

Оценка влияния выбора диаграммы деформирования бетона на результаты расчёта железобетонной фермы

Н.А. Грищенко, К.А. Цветков

*Национальный исследовательский университет Московский государственный
строительный университет*

Аннотация: В работе рассмотрены результаты исследования применения различных видов аппроксимаций диаграмм деформирования бетона на примере расчёта большепролётной железобетонной фермы длиной 18 м. Были выполнены расчёты с учётом физической нелинейности бетона и арматуры. При этом были использованы следующие диаграммы деформирования бетона: билинейная, трехлинейная и криволинейная с нисходящей ветвью. Результатом расчёта стали усилия в стержнях фермы, перемещения и ширина раскрытия трещин. Были сделаны выводы о влиянии выбора диаграммы деформирования бетона на результаты расчёта.

Ключевые слова: бетон, диаграмма деформирования, аппроксимация, физическая нелинейность, напряжённо-деформированное состояние, продольная сила, изгибающий момент, перемещение, трещиностойкость, ферма.

Состояние вопроса.

Вопросу изучения диаграмм деформирования бетона посвящено большое число исследований. В качестве ключевых в этой области можно отметить труды Гвоздева А. А., Карпенко, Н.И., Холмянского М. М. [1-3]. Из современных исследований отметим работу Ерышева В.А. и Латышева Е.В. [4], а также Марковича А.С. [5] и Кургина К.В. с Маиляном Д.Р. [6], которые анализируют особенности применения диаграмм деформирования для нелинейных расчётов строительных конструкций, в том числе и с применением численных методов. Отмечаем определённый интерес к рассматриваемой проблеме и в иностранной литературе, например, в [7,8].

Как известно, для построения диаграммы состояния бетона проводят испытания стандартных образцов (кубов, призм, цилиндров), при этом получают криволинейную диаграмму. Различные формы аппроксимации такой диаграммы используют для расчётов бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений. Основной метод аппроксимации, применяемый в отечественных нормах проектирования (СП 63.13330.2018

«СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения») – кусочно-линейный, в то время как в странах Европейского союза нашёл применение метод кривых (EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings).

Цели исследования. Методы.

Определить влияние вида диаграммы деформирования бетона при численных расчётах, применительно к расчёту железобетонной конструкции. В качестве такой конструкции была выбрана большепролетная железобетонная ферма длиной 18 м, загруженная по верхнему поясу узловой нагрузкой. Примеры тестирования различных форм аппроксимации диаграммы деформирования бетона для конкретных конструкций встречаем в [9,10].

Исследования проводились с использованием программного комплекса «Лира-САПР 2018». На данный момент в библиотеке указанного комплекса предложено несколько законов состояния материалов, они показаны на рис.1.

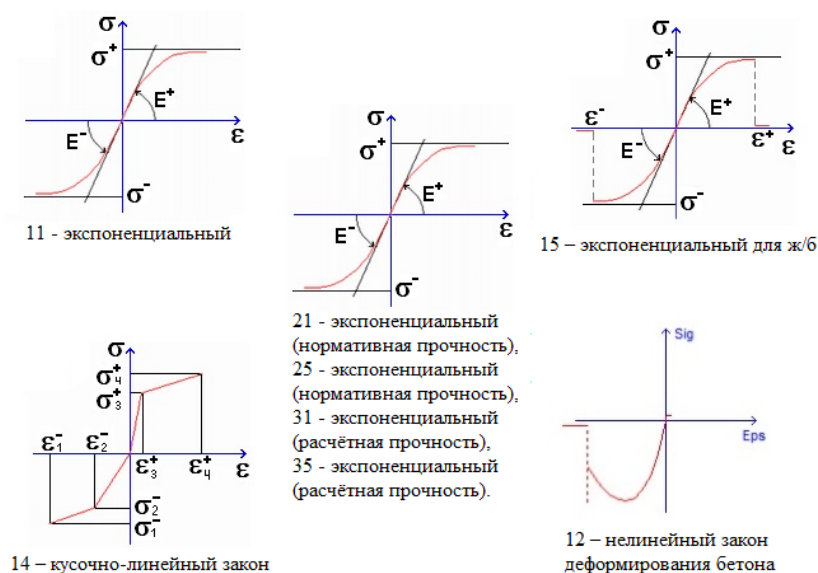


Рис.1. – Фрагмент из библиотеки «ЛИРА-САПР 2018»: законы деформирования материалов

Решение задачи вели шаговым методом, заключающимся в пошаговом нагружении схемы, и в решении системы уравнений на каждом этапе при заданном приращении узловых нагрузок. На каждом из шагов производилась оценка напряженно-деформированного состояния. Такой подход позволил произвести мониторинг образования и развития трещин, роста перемещений, а также оценить максимальную нагрузку, воспринимаемую конструкцией и её элементами.

Постановка задачи.

В ходе подбора сечения стержневым элементам схемы был назначен универсальный пространственный стержневой КЭ 10, в дальнейшем был принят физически и геометрически нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ 410.

Характеристики сечений (приведены в таблице № 2) приняты согласно марке фермы 3ФС24, которая показана на рис.2. Расчётная схема приведена на рис.3. Подбор сечений и армирование было произведено по СП 63.13330.2018.

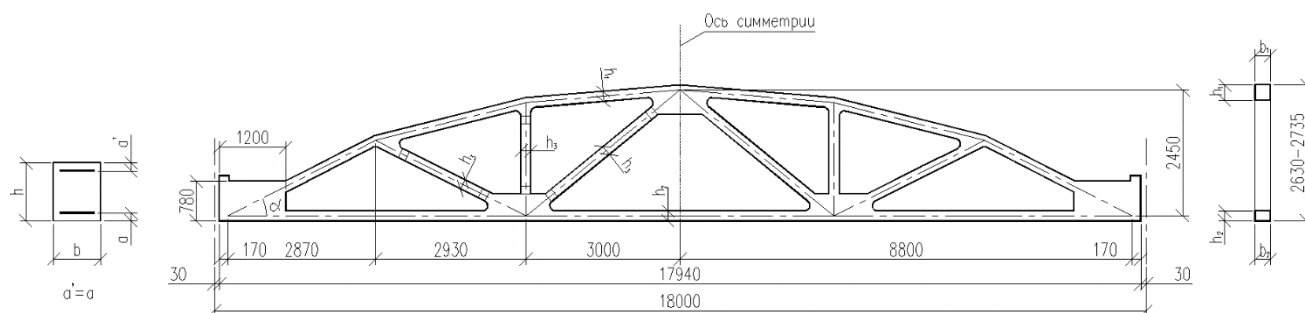


Рис.2. – Ферма 3ФС18

Таблица №1

Типоразмеры и расчетные параметры 3ФС18

Марка фермы по серии ПК-01-129/78	Размеры сечений, мм									$\alpha, ^\circ$
	Верхний пояс			Нижний пояс			Стойки, раскосы			
	b_1	h_1	a	b_2	h_2	a	b_3	h_3	a	
3ФС18	250	250	40	250	300	50	150	150	35	25.5

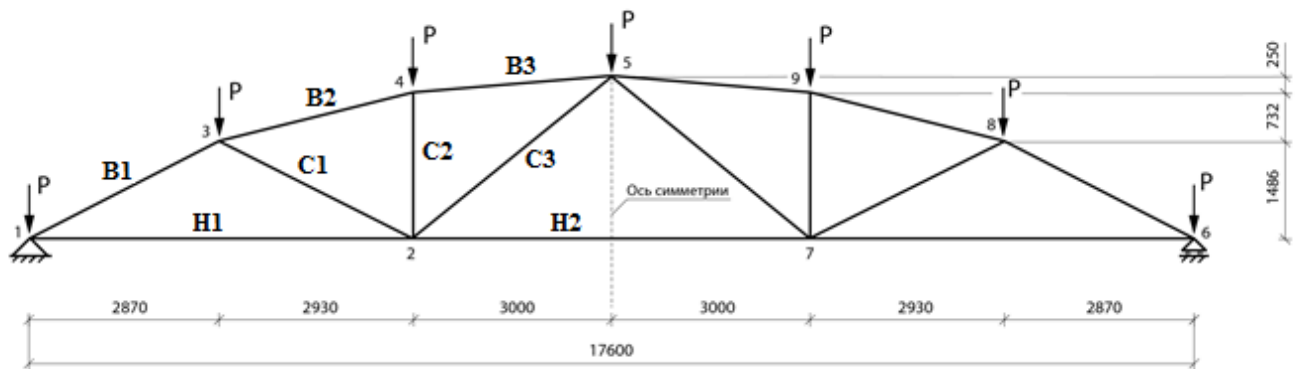


Рис.3. – Расчётная схема фермы

После определения основных показателей фермы были произведены ее расчёты в нелинейной постановке, для чего ферма была загружена узловой нагрузкой 160 кН. Определялись усилия, перемещения, ширина раскрытия трещин для трех типов диаграмм бетона: билинейной, трёхлинейной и криволинейной с ниспадающей ветвью. Затем результаты определения указанных величин сравнивались и анализировались.

Результаты расчёта с использованием билинейной диаграммы.

Результаты расчёта приведены на рис. 4-7.

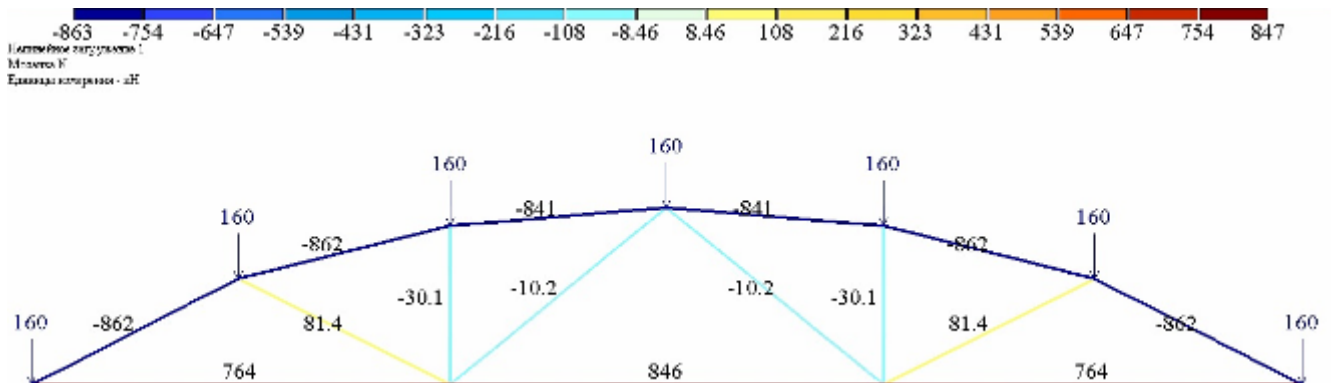


Рис. 4. – Мозаика продольных усилий N , кН.

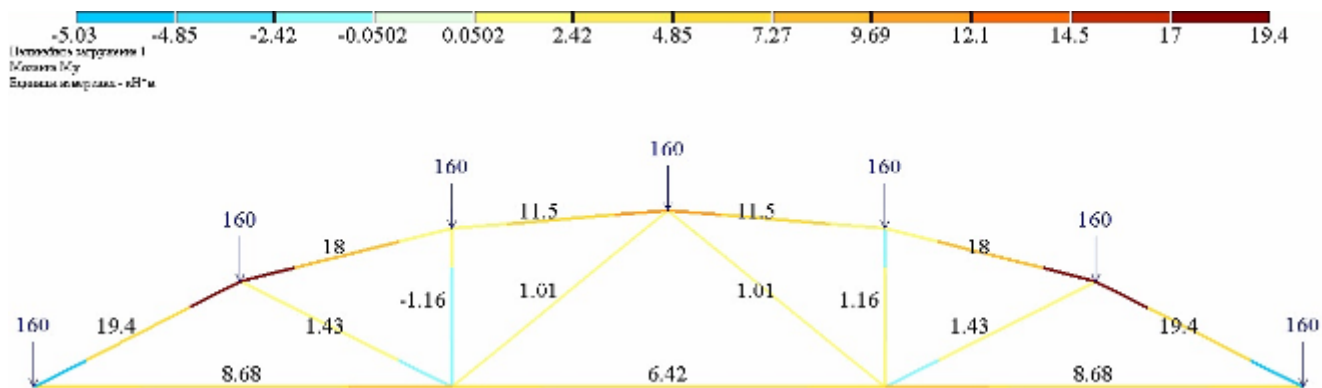


Рис.5. – Мозаика изгибающих моментов M_y , $кН·м$

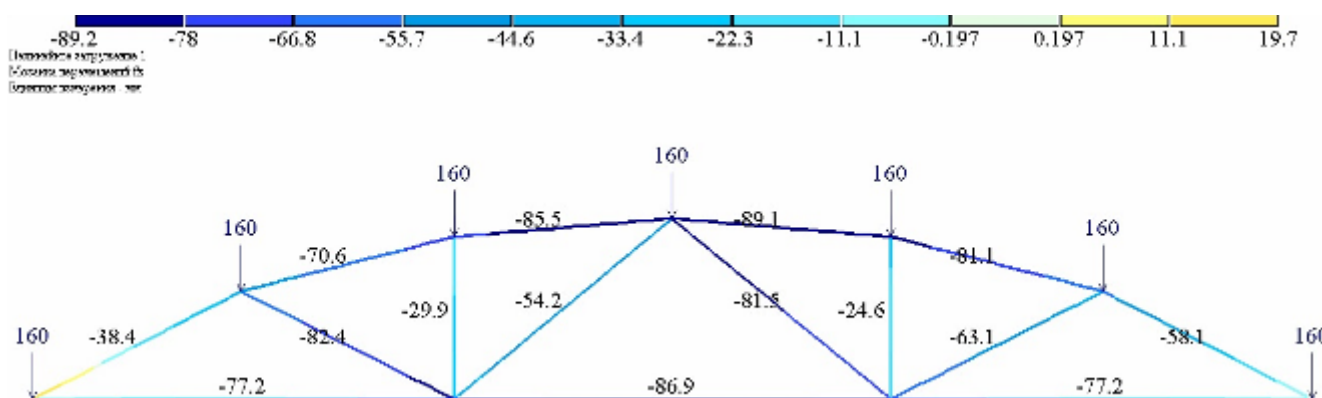


Рис.6. – Мозаика перемещений f_z , $мм$

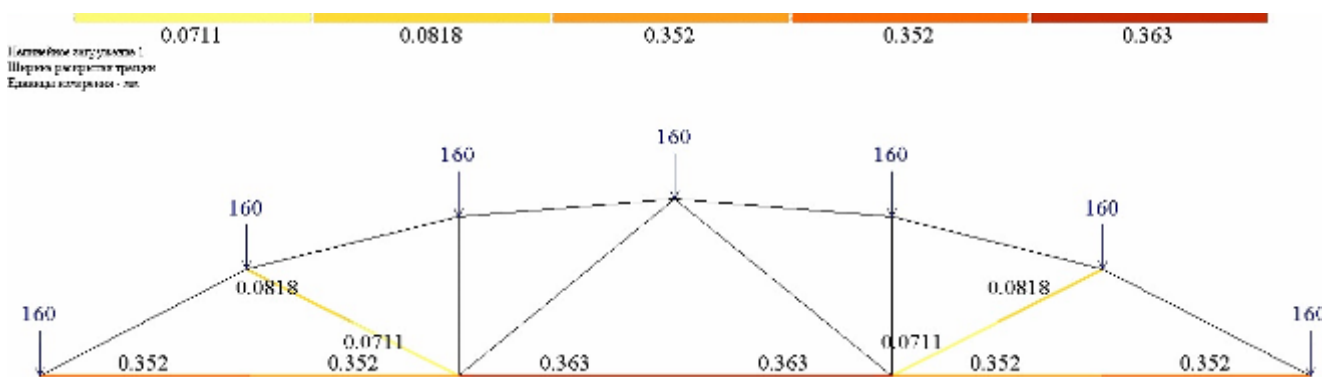


Рис.7. – Ширина раскрытия трещин a_{cr} , $мм$

Результаты расчёта с использованием трехлинейной диаграммы.

Результаты расчёта приведены на рис. 8 - 11

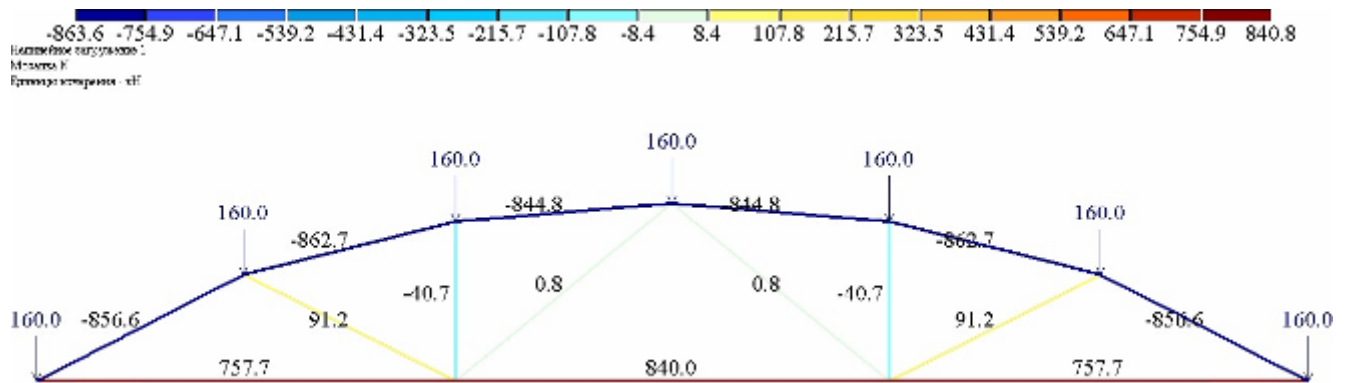


Рис. 8. – Мозаика продольных усилий N , кН.

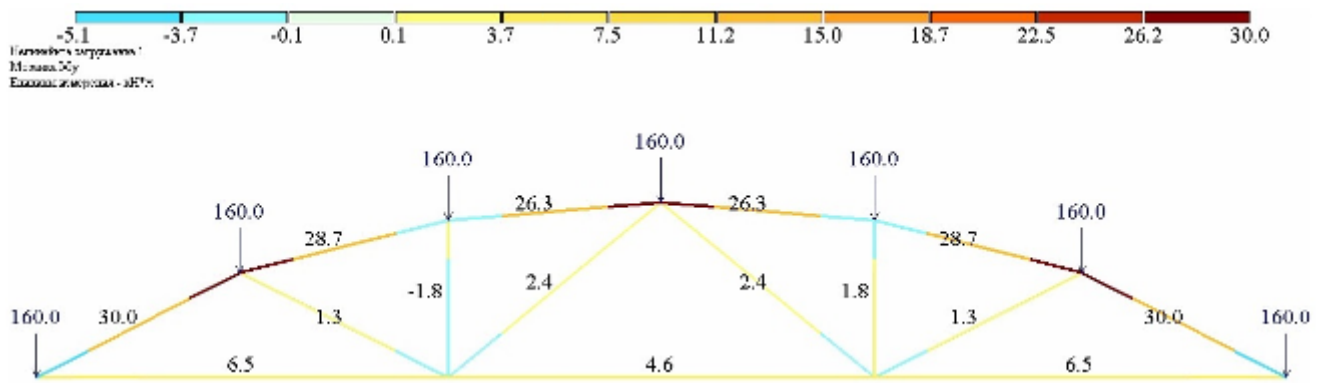


Рис.9. – Мозаика изгибающих моментов M_y , кН·м

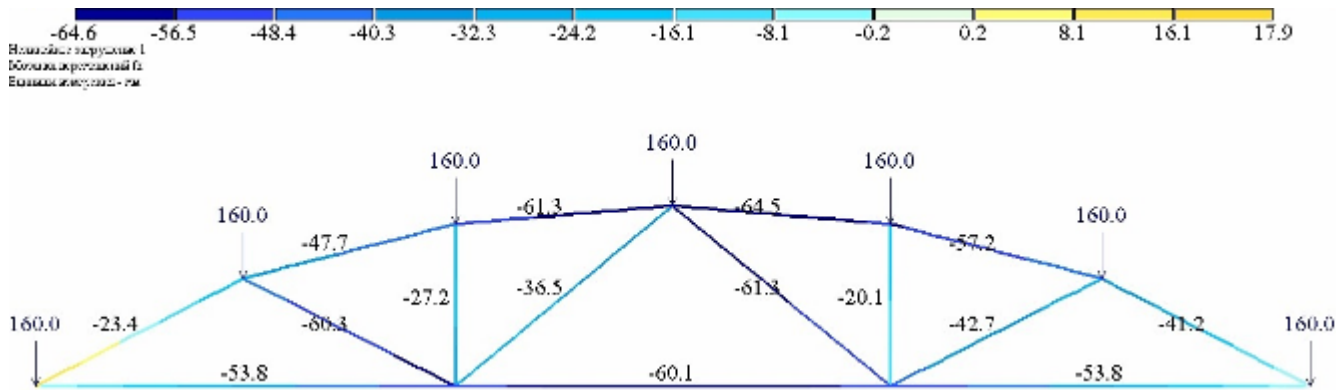


Рис.10. – Мозаика перемещений f_z , мм

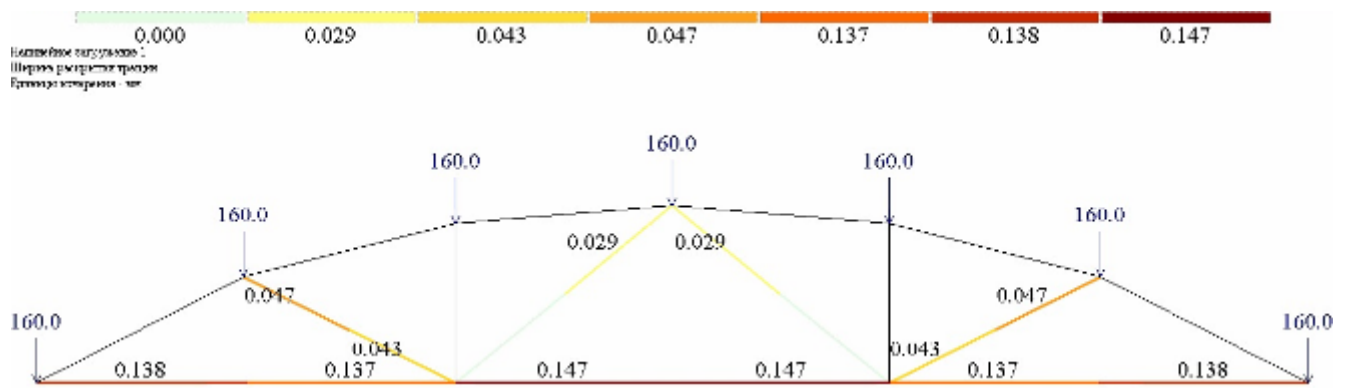


Рис.11. – Ширина раскрытия трещин a_{crs} , мм

Результаты расчёта с использованием криволинейной диаграммы с ниспадающей ветвью

Результаты представлены на рис.12-16.

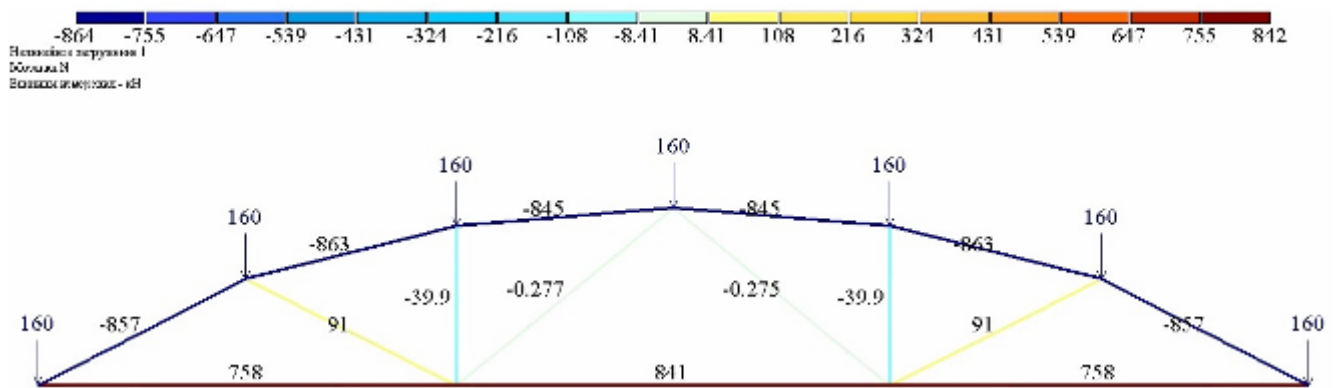


Рис. 12. – Мозаика продольных усилий N , кН.

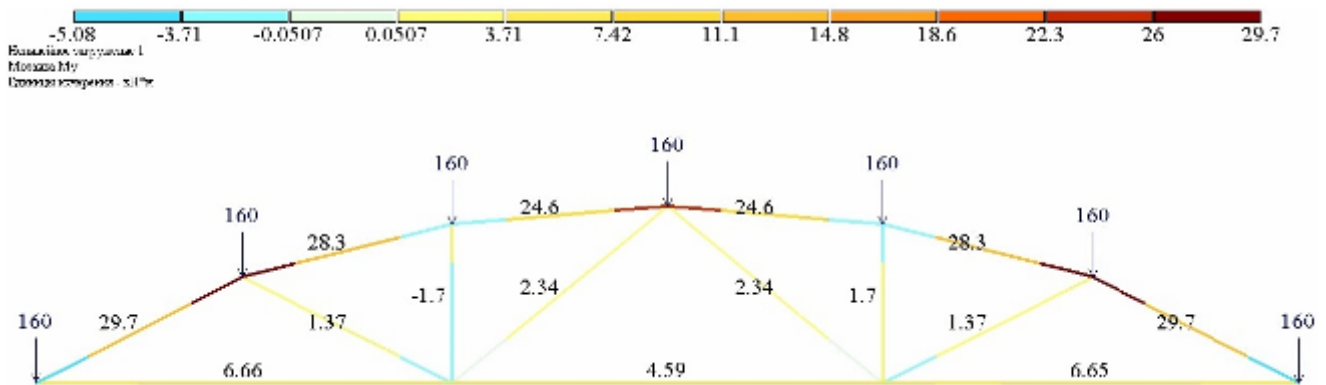


Рис.13. – Мозаика изгибающих моментов M_y , кНм

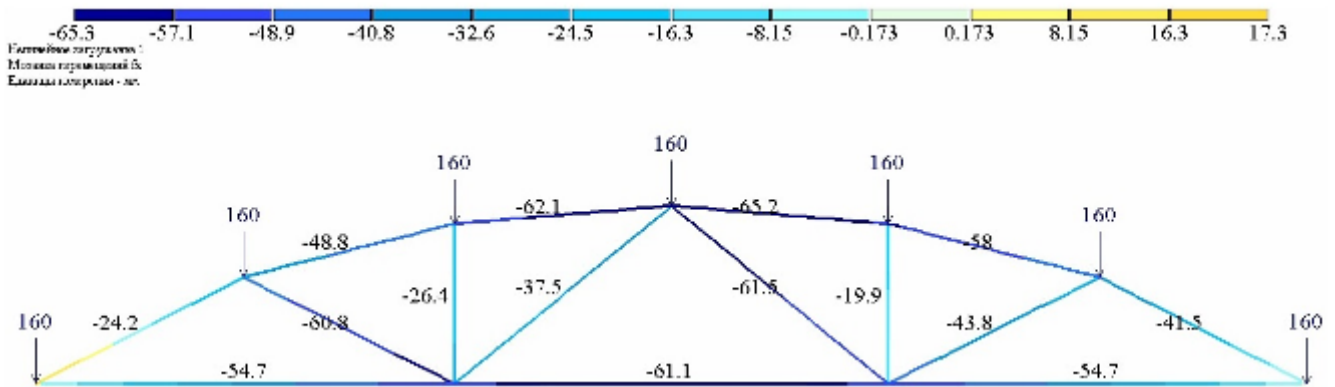


Рис.14. – Мозаика перемещений f_z , мм

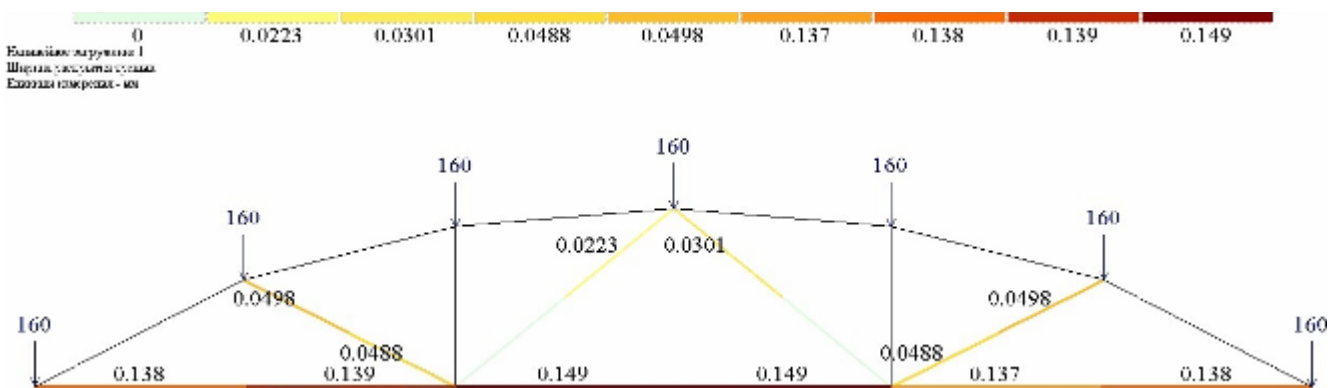


Рис.15. – Ширина раскрытия трещин a_{crc} , мм

Анализ результатов численного эксперимента.

В качестве основных параметров, по которым будет проводиться сравнительный анализ, выбраны: $f_{z,n}$ – максимальное значение прогиба нижнего пояса, a_{crc} – ширина раскрытия трещин и M_y – значение изгибающего момента в центре нижнего пояса фермы, соответствующее возникшим прогибу и трещинам от действующей расчётной нагрузки $P = 160$ кН.

Сравнение вышеуказанных параметров, полученных по трём деформационным моделям, представлено в таблице №2.

Таблица №2

Сравнение параметров a_{crc} , $f_{z,n}$, M_y в результатах расчётов с использованием различных форм аппроксимации диаграммы деформирования бетона

Вид диаграммы деформирования бетона	a_{crc} , мм		$f_{z,n}$, мм		M_y , кН·м	
	Значения	Сравнение	Значения	Сравнение	Значения	Сравнение
Криволинейная	0,149	–	61,1	–	4,6	–
3-х Линейная	0,147	–1%	60,1	–1,6%	4,6	0%
Билинейная	0,363	+144%	86,9	+42%	6,4	39%

Выводы по результатам исследования.

Расчет железобетонной фермы методом конечных элементов и сравнение полученных результатов по модели отечественных норм и норм Еврокод 2 позволили сделать следующие выводы:

1. Возникающие прогибы по моделям с трёхлинейной и криволинейной диаграмм имеют минимальное расхождение, но в значительной мере отличаются (42%) в меньшую сторону относительно билинейной.

2. Значения изгибающих моментов от расчётной нагрузки по трёхлинейной и криволинейной диаграммам также имеют минимальное расхождение относительно друг друга, но, как и прогибы, имеют значительные отличия от модели с билинейной (39%)

Проведенное исследование показало, что в рамках статической нагрузки использование билинейной диаграммы по отечественным нормам обеспечивает наименьшую надёжность по первой группе предельных состояний, а наибольшую – использование криволинейной. Тем не менее, трёхлинейная диаграмма обеспечивает практически такую же степень

надёжности, как и криволинейная. Малая разница в полученных результатах от трёх- и криволинейной диаграмм объясняется тем, что трёхлинейная аппроксимация является более близкой к криволинейной, чем билинейная.

В случае со второй группой предельных состояний максимальные прогибы и раскрытие трещин характерны именно для билинейной диаграммы, что при проектировании оказывает влияние на увеличение процента армирования. С одной стороны, это вызывает большие экономические затраты, с другой – обеспечивает большую надёжность. Таким образом, использование в расчётах криволинейной диаграммы по сравнению с билинейной, оказывается наиболее оправданным для обеспечения оптимальной материалоемкости конструкции. Если же выбирать из вариантов, предлагаемых отечественными нормами, то по этому показателю наиболее близка к криволинейной - трёхлинейная диаграмма.

Литература

1. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. - М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
2. Гвоздев А. А., Дмитриев С. А., Гуца Ю. П., Залесов А. С., Мулин М. Н., Чистяков Е. А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. - М., Стройиздат, 1978. - 204 с.
3. Холмянский М. М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. - М.: Стройиздат, 1978. - 559 с.
4. Ерышев В. А., Латышев Д. И., Тошин Д. С. Методика расчета деформаций изгибаемого железобетонного элемента при разгрузке // Известия Орловского Государственного технического университета. 2009. №2.С. 6-13.
5. Маркович А. С., Абу Махади М. И., Милосердова Д.А., Акифьева К. С. Проблема численного анализа жесткости изгибаемых железобетонных

- элементов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2018. Т. 14. -№ 3. С. 233 – 241.
6. Кургин К.В., Маилян Д.Р. О необходимости трансформации базовой аналитической зависимости " $\sigma_b - \epsilon_b$ " бетона // Инженерный вестник Дона, 2011, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/712
7. Asai M., Terada K., Ikeda K. Meso-scopic concrete analysis with a lattice model // Fracture Mechanics of Concrete Structures, 2001. С. 757 – 764.
8. Akroyd T. Concrete properties and manufacture / T. N. W. Akroyd- Oxford: Pergamon press INC, 1962. - 326с.
9. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818
10. Маилян Д.Р. Расчет преднапряженных гибких железобетонных колонн по деформированной схеме // Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона, вып. 8. – Ростов-на-Дону,1980. – С.32-35.

References

1. Karpenko N. I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona. [General models of reinforced concrete mechanics]. M.: Stroyizdat, 1996. 416p.
 2. Gvozdev A. A., Dmitriyev S. A., Gushcha YU. P., Zalesov A. S., Mulin M. N., Chistyakov Ye. A. Novoye v proyektirovanii betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [New in the design of concrete and reinforced concrete structures]. M., Stroyizdat, 1978. 204 p.
 3. Kholmyanskiy M. M. Beton i zhelezobeton. Deformativnost' i prochnost' [Concrete and reinforced concrete. Deformability and strength]. M.: Stroyizdat, 1978. 559 p.
 4. Yeryshev V. A., Latyshev D. I., Toshin D. S. Izvestiya Orlovskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. №2. pp. 6-13.
-



5. Markovich A. S. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2018. T. 14. № 3. pp. 233 – 241.
6. Kurgin K. V., Mailyan D. R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/712/
7. Asai M., Terada K., Ikeda K. Fracture Mechanics of Concrete Structures, 2001. pp. 757 – 764.
8. Akroyd T. Concrete properties and manufacture T. N. W. Akroyd-Oxford: Pergamon press INC, 1962. 326 p.
9. Mkrtchyan A.M., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1818.
10. Mailyan D.R. Voprosy prochnosti, deformativnosti i treshchinostoykosti, vyp. 8. Rostov-na-Donu, 1980. pp.32-35.