

УДК 624.044:624.041.6

КОСТЮК А.И., СТОЛЕВИЧ И.А., СТОЛЕВИЧ О.И.
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

**ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В
ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК ANSYS MECHANICAL**

Цель. Детальное экспериментально-теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния, трещиностойкости и несущей способности керамзитожелезобетонных балок с использованием программного комплекса Ansys Mechanical.

Результаты. Моделирование сложного напряженно-деформированного состояния опытных элементов путем нелинейного конечно-элементного расчета с помощью программного комплекса «ANSYS MECHANICAL» дает возможность численно воспроизвести результаты эксперимента и сделать прогноз их напряженно-деформированного состояния достоверным.

Методика. Построенная модель в соответствии с поставленной задачей должна максимально отражать реальную работу железобетонного элемента под действием нагрузки.

Научная новизна. Доказана возможность эффективного моделирования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, в том числе подверженных длительному воздействию нагрузки с учетом нелинейности ползучести при помощи метода конечных элементов, с реализацией в ПК ANSYS.

Практическая значимость. Существенно пополнен банк экспериментальных данных о напряженно-деформированном состоянии изгибаемых керамзитожелезобетонных элементов, в котором комплексно учтено влияние исследуемых факторов на выходные параметры их работоспособности.

Ключевые слова: модель, ползучесть, керамзитожелезобетон, напряжения, элемент.

Введение. В настоящее время недостаточно изученным, на наш взгляд, остается напряженно – деформированное состояние, трещинообразование и несущая способность железобетонных элементов. Предлагаемая деформационная модель является развитием деформационного метода расчета железобетонных конструкций. Одной из задач работы было конечноэлементное моделирование экспериментальных балок с помощью программного комплекса Ansys 14. Реализованная в Ansys 14 модель трехмерного железобетонного элемента, включает в себя модель бетона, как хрупко разрушающегося материала, в которую возможно включить армирующие стержни.

Моделирование бетона.

Модель материала поддерживает разрушение при сжатии, трещинообразование при растяжении, пластическое деформирование и ползучесть. Возможно использование армирования, как стержневого (отдельными элементами), так и распределенного по объему (так называемое размазанное), которое поддерживает в РК пластическое деформирование и ползучесть. В распределенном по объему армировании задается три различных армирующих материала (в направлении декартовых осей).

Разрушение и трещинообразование определяются критерием разрушения. В момент пересечения поверхности критерия функцией напряжений, бетон растрескивается, при достижении предельной величины растягивающих напряжений и разрушается, если не

соблюден критерий прочности. На основе критерия прочности Вильяма-Варнке, который зависит от девяти параметров материала. строится поверхность разрушения для сжимающих напряжений. При растяжении отказ определен критерием максимальных растягивающих напряжений. Поведение бетона считается упругим до момента разрушения, если параметры пластического деформирования бетона не заданы. Для учета передачи усилий среза через трещины предусмотрено два коэффициента: для открытой и закрытой трещины.

В конечноэлементных материалах реализация нелинейных свойств бетона может быть осуществлена одним из двух способов. Поведение материала, в первом случае, программируется независимо от элементов, посредством которых он задается. При использовании этого способа, подбор элементов для системы не ограничен, а для моделирования объектов существует возможность отдельно выбирать наиболее подходящие конечные элементы и модели материалов. Во втором случае, под конкретную задачу создается конечный элемент. Имплементированная в ПК Ansys реализация конечноэлементного моделирования бетона относится ко второму способу. Для моделирования нелинейного поведения хрупких материалов, этот способ предлагает специальный трехмерный восьмиузловой изопараметрический элемент Solid65, основанный на составной модели трехосного поведения бетона, разработанной К. Д. Вильямом и Е. П. Варнке.

В элементе используется модель распределенного трещинообразования для растянутых зон, и пластический алгоритм учета возможности разрушения бетона сжатых зон. Проверка трещинообразования и разрушения выполняется в 8 узлах каждого элемента. Трещинообразование или разрушение элемента происходят тогда, когда одно из главных напряжений в одном из контрольных узлов превысит прочность бетона на растяжение или сжатие. Вследствие этого формируются зоны трещинообразования или разрушения, перпендикулярно к направлению соответствующего главного напряжения. В дальнейшем напряжения локально перераспределяются. Элемент требует итеративного решателя так как является нелинейным. Трещинообразование для элемента в численных величинах достигается модификацией зависимости напряжение – деформация, с целью создания «слабой» плоскости в направлении соответствующего главного напряжения.

Передающаяся через трещину доля поперечного усилия, может варьировать от 1 (полная передача) до 0 (нет передачи). Реализация разрушения при сжатии походит на пластическое деформирование - при разрушении участка, дальнейшее приложение нагрузки в этом направлении приведет к увеличению деформаций при постоянном напряжении. Когда сформирована начальная трещина, касательные к фронту трещины напряжения, могут привести к развитию второй, третьей трещины в направлении главных напряжений в узловой точке.

Модель внутреннего армирования может быть представлена, как дополнительная размазанная жесткость, которая распределена по элементу в заданном направлении, или с использованием сжато-растянутых или изогнутых стержневых дискретных элементов. Внутреннему армированию балочных элементов позволено воспринимать поперечные силы. Но пластическое деформирование, в таких элементах, в Ansys не поддерживается.

Широко используемая на западе модель трехосного критерия прочности бетона разработана в 1974 г. К. Д. Вильямом и Е. П. Варнке. Поверхность критерия в координатах

главных напряжений показана на рис. 1. Выделяются сечения: гидростатическое (изменения в объеме) и девиаторное (изменения формы). Гидростатическое сечение формирует меридиональную плоскость, содержащую, как ось симметрии эквисектрису $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Девиаторное сечение лежит в плоскости, нормальной к эквисектрисе.

В полярных координатах девиаторное сечение имеет вид:

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

где: f_{cu} , σ_a , τ_a - сопротивления одноосному сжатию,

φ_1 , φ_2 - углы гидростатического конуса.

z и r - свободные параметры поверхности прочности. Они определяются на основе сопротивления одноосному сжатию f_{cu} , сопротивления двухосному сжатию f_{cb} и сопротивлению одноосному растяжению.

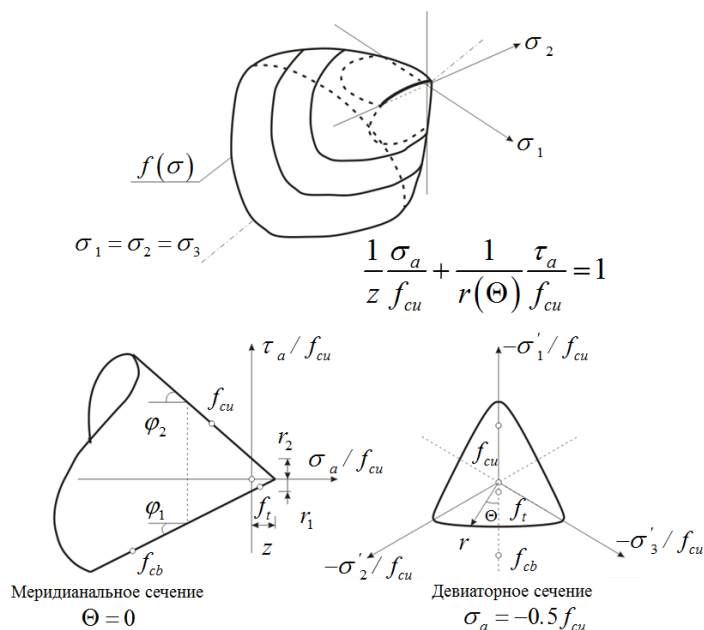


Рис.1. Поверхность прочности бетона согласно модели Вильяма-Варнке

Моделирование стального армирования. Учет армирования в конечноэлементном моделировании традиционно выделен в три способа: дискретный, внедренный и размазанный (рис. 2).

Модель дискретного армирования представлена, как стоечные или балочные элементы, которые связаны с узлами сетки бетона, при этом бетон и арматура имеют общие узлы, и занимают одно и то же пространство. Недостатки этого подхода в том, что конечноэлементная сетка для бетона привязана к расположению арматуры и том, что объем армирования не вычитается из бетонного массива.

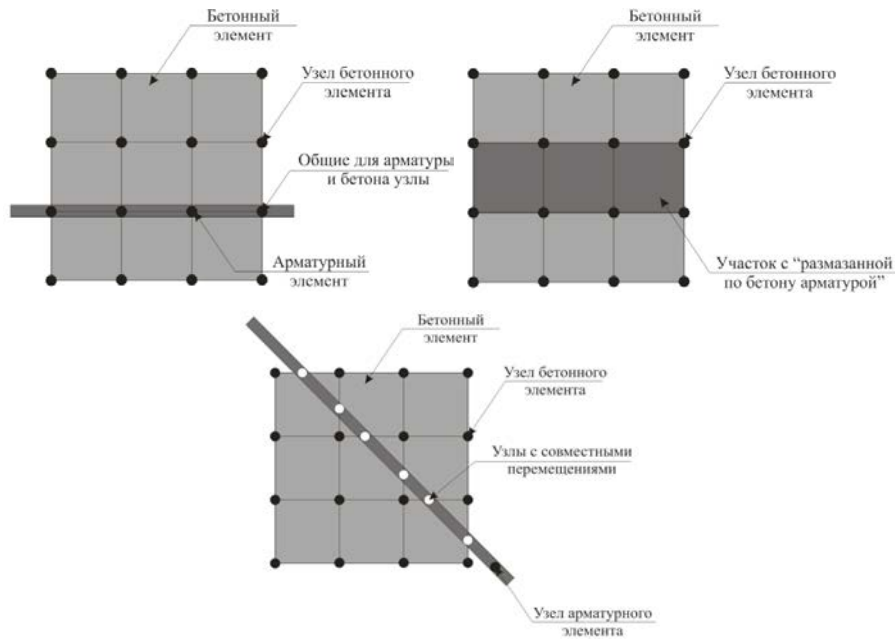


Рис.2. Способы моделирования стержневого армирования

При использовании внедренного армирования преодолеваются недостатки дискретного подхода, т.к. жесткость и реакция армирования вычисляются отдельно от бетона, а для совместности деформаций вводятся специальные функции. Недостками этого моделирования является возрастание числа узлов и степеней свободы системы, что приводит к значительному увеличению объема вычислений.

При использовании размазанного армирования в модель предусмотрено равномерное распределение армирование по бетонным элементам в заданном объеме конечноэлементной сетки. Этот способ хорош для моделей большого масштаба, в которых точное положение армирования серьезно не влияет на общую работу конструкции.

Типы используемых элементов:

КЭ Solid65 (рис. 3) используется для моделирования бетона.

КЭ Solid45 (рис. 4) используется для опор и пластин, через которые передается нагрузка. Это восьмиузловой элемент с тремя степенями свободы в каждом узле.

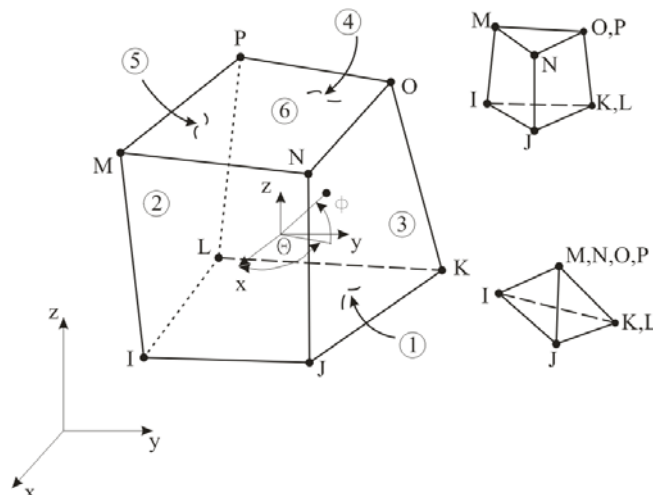


Рис.3. КЭ Solid65

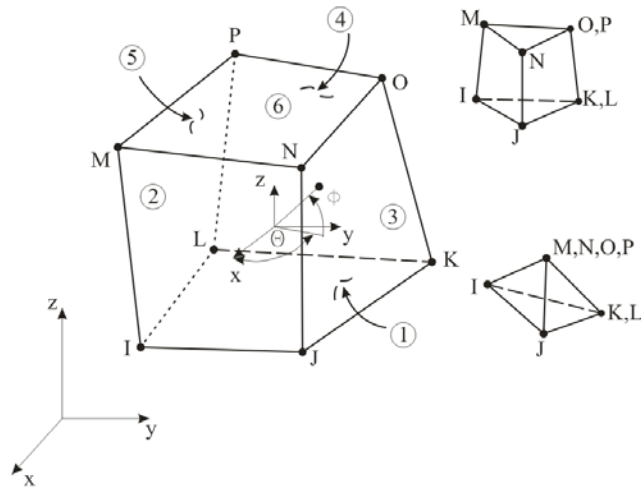


Рис.4. КЭ Solid45

Для моделирования стального армирования используется КЭ Link8 (рис. 5). Это трехмерный стержневой элемент с тремя степенями свободы в двух узлах, способный испытывать пластические деформации.

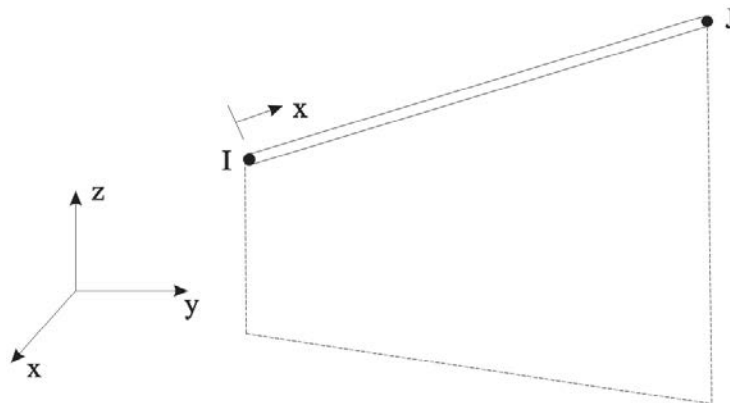


Рис. 5. КЭ Link8

Моделирование материалов. В таблице 1 приведены модели материалов.

Модель материала номер 1 относится к керамзитобетону. Для правильного моделирования свойств бетона КЭ Solid65 требует задания линейно-изотропной и мультилинейно-изотропной моделей. Мультилинейно-изотропный материал использует критерий прочности фон Мизеса совместно с моделью Вильяма и Варнке для описания процессов разрушения бетона. E_x – начальный модуль упругости керамзитобетона, ν_{xy} – коэффициент Пуассона.

Первая точка мультилинейно-изотропной модели должна удовлетворять закону Гука. В качестве закона деформирования бетона была принята диаграмма, основанная на работах А.Н. Бамбуры.

Реализация модели Вильяма и Варнке в ПК Ansys требует ввода 5, а при наличии данных о сложном напряженном состоянии 9 констант:

1. Коэффициент передачи поперечных сил через раскрытую трещину.
2. Коэффициент передачи поперечных сил через закрытую трещину.

3. Сопротивление одноосному растяжению.
4. Сопротивление одноосному сжатию.
5. Сопротивления двухосному сжатию (f_{cb}).
6. Характеристика обобщенного напряженного состояния

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

Таблиця 1

Модели материалов

№ матер.	Назначение	Тип элемента	Свойства материала		
1	Бетон	Solid 65	Линейно изотропная модель		
			E_x , МПа	8.5×10^3	
			ν_{xy}	0.2	
			Мультилинейно изотр. модель		
			№ точки	ε	σ , МПа
			1	0.000244	7.64
			2	0.000493	15.2
			3	0.00102	19.2
			4	0.00179	25.3
			5	0.00326	13.3
			6	0.00423	5.11
			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	2×10^4	
			ν_{xy}	0.3	
3	Продольная арматура	Link 8	Линейно изотр. модель		
			E_x , Мпа	2×10^4	
			ν_{xy}	0.3	
			Мультилинейно изотр. модель		
			№ точки	ε	σ , МПа
			1	0.00125	25
			2	0.0025	49.5
3	0.025	50			
5	Поперечная арматура	Link 8	Линейно изотр. модель		
			E_x , МПа	2×10^4	
			ν_{xy}	0.3	
			Билинейно изотр. модель		
			Предел текуч.	38	
Угол накл. касат.	145				

7. Двухосное сопротивление сжатию при объемном напряженном состоянии (f_1).
8. Одноосное сопротивление сжатию при объемном напряженном состоянии (f_2).
9. Коэффициент жесткости для раскрытой трещины.

Константы 6 ÷ 9 связаны со сложным напряженным состоянием, и если они не задаются пользователем, то автоматически вычисляются на базе эмпирических зависимостей модели:

$$f_{cb} = 1,2f_c \quad (3)$$

$$f_1 = 1,45f_c \quad (4)$$

$$f_2 = 1,725f_c \quad (5)$$

Следует заметить, что данные зависимости валидны только при выполнении условия:

$$|\sigma_n| \leq \sqrt{3}f_c \quad (6)$$

Модель материала №2 используется для моделирования стальных опор и пластинок в точках приложения нагрузки. В связи с этим, материал моделируется, как линейный, изотропный, с модулем упругости стали и коэффициентом Пуассона 0,3.

Модели материалов №3, №4, №5 относятся к арматурным элементам. Все армирование балки моделируется с помощью КЭ Link8. Диаграмма деформирования считается билинейной, а материал – изотропным. Для билинейной модели требуется знание предела текучести и модуля упрочнения материала.

Необходимо отметить, что плотности бетона и арматуры не включены в модель материалов. Влиянием собственного веса при расчетах пролетных конструкций так же можно пренебречь.

Параметры решения

Конечноэлементная модель в проводимом анализе – это балка на двух опорах под действием поперечной нагрузки. Для нее соответственно принят статический тип анализа.

Данная модель работает нелинейно. В таблице 2 нами приведены параметры решателя, контроля сходимости и нелинейного анализа. Для контроля сходимости используются два параметра – сумма внутренних усилий (внешняя нагрузка) и перемещения

Таблица 2

Параметры решения

Общие характеристики	
Тип анализа	Статический
Контроль перемещений	Большие
Время в конце шага наружения	P (величина кратковременного нагружения)
Число подшагов	10 ⁶
Автоматический таймстеппинг	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

Выводы.

1. Принятый объем экспериментально и теоретических исследований позволяет в полной мере решить все намеченные в диссертационной работе задачи и достичь поставленной цели.
2. Детально разработанная методика экспериментальных исследований в комплексе с современными электро-механическими приборами, программным обеспечением и оборудованием позволяют достичь необходимую достоверность полученных результатов.
3. Моделирование сложного напряженно-деформированного состояния опытных элементов путем нелинейного конечно-элементного расчета с помощью программного комплекса «ANSYS MECHANICAL» дает возможность численно воспроизвести результаты эксперимента и сделать прогноз их напряженно-деформированного состояния достоверным.

Список использованных источников

1. Дашченко А.Ф. Численно-аналитический метод граничных элементов / А.Ф. Дашченко, Л.В. Коломиец, В.Ф. Оробей, Н.Г. Сурьянинов — Одесса: ВМВ, 2010. — В 2-х томах. — Т.1. — 416 с. — Т.2. — 512 с.
2. Оробей В.Ф. Основные положения численно-аналитического варианта МГЭ / В.Ф. Оробей, Н.Г. Сурьянинов. — Труды Санкт-Петербургского политехнич. ун-та / Инженерно-строительный журнал. — № 4 (22). — СПб, 2011. — С. 33-39.
3. Басов К. А. ANSYS для конструкторов. — М.: ДМК Пресс, 2009. — С. 248.
4. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.
- Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справочное пособие — М.: Машиностроение — 1, 2004. — 512 с.
- А.И. КОСТЮК, И.А. СТОЛЕВИЧ, О.И. СТОЛЕВИЧ

References

1. Dashchenko A.F. Chislenno-analiticheskij metod granichnyh ehlementov / A.F. Dashchenko, L.V. Kolomic, V.F. Orobej, N.G. Sur'yaninov — Odessa: VMV, 2010. — V 2-h tomah. — T.1. — 416 p. — T.2. — 512 p.
2. Orobej V.F. Osnovnye polozheniya chislenno-analiticheskogo varianta MGEN / V.F. Orobej, N.G. Sur'yaninov. — Trudy Sankt-Perburgskogo politekhnich. un-ta / Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. — № 4 (22). — SPb, 2011. — P. 33-39.
3. Basov K. A. ANSYS dlya konstruktorov. — M.: DMK Press, 2009. — 248 p.
4. Kaplun A.B., Morozov E.M., Olfer'eva M.A. ANSYS v rukah inzhenera: Prakticheskoe ruokvodstvo — M.: Editorial URSS, 2003. — 272 p.
5. CHigarev A.V., Kravchuk A.S., Smalyuk A.F. ANSYS dlya inzhenerov: Spravochnoe posobie — M.: Mashinostroenie — 1, 2004. — 512 p.

ЗАГАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛЮВАННЯ В ЧИСЛОВОМУ ЕКСПЕРИМЕНТІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК ANSYS MECHANICAL

КОСТЮК А.І., СТОЛЕВИЧ І.А., СТОЛЕВИЧ О.І.

Одеська державна академія будівництва і архітектури

Мета. Детальне експериментально-теоретичне дослідження напружено-деформованого стану, тріщиностійкості та несучої здатності керамзитозалізобетонних балок з використанням програмного комплексу *Ansys Mechanical*.

Результати. Моделювання складного напружено-деформованого стану елементів, що досліджуються, шляхом нелінійного скінченно-елементного розрахунку за допомогою програмного комплексу «*ANSYS MECHANICAL*» дає можливість чисельно відтворити результати експерименту й зробити прогноз їх напружено-деформованого стану достовірним.

Методика. Побудована модель відповідно до поставленої задачі повинна максимально відображати реальну роботу залізобетонного елемента під дією навантаження.

Наукова новизна. Доведена можливість ефективного моделювання напружено-деформованого стану згинальних залізобетонних елементів, в тому числі схильних до тривалого впливу навантаження з урахуванням нелінійності повзучості за допомогою методу кінцевих елементів, з реалізацією в ПК *ANSYS*.

Практична значимість. Суттєво поповнено банк експериментальних даних про напружено-деформований стан згинальних керамзитозалізобетонних елементів, в якому комплексно враховано вплив досліджуваних факторів на вихідні параметри їх працездатності.

Ключові слова: модель, повзучість, керамзитозалізобетон, напруження, елемент, *ANSYS*.

GENERAL PARAMETERS OF MODELING IN A NUMERICAL EXPERIMENT WITH USING THE PK ANSYS MECHANICAL

KOSTYUK A.I., STOLEVICH I.A., STOLEVICH O.I.

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

Goal. Detailed experimental and theoretical research of the stress-strain state, crack resistance and load-bearing capacity of expanded clay reinforced concrete beams with using the program complex *Ansys Mechanical*.

Findings. Modeling the complex stress-strain state of experimental elements by means of nonlinear finite element calculation using the software complex "*ANSYS MECHANICAL*" makes it possible to numerically reproduce the results of the experiment and make a forecast of their stress-strain state reliable.

Methodology. The constructed model in accordance with the assigned task should maximally reflect the real work of the reinforced concrete element under the action of the load.

Scientific novelty. The possibility of effective modeling of the stress-strain state of bent reinforced concrete elements, including apt a long-term load, taking into account the nonlinearity of creep with help of the finite element method, with the realization in the PK *ANSYS*, is proved.

Practical significance. The bank of experimental data about stressed-strain state of bent expanded clay reinforced concrete elements has been significantly supplemented, in which the influence of the explored factors on the output parameters of their operability comprehensively taken into account.

Key words: model, creep, expanded clay reinforced concrete, stress, element, *ANSYS*.