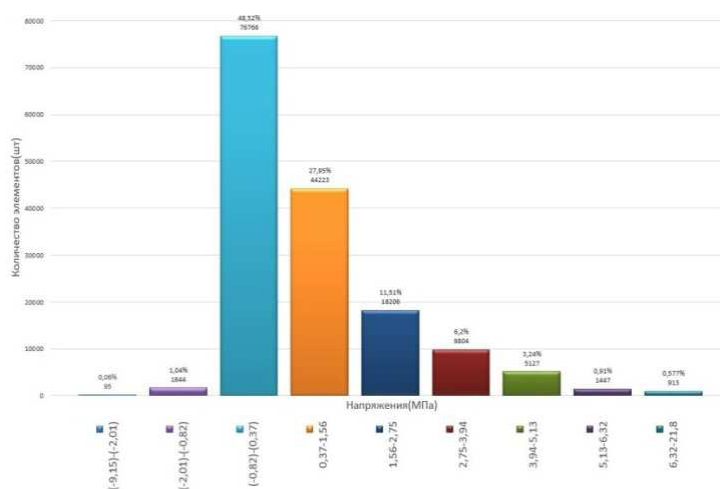


Рис.12. Количественный график элементов в зависимости от значения максимальных главных напряжений σ_1

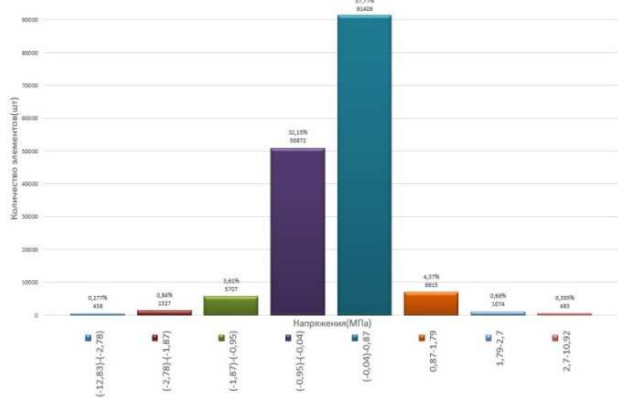


Рис. 13. Количественный график элементов в зависимости от значения максимальных главных напряжений σ_2

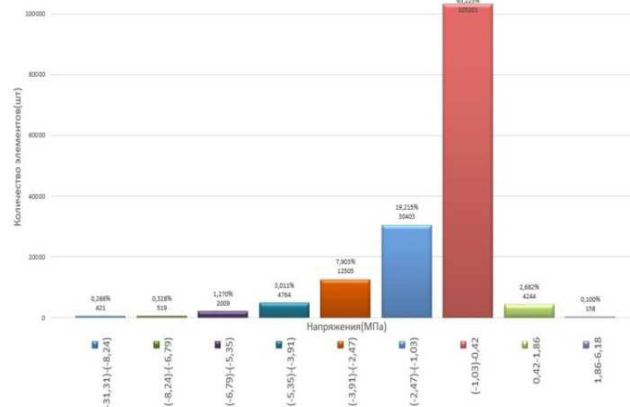


Рис. 14. Количественный график элементов в зависимости от значения максимальных главных напряжений σ_3

Выводы. Показана возможность конвертации КЭ модели сложной формы из ПК «Ansys» в ПК «ЛИРА-САПР», а также управление параметрами с помощью текстового файла на входном языке процессора. Проведено сравнение результатов, полученных при расчёте в ПК «Ansys» и ПК «ЛИРА-САПР». Сравнение показало отличия в результатах по перемещениям до

1 % и более существенные отличия по главным напряжениям – до 20 %.

На данный момент на площадке, предназначенной для строительства рассматриваемой в работе конструкции, проведены геодезические работы, инженерно-геологические изыскания и уже ведутся работы по устройству фундамента.

Список использованных источников

1. Sofiyev A.H., Kuruoglu N. Buckling and vibration of shear deformable functionally graded orthotropic cylindrical shells under external pressures. Original Research Article Thin-Walled Structures, Volume 78, May 2014. – P. 121-130.
2. Майборода, В. М. Трехслойные железобетонные конструкции [Текст] / В. М. Майборода, В. Ф. Карпюк. – К.: Будівельник, 1990. – 144 с.
3. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона: проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии [Текст] / А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Д. А. Городецкий и др. – К.: Факт, 2004. – 106 с.
4. Explore Pervasive Engineering Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com>.
5. Проектирование и расчет строительных конструкций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.liraland.ru/>.
6. Научно-исследовательский институт автоматизированных систем в строительстве Госкомградостроительства Украины. Программный комплекс Лира-Windows [Текст]: руководство пользователя. Т. IV. Раздел 3. – К., 1997. – С. 2-28.
7. Титаев, В. А. Автоматизация расчёта строительных конструкций на примере ЛИРА-подобных программных комплексов [Текст] / В.А. Титаев. – Хабаровск, 2001. – С. 146-149.

8. Демчина, Б. Г. Особливості розрахунку багатошарових плит перекриття на ПК «ЛІРА» [Текст] / Б.Г. Демчина, І.З. Рутковська, Л.І. Вознюк // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2009. – №4. – С. 179-185.

9. Представление. Проектирование. Воплощение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/products>.

Гапонова Людмила Вікторівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова. Тел. (066) 366-00-57.

Резник Петро Аркадійович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (050)-615-86-38.

Калмиков Олег Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел. (063)-104-55-53.

Гребенчук Сергій Сергійович, головний інженер ТОВ «Будівельник», м. Харків. Тел. (050)-301-25-29.

Gaponova Lyudmila, PhD, Associate professor of the Department of Building Constructions O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv. Tel.: (066) 366-00-57.

Reznik Petr, PhD, Department of Building Constructions O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv. Tel.: (050)-615-86-38.

Kalmykov Oleg, PhD, Department of Building Constructions O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv Kharkiv. Tel.: (063)-104-55-53.

Grebenchuk Sergey, O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv. Tel.: (050)-301-25-29.

Стаття прийнята 24.05.2017 р.