



**«СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ
ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И
СЖАТИИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И НЕСУЩУЮ
СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»**

Выполнил: Голубчиков Иван Александрович

Научный руководитель: Красовицкий Михаил Юрьевич
кандидат технических наук, доцент

Москва 2018 г.

Методика расчёта железобетонных конструкций по деформационной модели на нынешний день является весьма перспективной и приближенной к реальному поведению материала.

Но до сих пор в данной модели остаются неосвещенные и неизученные моменты. В частности, в технической литературе отсутствует информация о влиянии изменения ограничений деформационных диаграмм бетона на результаты расчетов.

Изучение этого вопроса позволяет восполнить пробел в исследовании деформационной модели и поэтому является актуальным направлением в развитии строительной науки и практики.

Цель

• Провести сравнительный анализ влияния изменения ограничений деформационных диаграмм бетона на несущую способность и трещиностойкость железобетонных конструкций при растяжении и сжатии.

Задачи:

1. Провести анализ и обобщение сведений о различных типах диаграмм деформирования бетона и методиках расчета по ним.
2. Выбрать приемлемую методику для численных исследований.
3. На основе расчетной модели, разработать программный вычислительный комплекс, позволяющий рассчитывать железобетонные конструкции, как по методике деформационной модели с ограничениями из СП 63.13330.2012, так и с возможностью редактирования деформационных диаграмм и изменения их ограничений.
4. Провести проверку разработанных алгоритмов на основе сравнения с результатами ручного метода расчета.
5. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы о влиянии увеличений ограничений диаграмм деформирования на результаты расчета несущей способности и трещиностойкости железобетонных конструкций при сжатии и растяжении.

На защиту выносятся:

- Разработанный программный расчетный комплекс для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели на базе связки Microsoft Office Excel + Autodesk AutoCAD с использованием макросов на языке Visual Basic.
- Результаты численных исследований железобетонных конструкций по несущей способности и трещиностойкости при изменении ограничений деформационных диаграмм бетона.
- Сравнение полученных результатов и анализ влияния ограничений предельных деформаций бетона на несущую способность и трещиностойкость железобетонных элементов при растяжении и сжатии.

Общие соображения

Расчет напряжённо деформированного состояния нормальных сечений по деформационной модели сводится к решению системы уравнений механики деформируемого твёрдого тела, включающей:

- *Статические условия* – уравнения равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении;
- *Геометрические условия* – уравнения распределения деформаций бетона и арматуры по координатам сечения (уравнения совместности деформаций);
- *Физические условия* – уравнения связи между напряжениями и деформациями (уравнения состояния) материала

$$N = \sum_i \sigma_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} A_{s,j},$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{b,i} x_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} x_{s,j} A_{s,j},$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{b,i} y_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} y_{s,j} A_{s,j},$$

$$\varepsilon_{b,i} = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{r_x}\right) \cdot x_{b,i} + \left(\frac{1}{r_y}\right) \cdot y_{b,i},$$

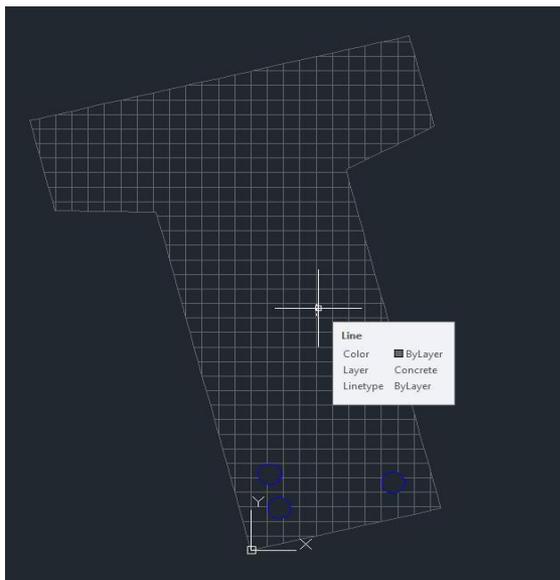
$$\varepsilon_{s,j} = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{r_x}\right) \cdot x_{s,j} + \left(\frac{1}{r_y}\right) \cdot y_{s,j},$$

$$\sigma_{b,i} = f_b(\varepsilon_{b,i}) = \varepsilon_{b,i} E_b \nu_{b,i},$$

$$\sigma_{s,j} = f_s(\varepsilon_{s,j}) = \varepsilon_{s,j} E_s \nu_{s,j},$$

В случае такого физически нелинейного и конструктивно неоднородного материала, как железобетон, задачу удобнее решать с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению.

Для этого нормальное сечение представляют в дискретной форме – в виде набора элементарных участков, в пределах которых все характеристики (напряжения, деформации и др.) принимаются постоянными. Количество и размеры таких участков определяются особенностями напряженно деформированного состояния и другими факторами.



Пример деления сечения на элементарные участки для последующего проведения расчета

Методы решения исходных уравнений деформационной модели

Метод переменных параметров упругости.

Наиболее часто применяемый способ, в котором коэффициенты упругости физически нелинейного материала последовательно уточняются в процессе решения физически нелинейных задач.

Для его реализации составляется разрешающая система уравнений, в которой неизвестными являются обобщенные перемещения. Решение имеет вид:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ 1/r_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} N \\ M_x \end{Bmatrix}.$$

Компоненты матрицы жесткости зависят от коэффициентов секущего модуля бетона и арматуры, которые в свою очередь определяются уровнем деформаций.

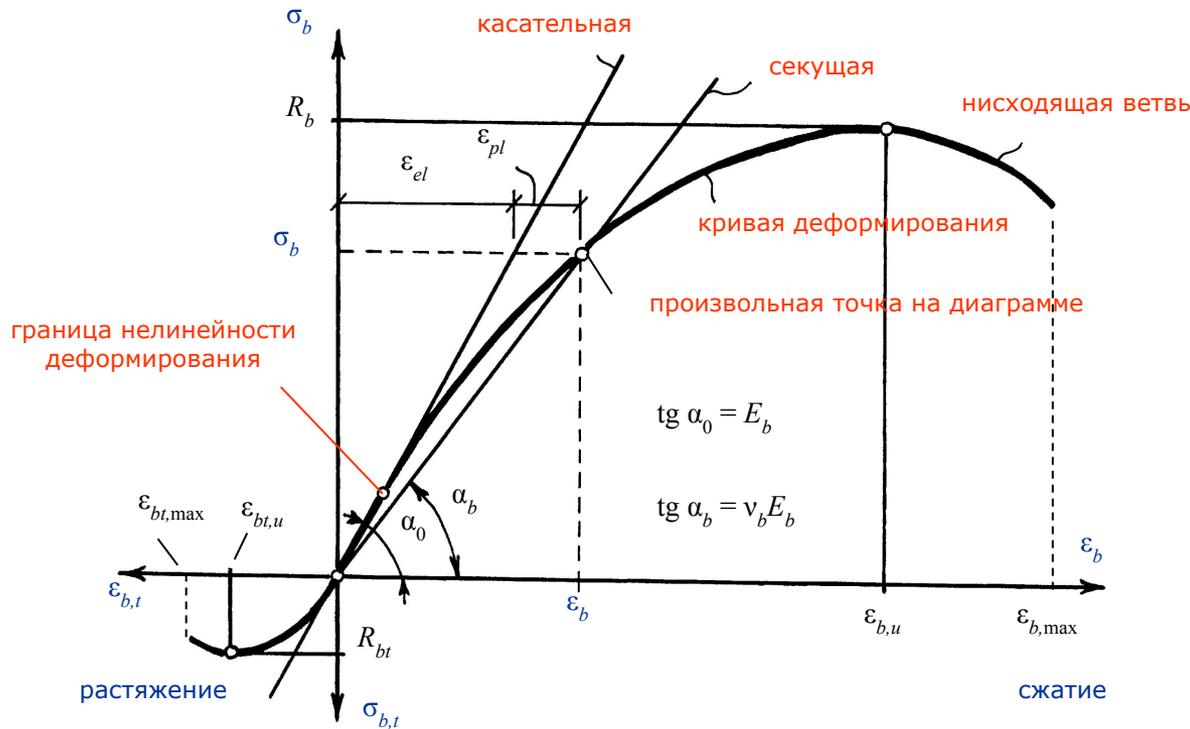
Решается методом приближений, задаваясь некоторыми значениями коэффициентов, определяя значения обобщенных деформаций, затем по гипотезе плоских сечений находят силовые деформации каждого компонента сечения, по ним вычисляют коэффициенты секущего модуля, а затем вновь проводят расчет до совпадения соответствующих деформаций двух смежных

Метод непосредственного подбора.

Для определения несущей способности и анализа состояния сечения в случаях плохой сходимости итерационного процесса более удобным оказывается метод непосредственного подбора параметров деформированного состояния.

Использование метода подбора позволяет выявить нисходящую ветвь на диаграмме «момент-кривизна», поскольку каждому заданному значению кривизны $1/r_x$ соответствует единственное значение момента M_x .

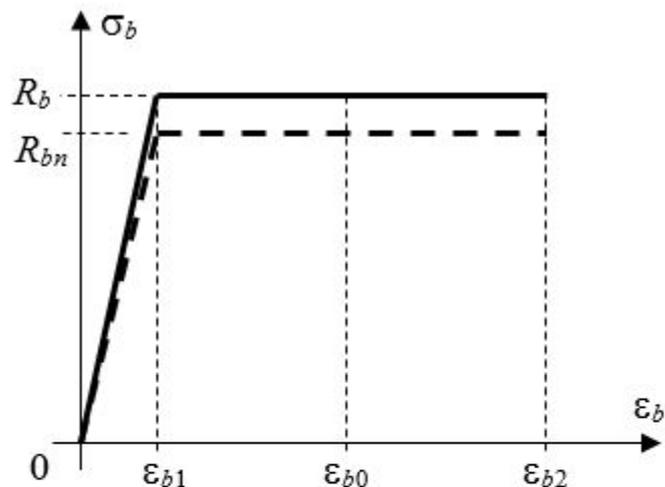
Однако и данный метод имеет свои недостатки, он сложнее алгоритмируется, что является немаловажным моментом при создании программного расчетного комплекса.



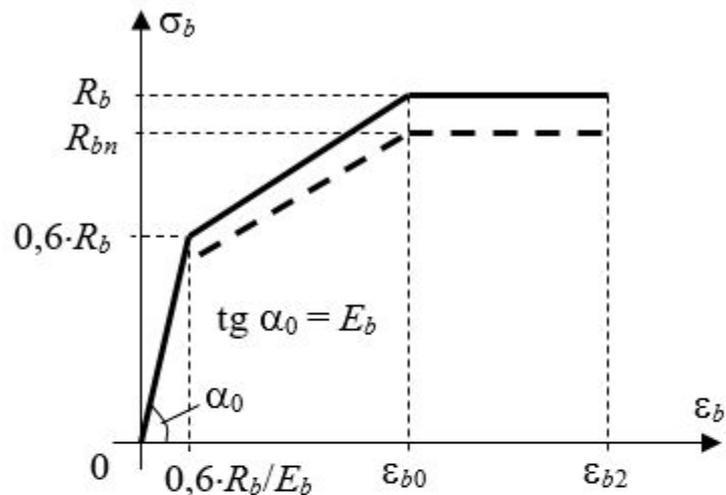
Полная диаграмма деформирования бетона

Российскими нормами допускается применять любые виды очертания диаграмм деформирования, однако СП 63.133300.2012 рекомендует к использованию двухлинейные и трехлинейные диаграммы по типу диаграмм Прандтля. В свою очередь, для расчета по несущей способности – двухлинейные, а для расчета по трещиностойкости – трехлинейные.

Двухлинейная



Трёхлинейная



Значения деформаций для тяжёлого бетона при непродолжительном действии нагрузки

Сжатие

$\varepsilon_{b0} = 0,002$ (0,2%)

$\varepsilon_{b1} = 0,0015$ (0,15%)

$\varepsilon_{b2} = 0,0035$ (0,35%) – для классов бетона не выше В60

Растяжение

$\varepsilon_{bt,0} = 0,0001$ (0,01%)

$\varepsilon_{bt,1} = 0,00008$ (0,008%)

$\varepsilon_{bt,2} = 0,00015$ (0,015%)

Созданная мною программа позволяет рассчитывать железобетонные элементы по деформационной модели, как в одной, так и в двух плоскостях.

Алгоритм выполнения расчета сводится к трем основным этапам:

Задание геометрии сечения, а также его разбиение на «элементарные» участки в программе Autodesk AutoCAD.

Импорт сечения в MS Office Excel, а также ввод таких исходных данных, как характеристики материалов, характер действия нагрузки, тип деформационных диаграмм и т.д.

Непосредственно выполнения расчета, а также, при желании, экспорт в Autodesk AutoCAD графического отображения расчетов.

Обзор созданной программы

12

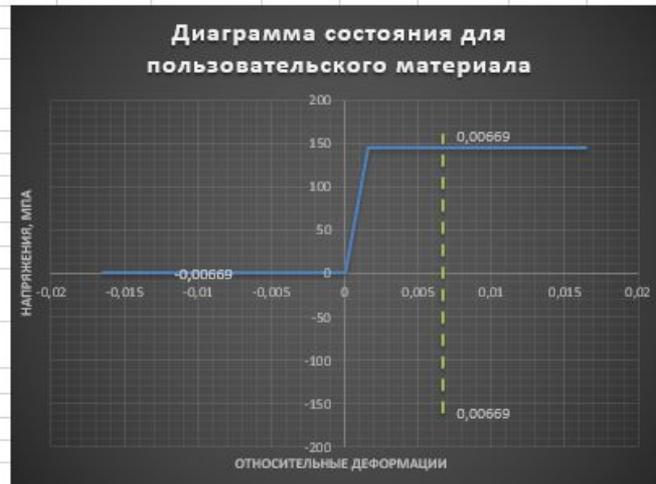
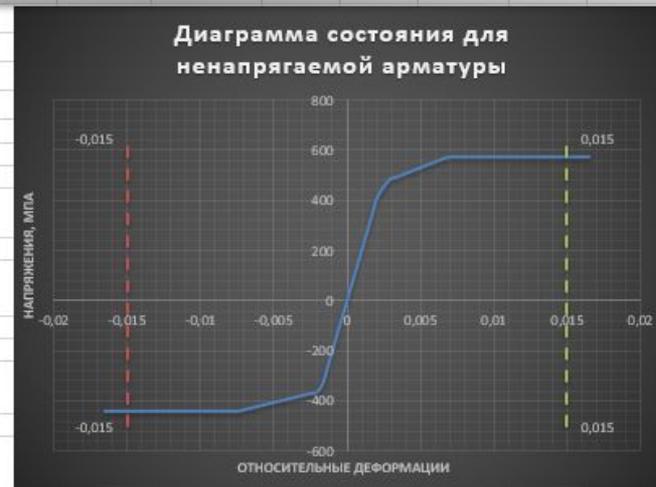
Примеры окон ввода/вывода данных

Информация о расчете					Информация о косвенном армировании						
Характеристики материалов		Расчетные			Учет косвенного армирования		Нет				
Точность расчета (% кН (кН×м))		0,10%			Класс арматуры сеток косвенного армирования		A400				
Учитывать сопротивление растяжению бетона		Нет			Расчетное сопротивление арматуры сеток косвенного армирования $R_{s,xy}$		350				
Максимальное количество итераций		750			МПа [табл. 6.13, 6.14]						
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения		Нет									
Информация о бетоне					Информация о косвенном армировании						
Класс тяжелого бетона		B40			Косвенное армирование в направлении X		число стержней n_x				
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %		40 - 75					площадь сечения стержня, A_{sx} , $см^2$				
Действие нагрузки		Непродолжительное					длина стержня сетки l_{sx} , см				
Произведение коэффициентов условий работы γ_{bi} [п. 6.1.12]		0,90			Косвенное армирование в направлении Y		число стержней n_y				
Произведение коэффициентов условий работы γ_{bti} [п. 6.1.12]		0,90					площадь сечения стержня, A_{sy} , $см^2$				
Диаграмма состояния бетона		Двухлинейная					длина стержня сетки l_{sy} , см				
Начальный модуль упругости бетона, E_b, E_{bt} , МПа [табл. 6.11]		3,60E+04			Площадь, заключенная внутри контура сеток косвенного армирования A_{ef}		3600				
Модуль деформации бетона, E_{bt}, E_{btd} , МПа [табл. 6.11]		3,60E+04			считая по их крайним стержням, $см^2$						
Расчетное сопротивление осевому сжатию R_b , МПа [табл. 6.7, 6.8]		19,8			Шаг сеток косвенного армирования s , см		10				
Расчетное сопротивление осевому растяжению R_{bt} , МПа [табл. 6.7, 6.8]		1,26			Коэффициент косвенного армирования $\mu_{s,xy}$ [(K.10)]		0,0120				
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]		Величина ϵ_{b1}		0,00033		Коэффициент α_{red} [(K.12)]		0,1312			
		Величина $\epsilon_{b1,red}$		0,00150		Коэффициент ϕ [(K.11)]		2,7687			
		Величина ϵ_{b0}		0,00200							
		Величина ϵ_{b2}		0,00350							
Растяжение [п 6.1.14]		Величина ϵ_{bt1}		0,00002		Информация о ненапрягаемой арматуре					
		Величина $\epsilon_{bt1,red}$		0,00008		Класс продольной ненапрягаемой арматуры		A600			
		Величина ϵ_{bt0}		0,00010		Произведение коэффициентов условий работы γ_{si}		1,00			
		Величина ϵ_{hp2}		0,00015		Диаграмма состояния арматуры		Трехлинейная (условный предел текучести)			
Учет продольного изгиба и случайного эксцентриситета					Расчетное сопротивление арматуры растяжению R_r , МПа [табл. 6.13, 6.14]						
Конструкция статически неопределимая		Да			Расчетное сопротивление арматуры сжатию R_{sc} , МПа [табл. 6.13, 6.14]						
Расчетная длина элемента [п. 8.1.17]		в плоскости момента M_{xy} , l_{Ox} , м		8,00		Модуль упругости арматуры, E_s , МПа [п. 6.2.12]					
		в плоскости момента M_{yy} , l_{Oy} , м		8,00		Величина ϵ_{s0} [п. 6.2.11]		0,0046			
Случайный эксцентриситет [п. 7.1.7]		в плоскости момента M_{xy} , e_{ax} , см		1,00		Величина ϵ_{s2} [п. 6.2.14, п. 6.2.15]		0,015			
		в плоскости момента M_{yy} , e_{ay} , см		1,00		Информация о напрягаемой арматуре					
Доля длительности нагрузки (отношение моментов внешних сил от действия постоянных и длительных нагрузок к моментам от действия всех нагрузок)		1,00			Класс продольной напрягаемой арматуры		A600				
							Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения γ_{sp} (растяж/сжатие)		0,9 1,1		
Информация об усилиях в сечении элемента					Диаграмма состояния арматуры						
Нагрузки		Заданные		С учетом прогиба, e , и преднапряжения		Полученные		Разница		Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь σ_{sp} , МПа	
		Нормальная сила, N, кН		-110,0		-1006,4		-1006,8		-0,05%	
Изгибающий момент M_{xx} , кНм		0,0		1,3		1,3		0,03%		Расчетное сопротивление арматуры растяжению R_r , МПа [табл. 6.13, 6.14]	
Изгибающий момент M_{yy} , кНм		-330,0		-387,0		-389,9		-0,76%		Расчетное сопротивление арматуры сжатию R_{sc} , МПа [табл. 6.13, 6.14]	
										Модуль упругости арматуры, E_s , МПа [п. 6.2.12]	
										Величина ϵ_{s0} [п. 6.2.11]	
										Величина ϵ_{s2} [п. 6.2.14, п. 6.2.15]	

Дополнительные элементы управления

	Результаты расчета													
	Визуальные	Численные												
	<table border="1"> <tr> <td>1 МПа</td> <td>=</td> <td>-15</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Множитель "столбиков" деформаций</td> <td>1,0E+05</td> </tr> </table>	1 МПа	=	-15	Множитель "столбиков" деформаций		1,0E+05	<table border="1"> <tr> <td>Размер текста для бетона и польз. мат.</td> <td>10,0</td> </tr> <tr> <td>Размер текста для арматуры и точек</td> <td>10,0</td> </tr> <tr> <td>Множитель отн. деформаций</td> <td>1,0,E+04</td> </tr> </table>	Размер текста для бетона и польз. мат.	10,0	Размер текста для арматуры и точек	10,0	Множитель отн. деформаций	1,0,E+04
1 МПа	=	-15												
Множитель "столбиков" деформаций		1,0E+05												
Размер текста для бетона и польз. мат.	10,0													
Размер текста для арматуры и точек	10,0													
Множитель отн. деформаций	1,0,E+04													
<u>Получение геометрии и расчет</u>														
Получить геометрию из AutoCAD	Отобразить сжатую зону	Отобразить напряжения в арматуре, МПа												
Выполнить расчет	Отобразить сжатые элементы с отн. деф. больше предельной	Отобразить напряжения в бетоне, МПа												
	Отобразить растянутые элементы с отн.	Отобразить напряжения в пользовательском материале, МПа												
	Отобразить "столбики" напряжений в бетоне	Отобразить напряжения в точках, МПа												
	Отобразить "столбики" напряжений в пользовательском материале	Отобразить относительные деформации в элементах												
	Отобразить "столбики" отн. деформаций	Отобразить относительные деформации в точках												
	Очистить чертеж	Отобразить усилия в арматуре, кН												
		Отобразить усилия в пользовательском материале, кН												

Диаграммы состояния материалов

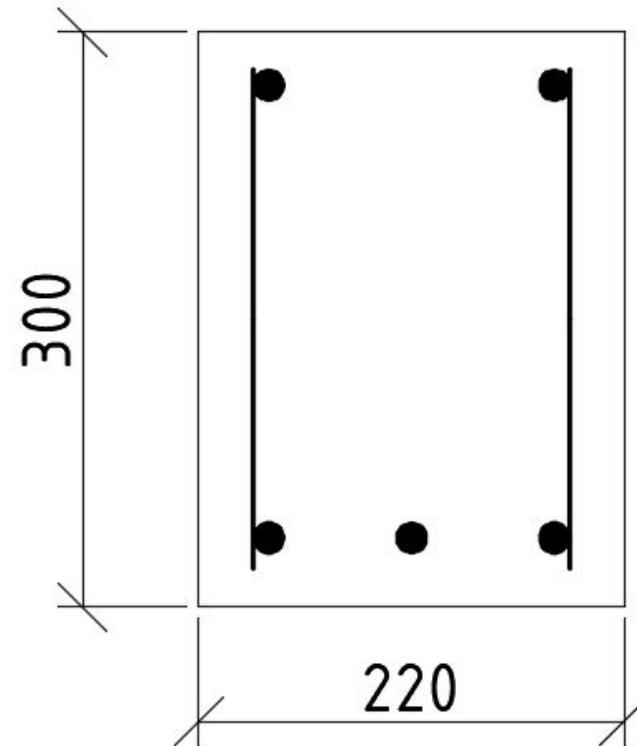
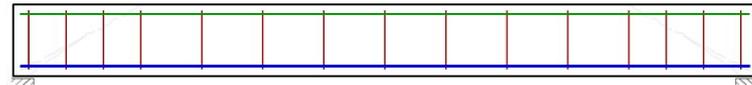


Исходные данные:

-прямоугольная балка 30x22x300

-Класс арматуры А500

-Класс бетона В25.



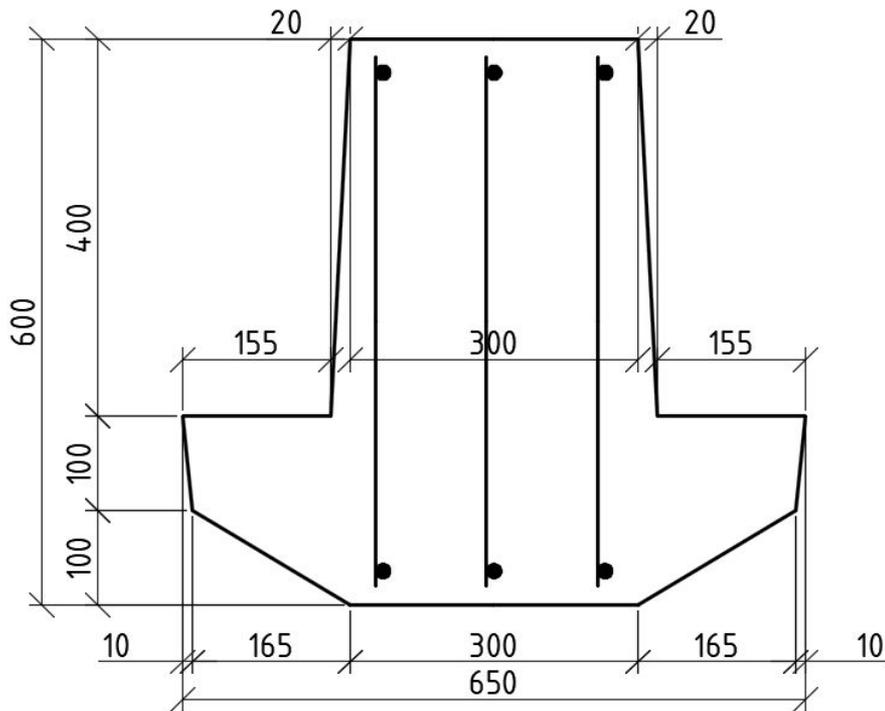
Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	35,8	35,87	36,19	36,44	36,59	37,02
На момент трещинообразования (кН*м)	21,5	21,52	21,89	22,08	22,45	22,75

Исходные данные:

-ригель таврового сечения пролет 5,1м.

-Класс арматуры А400

-Класс бетона В20.

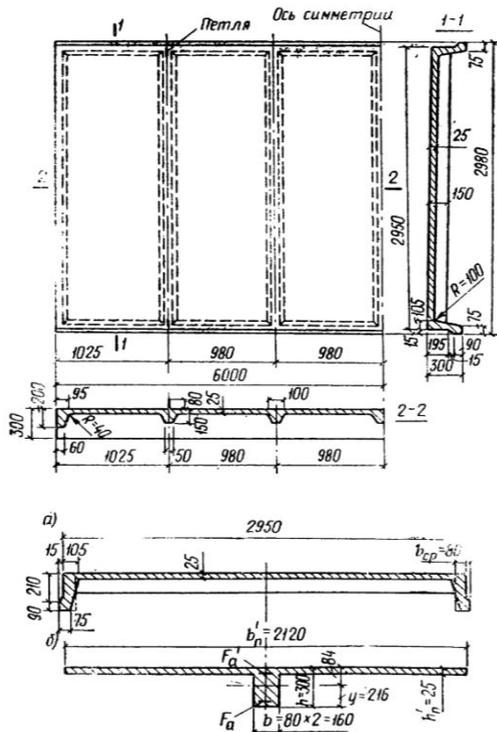


№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка $q_{н,к}$ кН/м ²	γ_f	Расчетная нагрузка q кН/м ²
I	Постоянная нагрузка			
1	Железобетонные плиты	18,0	1,1	19,8
2	Пол и перегородки	15,0	1,1	16,5
3	Собственный вес ригеля	5,0	1,1	6,6
	Итого	38,0	-	42,9
II	Временная нагрузка			
1	Кратковременная	66,69	1,2	80,03
2	Длительная	35,75	1,2	42,9
	Всего	102,44	-	122,93

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограниченным из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	211,32	212,02	215,20	216,47	219,23	220,93
На момент трещинообразования (кН*м)	124,81	124,92	127,54	128,92	131,42	136,04

Исходные данные:

- ребристая панель 3х6 м.
- Класс напрягаемой арматуры А800
- Класс бетона В30.

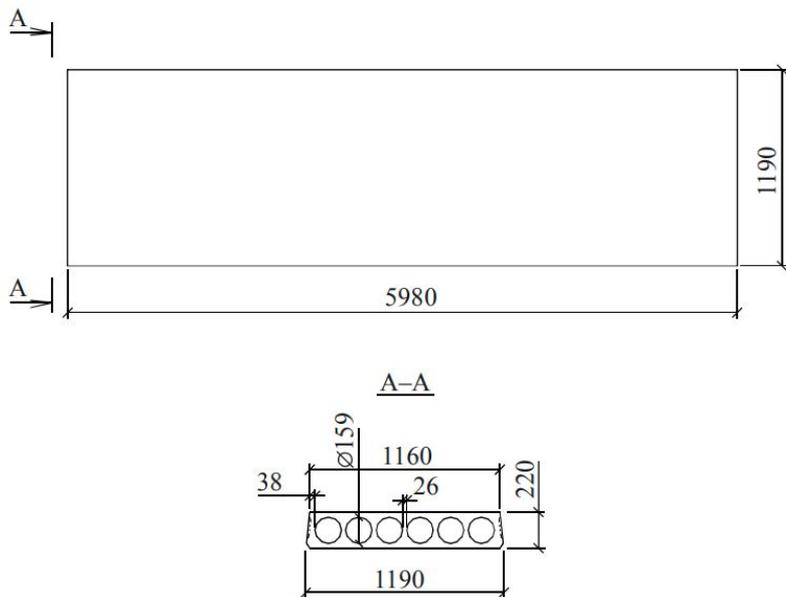


№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка q_n , кН/м ²	γ_f	Расчетная нагрузка q , кН/м ²
I	Постоянная нагрузка			
1	Трехслойный рубероид	0,15	1,2	0,18
2	Цементная стяжка	0,4	1,3	0,52
3	Утеплитель	0,6	1,2	0,72
4	Пароизоляция	0,1	1,2	0,12
5	Ребристые панели	1,35	1,1	1,485
	Итого	2,6	-	3,025
II	Временная нагрузка			
1	Кратковременная	0,3	1,4	0,42
2	Длительная	0,7	1,4	0,98
	Всего	3,6	-	4,425

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограниченным из СП 63.13330.201 2	По			Без ограничений
			+10%	+20%	+50%	
По нормальному сечению (кН*м)	62,04	62,09	62,59	63,27	63,58	63,64
На момент трещинообразования (кН*м)	37,6	37,63	38,31	38,65	38,95	39,44

Исходные данные:

- Размеры плиты 1,2х6 м.
- Класс напрягаемой арматуры А600
- Класс бетона В15.

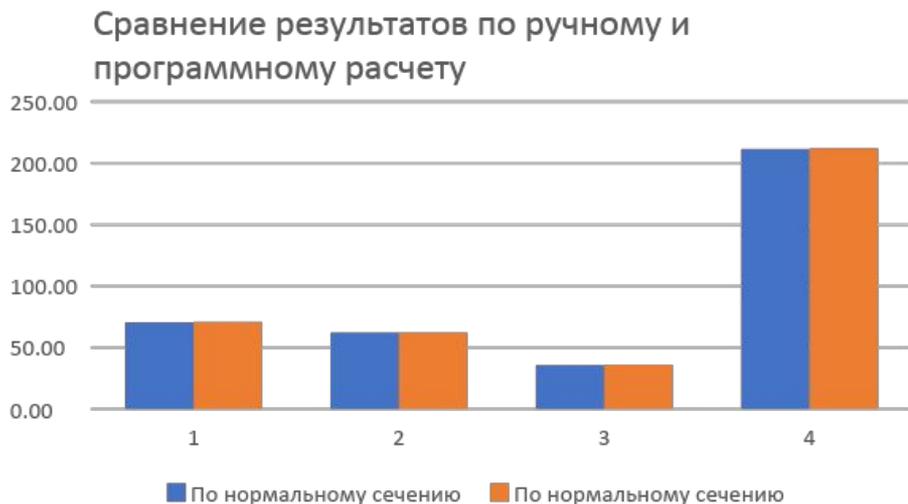


№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка q_n , кН/м ²	γ_f	Нормативная нагрузка q , кН/м ²
I	Постоянная нагрузка			
1	Трехслойный рубероид	0,15	-	0,711
2	Цементная стяжка	3	1,1	3,3
	Итого	3,578	-	4,011
II	Временная нагрузка	8	1,2	9,6
1	Кратковременная	2,667	1,2	3,2
2	Длительная	5,333	1,2	6,4
	Всего	11,578	-	13,611

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.201 2	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	70,60	70,71	71,49	71,91	72,34	73,18
На момент трещинообразования (кН*м)	41,45	41,43	42,05	42,47	43,08	43,67

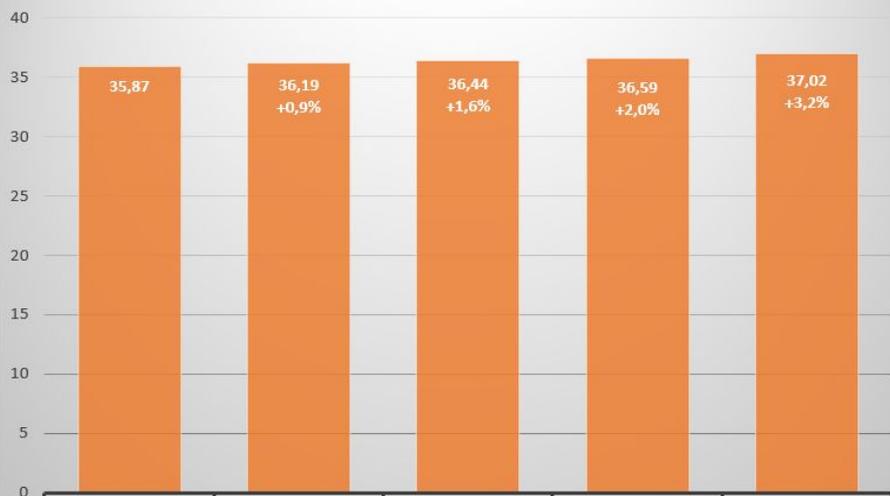
Проведенные расчеты показали, что разница в результатах, полученных при ручном расчете и расчете по деформационной модели с использованием программы по ограничениям диаграмм из СП 63.13330.2012, совершенно не значительна и не составляет более 0,33%.

Номер расчета	По нормальному сечению		На момент трещинообразования	
	ручной расчет	расчет по программе	ручной расчет	расчет по программе
1	70,60	70,71	41,45	41,43
2	62,04	62,09	37,60	37,63
3	35,80	35,87	21,50	21,52
4	211,32	212,02	124,81	124,92



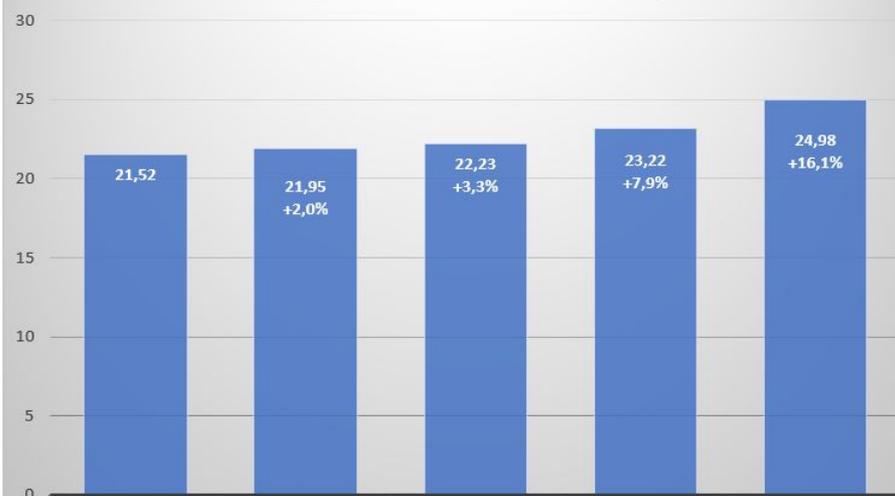
Наименование расчёта	По ограничениям из СП 63.13330.2 012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	35,87	36,19 (+0,9%)	36,44 (+1,6%)	36,59 (+2,0%)	37,02 (+3,2%)
На момент трещинообразования	21,52	21,95	22,23	23,22	24,98

По нормальному сечению (кН*м)



ПО ОГРАНИЧЕНИЯМ ИЗ СП 63.13330.2012 10% 20% 50% БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ

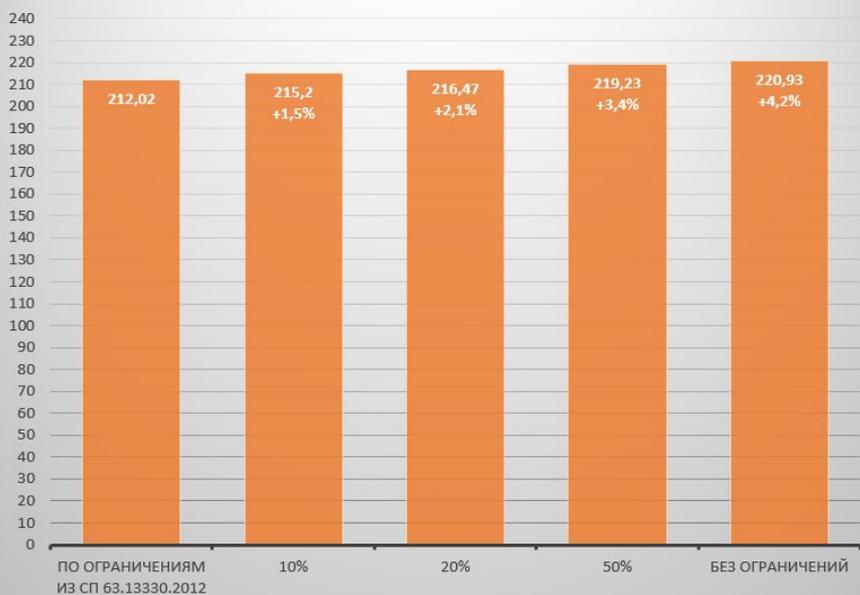
На момент трещинообразования (кН*м)



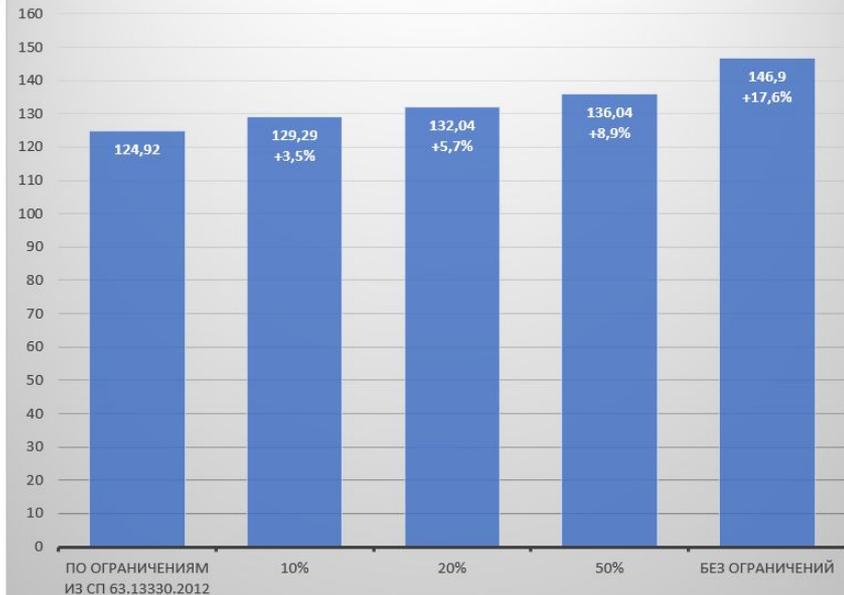
ПО ОГРАНИЧЕНИЯМ ИЗ СП 63.13330.2012 10% 20% 50% БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	212,02	215,20 (+1,5%)	216,47 (+2,1%)	219,23 (+3,4%)	220,93 (+4,2%)
На момент трещинообразования	124,92	129,29 (+3,5%)	132,04 (+5,7%)	136,04 (+8,9%)	146,9 (+17,6%)

По нормальному сечению (кН*м)



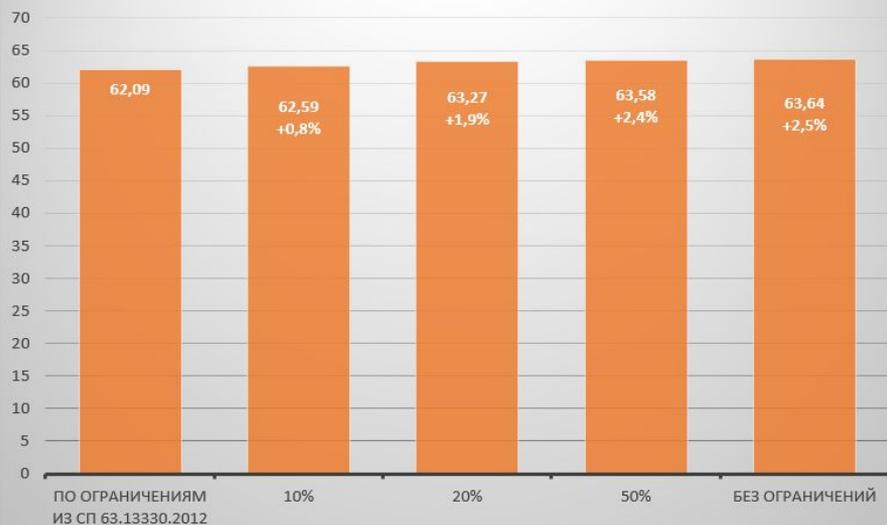
На момент трещинообразования (кН*м)



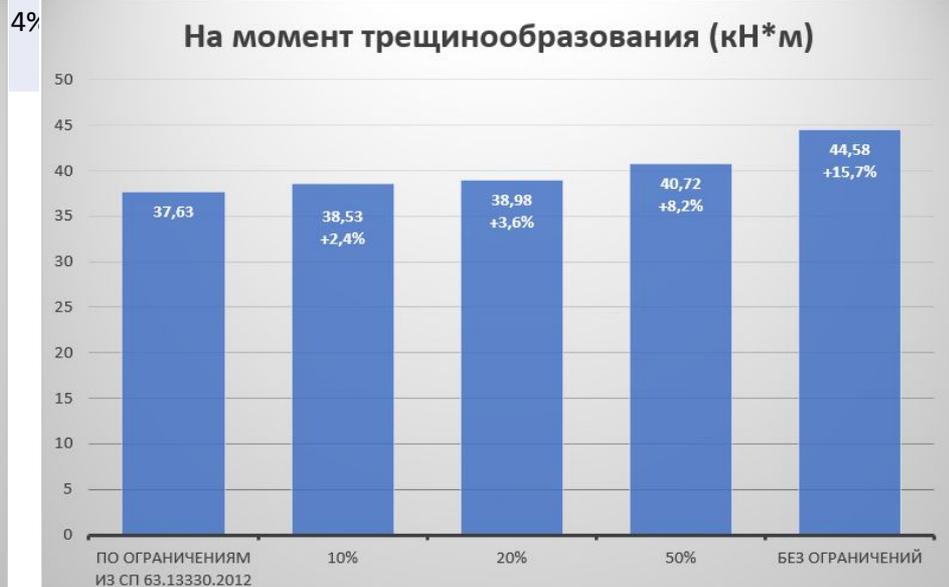
Расчёт железобетонной ребристой плиты

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2 012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	62,09	62,59 (+0,8%)	63,27 (+1,9%)	63,58 (+2,4%)	63,64 (+2,5%)
На момент трещинообра	37,63	38,53	38,98	40,72	44,58

По нормальному сечению (кН*м)

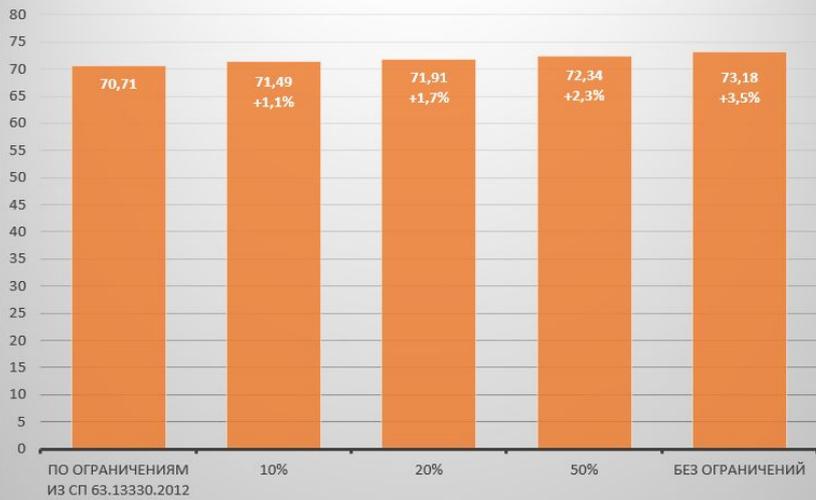


На момент трещинообразования (кН*м)

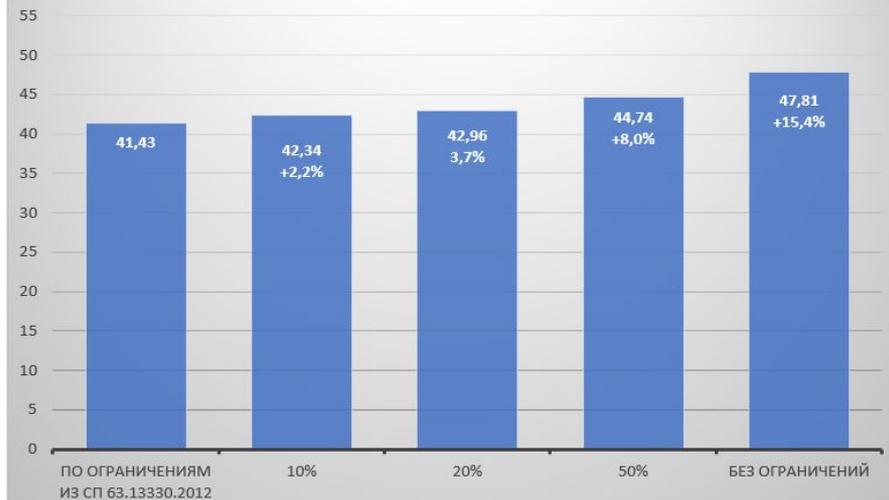


Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	10%	20%	50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	70,71	71,49	71,91	72,34	73,18
		(+1,1%)	(+1,7%)	(+2,3%)	(+3,5%)
На момент трещинообразования (кН*м)	41,43	42,34	42,96	44,74	47,81
		(+2,2%)	(+3,7%)	(+8,0%)	(+15,4%)

По нормальному сечению (кН*м)



На момент трещинообразования (кН*м)



Анализ полученных результатов показал, что при расчете по нормальному сечению средняя разница при полном снятии ограничений с диаграммы деформирования составила 3,35%, а максимальная разница достигала 4,2%. При расчете же на момент трещиностойкости средняя разница при полном снятии ограничений с диаграммы деформирования составила 16,2%, а максимальная разница достигала 17,6%.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что изменение ограничений границ диаграмм деформирования при расчете железобетонных конструкций влечет за собой получение результатов несущей способности и трещиностойкости, отличающихся от результатов ручного расчета и расчета по ограничениям из СП 63.13330.2012, причем результаты расчета по трещиностойкости достигают значительных различий.

**Доклад окончен.
Спасибо за внимание.**