

Мальгин М.Г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ БАЛОЧНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

**Анотація.** У статті представлені результати розрахунків сталезалізобетонної прогонової будови автодорожнього моста, використовуючи різні скінченно-елементні моделі. Проведено аналіз результатів розрахунків і виявлені переваги і недоліки кожної з моделей. Запропоновано нову скінченно-елементну модель, що дозволяє повною мірою оцінити напружено-деформований стан даної конструкції і при цьому є ефективніше існуючих.

**Ключові слова:** метод скінченних елементів; скінченно-елементна модель; прогонові будови мостів; напружено-деформований стан.

**Аннотация.** В статье представлены результаты расчетов сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста, используя различные конечно-элементные модели. Проведен анализ результатов расчетов и выявлены преимущества и недостатки каждой из моделей. Предложена новая конечно-элементная модель, позволяющая в полной мере оценить напряженно-деформированное состояние данной конструкции и при этом является эффективней существующих.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов; конечно-элементная модель; пролетные строения мостов; напряженно-деформированное состояние.

**Annotation.** The present paper concentrates on the analyzing of plate-girder bridges using finite element method. The results of calculations of the steel-concrete composite girder bridge using different finite element models are performed. Aspects of finite element models are discussed. The new finite element model that allows carrying on more accurate calculations with smaller expenses of time is offered.

**Keywords:** finite element method; finite element model; plate-girder bridges; mode of deformation.

## Вступление

Балочные пролетные строения являются наиболее распространенными как в отечественном, так и в зарубежном мостостроении. В автодорожных мостах получили широкое распространение разрезные и неразрезные сталежелезобетонные пролетные строения. В поперечном сечении такого типа пролетного строения может располагаться различное количество балок, которые совместно с плитой проезжей части работают как сложные пространственные системы.

Аналитический опыт расчета и проектирования таких пролетных строений заключается в определении усилий в каждой балке от временной нагрузки с помощью КПУ (коэффициент поперечной установки) и на данный момент на фоне современных вычислительных методов (метод конечных элементов и др.) является менее эффективным.

При расчете подобных конструкций с помощью современных вычислительных комплексов, которые базируются на методе конечных элементов, в основном используют такие элементы как стержень и оболочка. Можно выделить следующие виды конечно-элементных моделей сталежелезобетонного пролетного строения:

- модель конструкции аппроксимируется стержневыми элементами, в виде балочной клетки, при этом продольные стержни имеют жесткость сталежелезобетонного сечения с эффективной шириной полки, а поперечные соответственно жесткость плиты проезжей части (рис. 1а.);

- в модель вводятся оболочечные и стержневые элементы, которые пересекаются в одной плоскости в общих узлах, при этом стержни имеют ту же жесткость что и в балочной клетке, а оболочечные элементы - жесткость плиты проезжей части (рис. 1б);

- модель, где конструкция аппроксимируется аналогично предыдущей, но стержневым элементам вводят жесткость металлической балки и подвешивают их через жесткие вставки на величину равную расстоянию между центрами тяжести плиты и балки (рис. 1в);

- модель конструкции которая имеет более детальную аппроксимацию и состоит из оболочечных элементов, которыми описываются как плита проезжей части, так и металлическая балка и объединяются между собой через жесткие связи. (рис. 1г).

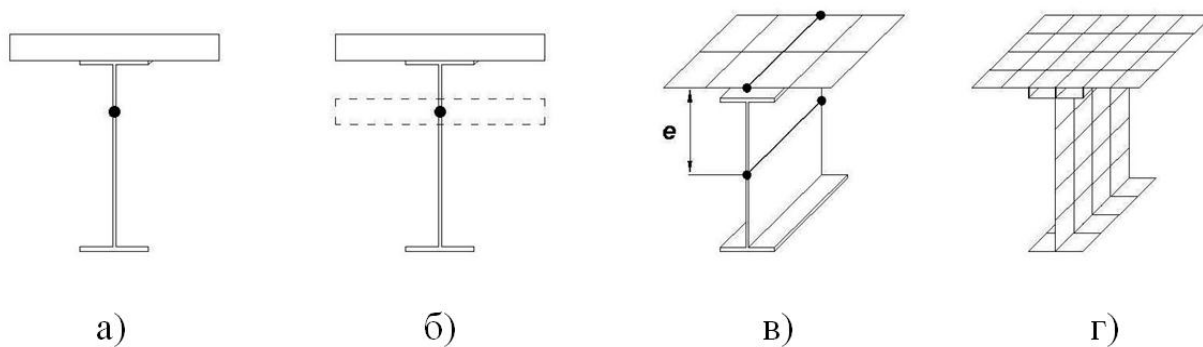


Рис. 1. Возможные варианты КЭ модели сталежелезобетонного пролетного строения

Из вышеприведенного видно, что конечно-элементные модели для расчета балочных пролетных строений мостов имеют принципиальные отличия между собой.

Для исследования особенностей и возможностей этих конечно-элементных моделей, были поставлены такие задачи:

#### **Задачи исследования:**

1. Выполнить расчет сталежелезобетонного пролетного строения автомобильного моста, используя различные конечно-элементные модели. Провести анализ результатов расчета и выявить преимущества и недостатки каждой из моделей.

2. Предложить эффективную конечно-элементную модель, позволяющую в полной мере оценить напряженно-деформированное состояние данной конструкции.

Объектом исследования расчетных моделей было выбрано неразрезное сталежелезобетонное пролетное строение по схеме 2х42 представленное на рис. 2.

Пролетное строение состоит из сварных двутавровых балок высотой 1500 мм. Верхние пояса балок имеют переменную ширину и толщину. На участке в пролете пояс имеет размеры 320х20 мм, а в надпорном участке 540х38 мм. Нижний пояс на всем протяжении имеет постоянные размеры 540х38 мм. Толщина стенки составляет 14 мм. Сварные балки пролетного строения объединены между собой монолитной железобетонной плитой проезжей части толщиной 220 мм.

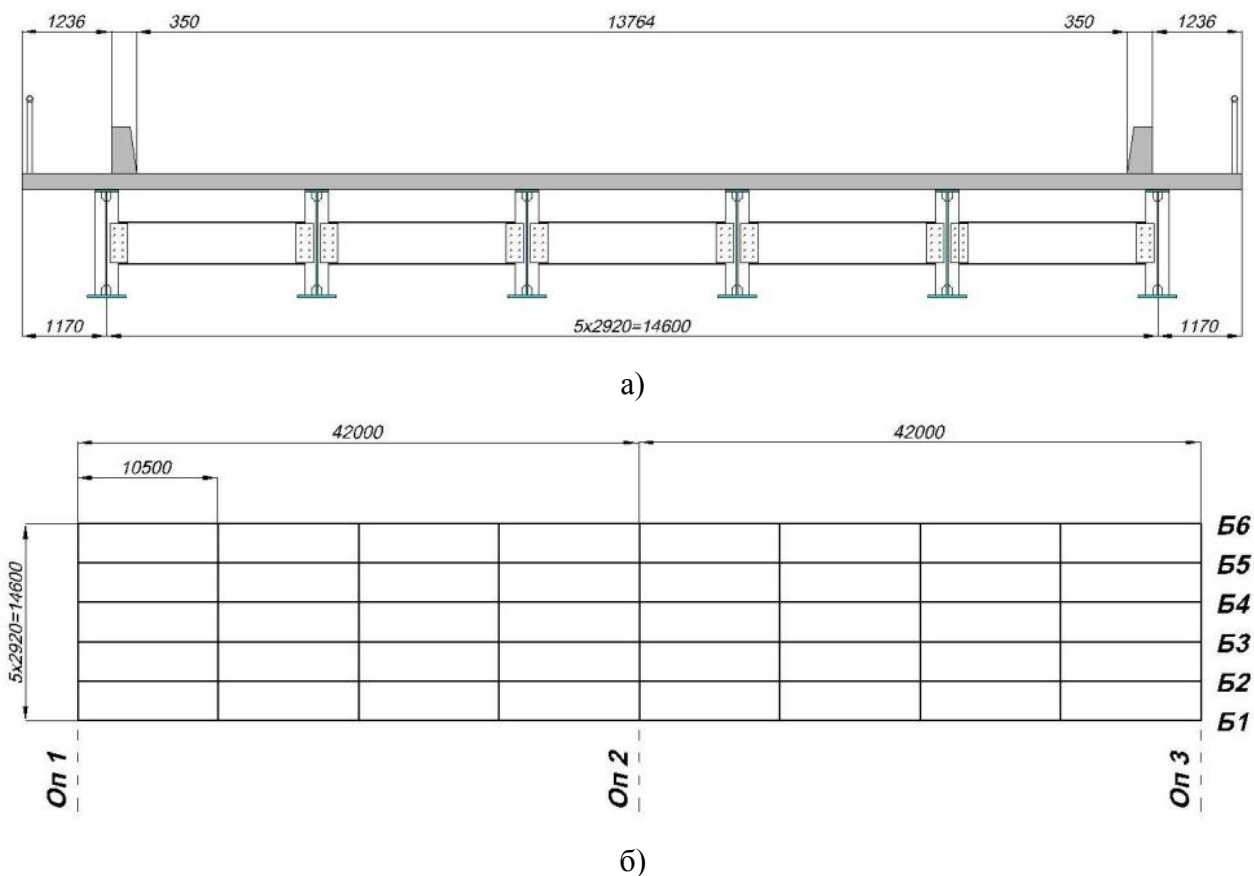
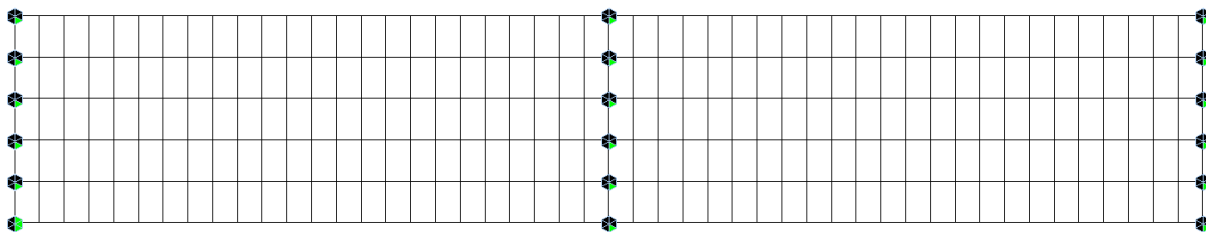


Рис. 2. Поперечное сечение и схема неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения для численных исследований: а – поперечное сечение; б – схема

Численный анализ данного пролетного строения проводился с помощью программного комплекса Midas Civil (trial version). Были составлены следующие конечно-элементные модели:

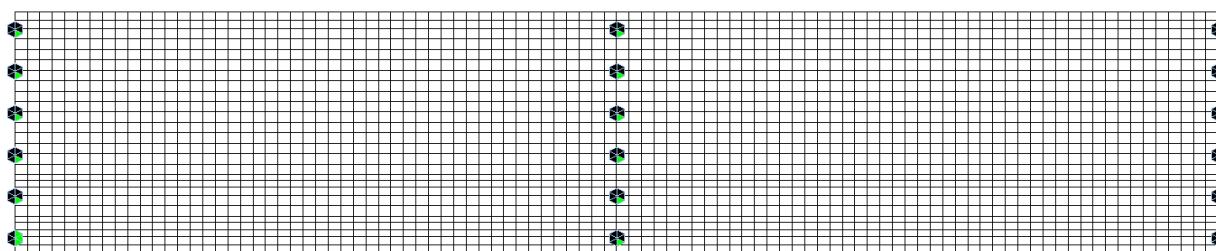
**Модель 1.** Классическая модель в виде балочной клетки, которая полностью состоит из стержневых элементов (рис. 3). Продольные стержневые элементы имеют жесткость сталежелезобетонного сечения с учетом эффективной ширины полки. Плита проезжей части заменялась поперечными стержневыми элементами, жесткости которых выбирались исходя из равенства энергии деформации плиты. Также учитывались поперечные стержневые элементы с жесткостью поперечных балок пролетного строения. Число элементов в модели составило 1083, узлов 785.



*Рис. 3. Расчетная схема модели 1*

**Модель 2.** Для второй модели использовались оболочечные и стержневые элементы. Оболочечным элементам задавалась жесткость железобетонной плиты проезжей части, а стержневым - жесткость сталежелезобетонного сечения и поперечных балок. Стержневые элементы расположенные в одной плоскости с оболочечными были объединены через общие узлы (рис. 4). Число элементов в модели составило 3122, узлов - 2620.

**Модель 3.** Третья модель аналогична предыдущей. Единственное отличие состоит лишь в жесткостных характеристиках продольных стержневых элементов, которые имеют жесткость двутавровой балки подвешенной через жесткие вставки на величину равную расстоянию между центрами тяжести железобетонной плиты и металлической балки.



*Рис. 4. Расчетная схема модели 2*

**Модель 4.** В четвертой модели оболочечными элементами аппроксимировалось все пролетное строение (рис. 5.). Для модели использовались четырех узловые конечные элементы оболочки. Объединение элементов железобетонной плиты и верхних поясов балок выполнено через двухузловые стержневые элементы с большой жесткостью, позволяющей обеспечить их совместную работу. Такая модель имела 56950 элементов и 53646 узлов.

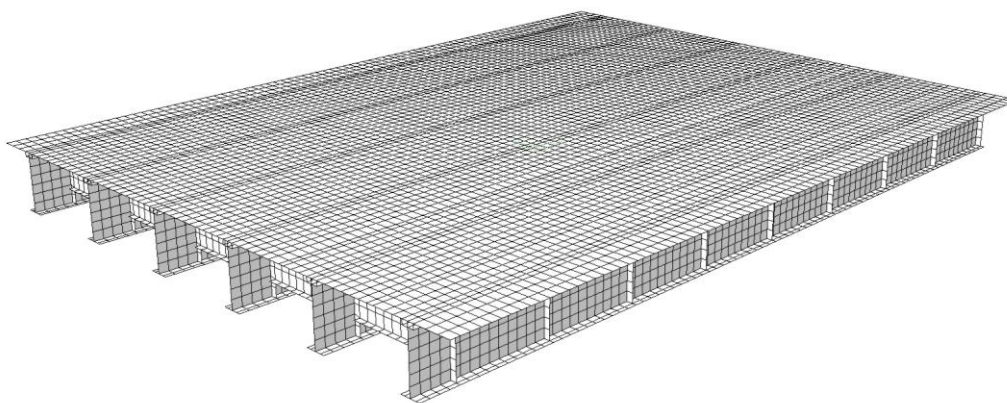


Рис. 5. Расчетная схема модели 4 (фрагмент)

Для численного исследования конечно-элементных моделей в первом пролете была приложена нормативная временная нагрузка А15 (ремонтный случай). В качестве результатов для сопоставления рассматривались напряжения в поясах второй балки, в двух сечениях, и перемещения в каждой балке в первом и втором пролете. Схема загрузки пролетного строения нагрузкой А15 и схема расположения контрольных точек для сопоставления результатов представлены на рис. 6. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

**Таблица 1** – Результаты расчета конечно-элементных моделей

Точки	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Прогибы, мм				
T1	-40.66	-40.47	-42.135	-42.537
T2	-37.34	-36.36	-38.183	-36.33
T3	-28.32	-28.03	-28.85	-26.91
T4	-16.31	-16.25	-16.64	-16.01
T5	-5.99	-5.97	-5.88	-6.29
T6	3.17	2.65	3.307	2.46
T7	16.43	16.37	16.885	16.69
T8	13.48	13.405	13.752	13.32
T9	10.215	10.159	10.349	9.98
T10	6.63	6.63	6.654	6.39
T11	2.94	3.04	2.887	2.92
T12	-0.69	-0.435	-0.802	-0.46
Напряжения, МПа				
$\sigma_1$	64.5	63.5	65.1	62.1
$\sigma_2$	-12.1	-12.4	-12.65	-11.8
$\sigma_3$	-34.3	-34.1	-34.7	-34.4
$\sigma_4$	6,0	6.1	6,0	5.7

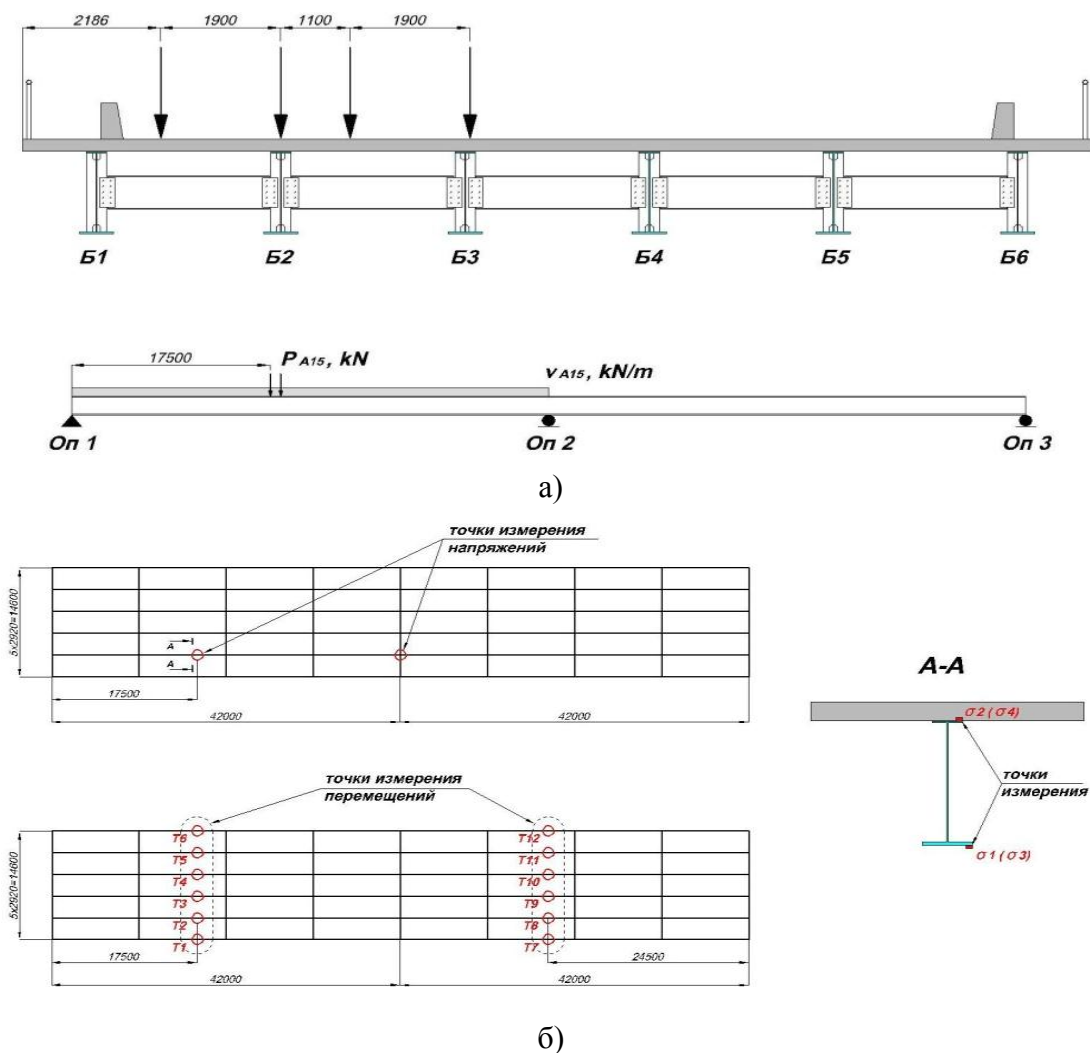


Рис. 6. Схема загрузки пролетного строения нагрузкой A15 и схема расположения контрольных точек для сопоставления результатов. а - схема загрузки пролетного строения, б - схема расположения контрольных точек

Из таблицы видно, что значения перемещений в узлах и усилий в элементах хорошо коррелируют между собой.

Если же говорить о преимуществах и недостатках каждой из моделей, то можно сказать следующее:

- Первые две модели достаточно просты в реализации и количество времени затрачиваемое на создание и расчет моделей – минимальное. Однако, несмотря на простоту в моделировании, возникает необходимость в проведении дополнительных вычислений, связанных с определением жесткостных характеристик сталежелезобетонного сечения и эффективной ширины полки;

- Третья модель, по отношению к первым двум, является удобней в использовании. В ней нет необходимость в определении эффективной ширины полки сечений и жесткостных характеристик, так как в модели это все учитывается автоматически. Однако в результате расчета в стержневых

элементах, кроме изгибающих моментов ( $M$ ) и поперечных сил ( $Q$ ), возникают еще и нормальные силы ( $N$ ), в результате чего есть необходимость в выполнении дополнительных вычислений при определении напряжений в сечениях балок.

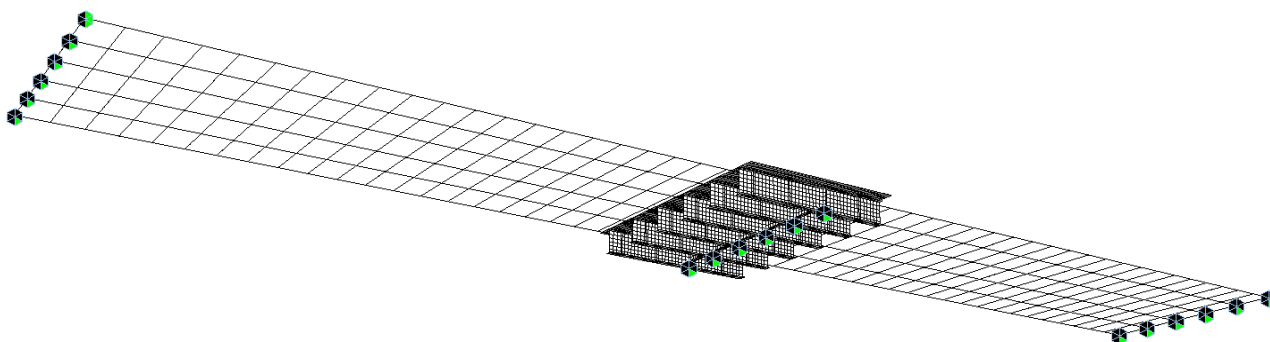
- Четвертая модель наиболее точна в описании напряженно-деформированного состояния пролетного строения. Она позволяет выдать как картину распределения напряжений в элементах конструкции, так и приближенную к действительности форму деформации. Одним из основных преимуществ применения оболочечных элементов в модели является то, что в результате расчета можно получить формы потери устойчивости и коэффициенты запаса устойчивости элементов конструкции. Основным недостатком этой модели является необходимость в использовании значительного количества конечных элементов, что в случае проведения численного анализа достаточно длинного моста, имеющего сложную топологию, приводит к значительным затратам времени на создание и расчет такой модели.

В тоже время использование четвертой модели обосновано в случаях проведения детальных расчетов сложнапряженных мест в конструкции, например: анализ устойчивости отсеков балки; распределение локальных напряжений; определение выносливости сварного узла, при использовании метода локальных напряжений и т.д. В исследуемом пролетном строении сталежелезобетонного моста соответствующим местом с точки зрения применения модели полностью состоящей из оболочечных элементов является надпорный участок. Используя одну из первых трех моделей, в указанном месте можно получить лишь изгибающий момент и поперечную силу и потому для анализа устойчивости в отсеках вертикальной стенки балки приходится проводить аналитические вычисления. Использование же модели состоящей из оболочечных элементов появляется возможность оценить устойчивость отсеков, без каких либо дополнительных вычислений, при этом полученные результаты будут являться более точными. Во всем остальном эта модель практически ничем не уступает стержневым моделям. Из выше представленных результатов расчета четырех конечно-элементных моделей видно, что перемещения и напряжения в характерных точках сечений пролетного строения достаточно близки между собой.



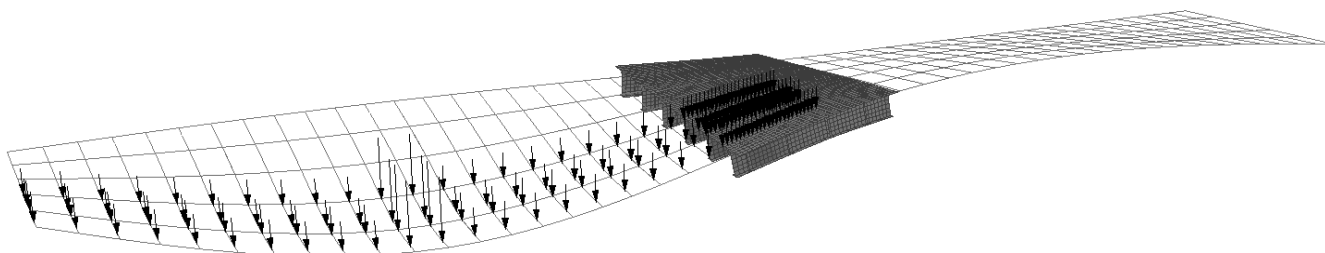
Можно сделать вывод, что есть необходимость в применении модели, которая включала бы в себя преимущества стержневой и оболочечной модели. То есть, такой модели, которая позволяла бы более подробно оценить напряженно- деформированное состояние характерных мест в конструкции и тем самым времени на расчет затрачивалось намного меньше.

В данной статье предлагается модель для балочных пролетных строений мостов, в которой оболочечными элементами аппроксимируется фрагмент надпорного участка, а вся остальная часть конструкции стержневыми элементами. При этом фрагменты модели объединяются между собой через жесткие тела. В качестве фрагмента состоящего из стержневых элементов удобнее использовать модель балочной клетки, т.к. переход от стержневой к оболочечной модели посредством жестких тел осуществляется намного легче. Такая модель представлена на рис. 6.



*Рис. 6. Общий вид модели с жесткими телами*

Численный расчет модели с жесткими телами был проведен при расположении временной нагрузки аналогично предыдущим расчетам. Загружение предлагаемой модели нагрузкой А15 и ее деформация в результате расчета представлены на рис. 7.



*Рис. 7. Общий вид модели и ее деформация от временной нормативной нагрузки*

Результаты полученных расчетов были сопоставлены с результатами расчета четвертой модели. Данные приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Результаты расчета конечно-элементных моделей

Точки	Вариант 4	Модель с жесткими телами
Прогибы, мм		
T1	-42.537	-40.73
T2	-36.33	-37.214
T3	-26.91	-28.14
T4	-16.01	-16.279
T5	-6.29	-5.97
T6	2.46	2.74
T7	16.69	16.3
T8	13.32	13.26
T9	9.98	10.026
T10	6.39	6.58
T11	2.92	3.1
T12	-0.46	-0.319
Напряжения, МПа		
$\sigma_1$	62.1	61.5
$\sigma_2$	-11.8	-11.3
$\sigma_3$	-34.4	-34.2
$\sigma_4$	5.7	5.9

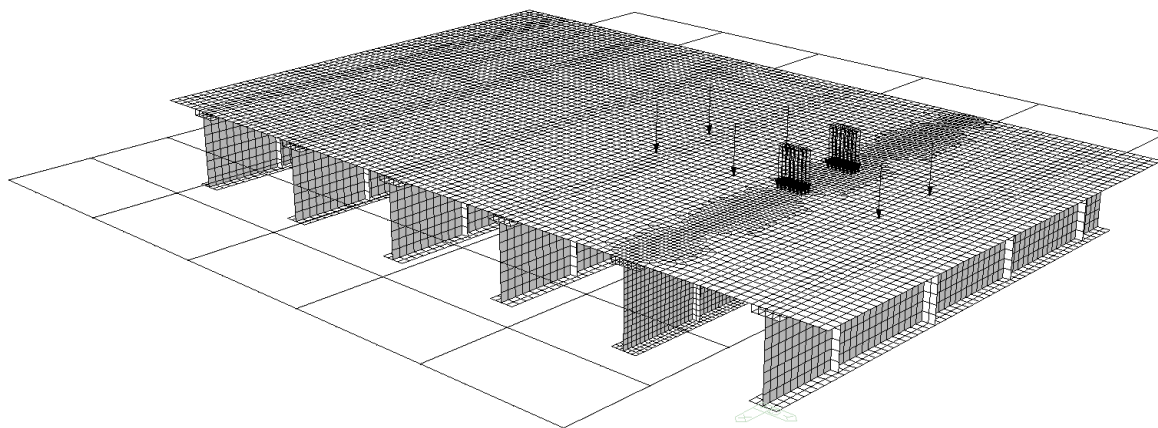
Из таблицы видно, что результаты расчета модели с жесткими телами фактически совпадают с результатами расчета, полученными используя четвертую модель. Это подтверждает адекватность отображения напряженно-деформированного состояния конструкции используя модель с жесткими телами.

В случаях анализа устойчивости стенки в отсеках, более подробная конечно-элементная сетка используется лишь в одной балке, все остальные балки могут иметь более грубую сетку. Это позволит детально оценить устойчивость стенки и при этом сэкономить время расчета.

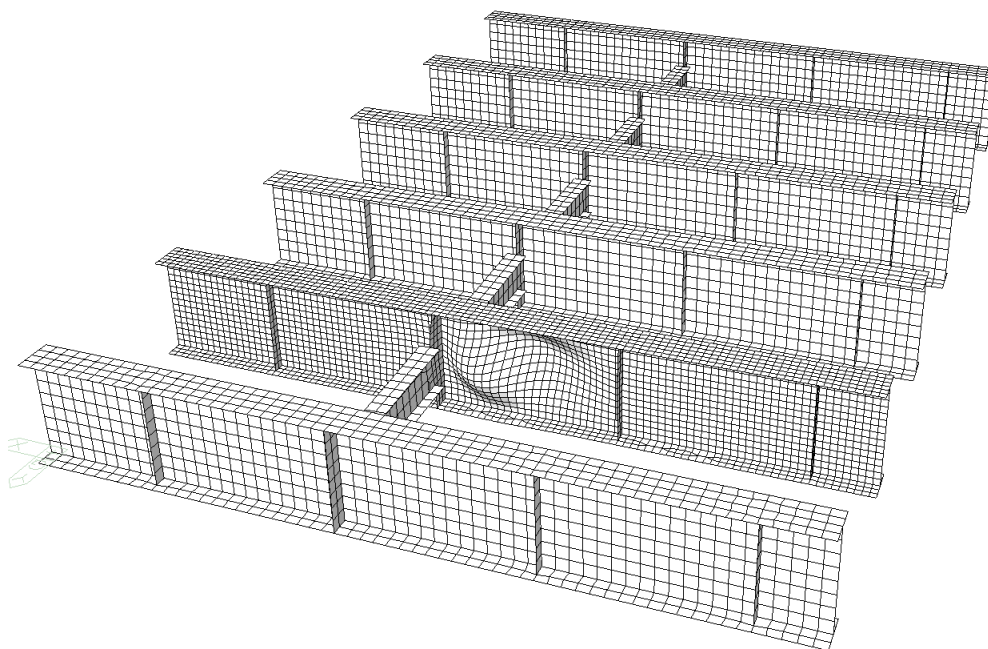
Загружение второй балки над опорой 2 и форма потери устойчивости в отсеке стенки показаны на рис. 8,9.

Как видно из представленного выше анализа модель с применением жестких тел в полной мере отображает напряжено-деформированное состояние

сталежелезобетонного пролетного строения. Такая модель намного практичней в использовании. И в случаях, когда создается модель моста имеющего значительно большие пролеты, а также множество мест для детального исследования напряженно-деформированного состояния, эффективность применения предложенной модели возрастает.



*Рис. 8. Фрагмент надпорного участка с приложенной нагрузкой для исследования устойчивости стенки во второй балке*



*Рис. 9. Форма потери устойчивости в надпорном участке во второй балке*

## **Выводы**

Анализ результатов расчетов неразрезного сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста, используя различные конечно-элементные модели, показал, что применение четвертой модели (модели состоящей полностью из оболочечных элементов) позволяет более детально отобразить напряженно-деформированного состояния всей конструкции.

Однако такая модель требует большего количества элементов, чем остальные модели. В случае, когда проводится детальный численный анализ достаточно длинного моста, имеющего сложную топологию, затраты времени на создание и расчет такой модели значительны.

Из анализа результатов видно, что не имеет смысла всю модель сталежелезобетонного пролетного строения аппроксимировать оболочечными элементами для исследования устойчивости и распределения напряжений в элементах главных балок. Достаточно описать оболочечными элементами лишь фрагмент характерного места, а все остальные участки стержневыми элементами которые объединяются с оболочечными используя жесткие тела. Такая модель позволяет в полной мере численным путем описать напряженно-деформированное состояние пролетного строения и при этом затрачивается меньше времени на создание и расчет такой конструкции.

Целесообразно провести численные исследования, связанные с использованием модели с жесткими телами и на других типах пролетных строений мостов.

## Литература

1. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений/ А.С. Городецкий, В.И. Зоворицкий, А.И. Лантух-Лященко, А.О. Рассказов. - М.: Транспорт. 1981. – 143 с.
2. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600 с., ил. (Серия «Проектирование»).
3. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. – К.: Факт, 2007. – 394 с.
4. Midas Civil. Analysis for Civil Structures (Analysis Manual). <http://en.midasuser.com>.
5. Розрахунок і проектування мостів: В 2-х т.: Навч. посіб./ О. Загора, Д. Каплинський, М. Корнієв, А. Корецький, А. Лантух-Лященко, К. Медведєв, В. Снітко, В. Годіріка/ За ред.. А. Лантуха-Лященка. – К.: НТУ. – 2007. – 337 с.
6. Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М., Лантух-Лященко А.І., Хархаліс М.Р. Мости: конструкції та надійність. – Львів: Каменяр, 2005. – (Нац. Академія наук України. Фіз.- мех.ін-т ім. Г.В. Карпенка. Довідник). – 989 с.