

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «ЛИРА-САПР»

*М.С. Барабаш<sup>1,2</sup>, А.В. Пикуль<sup>2,3</sup>, О.Ю. Башинская<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Национальный авиационный университет, г. Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup> ООО «ЛИРА САПР», г. Киев, УКРАИНА

<sup>3</sup> Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, УКРАИНА

**Аннотация:** В статье предложена методика моделирования усиления конструкций композитными материалами в программном комплексе "ЛИРА-САПР". Приводится пример осуществления проверки несущей способности усиленных элементов конструкций в программе ЭСПРИ. Предложен алгоритм расчёта конструктивной системы для определения реальной несущей способности при изменении проектной ситуации с учётом включения в работу конструкции элементов усиления. Алгоритм заключается в последовательном математическом моделировании и анализе напряженно-деформированного состояния конструкции при изменении проектной ситуации. Алгоритм состоит из следующих этапов: статический расчёт конструкции, подбор армирования; определение элементов, которые могут подвергнуться разрушению (физически-нелинейная постановка задачи); определение несущей способности усиленных элементов (в ЭСПРИ); расчет выбранных элементов с учетом усиления; общий расчет и анализ конструктивной системы с измененными жесткостными характеристиками сечений в результате усиления. Рассмотрен процесс моделирования усиления конструкций при помощи классических методов, а именно усиление металлической обоймой. Рассмотрен пример численного моделирования усиления рамной конструкции, с подбором и проверкой композитного материала. С использованием метода конечных элементов была построена математическая модель рамной конструкции. В работе рамы учитывалось наличие усиления некоторых стержневых элементов композитными материалами. Произведено сравнение кинематических характеристик и усилий, которые возникли в расчётной модели рамы при статическом расчете, при расчёте с учётом физической нелинейности и при усилении некоторых элементов конструкции углепластиком. Также в работе описан метод моделирования усиления конструкции металлической обоймой. Расчет усиленного элемента производится в программе ЭСПРИ, с последующим анализом работы общей расчетной модели в ПК «ЛИРА-САПР». Результатом работы является сравнение и анализ напряженно-деформированного состояния рассматриваемой расчетной модели при различных вариантах постановки задачи. Результаты работы могут быть использованы для широкого применения при исследовании методов повышения несущей способности зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, композитные материалы, деформации, физическая нелинейность, компьютерное моделирование, ПК «ЛИРА-САПР».

## THE MODELING OF STRUCTURAL ENFORCEMENT BY COMPOSITE MATERIALS ON "LIRA-SAPR"

*Maria S. Barabash<sup>1,2</sup>, Anatol V. Pikul<sup>2,3</sup>, Olha U. Bashynska<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> National Aviation University, Kiev, UKRAINE

<sup>2</sup> OOO "LIRA SAPR", Kiev, UKRAINE

<sup>3</sup> Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev, UKRAINE

**Abstract:** This paper provides detailed suggestions for process of modeling the structural reinforcement by composite materials on the software package "LIRA-SAPR". It provides the implementation of bearing capacity checks for reinforced elements on the program called "ESPRI". The article offers an algorithm for calculation the construction objects in case of the changing of design situation, taking into account the modeling of the composite structure reinforcement. It considers the modeling process of reinforcement of structures using classical methods, such as using of metal casing. In the article you can also find a numerical modeling example of the

frame structure reinforcement, with the selection and verification of the composite material. It considered the process of modeling the bearing capacity increasing with using the classical methods, namely the increase of the metal hooping. The article investigates the example of a numerical simulation of the frame bearing capacity increasing with the selection and verification of the composite material. Using the finite element method a mathematical model of the frame structure was constructed. In the frame work it was taken into account the occurrence of the bearing capacity increasing by composite materials in some elements. It compared the kinematic characteristics and effort that have arisen within the frame design model with static analysis, also taking into account physical nonlinearity in the calculation and enhancing certain elements reinforced with composite material. Also in this paper we describe a method of modeling the bearing capacity increasing with using the metal hooping. The calculation of reinforced element is made on the program called ESPRI, followed by an analysis of the overall calculation model work on the software package "LIRA-SAPR". The result of the article is a comparison and analysis of the stress-strain state of the considered computational model for various problem formulations. The results could be used for wider application in the study of methods for increasing the bearing capacity of buildings and structures.

**Key words:** stress-strain state, composite material, strains, deformations, material nonlinearity, computer modelling software «LIRA-SAPR»

## ВВЕДЕНИЕ

На эксплуатационной стадии жизненного цикла возникает изменение нагрузок, изменение характеристик материалов, в связи с реологией и возможным развитием трещин. Вопрос о повышении несущей способности конструкций зданий и сооружений путем их усиления является актуальным. Одним из наиболее эффективных методов усиления железобетонных конструкций является использование композитных материалов (ламинатов, а также других изделий на основе углеродного (или стеклянного) волокна).

### Анализ публикаций:

В связи с постоянным увеличением интереса к композитным материалам и композитным конструкциям, а также актуальностью их использования, развитию этого вопроса было посвящено много работ Стороженко Л.И. [3, 4], Гвоздева А.А., Ключева С.В., Курлапова Д.В. [12], Хаятина Ю.Г. [14], Чернявского В.Л. [15] и других. Развитию методик расчёта железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами посвящены работы Кузнецова В.Д., Ватина Н.И. [9], Григорьева Я.В. и других. Эти вопросы также рассматривались и в работах зарубежных ученых. Например, в работах Belarbia A. [17], Acunb B., David D. [18], Grace N.F. [20] и других.

Анализ работ показал, что на сегодняшний день существует большое количество экспериментальных исследований в этом направлении. Вопросы численного моделирования усиленной конструкции и анализ её напряженно-деформированного состояния (НДС) остаются открытыми.

### Постановка задачи.

Целью статьи является математическое моделирование рамной конструкции методом конечных элементов (МКЭ), с учётом работы системы усиления конструкции композитными материалами. А также создание алгоритма компьютерного моделирования работы конструкции до и после усиления. Реализация поставленной задачи проводилась на основе программного комплекса «ЛИРА-САПР» и электронного справочника инженера «ЭСПРИ».

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Композитные материалы на основе фибры (волокон), применяемые при усилении строительных конструкций, изготавливаются из микроволокон, которые омоноличивают в полимере и тем самым соединяют их в единое целое. Наиболее распространённые типы волокон: арамидные, углеродные и стеклово-

локна. Физико-механические свойства композитных материалов определяются типом и количеством применяемых волокон. Обеспечение несущей способности и устойчивости любой конструкции обосновывается на основе численного и компьютерного анализа НДС.

Рассмотрим методику расчёта конструкции в ПК «ЛИРА-САПР» с учётом повышения несущей способности её элементов путем усиления композитными материалами.

Для определения реального НДС исследуемого объекта, с целью принятия решения о дальнейшей его эксплуатации или о реконструкции, выполняется расчет с учетом изменившихся нагрузок, пониженных жесткостей, изменения конструктивной системы. Расчет целесообразно выполнить, используя метод «инженерной нелинейности» ПК ЛИРА-САПР. После подбора армирования для железобетонных элементов, выполняется расчет конструкции с учётом физической нелинейности, с учетом подобранной арматуры. В результате расчета по приведенной методике определяются поврежденные элементы конструкции, в которых возникают трещины, следовательно, элементы, которые нуждаются в усилении.

На следующем этапе подбираются параметры композитного материала, которым будут усиливать конструкцию. Несущая способность усиленного элемента проверяется в ЭСПРИ. В результате проверки, в ЭСПРИ получаем новую приведенную жесткость усиленного элемента.

После подбора композитного материала и проверки несущей способности усиленного элемента, в ПК «ЛИРА-САПР» задается новая жесткость конечным элементам расчётной схемы. Для этого в элементах, которые необходимо усилить, изменяется тип конечного элемента на физически-нелинейный универсальный пространственный стретневой КЭ №210. После задания новой жесткости (с учётом усиления конструкции композитными материалами) производится новый расчёт. В результате оценки полученного НДС расчётной модели в целом, принимает-

ся решение о дополнительном усилении оставшихся элементов конструкции.

В расчетной схеме возникает перераспределение усилий, после чего, при желании, в ЭСПРИ можно произвести повторную проверку несущей способности усиленных элементов конструкции, уже с новыми, полученными в ПК «ЛИРА-САПР» усилиями в этих элементах.

Таким образом, процедуру расчета аналитической модели в ПК «ЛИРА-САПР» и ЭСПРИ с учетом усиления можно представить в виде алгоритма (рисунок 1).

Рассмотрим процедуру получения параметров для моделирования усиления конструкции в ПК «ЛИРА-САПР» на примере расчётной модели рамы (рисунок 2).

После статического расчета для рассматриваемой расчётной модели было подобрано соответствующее армирование. После этого был произведен расчет с учетом физической нелинейности, в котором были заданы соответствующие параметры деформирования бетона и арматуры. Также были заданы параметры для расчёта деформации конструкции с учётом ползучести. Изменение коэффициента ползучести во времени было задано при помощи 44-го кусочно-линейного закона ползучести. При этом коэффициент ползучести  $\varphi(\tau)$  был рассчитан по формулам:

$$\varphi(\tau) = \varphi(t')f(t-t'), \quad (1)$$

$$\varphi(t') = C_0 + \sum_{k=1}^m \frac{A_k}{(t')^k}, \quad (2)$$

$$f(t-t') = \sum_{k=0}^m B_k e^{-\gamma_k(t-t')}, \quad (3)$$

где  $t$  – момент времени, для которого определяется деформация;  $t'$  – момент приложения элементарного приращения напряжения;  $B_k$  и  $\gamma_k$  – постоянные, подобранные надлежащим образом для принятого материала, при этом

$$B_0 = 1, \quad \gamma_0 = 0 \quad \text{и} \quad \gamma_k > 0.$$

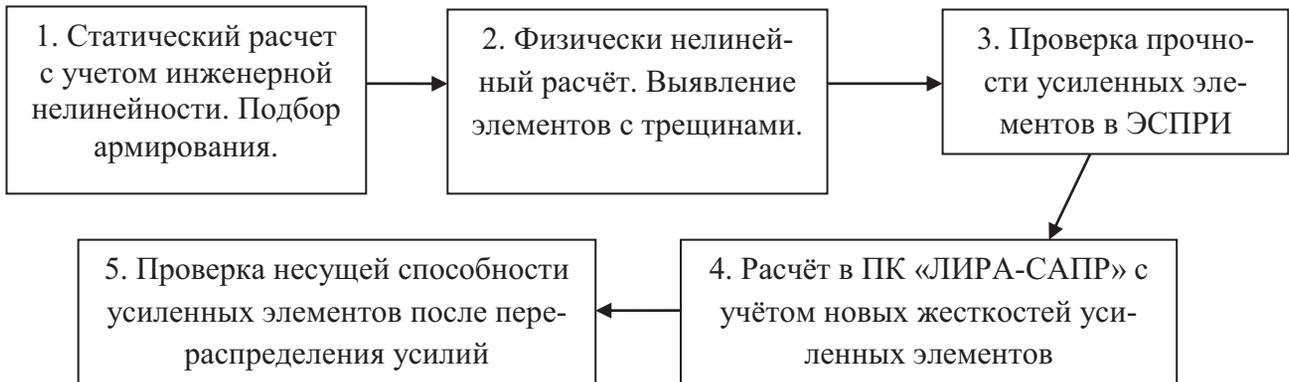


Рисунок 1. Алгоритм расчёта усиления конструкции в ПК «ЛИРА-САПР».

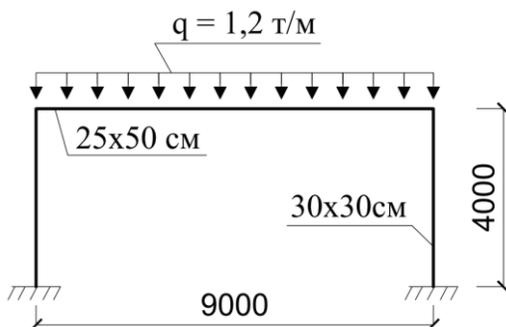


Рисунок 2. Расчётная схема рамы.

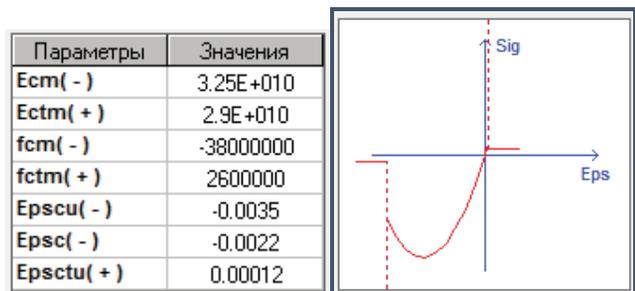


Рисунок 3. Параметры нелинейного деформирования бетона, Па.



Рисунок 4. Схемы НДС: а) деформированная схема; б) мозаика перемещений.

Величина  $C_0$  – это предельное значение меры ползучести;  $A_k$  – некоторый параметр, который зависит от свойств и условий старения для принятого материала.

После расчета с учётом физической нелинейности были получены схемы НДС тестовой рамы (рисунок 4).

В результате расчета было определено, что на 3 стадии проявления деформаций ползучести в некоторых элементах схемы возникают трещины. На рисунке 5 показаны диаграммы напряжений и деформаций в поперечных сечениях балки и колонн, до появления трещин и после.

Для усиления элементов рамы, в которых возникли трещины был подобран композитный материал марки Aslan 400 CFRP Laminate с жесткостными характеристиками:

- толщина монослоя: 1,4 мм;
- модуль упругости, E: 131000 МПа;
- деформация при разрыве: 0.0187 %.
- прочность материала на растяжение: 2400 МПа;

Коэффициент условий работы принимался равным единице. После подбора композитного материала для усиления, в ЭСПРИ была произведена проверка несущей способности усиленного элемента рамы.

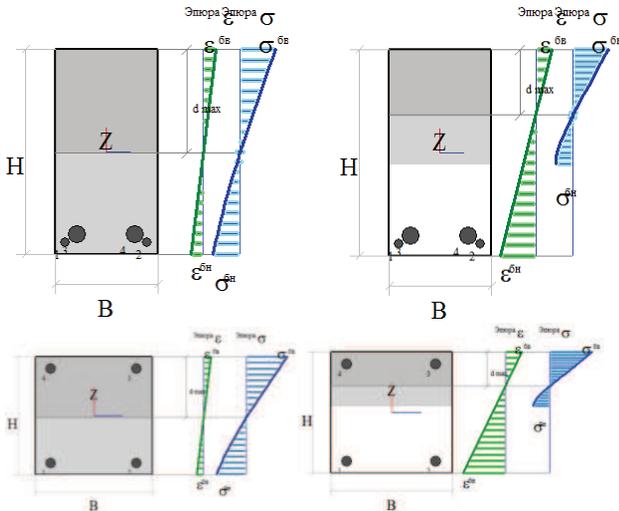


Рисунок 5. Диаграммы напряжений и деформаций поперечных сечений схемы.

Для усиленных элементов, которые работают на сжатие, проверка несущей способности осуществляется по формулам:

- при усилении внешним армированием в продольном направлении:

$$N_e \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s' (h_0 - a') + R_f A_f a', \quad (4)$$

- при усилении внешним армированием в поперечном направлении:

$$N_e \leq R_{b3} b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s' (h_0 - a'). \quad (5)$$

Для элементов, что работают на изгиб, проверка осуществляется по продольному изгибающему моменту:

- для прямоугольного сечения:

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_s' (h_0 - a') + R_f A_f a', \quad (6)$$

- для таврового сечения, если граница проходит в ребре:

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_b (b_f' - b) h_f' (h_0 - 0,5h_f') + R_{sc} A_s' (h_0 - a') + R_f A_f a'$$

После подбора материала для усиления, и проверки усиленных элементов конструкции, была получена приведенная жесткость усиленных элементов. Для расчёта компьютерной модели с учетом новых жесткостей и расчета с учетом физической нелинейности, КЭ №10 заменяется на КЭ №210, и элементам присваиваются новые приведенные жесткостные характеристики.

Одним из самых распространенных классических вариантов повышения несущей способности конструкции есть увеличение её жесткости, путём установки металлической обоймы. Рассмотрим пример расчета усиления колонн данной рамной конструкции при помощи устройства металлических обойм. Для этого нужно вместо подбора композитных материалов подобрать размеры металлических уголков (или пластинок), которыми необходимо усилить элементы конструкции. Проверку усиленных элементов можно также осуществить в программе «ЭСПРИ». Для этого в подпрограмме «Проверка сечений сталебетонных колонн» (раздел Железобетонные конструкции) выбирается параметр проверки сталебетонного сечения с металлическими уголками и задаются параметры уголков таким образом, чтобы они моделировали металлическую обойму вокруг колонны.

Проверку композитных сечений можно осуществлять по предельным состояниям и деформационной модели, а также по двухлинейной и трёхлинейной диаграммам деформирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приводятся результаты сравнительного анализа НДС в элементах рамы (с учетом моделирования усиления) на различных этапах расчета.

Таблица 1. Сравнение усилий и перемещений рамы при различных постановках задачи.

	Линейно-упругий расчет		Физическая нелинейность		С учетом усиления	
	Перемещение Z, мм	Усилия $M_y$ , т*м	Перемещение Z, мм	Усилия $M_y$ , т*м	Перемещение Z, мм	Усилия $M_y$ , т*м
Колонна	0	±1,65	-0,1	±1,89	0	±2,06
Балка	-2,8	2,96	-7,6	2,7	-7,3	2,26

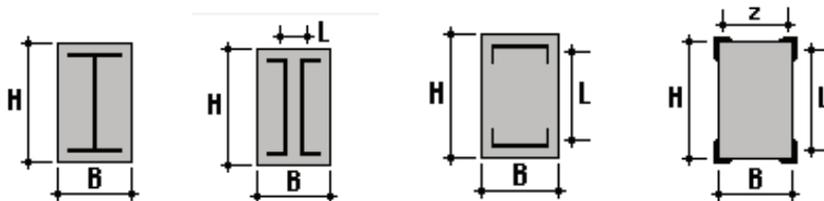


Рисунок 7. Типы поперечных сечений сталебетонных конструкций для расчета в ЭСПРИ.

Наблюдаются следующие изменения кинематических характеристик расчетной модели рамы: величина перемещений вдоль оси Z (при усилении рамы композитным материалом) меньше чем при расчете с учетом физической нелинейности, потому что композитные материалы повышают жесткость конструкции, тем самым уменьшая её деформации. Но значения кинематических характеристик с учетом усиления больше, чем при статическом расчете, поскольку расчет с использованием КЭ №210 (при учёте новых жесткостей) является также физически нелинейным, а значит более точно может моделировать изменение НДС конструкции. После усиления конструкции углеволокном или какими-либо другими способами, в усиленных элементах происходит изменение жесткостных характеристик, следовательно, при расчете с учетом новых жесткостей, между конечными элементами происходит перераспределение усилий. Согласно дифференциальному уравнению упругой линии балки (8) известно, что значения моментов, которые возникают в конструкции, зависят от приведенной жесткости сечения. Следовательно, в результате повышения приведенной жесткости, на усиленные конечные элементы приходится большее значение изгибающих усилий, чем при обычном физически нелинейном расчёте.

$$M(x) = EI \frac{d^2 u(x)}{dx^2} \tag{8}$$

Также, в программе «ЭСПРИ» можно производить расчет и других сечений сталебетонных конструкций, пример которых показан на рисунке 7.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование композитных материалов для усиления конструкций позволяет значительно повысить несущую способность элементов зданий и сооружений, а также продлить их сроки эксплуатации, предотвратить или устранить аварийную ситуацию, устранить ошибки или проектирования, а главное – обеспечить надежную эксплуатацию и долговечность конструкции в целом. Математические модели расчётных схем с учётом усиления реализованы в ПК «ЛИРА-САПР». В работе предложена методика моделирования усиления конструкции композитными материалами, а также рассмотрен вариант моделирования усиления конструкции металлической обоймой. Получены величины НДС элементов расчётной модели. Результатом исследования является оценка НДС конструкции при моделировании ее

усиления композитными материалами в физически нелинейной постановке задачи.

Результаты данной работы могут быть использованы для широкого применения при компьютерном моделировании конструктивных систем, усиленных композитными материалами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция. СНиП 52-01-2003. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 155 с.
2. **Чернявский В.Л., Хаютин Ю.Г.** Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. – М.: НИИЖБ, 2006. – 48 с.
3. **Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.М.** Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. – М.: Стройиздат, 2007. – 184 с.
4. **Барабаш М.С.** Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства. – К.: Сталь, 2014. – 301 с.
5. **Бокарев С.А., Смердов Д.Н.** Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, Вып. 46, 2010, с. 113-125.
6. **Ватин Н.Н., Дьячкова А.А.** Усиление железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов на основе углеродных волокон и постнапрягаемых стержней. // Бетон и железобетон, Вып. 74, 2009, с. 20-21.
7. **Глинский В.В., Ионин В.Г.** Статический анализ. – М.: ИНФРА-М; Новосибирск: Сибирское соглашение, 2002. – 241 с.
8. **Карпенко Н.И., Круглов В.М., Соловьев Л.Ю.** Нелинейное деформирование бетона и железобетона. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001. – 276 с.
9. **Курлапов Д.В.** Усиление железобетонных конструкций с применением полимерных композитов. // Инженерно-строительный журнал, Вып. 28, 2009, с. 22-24.
10. **Смердов М.Н., Селиванова Е.О.** Отечественный опыт экспериментальных исследований долговечности железобетонных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами. Инновационный транспорт, №2, 2005, с. 60-63.
11. **Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З.** Применение углепластиков для усиления строительных конструкций. // Бетон и железобетон, Вып. 63, 2001, с. 17-20.
12. **Чернявский В.Д., Аксельрод Е.З.** Применение углепластиков для усиления железобетонных конструкций промышленных зданий. // Промышленное и гражданское строительство, №3, 2004, с. 37-38.
13. **Шевцов Д.А., Гвоздева А.А.** Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. // Промышленное гражданское строительство, №8, 2014, с. 61-64.
14. **Belarbia A., Acunb B.** FRP Systems in Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures // Procedia Engineering, Vol. 57, 2013, pp. 2-8.
15. **David E., Djelal C.** Repair and strengthening of reinforced concrete beams using composite 7th Int. conf. on Struct // Faults and Repair, Vol. 2, 1997, pp. 169-173.
16. **Ehasani M.R.** Design recommendation for bond of GFRP rebar to concrete // Journal of Structural Engineering, 1996, Vol. 3(102), pp. 125-130.
17. **Grace N.F.** Strengthening of concrete beams using innovative ductile fiber – fiber reinforced polymer fabric // ACI Structural Journal. № 5(99), 2002, pp. 692-700.

Барабаш Мария Сергеевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры компьютерных технологий строительства, Национальный авиационный университет; директор ООО «ЛИРА САПР»; Украина, г. Киев, Кияновский пер., д. 7а; тел. +380952863990; E-mail: bmari.lira@gmail.com; bmari@ukr.net.

Пикунь Анатолий Владимирович, ассистент кафедры металлических и деревянных конструкций, Киевский национальный университет строительства и архитектуры; инженер-аналитик программного обеспечения ООО «ЛИРА САПР»; Украина, г. Киев, Кияновский пер., д. 7а; тел. +380972176879; E-mail: Anatol.Pikul@gmail.com.

Башинская Ольга Юрьевна, аспирант, ассистент кафедры компьютерных технологий строительства, Национальный авиационный университет; инженер-программист ООО «ЛИРА САПР»; Украина, г. Киев, Кияновский пер., д. 7а; тел. +380631082201; E-mail: olchik@ukr.net.

Maria S. Barabash, Prof. Dr.Sc.; Professor of Department of Computational Technologies in Construction; National Aviation University; Director of ООО “LIRA SAPR”; Kosmonavta Komarova 1, Kyiv, Ukraine, 03058; phone +380952863990; E-mail: bmari.lira@gmail.com; bmari@ukr.net.

Anatol V. Pikul, Assistant of Department of Steel and Timber Structures; National University of construction and architecture; Software analytical engineer of ООО “LIRA SAPR”; Kiev, Povitroflotsky Avenue, 31, 03680; Phone +380972176879; E-mail: Anatol.Pikul@gmail.com.

Olha U. Bashynska, Ph.D. Student, Assistant of Department of Computational Technologies in Construction; National Aviation University; Software development engineer of ООО “LIRA SAPR”; Kosmonavta Komarova 1, Kyiv, Ukraine, 03058; Phone +380631082201; E-mail: olchik@ukr.net.