

УДК 624.075.23:624.012.45

А. А. Давиденко, М. А. Давиденко, А. Н. Бамбура, В. Б. Березин, А. П. Пилипенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

UDC 624.075.23:624.012.45

A. A. Davydenko, M. A. Davydenko, A. N. Bambura, V. B. Berezin, A. P. Pilipenko

STUDY OF DEFORMATION AND FAILURE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS OF CIRCULAR CROSS SECTION DURING TRANSVERSE BENDING BY USING THE DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных колонн круглого сечения на поперечный изгиб и определены деформации поверхности колонны с использованием метода корреляции цифровых изображений.

Ключевые слова:

железобетонная колонна, круглое сечение, поперечный изгиб, корреляции цифровых изображений.

Abstract

The article presents the results of experimental studies of reinforced concrete columns of circular cross section during transverse bending, with the strains on the surface of concrete columns being determined by using the digital image correlation method.

Key words:

reinforced concrete column, circular section, transverse bend, digital image correlation.

Расчет прочности изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов круглого, кольцевого сечений выполняется с применением метода [1]. Расчетные формулы данного метода получены с учетом прямоугольных эпюр напряжений в бетоне и арматуре сжатой и растянутой зон. С некоторыми упрощениями этот метод вошел в нормы проектирования [2]. Современные нормативные документы [3–7] рекомендуют выполнение расчетов прочности нормальных сечений указанных элементов на базе нелинейной деформационной модели. Метод основан на использовании нелинейных

диаграмм деформирования материалов и линейного закона распределения деформаций бетона и арматуры по высоте сечения элемента. Исследования железобетонных колонн при поперечном изгибе, в условиях совместного действия поперечного изгиба и продольных сжимающих сил проводятся, главным образом, на элементах прямоугольного сечения. Между тем подобные исследования необходимы для колонн, имеющих круглое сечение (здания, расположенные в сейсмоопасных зонах, буронабивные сваи подпорных стен, противопожарных сооружений, фундаментов с глубокими технологическими тоннелями),

воспринимающих значительное горизонтальное давление грунта.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований колонн круглого сечения $\varnothing 190$ мм с продольным армированием в виде шести стержневой арматуры $\varnothing 10$ A240С и поперечным спиральным армированием из арматурной проволоки $\varnothing 4$ ВрI с шагом 100 мм. Для изготовления образцов ис-

пользовали бетон класса С 25/30. Образцы для испытаний были разделены на три серии в зависимости от устанавливаемого пролета среза, равного диаметру колонны, 1,5 диаметра колонны, двум диаметрам колонны за вычетом защитного слоя бетона 30 мм. Длина образцов колонн составляла 1000 мм. Было испытано по три образца каждой серии (рис. 1).



Рис. 1. Колонна круглого сечения после проведения испытаний

В качестве оборудования использовали испытательную машину WERKSTOFFPROFMASHINEN L5IPZI6 с максимальным усилием 20 т. Для установки колонн в горизонтальное положение и возможности передачи поперечной нагрузки были изготовлены опоры из половин стальных труб по диаметру колонн.

Исследование деформаций бетона в зоне поперечного изгиба выполняли с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 10^{-3} мм и нового метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) [8–11], представленного в виде программного пакета. Программный пакет для метода КЦИ оснащался цифровой камерой Casio Exilim Pro EX-F1, съемка производилась с расстояния

1,5 м, при этом влиянием поперечного перемещения балки от/в направлении камеры можно было пренебречь. В основе метода КЦИ лежит сравнение двух участков изображения (рис. 2): базового и деформированного, а именно поиск положения участка базового изображения в деформированном изображении, основываясь на некоторой мере соответствия.

В качестве меры сравнения устанавливается некоторая скалярная величина, далее вычисляется локальный оптимум этой меры методами нелинейной оптимизации. Также принимается во внимание и изменение формы самого участка – задается функция формы, как и в методе конечных элементов. В итоге в результате работы алгоритма по-

лучается множество перемещений данных подобластей. Это множество представляет собой поле перемещений базового изображения. Из полученного

поля перемещений дифференцированием с дальнейшим использованием тензора Лагранжа определяется поле деформаций.



Рис. 2. Определение перемещения участка в деформированном изображении

Перед испытаниями на поверхность бетона с помощью матовой черной краски наносили дискретные точки как по сетке, так и случайным образом (рис. 3). Далее проводили фото-

графирование недеформированного (базового) и последующих изображений (под нагрузкой) исследуемого участка колонны.

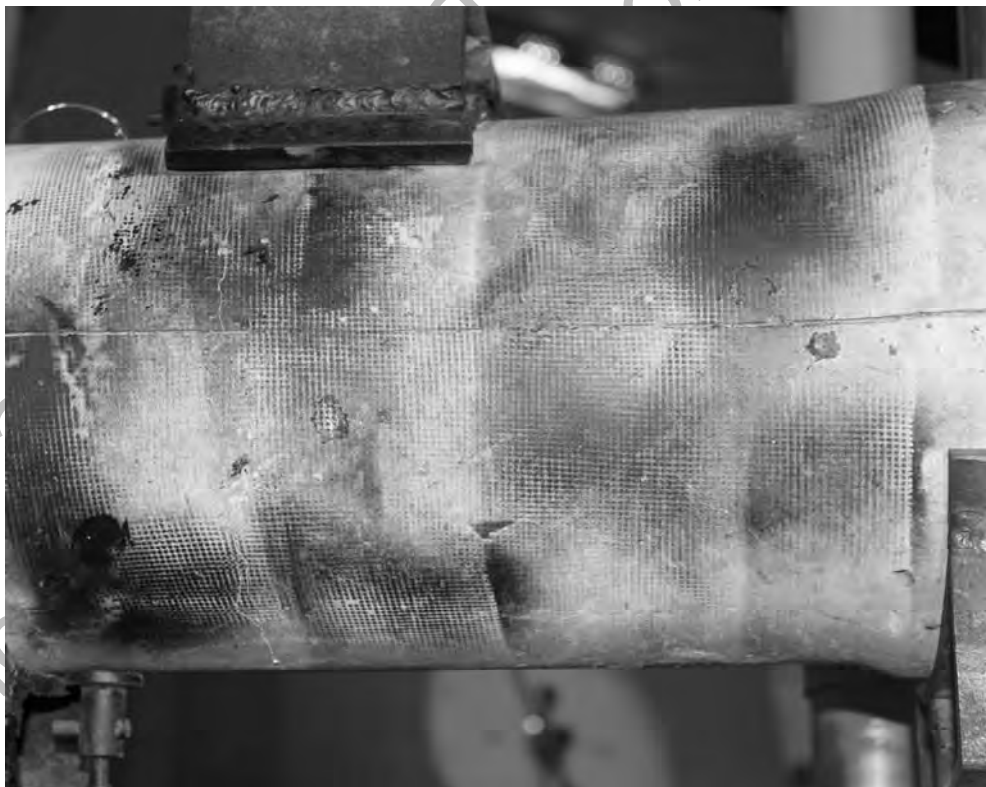


Рис. 3. Нанесение дискретных точек на поверхность бетона для оцифровки изображения и определения деформаций с помощью конечно-элементного анализа

Последующая обработка данных с помощью специального программного комплекса позволила определять деформации бетона в процессе нагружения на каждой стадии деформирования, фиксировать образование и развитие трещин, практически получить полную кинематическую картину деформирования и разрушения элемента при поперечном изгибе. Последовательность методики: напыление матовой краски на поверхность бетона, установка светодиодных прожекторов (2 шт.), фиксация каждого этапа нагружения с помощью фотокамеры, разбивка зоны исследований на конечные элементы, определение деформаций в каждом подэлементе изображения и визуализация деформаций.

Результаты испытаний показали, что первыми при поперечном изгибе

появлялись нормальные трещины в растянутой зоне (рис. 4) в месте приложения усилия при нагружении, примерно, $0,33P_{разр}$ и деформации в сжатой зоне $\epsilon_{в} = 41 \cdot 10^{-5} \dots 53 \cdot 10^{-5}$. Образование наклонной трещины начиналось с отклонения нормальной трещины по направлению к месту приложения нагрузки и деформациях на сжатой фибре, превышающих $100 \cdot 10^{-5}$. При этом процесс уменьшения высоты сжатой зоны происходит так же, как и в нормальном сечении. Далее с достижением главными растягивающими напряжениями бетона в пролете среза предела прочности на растяжение происходит образование наклонной трещины с ее началом в растянутой зоне и окончанием в месте наименьшей высоты сжатой зоны.

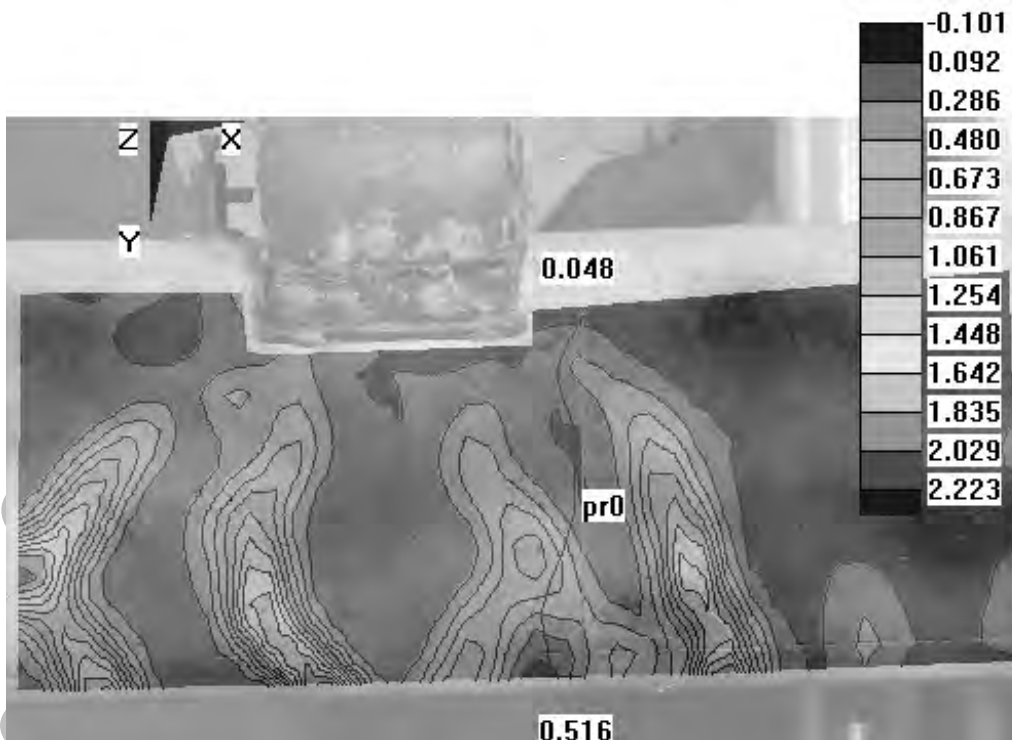


Рис. 4. Начало образования нормальных трещин при поперечном изгибе

Полученное методом корреляции цифровых изображений распределение деформаций, зафиксированное перед моментом разрушения, позволило вы-

явить причину образования наклонной трещины как результат локального достижения предела текучести в нижней продольной арматуре в одной из ранее

образованных нормальных трещин (см. рис. 4). Далее с преобладающим ростом раскрытия одной из нормальных трещин происходит резкое уменьшение высоты сжатой зоны над этой трещиной и перераспределение усилий в элементе с нижней продольной арматуры на вышерасположенные продольные стержни, а также поперечную арматуру. При достаточном поперечном армировании и соответствующем шаге начинается раскрытие наклонной трещины (или трещин). При отсутствии поперечной арматуры либо при достижении предела текучести в поперечных стержнях (их разрыве) происходит процесс разрушения по наклонному сечению, показанный на рис. 5.

Как следует из проведенных опы-

тов, влияние спирального поперечного армирования увеличивает несущую способность круглых сечений до 43 % (рис. 6). Вместе с тем количество продольной арматуры, расположенной в растянутой и сжатой зонах сечения, также оказывает существенное влияние на предельную поперечную силу для элементов круглых сечений. Зависимость влияния процента армирования продольной арматуры на несущую способность по наклонному сечению для круглых элементов диаметром 190 мм в сопоставлении с подобным влиянием на прямоугольные элементы, размером 100×180 и 100×200 мм по данным опытов [12] при пролете среза $2h_0$ ($2\varnothing$) приведена на рис. 7.

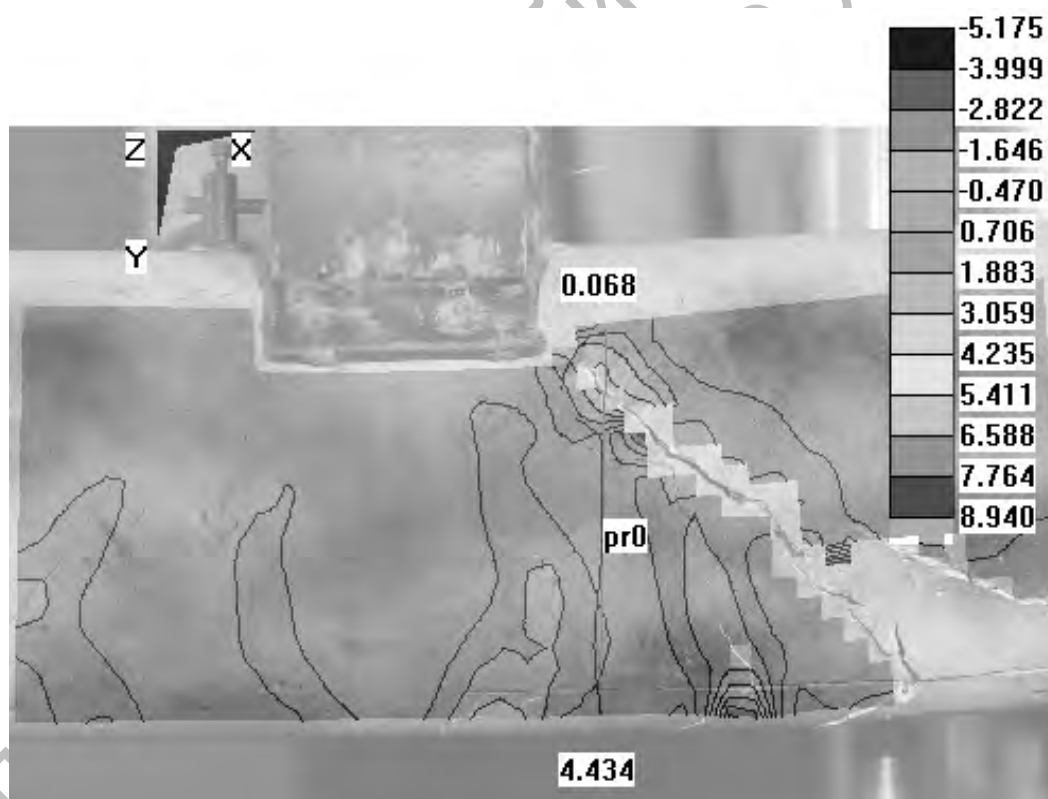


Рис. 5. Процесс разрушения колонны по наклонному сечению

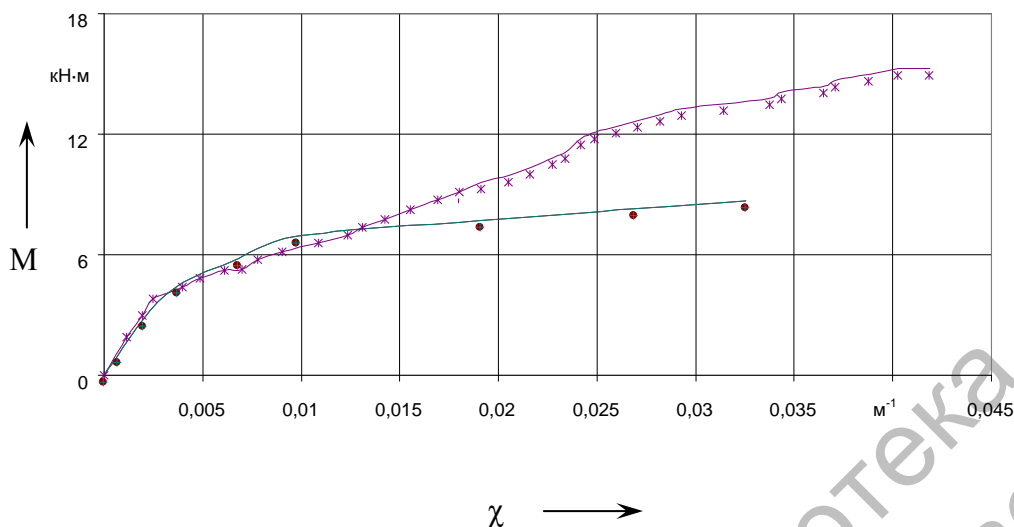


Рис. 6. Зависимости «момент – кривизна» для элементов круглого сечения с поперечной арматурой и без поперечной арматуры

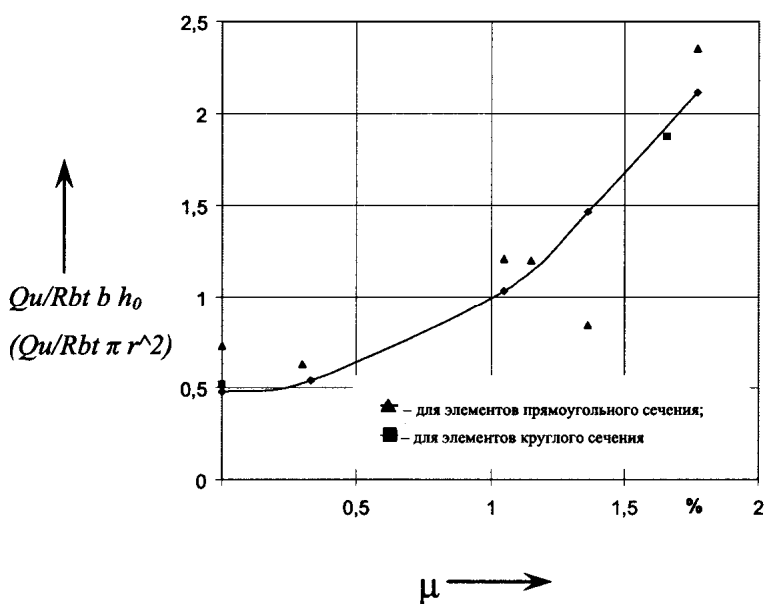


Рис. 7. Экспериментальная зависимость влияния процента армирования продольной арматуры на несущую способность наклонного сечения при пролете среза $2h_0$ mm

В отношении нагельного эффекта продольной арматуры, особенно при многорядном армировании, следует отметить, что данный эффект проявляется после достижения предела текучести в стержнях, наиболее удаленных от сжа-

той зоны, и после начала раскрытия наклонной трещины – в стержнях, расположенных выше по сечению с напряжением ниже предела текучести.

Выводы

Приведенные результаты исследований свидетельствуют, что методика расчета несущей способности по поперечной силе как круглых сечений, так и прямоугольных элементов с многорядным армированием должна учитывать влияние продольного армирования.

Исследования процесса разрушения с использованием метода корреляции цифровых изображений показали необходимость применения деформационного подхода к нахождению усилий в продольных и поперечных стержнях арматуры, не достигающих предельных значений, и оценки несущей способности наклонного сечения по соответствующей деформационной модели с определением деформаций в бетоне сжатой зоны.

Бесконтактный метод корреляции цифровых изображений обладает широкими возможностями при нахождении поля деформаций, минимальными требованиями к оборудованию, отличается простотой и достаточной точностью – до 0,004 % абсолютной погрешности при определении деформации, дает возможность анализа быстротечных процессов при разрушении с помощью высокоскоростной камеры.

Деформации, полученные методом корреляции цифровых изображений, соответствовали деформациям, определяемым по приборам, а характер разрушения (см. рис. 5) практически точно соответствовал реальной картине разрушения (см. рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баташев, В. М.** Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многорядным армированием / В. М. Баташев. – Киев : Будівельник, 1978. – 120 с.
2. **Баташев, В. М.** Расчет прочности элементов кольцевого сечения по СНиП II-21-75 / В. М. Баташев // Бетон и железобетон. – 1976. – № 12. – С. 29–31.
3. **Бамбура, А. Н.** Общий метод оценки напряженно-деформируемого состояния и несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов круглого сечения по деформационной модели / А. Н. Бамбура, Е. В. Дорогова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 105–113.
4. **Бамбура, А. М.** Несуча здатність попередньо напружених залізобетонних елементів кругового перерізу за деформаційною моделлю та залежністю / А. М. Бамбура, О. В. Дорогова // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2013. – Вып. № 69. – С. 34–37.
5. **ДБН В.2.6-98:2009.** Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. – Київ : Мінрегіонбуд, 2009. – 97 с.
6. **СП 52-101-2003.** Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного преднапряжения арматуры. – М. : ФГУП ЦПП, 2004. – 53 с.
7. ENV 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1 : General Rules and Rules for Buildings. – Brussels : European Committee for Standardization, 1992.
8. **Березін, В. Б.** Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 2. – С. 15–20.
9. **Березін, В. Б.** Оптичний комплекс для безконтактного дослідження поля деформації плоскої поверхні методом кореляції цифрових зображень / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов, Й. Й. Лучко // Вісн. Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2011. – Т. 41. – С. 30–39.
10. **DOI: 10.1007/bf02321405.** Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction / H. A. Bruck [et al.] // Experimental Mechanics. – 1989. – Vol. 29, № 3. – P. 261–267.
11. **Hild, F.** Digital image correlation / F. Hild, S. Roux // Optical Methods for Solid Mechanics. A Full-Field Approach. – USA : Wiley, 2013. – P. 18–28.

12. **Силантьев, А. С.** Прочность изгибаемых железобетонных элементов без хомутов по наклонным сечениям с учетом параметров продольного армирования / А. С. Силантьев // Вестн. МГСУ. – 2011. – Т. 1, № 2. – С. 66–71.

Статья сдана в редакцию 12 мая 2015 года

Алексей Александрович Давиденко, ассистент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. E-mail: a.david@ukr.net.

Михаил Александрович Давиденко, канд. техн. наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Тел.: +380-095-638-34-90.

Андрей Николаевич Бамбура, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский институт строительных конструкций. Тел.: +380-067-238-22-34.

Валентин Борисович Березин, канд. техн. наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Тел.: +380-063-261-69-85.

Андрей Петрович Пилипенко, канд. техн. наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Тел.: +380-097-355-14-07.

Aleksey Aleksandrovich Davydenko, assistant lecturer, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. E-mail: a.david@ukr.net.

Mikhail Aleksandrovich Davydenko, PhD (Engineering), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Phone: +380-095-638-34-90.

Andrey Nikolayevich Bambura, DSc (Engineering), Prof., State Research Institute of Steel Structures. Phone: +380-067-238-22- 34.

Valentin Borisovich Berezin, PhD (Engineering), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Phone: +380-063-261- 69-85.

Andrey Petrovich Pilipenko, PhD (Engineering), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Phone: +380-097-355-14-07.