

УДК 69.04

ФИЗИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В РАСЧЕТНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ

С.Ф. Дьяков, К.А. Трофин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В данной статье производится оценка влияния учета физически нелинейных свойств железобетона на прогибы, возникающие в конструкции. В сравнение приводятся несколько методик. Первая, нормативная методика, по СП 430.1325800.2018, требующая в ходе расчета строительных конструкций учитывать понижение жесткостных характеристик материала. Вторая, шаговая методика, реализующая поэтапное нагружение конструкции и учитывающая в жесткостных характеристиках материалов их нелинейные свойства, такие как ползучесть и модуль разупрочнения. Расчет производится в ПК SCAD Office 21.1.9.9 по одной из теорий, пластичности, встроенных в расчетное ПО – по деформационной теории пластичности. Третья методика, встроенная в ПК ЛИРА-САПР 2021 R2 описана внутренним модулем программного комплекса – «Инженерной нелинейностью». Данный модуль, заявленный авторами программного обеспечения как один из способов замены привычного и трудоемкого шагово-итерационного расчета, самостоятельно проводит итерационный расчет, на каждой итерации, подбирая новую жесткость конечного элемента и его армирование. В статье приведены алгоритмы расчета по каждой из методик; приведены в сравнения прогибы, полученные по той или иной методике расчета; были оценены трудозатраты на проведение того или иного типа расчета.

Ключевые слова: железобетон, физическая нелинейность, SCAD, ЛИРА, ползучесть, деформационная теория пластичности, безбалочная плита, инженерная нелинейность, изгиб.

Ссылка для цитирования: Дьяков С.Ф., Трофин К.А. Физическая нелинейность железобетонных конструкций в расчетных программных комплексах // Инженерные исследования. 2024. №4(19). С. 3-11. EDN: DGIVTS

PHYSICAL NONLINEARITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN COMPUTATION SOFTWARE COMPLEXES

S.F. Dyakov, K.A. Trofin

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article assesses the impact of taking into account the physically nonlinear properties of reinforced concrete on the deflections that occur in the structure. Several methods are compared. The first, the normative method, according to SP 430.1325800.2018, requires taking into account the decrease in the rigidity characteristics of the material during the calculation of building structures. The second, step-by-step method, implements a step-by-step loading of the structure and takes into account the nonlinear properties of materials in their rigidity characteristics, such as creep and softening modulus. The calculation is performed in the SCAD Office 21.1.9.9 PC according to one of the theories of plasticity built into the calculation software - according to the deformation theory of plasticity. The third method, built into the LIRA-SAPR 2021 R2 PC, is described by the internal module of the software package - "Engineering Nonlinearity". This module, declared by the authors of the software as one of the ways to replace the usual and labor-intensive step-iteration calculation, independently carries out the iteration calculation, at each iteration, selecting a new rigidity of the finite element and its reinforcement. The article provides calculation algorithms for each of the methods; deflections obtained by one or another calculation method are compared; labor costs for carrying out one or another type of calculation were estimated.

Keywords: reinforced concrete, physical nonlinearity, SCAD, LIRA, creep, deformation theory of plasticity, beamless slab, engineering nonlinearity, bending.

For citation: Dyakov S.F., Trofin K.A. Physical nonlinearity of reinforced concrete structures in computation software complexes // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.4(19). Pp. 3-11. EDN: DGIVTS

ВВЕДЕНИЕ

Физическая нелинейность железобетонных конструкций является важным аспектом при их проектировании, так как она существенно влияет на точность расчета и прогнозирование поведения материалов под воздействием различных нагрузок. Железобетон проявляет нелинейные свойства, которые зависят от уровня напряжений и продолжительности действия нагрузки. Это особенно важно для расчета изгибаемых и сжимаемых элементов, где нелинейные деформации, оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики конструкций [1-3]. Помимо указанных исследований, вопросы грамотного учета физической нелинейности железобетонных конструкций рассматриваются также в источниках [4-6].

Научным сообществом данный вопрос изучается достаточно активно. В работе В.А. Куци и В.П. Яценко [7] рассмотрен физически нелинейный расчет плоской рамы. Полученные результаты нелинейного расчета сравниваются с результатами, полученными в ходе решения задачи в линейной постановке, а также с результатами расчета, использовавшим понижающий жесткостные коэффициенты. Результатом исследования стал вывод о несогласованности всех трех вариантов расчета более чем на 50% в отношении как внутренних усилий, так и максимальных прогибов в конструкции. В случае использования в ходе расчета нелинейной модели работы железобетона, авторами рекомендуется проведения дополнительных верификационных проверок [8].

Последнее исследование, затрагивающее вопросы учета физической нелинейности в работе железобетонных конструкций, было проведено С.Ф. Дьяковым и Л.В. Мустафиной [9]. В статье проводится моделирование безбалочного монолитного железобетонного перекрытия, учитывающее нелинейный характер деформирования конструкции по модели Друкера-Прагера. Результат показал завышение требуемого армирования в сравнении с нормативными методиками. Авторы также отмечают, что однозначный вывод возможности расчета конструкций с учетом физической нелинейности в строительной практике сделать нельзя, поскольку различия в результатах могут быть вызваны неочевидным соотношением начальных характеристик, задаваемых в расчет [10].

Цель данной работы – оценить трудозатраты по учету физической нелинейности в работе железобетонных конструкций, а также выявить наиболее применимую в проектировании методику учета нелинейных свойств. В сравнение приводятся методики, заложенные в два наиболее популярных в Российской Федерации программных комплекса: SCAD Office и ЛИРА-САПР.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА В ПК SCAD OFFICE

Расчет проводился в сертифицированном расчетном программном комплексе SCAD Office 21.1.9.9.

В качестве расчетной модели принято монолитное безбалочное перекрытие, опертное на регулярную систему колонн. Толщина перекрытия составляет 180 мм, размер сечения колонны – 800х800 мм. Материал несущих конструкций – бетон В25, армируемый продольными стержнями А500; поперечными – А240. Шаг колонн составляет 5х5 м.

В качестве контрольного нагружения на сооружение принято три нагрузки (табл.1).

Таблица 1. Сбор нагрузок на сооружение

Table 1. Collection of loads on the structure

№	Название нагрузки	Тип нагрузки	Доля длительности	Нормативное значение нагрузки, кПа	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетное значение нагрузки, кПа
1	Собственный вес плиты перекрытия	Постоянная	1,00	4,42	1,10	4,86
2	Эксплуатируемая кровля			7,00	1,15	8,05
3	Полезная нагрузка от веса людей	Кратковременная	0,35	4,00	1,20	4,80

Для выявления наибольшего влияния нагрузки на расчетную схему, в расчет были приняты три варианта нагружения от полезной нагрузки от веса людей (рис. 1).

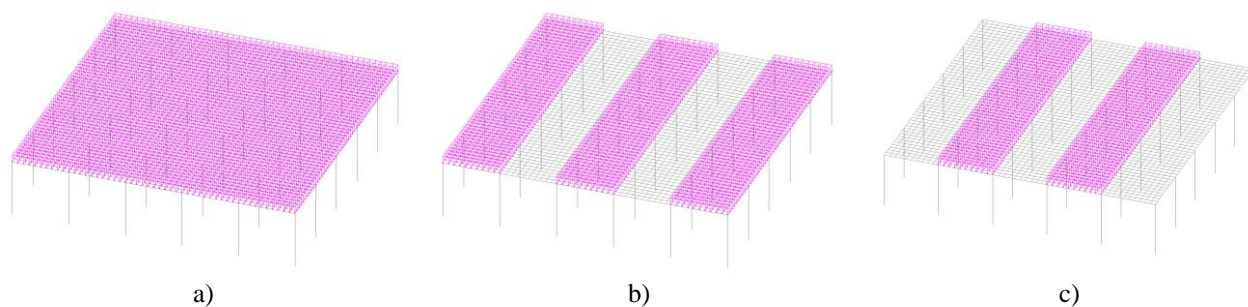


Рис. 1. Схемы нагружения полезной нагрузкой расчетной схемы: а – нагрузка на всем перекрытии; б – нагрузка в нечетных пролетах плиты; с – нагрузка в четных пролетах плиты

Fig. 1. Schemes for loading the design scheme with a payload: а – load on the entire floor; б – load in odd spans of the slab; с – load in even spans of the slab

Закрепление расчетной схемы проводилось за счет внедрения связей у оснований колонн. Закрепление проводилось по всем направлениям. Типы линейных конечных элементов – КЭ №44 для плиты перекрытия (4-х угольный КЭ оболочки); КЭ №5 для колонн (пространственный стержень) (рис. 2).

В соответствии с рекомендациями норм¹, на первой стадии расчета для оценки усилий в элементах монолитных конструктивных систем допускается принимать модуль упругости равным $0,6E_b$ – для вертикальных сжатых несущих элементов; $0,2E_b$ – для горизонтальных несущих элементов с допуском возникновения в них трещин. Такой подход позволяет более точно, и достаточно быстро, определить реальную жесткость конструкции, работающей физически нелинейно. Таким образом, для расчетной схемы были назначены модули упругости, при начальном модуле упругости бетона В25, $E_b = 30000$ МПа: для колонн $E = 18000$ МПа; для плиты перекрытия – $E = 6000$ МПа.

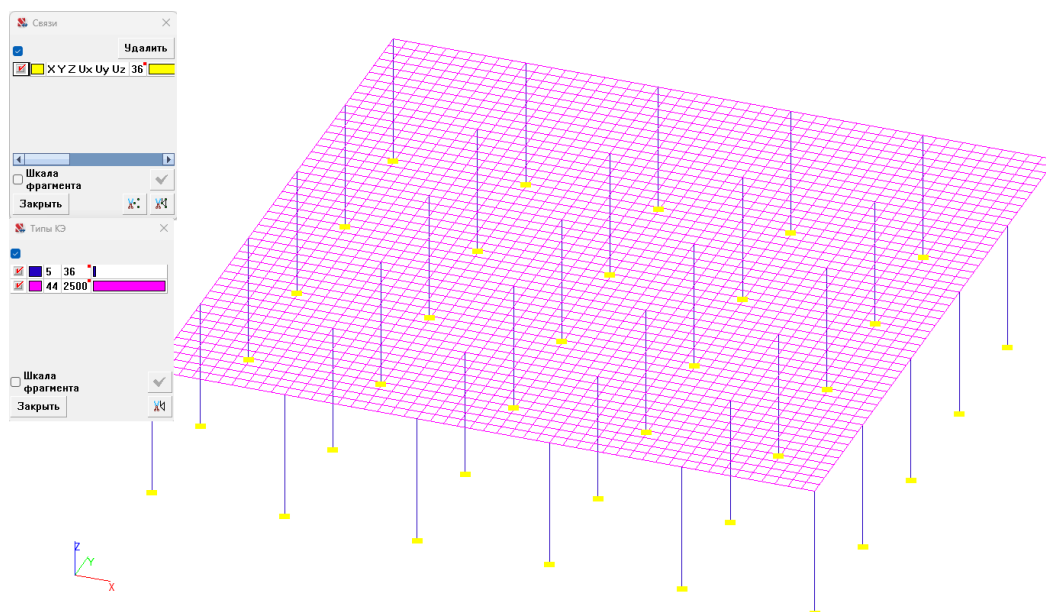


Рис. 2. Закрепления схемы и типы конечных элементов

Fig. 2. Schematic Constraints and Finite Element Types

По результатам заданных таблиц РСУ и РСН были определены максимальный прогиб в плите перекрытия (табл.2) и минимально требуемое армирование в плите перекрытия. Армирование подбиралось по первой и второй группам предельных состояний в соответствии с нормативными требованиями².

Полученная в результате модель была сохранена под другим именем для проведения нелинейного расчета. Для дальнейшего расчета у плиты перекрытия были изменены конечные элементы на КЭ №444

¹ СП 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования».

² СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

(4-х угольный КЭ оболочки с учетом физической нелинейности). Глобально, учет физической нелинейности в ПК SCAD Office можно разделить на две составляющих: нелинейные жесткостные характеристики материала конструкции и стадийность моделирования загружений конструкции.

Для добавления соответствующему материалу физически-нелинейных характеристик потребовался ввод дополнительных исходных данных (рис. 3).

SCAD Office предлагает в своем функционале несколько теорий нелинейного поведения железобетонных конструкций. Дальнейший расчет проводился по деформационной теории пластичности.

Идейно, физически нелинейный расчет предполагает рассмотрение четырех возможных сценариев работы конструкции. Каждый из рассматриваемых сценариев отвечает определенным критериям расчета. 1 и 2 расчетные модели используются для расчета конструкции по I группе предельных состояний, 3 и 4 модели – для расчета по II группе предельных состояний.

В 1 и 3 расчетных случаях моделируется работа конструкции из условия кратковременного воздействия нагрузок на сооружение. 2 и 4 расчетные случаи исключают кратковременные воздействия и моделируют работу конструкции в предположении действия только длительной части этих нагрузок, однако требуют понижения модуля упругости бетона (согласно п.6.1.15), из-за возникновения эффекта ползучести, при рассмотрении работы конструкции на продолжительном временном интервале:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}} = \frac{30000 \text{ МПа}}{1 + 3,6} = 6521,739 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где:

E_b – начальный модуль упругости бетона, принимаемый по табл.6.11¹, для класса В25, $E_b = 30000$ МПа;

$\varphi_{b,cr}$ – коэффициент ползучести, принимаемый по табл.6.12¹. Принят худший вариант, чреватый увеличением трещинообразования – помещение с пониженной влажностью, $\varphi_{b,cr} = 3,6$.

Общие данные		Модель №:				
		1	2	3	4	
Объемный вес		24.52	24.52	24.52	24.52	кН/м ³
Коэффициент Пуассона		0.2	0.2	0.2	0.2	
Начальный модуль упругости бетона		30000000	6521739	30000000	6521739	кН/м ²
Предел прочности бетона на сжатие		14500	14500	18500	18500	кН/м ²
Предел прочности бетона на растяжение		1050	1050	1550	1550	кН/м ²
Относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы при растяжении		-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
Относительный модуль (раз)упрочнения билинейной диаграммы при сжатии		-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
Отношение деформации в точке U и деформации, соответствующей пределу прочности бетона на сжатие		1.732	2.772	1.732	2.772	

Свойства арматуры		Модель №:				
		1	2	3	4	
Модуль упругости арматуры		200000000	200000000	200000000	200000000	кН/м ²
Коэффициент Пуассона арматуры		0.3	0.3	0.3	0.3	
Предел текучести арматуры на растяжение		435000	435000	500000	500000	кН/м ²
Предел текучести арматуры на сжатие		400000	400000	500000	500000	кН/м ²
Относительный модуль (раз)упрочнения в зоне растяжения для арматуры		0.05	0.05	0.05	0.05	
Относительный модуль (раз)упрочнения в зоне сжатия для арматуры		0.05	0.05	0.05	0.05	
Предельная деформация для растянутой арматуры		0.023	0.023	0.023	0.023	
Предельная деформация для сжатой арматуры		-0.023	-0.023	-0.023	-0.023	

Рис. 3. Исходные физически нелинейные параметры плиты перекрытия

Fig. 3. Initial physically nonlinear parameters of the floor slab

Пределы прочности бетона на сжатие и растяжение приняты в соответствии с рекомендациями норм³ по табл. 6.7 и 6.8. Относительный модуль разупрочнения принят в соответствии с рекомендациями⁴.

³ СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

⁴ Нелинейные расчёты на МРЗ в SCAD++ Вебинар А.В. Теплых, зам.ген.директора ООО «СКАД СОФТ» [Электронный ресурс]. - URL: https://www.youtube.com/watch?v=OFlu69_fCHw (дата обращения: 05.11.2024).

Абсцисса вершины диаграммы сжатия бетона определяется в соответствии с приложением Г, нормативного документа по железобетонным конструкциям⁵:

$$|\varepsilon_b| = \frac{B}{E_b} \cdot \lambda \cdot \frac{1 + 0,75\lambda B / 60 + 0,2\lambda / B}{0,12 + B / 60 + 0,2 / B} = \frac{25}{30000} \cdot 1 \cdot \frac{1 + 0,75 \cdot 1 \cdot 25 / 60 + 0,2 \cdot 1 / 25}{0,12 + 25 / 60 + 0,2 / 25} = 0,00202, \quad (2)$$

где:

λ – безразмерный коэффициент, принимаемый равным 1 для тяжелых бетонов;

B – класс бетона;

E_b – начальный модуль упругости бетона.

Отношение деформации в точке U и деформации, соответствующей пределу прочности бетона на сжатие определяется исходя из длительности действия нагрузки.

- для моделей 1 и 3:

$$\varepsilon_{b2} = 0,0035 \rightarrow \frac{\varepsilon_{b2}}{\varepsilon_b} = \frac{0,0035}{0,00202} = 1,732; \quad (3)$$

- для моделей 2 и 4:

$$\varepsilon_{b2} = 0,0056 \rightarrow \frac{\varepsilon_{b2}}{\varepsilon_b} = \frac{0,0056}{0,00202} = 2,772, \quad (4)$$

где:

ε_{b2} – значение предельной относительной деформации тяжелых бетонов, в зависимости от длительности действия нагрузки, принятые по п.6.1.20 и табл. 6.10¹.

После задания жесткостных характеристик материалов несущих конструкций необходимо задать этапность моделирования нагрузки. Для каждой модели было задано пошаговое нагружение конструкции (рис. 4). В каждой из модели рассмотрено по три варианта действия нагрузки от нахождения людей на плите перекрытия:

Управление шаговым процессом

Номер нелинейного нагружения: 1 Загружение является продолжением предыдущего нагружения

После нелинейного расчета выполнить анализ устойчивости

После нелинейного расчета выполнить анализ устойчивости

Коэффициенты нагружения по шагам

Модель 1			
Номер нагружения	Коэффициент нагружения	Количество шагов	Сохранение результатов
1 : СВ	0,5	2	<input checked="" type="checkbox"/>
2 : Пол	0,1	10	<input checked="" type="checkbox"/>
3 : Людн. Полное_пе	0,1	10	<input checked="" type="checkbox"/>

Модель 2			
Номер нагружения	Коэффициент нагружения	Количество шагов	Сохранение результатов
1 : СВ	0,5	2	<input checked="" type="checkbox"/>
2 : Пол	0,1	10	<input checked="" type="checkbox"/>
3 : Людн. Полное_пе	0,035	10	<input checked="" type="checkbox"/>

Модель 3			
Номер нагружения	Коэффициент нагружения	Количество шагов	Сохранение результатов
1 : СВ	0,4545	2	<input checked="" type="checkbox"/>
2 : Пол	0,087	10	<input checked="" type="checkbox"/>
3 : Людн. Полное_пе	0,0292	10	<input checked="" type="checkbox"/>
3 : Людн. Полное_пе	0,0542	10	<input checked="" type="checkbox"/>

Модель 4			
Номер нагружения	Коэффициент нагружения	Количество шагов	Сохранение результатов
1 : СВ	0,4545	2	<input checked="" type="checkbox"/>
2 : Пол	0,087	10	<input checked="" type="checkbox"/>
3 : Людн. Полное_пе	0,0292	10	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 4. Пошаговое моделирование нагружений

Fig. 4. Modeling of loading steps

⁵ СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

1. Модель 1. Расчетные постоянные, длительные и кратковременные нагрузки. Доля длительности не учитывается, поскольку прикладывается полная нагрузка. На первом этапе за 2 шага прикладывается нагрузка от собственного веса, за 10 следующих шагов – нагрузка от эксплуатируемой кровли и за последние 10 шагов – от веса людей.

2. Модель 2. Расчетные постоянные и длительные нагрузки. То же, что и модель 1, но на этапе приложения временной нагрузки учитывается доля длительности – 0,35.

3. Модель 3. Нормативные постоянные, длительные и кратковременные нагрузки. Данная модель загружена с использованием четырех этапов загрузки. Сначала за 2 шага прикладывается нагрузка от собственного веса конструкции. Далее, за 10 шагов прикладывается нагрузка от покрытия кровли. За следующие 10 шагов прикладывается длительная часть временно действующей нагрузки, за счет умножения коэффициента загрузки на 0,35. Последние 10 шагов учитывают кратковременную часть временной нагрузки за счет умножения коэффициента загрузки на 0,65. Данное разделение необходимо, поскольку дальнейший расчет предполагает снятие прогибов плиты перекрытия на этапе приложения сначала длительной части кратковременной нагрузки, а потом полной кратковременной нагрузки.

4. Модель 4. Нормативные постоянные и длительные нагрузки. То же, что и модель 2, но прикладываются нормативные значения нагрузки, вместо расчетных.

После моделирование шагов загрузки конструкции необходимо перейти к формированию таблиц расчетных сочетаний усилий при моделировании нелинейных нагрузок. Это необходимо для автоматического определения программой наилучшего варианта нагружения. На рис. 5 показан пример формирования таблицы НРСУ для модели 3.

Расчетные сочетания усилий и перемещений					
Загрузки					
	Активное нагружение	Активное нагружение	Наименование	Коэф. надежности	Доля длительности
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 1, шаг 2 - 0.909 ^q L1	1	1
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 1, шаг 12 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2	1	1
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 1, шаг 22 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2+0.292 ^q L3	1	1
4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 1, шаг 32 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2+0.542 ^q L3	1	0,8145
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 2, шаг 2 - 0.909 ^q L1	1	1
6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 2, шаг 12 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2	1	1
7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 2, шаг 22 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2+0.292 ^q L4	1	1
8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 2, шаг 32 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2+0.542 ^q L4	1	0,8798
9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 3, шаг 2 - 0.909 ^q L1	1	1
10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 3, шаг 12 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2	1	1
11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 3, шаг 22 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2+0.292 ^q L5	1	1
12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	загрузка 3, шаг 32 - 0.909 ^q L1+0.87 ^q L2+0.542 ^q L5	1	0,9165

Рис. 5. Нелинейные расчетные сочетания усилий для модели 3
 Fig. 5. Nonlinear design combinations of forces for model 3

Расчет проводится последовательно: от модели 1 до модели 4. После проведения расчетов по определенной модели проверяется, удовлетворяет ли заданное армирование требованиям нормативных документов⁶. Производится это благодаря постпроцессору SCAD Office, обладающей утилитой по экспертизе железобетонных конструкций. В случае если заданное армирование не удовлетворяет тем или иным критериям (в зависимости от того, по какой группе предельных состояний производится расчет), армирование меняется до тех пор, пока все условия не будут удовлетворены. По итогу, файл с заданным актуальным армированием сохраняется под новым именем и происходит расчет по следующей модели.

В конце концов, нелинейный прогиб определяется с использованием данных, полученных в результате расчета по 3 и 4 моделям. Итоговый максимальный прогиб в конструкции будет определяться как:

$$f = f_{3n} - f_{3d} + f_4, \quad (5)$$

где:

f – искомый нелинейный максимальный прогиб в плите перекрытия;

f_{3n} – максимальное перемещение по 3 модели на этапе приложения полной нагрузки;

f_{3d} – максимальное перемещение по 3 модели на этапе приложения длительной части нагрузки;

f_4 – максимальное перемещение по 4 модели на этапе приложения длительной части нагрузки.

⁶ СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции».

МЕТОДИКА РАСЧЕТА В ПК ЛИРА-САПР

Расчет проводился в сертифицированном расчетном программном комплексе ЛИРА-САПР 2021 R2.

Начиная с ПО версии от 2016 года выпуска, разработчиками заявлено внедрение в функционал программы возможности учета физической нелинейности в конструкции или отдельных ее элементов за счет встроенного модуля «Инженерная нелинейность».

Принцип работы модуля заключается в изменении жесткостных характеристик каждого рассчитываемого конечного элемента путем итерационного процесса. На каждом шаге итерации производится подбор армирования и изменение модуля упругости элемента, его модуля сдвига и коэффициента Пуассона.

Расчет производится по следующему алгоритму:

1. Задается рассчитываемая модель: геометрические характеристики, начальные жесткостные характеристики, ж/б характеристики, связи, загрузки, комбинации загрузок.

2. В меню «Расчет», на вкладке «Нелинейность» выбирается «Инженерная» (рис. 6). Здесь расчетчик должен самостоятельно задать, по его мнению, определяющее нагружение, влияющее на работу конструкции.

3. Проводится обыкновенный линейный расчет.

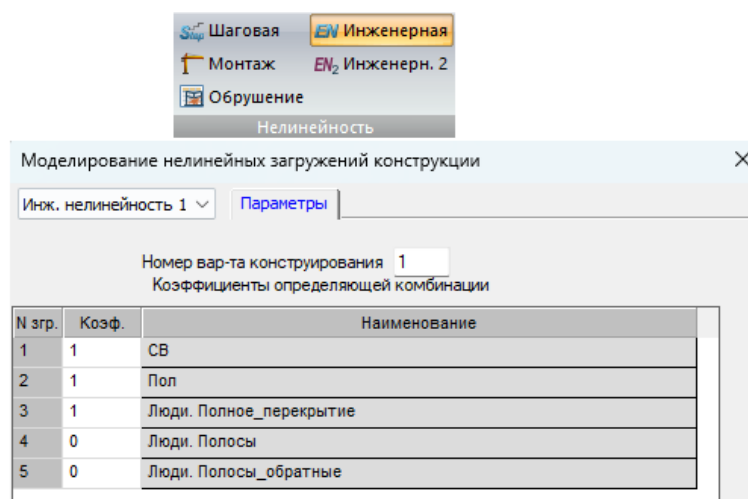


Рис. 6. Модуль «Инженерная нелинейность»

Fig. 6. Module "Engineering nonlinearity"

В расчетный комплекс была добавлена расчетная модель, аналогичная рассчитанной в ПК SCAD Office.

В результате расчета, программа определит армирование элементов и изменит жесткостные характеристики каждого КЭ. Прогиб, соответствующий заданным жесткостям и армированию будет итоговым.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В первую очередь, хочется отметить трудоемкость расчета в SCAD Office в нелинейной постановке задачи. Расчет 1 линейной и 4 нелинейных моделей в сумме занял около 2000 секунд. Более того, данное время увеличивается за счет временных затрат на вычисление и ввод дополнительных исходных данных. Время, затраченное на расчет с помощью модуля «Инженерная нелинейность» едва ли превышает время на расчет в линейной постановке (которое ограничивается несколькими секундами), из-за необходимости проведения предварительного итерационного расчета с подбором жесткостей и армирования.

При определении максимального прогиба каждая из методик показала одинаковый характер деформированного состояния плиты перекрытия. Наибольший прогиб во всех моделях наблюдался в угловых пролетах плиты (рис. 7).

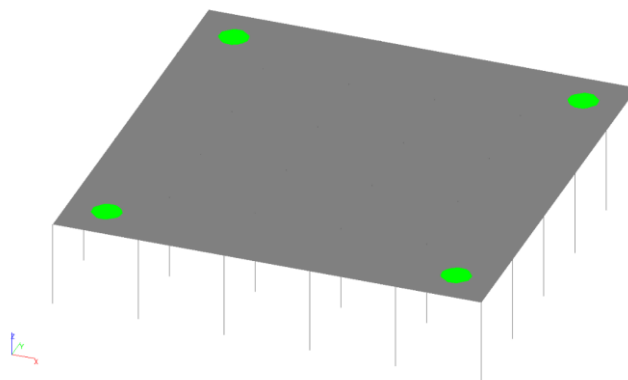


Рис. 7. Характер возникновения максимальных прогибов в конструкции
Fig. 7. The nature of the occurrence of maximum deflections in the structure

Основываясь на официальной документации ЛИРА-САПР⁷, в качестве исходных жесткостей материала бетона должен выступать начальный модуль упругости ($E = 30000 \text{ МПа}$). Однако, результаты, полученные в ходе соблюдения данной рекомендации, показали результат, более чем в 2 раза отличающийся (в меньшую сторону) от остальных значений. Модель была сохранена под новым именем. Модуль упругости бетона в ней был назначен пониженным, в соответствии с рекомендациями норм⁸. Результаты расчета плиты перекрытия с учетом физической нелинейности по всем методикам расчета сведены в табл.2.

Таблица 2. Результаты расчета максимального прогиба плиты
Table 2. Results of calculating the maximum deflection of the slab

Наименование расчета	SCAD Office 21.1.9.9		ЛИРА-САПР 2021 R2		
	Линейный расчет ($E = 0, 2E_b$)	Шаговый нелинейный расчет	Линейный расчет ($E = 0, 2E_b$)	«Инженерная нелинейность» ($E_0 = E_b$)	«Инженерная нелинейность» ($E_0 = 0, 2E_b$)
Максимальный прогиб, мм	27,5	31,6	29,0	11,4	27,8
Отклонение результата относительно нелинейного расчета в SCAD, %	13,0	-	8,2	63,9	12,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа реализованных в программных комплексах методов физически нелинейного расчета железобетонных конструкций, можно сделать следующие выводы:

1. Основываясь на работах предшественников, рассчитывавших аналогичные конструкции шаговым методом в ПК SCAD Office, можно заключить, что учет физической нелинейности в работе конструкции может показать как положительный (уменьшение прогиба), так и отрицательный результат (увеличение прогиба). Предположительно, решающим фактором является некое отношение результирующей нагрузки, действующей на перекрытие, к физико-геометрическим характеристикам плиты перекрытия. В случае внушительной высоты плиты и/или большего класса бетона, при сохранении величины внешней нагрузки, плита перекрытия, в ходе физически нелинейного расчета, может показать меньший прогиб, в сравнении с линейным расчетом.

2. При расчете задачи в линейной постановке, с введением понижающих коэффициентов¹, между вариантами расчета в ПК SCAD Office и ПК ЛИРА-САПР, численно, нет существенной разности. Полученная разность в результатах укладывается в пределы инженерной погрешности.

⁷ Учет нелинейной работы железобетона в ПК ЛИРА-САПР. Метод «Инженерная нелинейность». [Электронный ресурс]. - URL: <https://help.liraland.com/ru-ru/high-technology-innovations/method-engineering-nonlinearity.html> (дата обращения: 07.11.2024).

⁸ СП 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования».

3. Использование «Инженерной нелинейности», где в качестве исходных данных был принят начальный модуль упругости бетона, показал заниженный, более чем в 2 раза, результат по максимальному прогибу. При использовании в качестве исходных данных модуля упругости бетона с понижающим коэффициентом, результат показывает значения, схожие с остальными методиками расчета. Из-за несоответствия ожидаемых результатов расчета реальным, использование модуля «Инженерная нелинейность» для практических расчетов находится под сомнением.

4. Время, затраченное на реализацию шагового нелинейного расчета в ПК SCAD Office, многократно превышает время, затраченное на реализацию остальных методик. При усложнении расчетной схемы и рассмотрении больших комбинаций загрузений данное время может также кратно возрасти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсеев Н.А. Учет физической нелинейности железобетонных конструкций при численных расчетах конструктивных систем // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 66–70. EDN: YOAUNF. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-5-66-70.
2. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Учет физической нелинейности при расчете железобетонных монолитных конструкций высотных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 2005. № 1. С. 4–8.
3. Блохина Н.С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2011. № 6. С. 384–387. EDN: OWFSOL.
4. Fialko S.Y., Perelmuter A.V. Inelastic analysis of reinforced concrete structures in SCAD // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. № 15 (1). P. 54–60. EDN: KYPWJU. DOI: 10.22337/2587-9618-2019-15-1 54-60.
5. Fialko S. Y., Karpilovskyi V.S. Triangular and quadrilateral flat shell finite elements for nonlinear analysis of thin-walled reinforced concrete structures in SCAD software // Shell Structures: Theory and Applications, Gdańsk, 11–13 октября 2017. Gdansk, Poland: CRC Press, 2018. P. 367-370. EDN: PLBDNP. DOI 10.1201/9781315166605-83.
6. Kolchunov V. I., Karpenko S. N. Rigidity of reinforced concrete structures under complex resistance // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2022. № 1(53). P. 7-20. EDN: WQNTEN.
7. Куш В.А. Учет физической нелинейности при расчете плоской железобетонной рамы с использованием вычислительного комплекса SCAD // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11, № 1(36). С. 38-47. EDN: HFQNAV. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-1.
8. Шевченко А.В., Баглаев Н.Н., Зеленев Е.А., Курбатов В.Л. Определение остаточных прогибов изгибаемых железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 8. С. 31-40. EDN: AQMAUE.
9. Дьяков, С.Ф., Мустафина Л.В. Физическая нелинейность железобетона в изгибаемых элементах с учётом длительности действия нагрузки // Инженерные исследования. 2024. № 1(16). С. 13-22. EDN VXYYVY.
10. Теплых А.В. Применение оболочечных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 49–52. EDN: NTBGDH.

ОБ АВТОРАХ

Станислав Федорович Дьяков – доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29. E-mail: dyakov_sf@spbstu.ru

Кирилл Андреевич Трофин – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29. E-mail: trofin.ka@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Stanislav F. Dyakov – associate professor at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29. E-mail: dyakov_sf@spbstu.ru.

Kirill A. Trofin – master's student. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St. Petersburg, Politekhnikeskaya st., 29. E-mail: trofin.ka@edu.spbstu.ru.