

**К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
БАЛОК В ПК ANSYS MECHANICAL**

**Дорофеев В.С., д.т.н., проф., Карпюк В.М., к.т.н., доц.,  
Неутов А.С., асс., Неутов С.Ф., к.т.н., доц., Макарук В.П., асс.**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

**Актуальность исследований.** Во многих случаях сопротивление приопорных участков балочных железобетонных элементов, находящихся в сложном напряженном состоянии, является определяющим фактором при проектировании. Вместе с тем, работа этих участков как при кратковременном, так и при длительном нагружении поперечной нагрузкой высокого уровня -  $(0,7 - 0,9)V_{ult}$ , до сих пор остается не до конца РЕШЕННОЙ научной проблемой. Тому есть множество причин. Но, одной из них является громоздкий и сложный расчетный аппарат, практически, неприменимый в ручном режиме.

Поэтому, выполнение систематизированных экспериментально-теоретических исследований с целью совершенствования имеющихся и разработки новых современных расчетных моделей сложнапряженных приопорных участков железобетонных изгибаемых элементов является важной и актуальной задачей.

Для экономии материально-технических ресурсов на западе осуществляется переход к моделям информационного проектирования зданий (BIM). В этом контексте вопросы численного моделирования работы конструкций и их элементов приобретают дополнительную важность и актуальность.

**Цель работы** – исследовать применимость конечноэлементного ПК ANSYS Mechanical для анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов.

**Основная часть**

Значительный интерес представляет работа Волански А.Д. [1], в которой рассматриваются вопросы трещинообразования, разрушения, соответствия расчетной кривой «нагрузка-деформация» экспериментальным данным для обычных и предварительно напряженных балок с использованием ПК ANSYS. Однако, эта, а также работы других авторов [2-4] оставили невыясненными ряд вопросов, важных с точки зрения моделирования несущей способности исследуемых элементов.

Исходя из вышеизложенного, основной задачей данной работы является исследование возможности и достоверности моделирования НДС опытных балок путем нелинейного конечно-элементного расчета в ПК ANSYS как основы для прогнозирования работоспособности приопорных участков железобетонных балок. В качестве верификационных данных используются результаты экспериментов, освещенные ранее в статьях авторов[5-7].

### Методика моделирования балок

Для моделирования бетона использовали 8<sup>н</sup> узловой 3<sup>х</sup> мерный изопараметрический бетонный конечный элемент Solid65[8](рис. 1, табл.1), с возможностью учета его размазанного армирования. Он поддерживает пластическое деформирование, ползучесть, усадку и набухание, растрескивание и разрушение бетона.

Для моделирования стальных опор и накладок, передающих нагрузку, использовали 8<sup>н</sup> узловой 3<sup>х</sup> мерный изопараметрический элемент Solid45, а для моделирования арматуры – стержневой элемент Link8(рис. 2), поддерживающий пластическое деформирование.

Элементы Solid 65 и Link8 вне зависимости от используемого материала и его свойств требуют введения ряда констант. Для бетонных элементов это параметры размазанного армирования(если оно используется), – армирующий материал, процент армирования и направляющий угол, для арматурных – площадь и начальная деформация.

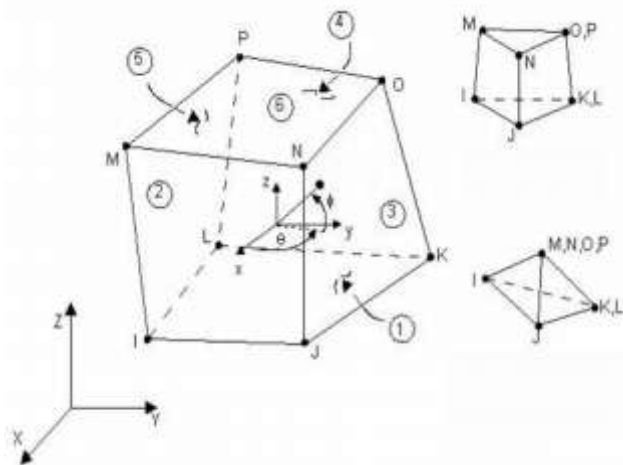


Рис. 1 8<sup>н</sup> узловой изопараметрический элемент Solid45, Solid65

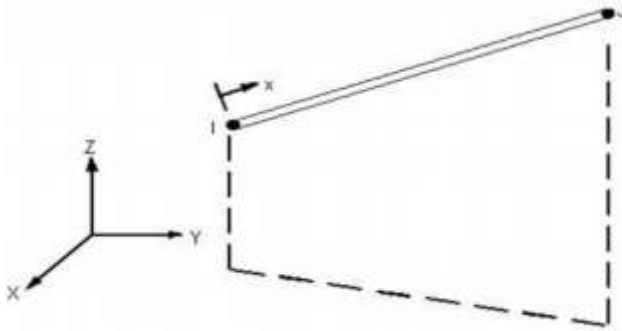


Рис. 2. Стержневой элемент Link8

Таблица 1. Основные параметры моделирования балок

№	Назначение	Тип элемента	Константы			
			Армиров. по оси	x	y	z
1	Бетон	Solid 65	Армир. матер.	0	0	0
			$\rho$ , %	0	0	0
			Направл. угол	0	0	0
			Направл. угол	0	0	0
			Направл. угол	0	0	0
2	Нижняя продольная арматура	Link 8	Поперечное сечение, см <sup>2</sup>	1.702		
			Нач. относ. деформация	0		
3	Верхняя продольная арматура	Link 8	Поперечное сечение, см <sup>2</sup>	0.785		
			Нач. относ. деформация	0		
4	Поперечная арматура в зоне чистого изгиба	Link 8	Поперечное сечение, см <sup>2</sup>	0.2827		
			Нач. относ. деформация	0		
5	Поперечная арматура в пролете среза	Link 8	Поперечное сечение, см <sup>2</sup>	0.1257		
			Нач. относ. деформация	0		

## Моделирование свойств материалов

Моделирование свойств бетона в ПК ANSYS достигается использованием трех взаимодополняющих моделей: упругой изотропной, соответствующей начальному моменту нагружения и касательной к диаграмме деформирования бетона в начале координат(рис. 3); пластической мультилинейно-изотропной модели с кинематическим упрочнением,(соответствующей диаграмме деформирования); и, наконец, трехмерной модели прочности трехмерного бетона, основывающейся на трудах Вильяма и Варнке[9].

В исследуемом элементе используется модель распределенного трещинообразования для растянутых зон и алгоритм для учета возможности пластического разрушения бетона в сжатых зонах. Каждый элемент имеет 8 узлов, в которых выполняются проверки трещинообразования и разрушения.

Растрескивание или разрушение элемента происходят, когда одно из главных напряжений в одной из контрольных точек(узлов) превышает прочность бетона на растяжение или сжатие.

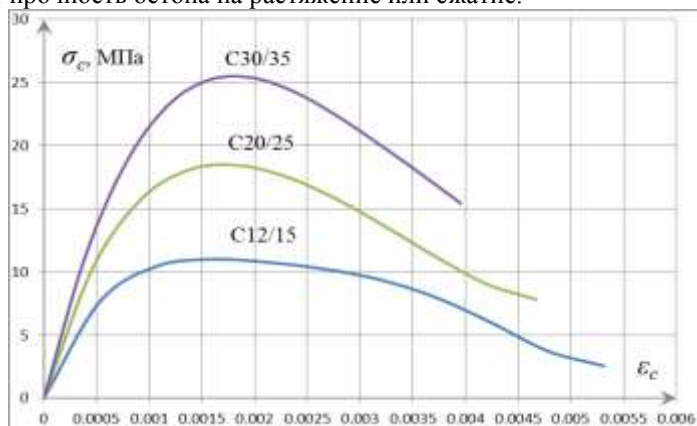


Рис. 3. Диаграммы деформирования бетона принятые для классов C12/15, C20/25, C30/35(ГП НИИСК)

Таким образом, элемент является нелинейным и требует итеративного решателя. В численных величинах образование трещины достигается модификацией зависимостей напряжение – деформация для элемента, с целью создания «слабой» плоскости в направлении соответствующего главного напряжения. Доля поперечного усилия, передающаяся через трещину может варьироваться от 1(полная передача) до 0(нет передачи). Реализация разрушения при сжатии похожа на пластическое деформирование: при разрушении участка дальнейшее при-

ложение нагрузки в этом направлении приведет к увеличению деформаций при постоянном напряжении. После формирования начальной трещины напряжения, касательные к ее фронту, могут привести к развитию второй и третьей трещины в узловой точке.

Поверхность прочности (рис. 4), в целом, описывается уравнением

$$\frac{1}{z} \frac{\sigma_a}{f_{cu}} + \frac{1}{r(\Theta)} \frac{\tau_a}{f_{cu}} = 1$$

где:  $f_{cu}$  - сопротивление одноосному сжатию;  $z$  - сопротивление одноосному растяжению;  $\sigma_a, \tau_a$  - компоненты напряженного состояния на площадке.

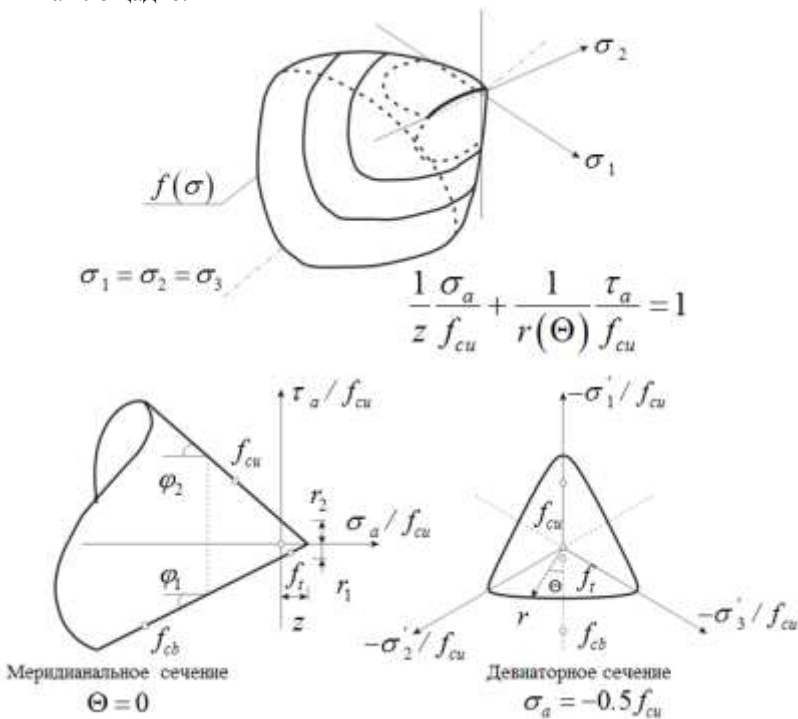


Рис. 4. Поверхность прочности, соответствующая модели Вильяма-Варнке

Данная модель требует ввода 9 констант, из них мы используем 4:

1. Коэффициент передачи  $V$  через открытую трещину;
2. Коэффициент передачи  $V$  через закрытую трещину;
3. Сопротивление одноосному растяжению;

4. Соппротивление одноосному сжатию.

Моделирование материала арматуры, в целом, осуществляется аналогично моделированию бетона с той разницей, что поверхность прочности не используется. Для арматуры принята диаграмма деформирования, близкая к диаграмме Прантдля.

Материал опоры и накладки, передающей нагрузку, соответствует строительной стали и принят линейно-упругим, а также - изотропным.

Характеристики материалов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные параметры моделирования материалов

№ матер.	Назначение	Тип элемента	Свойства материала		
1	Бетон	Solid 65	Линейно изотропная модель		
			$E_x$ , Мпа	$3 \times 10^3$	
			$\nu_{xy}$	0.2	
			Мультилинейно изотр. модель		
			№ точки	$\varepsilon$	$\sigma$ , Мпа
			1	0.000246	7.65
			2	0.000492	15.3
			3	0.00102	19.3
			4	0.00181	25.2
			5	0.00324	13.2
			6	0.00420	5.10
			Бетон		
			Конст1	1	
			Конст2	0.9	
			Конст3	0.9	
Конст4	$f_{ctk}$				
Конст5	-1				
2	Материал опоры	Solid 45	Линейно изотр. модель		
			$E_x$ , Мпа	$2 \times 10^4$	
			$\nu_{xy}$	0.3	
3	Продольная арматура	Link 8	Линейно изотр. модель		
			$E_x$ , Мпа	$2 \times 10^4$	
			$\nu_{xy}$	0.3	
			Мультилинейно изотр. модель		
			№ точки	$\varepsilon$	$\sigma$ , Мпа
			1	0.00125	25
2	0.0025	49.5			
3	0.025	50			

№ матер.	Назначение	Тип элемента	Свойства материала	
5	Поперечная арматура	Link 8	Линейно изотр. модель	
			$E_x$ , Мпа	$2 \times 10^4$
			$\nu_{xy}$	0.3
			Билинейно изотр. модель	
			Предел текуч.	38
Угол накл. Кас.	145			

### Геометрическое моделирование

Бетон, опоры и пластины моделировали объемными элементами, арматуру – стержневыми. Образец имеет две плоскости симметрии. Поэтому моделировали одну четвертую образца с целью уменьшения вычислительной емкости модели.

Конечноэлементная модель бетонного массива и армирования с шагом сетки 1см показана на рис.5а и 5б, соответственно.

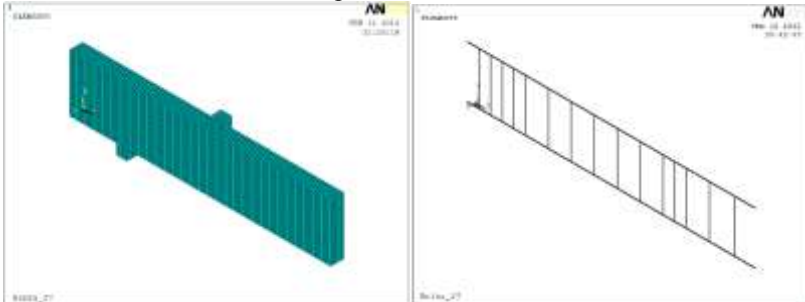


Рис. 5. Конечноэлементная модель бетонного массива (а) и армирования (б)

При применении элементов solid65 рекомендовано использование прямоугольной сетки. Таким образом, конечные элементы должны иметь форму параллелипипеда или куба. Совместность работы армирования и бетонного массива достигается установкой кратных(а лучше - совпадающих) шагов сетки и последующим «склеиванием» или «пересечением» узлов и ключевых точек модели. Важное значение имеет порядок «пересечения»: узлы сетки должны быть пересечены до ключевых точек, в противном случае узлы могут потерять связь с массивом.

### Граничные условия и нагрузки

На модель накладываются граничные условия в плоскостях симметрии, местах приложения нагрузки и на опорах.

Первыми задаются граничные условия симметрии. Модель симметрична относительно двух плоскостей. Граничные условия показаны на рис. 5.

Для задания плоскости симметрии все узлы, находящиеся на ней, ограничиваются в перемещениях в направлении, нормальном к рассматриваемой плоскости симметрии. Опоры задаются таким образом, чтобы образовывались шарниры. Отдельной линии узлов на плоскости были приданы граничные условия  $UZ = 0$ ,  $UY = 0$ , тем самым позволив поворот балки вокруг этой линии(оси опоры).

Сила  $F$  передается на балку через стальную пластину. Для ее задания используются узловые нагрузки, прикладываемые к узлам центральной линии пластины, величиной в  $P/10$ .

Основные параметры расчёта задаются в соответствии с табл. 3.

Таблица 3. Заданные характеристика расчета

Общие характеристики	
Тип анализа	Статический
Контроль перемещений	Большие
Учет эффектов преднапряжения	Нет
Время в конце шага наружения	P
Число подшагов	$10^6$
Автоматический контроль шага	Да
Нелинейный расчет	
Линейный поиск	Да
Максимальные пластические деформации	100%
Несимметричный решатель с прогноз-коррекцией	Да
Максимальное число итераций на шаге	10
Контроль формы элемента	Нет
Контроль разрушения	Нет
Контроль сходимости	По силам(F)
Толерантность	0.5

О сходимости расчетных и опытных значений основных параметров несущей способности исследуемых элементов можно судить по табл. 4,5, а также рис. 6...8



Таблица 4. Разрушающие нагрузки

Серия испытаний	$V_{ult}$ (модель), кН	$V_{ult}$ (эксперимент), кН	$\sum \widehat{V}_{ult} - V_{ult})^2 = 1095 \text{кН}^2$ $\sigma = \sqrt{\frac{(\widehat{V}_{ult} - V_{ult})^2}{11-1}} = 10,464 \text{кН}$ $v = \frac{\sigma}{\widehat{V}_{ult}} \cdot 100 = 5,74\%$
0-17	147.5	140	
0-18	60	64	
0-19	120	116	
0-20	75	72	
0-21	86	96	
0-22	81	82.5	
0-23	96.5	100	
0-24	65	72	
0-25	86	89	
0-26	86	84	
0-27	86	86	

Таблица 5. Деформации и прогибы балок серии 27

Модель	$\epsilon_x$ крайнего сжатого волокна	$\epsilon_x$ на уровне растянутой арматуры	Прогиб в центре балки, мм	Нагрузка, кН
Прогибы и деформации при появлении нормальных трещин $0,25V_{ult}$ (22кН)				
Эксперимент	0,00022	0,00028	2,04	22
ANSYS	0,0002402	0,00032	1,4	22
Прогибы и деформации на уровне $0,95V_{ult}$ (82кН)				
Эксперимент	0,000922	0,00268	11,7	82
ANSYS	0,00096	0,00165	9,8	82

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие

**Выводы:**

1. Результаты моделирования НДС исследуемых балок с помощью нелинейного конечно-элементного расчета в ПК ANSYS показали хорошую сходимость опытных и расчетных значений их несущей спо-

способности, а также возможность численного воссоздания результатов эксперимента.

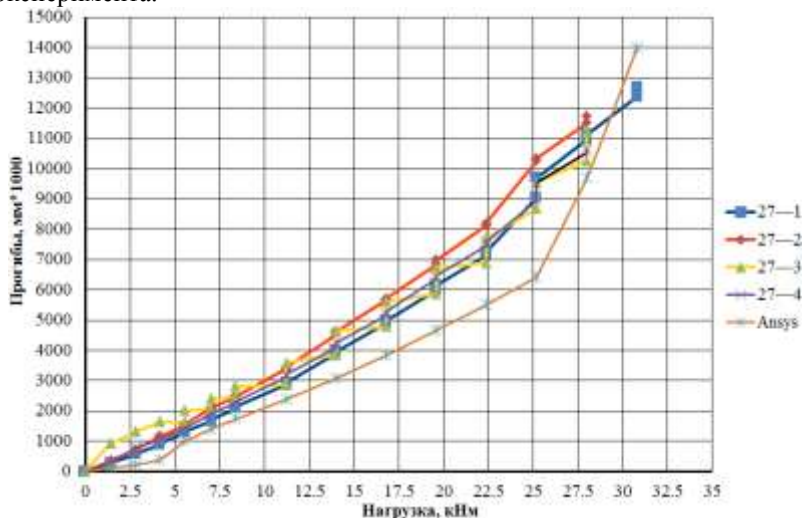


Рис. 6. Прогибы в центральной части натуральных экспериментальных балок серии 27 и модели

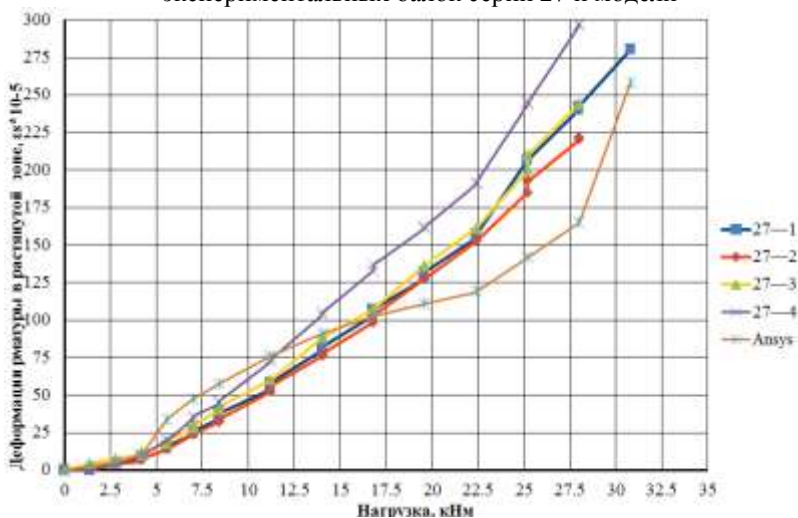


Рис. 7. Деформации арматуры в растянутой зоне на уровне арматуры в центральной части натуральных экспериментальных балок серии 27 и модели

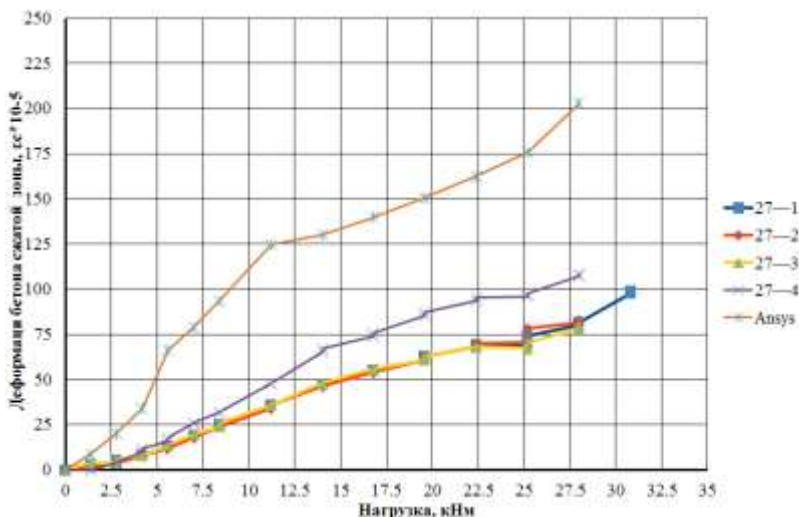


Рис. 8. Деформации крайнего сжатого бетонного волокна в центральной части натуральных экспериментальных балок серии 27 и модели

2. Приведенная расчетная модель позволяет проследить за всеми этапами работы пролетной изгибаемой конструкции, включая ее разрушение.

3. Моделирование НДС исследуемых элементов с использованием ПК ANSYS позволяет существенно экономить материально-технические ресурсы на проведение дорогостоящих экспериментальных исследований, изучить влияние конструктивных факторов и факторов внешнего воздействия с помощью численного эксперимента.

### Summary

There described the modeling of reinforced rectangular concrete beams in ANSYS Mechanical. Result parameters, obtained from this modeling, is compared with experimental ones, such as: ultimate load, average centerline deflection, concrete strain. So opportunity of general modeling reinforced concrete beams is studied, thus providing basis for further research.

## *Литература*

1. Anthony J. Wolanski, B.S. Flexural behaviour of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis, Master's Thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin – 2004, 87p.
2. Saifullah I., Nazir-uz-zaman M, Uddin S.M. (2011), “Experimental and Analytical Investigation of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam”, IJET, Vol.11, Issue 02, pp.188-196.
3. Saifullah I., Nazir-uz-zaman M, Uddin S.M. (2011), “Nonlinear analysis of RC beam for Different Shear Reinforcement Patterns by Finite Element Analysis”, IJET, Vol.11, Issue 02, pp.173-185.
4. Vasudevan. G, Kothandaraman S. (2011) “Parametric study on Non-linear Finite Element Analysis on flexural behaviour of RC beams using ANSYS”, INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING, Vol. 2, Issue 1, pp. 98-11.
5. Дорофеев В.С. Экспериментальные исследования работы приопорных участков железобетонных балок при длительном воздействии нагрузки / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, С.Ф. Неутов, В.П. Макарук, А.С. Неутов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 38. - Одеса: Тов. «Зовнішрекламсервіс». - 2010. – С. 255-262.
6. Дорофеев В.С. О влиянии конструктивных факторов на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов. / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, С.Ф. Неутов, В.П. Макарук, А.С. Неутов. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 39, Частина 1. - Одеса: Тов. «Зовнішрекламсервіс». - 2010. - С. 186-199.
7. Дорофеев В.С. Експериментальні дослідження тріщиностійкості приопорних ділянок зігнутих залізобетонних елементів при тривалій дії навантаження / В.С. Дорофеев, В.М. Карпюк, С.Ф. Неутов, В.П. Макарук, А.С. Неутов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. № 34, Частина 1. - Одеса: Тов. «Зовнішрекламсервіс». - 2009. - С.19-22.
8. “ANSYS theory refence”, 12<sup>th</sup> ed, SAS IP, Inc.
9. William K.J., Warnke E.P. (1974). “Constitutive model for triaxial beavior of concrete”. Proceedings of international associations of bridge and structural engineering conference, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, pp. 174-191.