

**ВОЗДЕЙСТВИЕ НАГРУЗОК ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
(НК-80, А-11) НА МОСТОВОЕ ПОЛОТНО  
ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КНЭСК**

*к.т.н., доцент, И.М., Кузменко Белорусско-Российский университет, г. Могилев  
аспирант, Медведев В.Н., Белорусско-Российский университет, г. Могилев*

*Аннотация*

*Преимущества использования конструкций с применением композитного несущего элемента строительных конструкций (КНЭСК) обусловлены рядом преимуществ таких как: простота устройства, высокая несущая способность, хорошее сцепление бетонного заполнителя и стальной составляющей и др. Но так как конструкция является новой и мало изученной, то существует проблема оценки несущей способности. Авторами приводится аналитический расчет плиты КНЭСК, с использованием метода конечных элементов, при использовании ее в качестве пролетного строения автодорожного многопролетного моста с заданными геометрическими размерами. Использование данной методики позволило смоделировать физическую и геометрическую нелинейность плиты, учесть пластические деформации их влияние на перераспределение усилий в плите, несущую способность конструкции.*

**Введение**

Высокий уровень развития технического прогресса в строительной отрасли требует создания новых, более долговечных, эффективных и надежных строительных конструкций, позволяющих рационально расходовать выделенные ресурсы, сокращать сроки строительства.

В Белорусско-Российском университете, совместно с МГУТ, был разработан композитный несущий элемент строительных конструкций (КНЭСК) [1,2]. В работах [3-5] дано описание элемента (рис. 1) и показаны области его применения в сооружениях различного назначения.

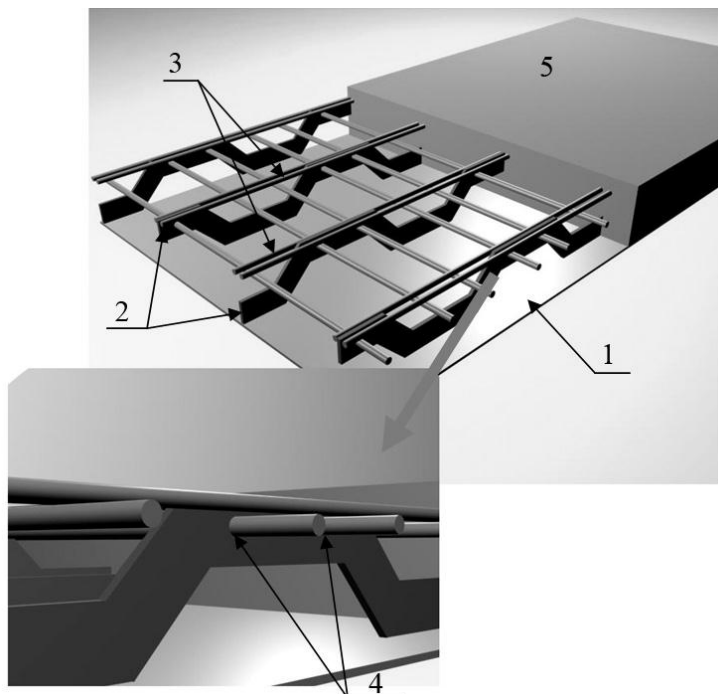


Рис. 1 – общий вид КНЭСК

КНЭСК состоит из стальной и бетонной (1) составляющих. В свою очередь стальная составляющая представляет собой стальной лист (2), к которому приварены фасонная листовая (3) и круглая арматура (4). Стальная составляющая полностью изготавливается в заводских условиях в виде модулей и

приваривается на месте монтажа к несущим конструкциям сооружения. Бетонирование может быть осуществлено после полного монтажа КНЭСК.

В рамках [6] автором показана эффективность применения КНЭСК в линейно протяженных конструкциях, в частности, при создании мостового полотна пролетных строений мостов.

В настоящее время работа железобетонных элементов с внешним листовым армированием (к которым можно отнести КНЭСК), является малоизученной и требует теоретических и экспериментальных исследований направленных на изучение ее несущей способности. А при проектировании конструкций расчет производится по допускаемым напряжениям. Данный метод не отражает реальной работы конструкции и не позволяет проектировать конструкции с максимальным экономическим эффектом. Авторами данной работы, был проведен анализ НДС плиты КНЭСК использованной в качестве мостового полотна с пролетом в свету 2.9 м, на основании изучения конечно-элементной модели, от действия постоянных нагрузок и нагрузок подвижного состава.

основная часть.

Элемент пролетного строения мостового полотна выполненного из КНЭСК имеет следующие габаритные размеры: пролет 2900 мм, высота 150 мм (рис. 2) выбраны в соответствии с требованиями СНиП 2.05.03-84 п 1.9-1.25 для автодорожных мостов. Шаг фасонных стальных элементов по ширине плиты 165 мм, таким образом, в рассматриваемом случае на дистанции 1000 мм будет расположено 5 фасонных элементов (выбран в соответствии с удобством монтажа сварных элементов). Размеры всех элементов КНЭСК приведены на рис. 2. Ширина плиты принята из расчета на один погонный метр.

При расчете были приняты материалы со следующими прочностными и деформативными характеристиками:

Бетон класса С30/37, по условиям эксплуатации ХС4, XF4 (обусловлено применением антиобледенителей в зимнее время, подвержены попеременному увлажнению и высушиванию), модуль упругости  $E=3.7 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\eta=0,2$ , коэффициент поверхности трещины (shear transfer coefficient)  $\beta_t = 0.2$

Для моделирования физической нелинейности бетона в программном комплексе ANSYS используется следующие количественные зависимости :

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)^2}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_o = \frac{2f_c^2}{E_c}, \quad (2)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где,  $f$  – напряжения в бетоне при деформациях  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_o$  – предельные деформации в бетоне.

Стержневая сталь класса S400 с  $f_{yd}=364$  МПа и листовая сталь марки 15ХСНД с  $f_y=335$  МПа, модуль упругости для стали  $E=2 \times 10^6$  МПа, коэффициент Пуассона  $\eta=0,3$ . при расчете вводилась диаграмма деформирования бетона для класса С30/37 построенная в соответствии с требованиями действующих норм [7]

Для проведения анализа НДС и построения конечно-элементной модели плиты КНЭСК был использован, конечно-элементный пакет ANSYS, позволяющий моделировать конструкции со сложной геометрией и физической нелинейностью материалов.

Конечно-элементная модель КНЭСК, представляет собой полноразмерную балочную конструкцию, состоящую из стержневых и трех мерных, твердотельных элементов.

При моделировании конструкции были использованы конечные приведенные в табл. 1, выбор которых позволил учесть физическую нелинейность бетона.

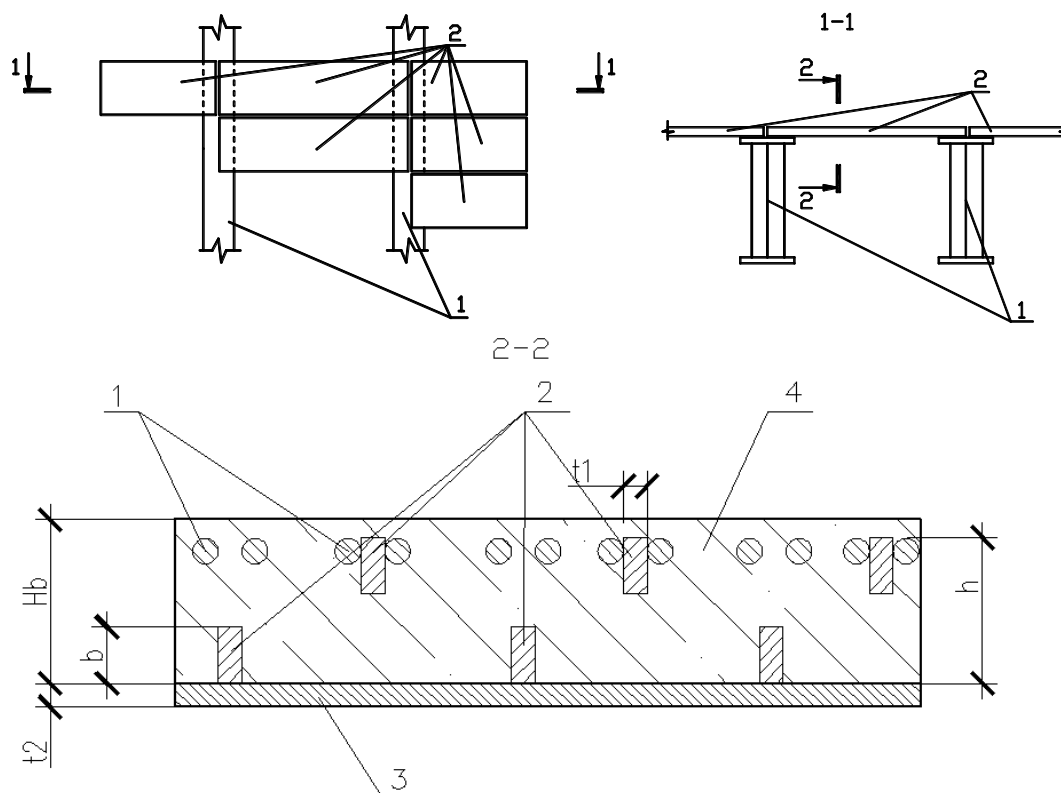


Рис. 2 – пролетное мостовое строение, 1-опоры, 2-элементы КНЭСК, 2-2 поперечный разрез КНЭСК, 1- продольная стержневая арматура, 2-фасонная арматура с  $b=50$  мм и толщиной  $t_1=8$  мм, 3- стальной опорный лист высотой  $t_2=4$  мм, 4-бетонный наполнитель, высота плиты  $H_b=150$  мм

Таблица 1

Краткое описание конечных элементов использованных при анализе несущей способности КНЭСК

№	Название	Краткое описание	Количество элементов в модели	Место использования
1	solid 64	3-х мерный кубический элемент. Имеет 10 узлов и поддерживает физически нелинейные свойства бетона пи сложных видах деформирования	13540	заполнитель (бетон)
2	Link 8	балочный элемент имеющий 2 узла с двумя степенями свободы	860	стержневая арматура
3	Solid 45	3-х мерный кубический элемент имеет 10 узлов	3456	стальной опорный лист, стержневая арматура

В соответствии с [7,8] расчет мостового полотна проводится на действие постоянных, временных и прочих нагрузок. В данной работе, учитывались следующие нагрузки: постоянные (вес дорожного полотна, собственный вес пролетного строения), временные (нагрузки, ветровые нагрузки, снеговые нагрузки, вес наледи и др.).

Схема приложения нагрузок к пролетной конструкции КНЭСК приведена на рис.3. Краткое описание нагрузок приводится в табл. 2

Таблица 2

Описание нагрузок приложенных к пролетному строению КНЭСК

№	Название	Краткое описание	Величина	Нормативная ссылка
1	НК-80	колесная нагрузка, от действия подвижного состава 8-и колесной	80 тс	СНиП 2.05.03-84
2	А-11	колесная нагрузка от четырех колесной машины	11 тс	СНиП 2.05.03-84

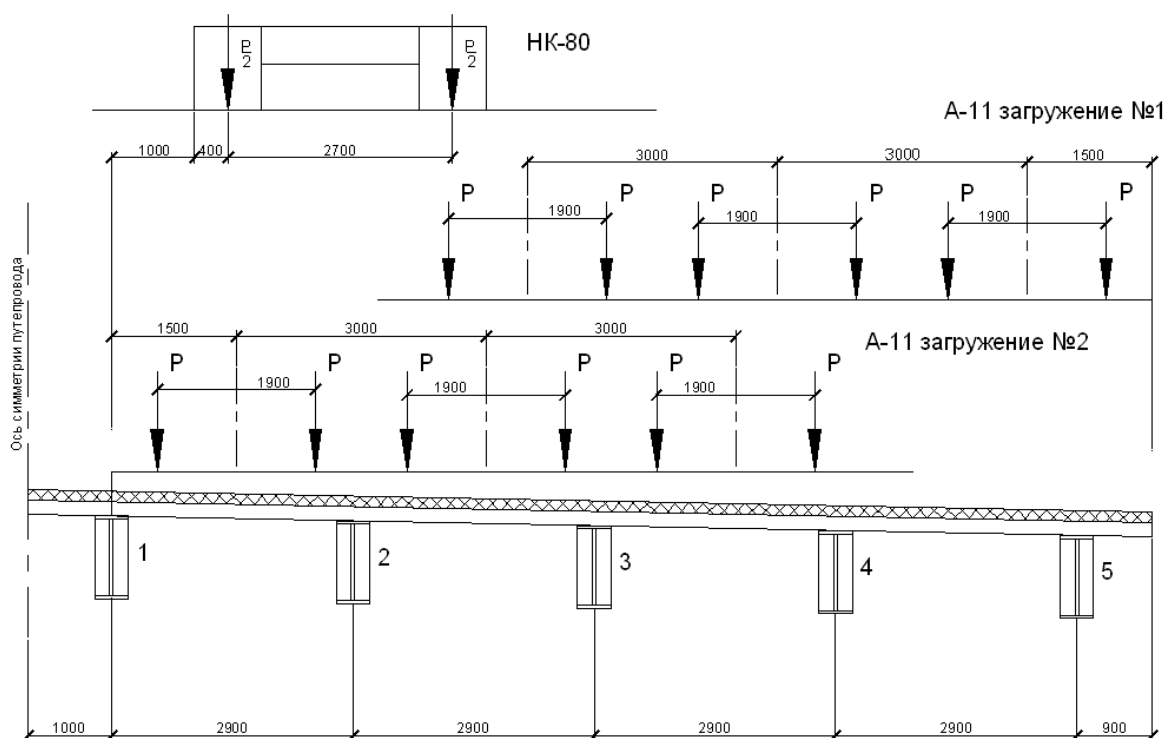


Рис. 3 – расчетное расположение колес на плите при воздействии нагрузки НК-80 и А-11

Анализ напряженно-деформированного состояния плиты КНЭСК проводится по первой (несущая способность) и второй (трещинообразование, прогиб) группам предельных состояний.

Таблица 3

Значения максимальных напряжений в КНЭСК при нагрузке НК-80, колесо расположено в середине пролета

Материал	Элемент КНЭСК, знак напряжений	Величина (МПа)	Место появления
Бетон	сжатие	- 2.3	Надпорная зона, середина пролета
	растяжение	1.83	В центре пролета
Сталь	стержневая арматура	163	Надпорная зона
	Стальной лист	47,9	В центре пролета

Таблица 4

Значения максимальных напряжений в КНЭСК при нагрузке НК-80 колесо у края опоры

Материал	Элемент КНЭСК, знак напряжений	Величина (МПа)	Место появления
Бетон	сжатие	- 5.18	0.4·L* от левой опоры, верхняя сторона плиты
	растяжение	1.8	0.4L от левой опоры
Сталь	стержневая арматура, растяжение	228	Надпорная зона, левый край
	стальной лист, растяжение	25.1	0.4L от левой опоры

\*- где L пролет плиты

Значения максимальных напряжений в КНЭСК при нагрузке А-11

		Величина (МПа)	Место появления
Бетон	Максимальные напряжения Сжатия	-3.5	Надпорная зона, середина пролета
	Максимальные напряжения Растяжения	1.83	В центре пролета
Сталь	Максимальные напряжения в стержневой арматуре	46,9	Надпорная зона
	Максимальные напряжения в стальном опорном листе	5.1	В центре пролета

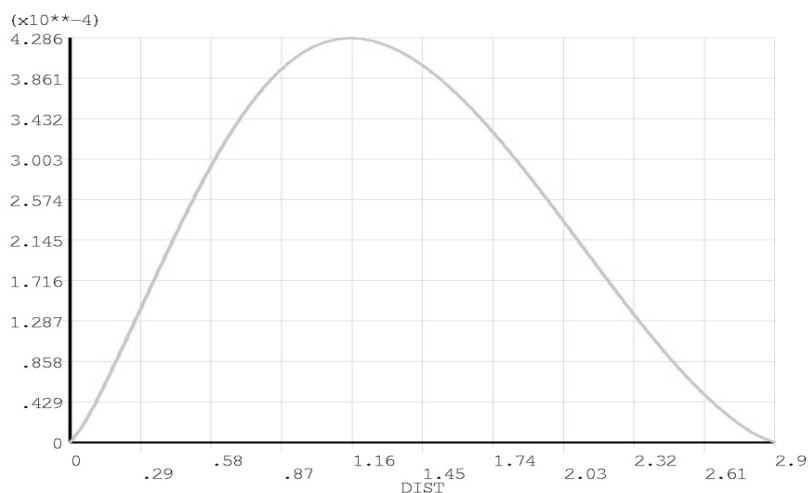


Рис. 4 – прогиб в ж/б плите КНЭСК при нагрузке НК-80.

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния КНЭСК при действии заданных нагрузок представлены ниже.

Из результатов анализа и математического моделирования по первой группе предельных состояний следует, что при данной схеме закрепления и нагружения в плите будут возникать сжимающие и растягивающие напряжения, значения и место появления которых приведены в табл. 3-5.

Результаты расчетов на трещинообразование конструкции показали, что при данной расчетной схеме и заданных нагрузках в конструкции возможно образование трещин в приопорных зонах, с обеих сторон плиты, что вызвано совместным действием изгибающего момента и смятия. На расстоянии 0.16 м от левой опоры при воздействии нагрузки НК-80 возможно образование диагональных трещин под углом  $45^\circ$  от воздействия поперечной силы. Исходя из полученных результатов, можно судить о том, что конструкция в приопорных зонах работает в 1-й стадии. Так же можно говорить о нарушении сплошности сцепления между стальным листом и бетоном и перераспределении усилий в центре пролета, о чем говорят вертикальные трещины.

Характер образования трещин в правой приопорной зоне показывает о перераспределении внутренних усилий, нейтральная ось сместилась к наиболее сжатой грани сечения, тем самым уменьшив высоту сжатой зоны. Так же можно говорить о нарушении сплошности сцепления бетона со стальной стержневой арматурой.

Расчет перемещений в плите показал, что прогиб достигает максимальных величин 0,379 мм в середине пролета (см. рис. 4), данные значения не превышают допустимых нормативными документами [7]  $1/400 \cdot L = 1/400 \cdot 2900 = 7,25$  мм.

## Выводы

По результатам численного конечно-элементного моделирования и аналитического расчета можно сделать следующие выводы:

Для сечений расположенных в центре пролета: т.к. усилия от воздействия нагрузок от подвижного состава НК-80 на верхней грани бетона составляют  $5.18/30=0.24f_c$  ( $f_c$  – напряжения в пиковой точке диаграммы деформирования) то можно сделать вывод о том, что материал (бетон у верхней грани) работает на начальном участке зависимости  $\sigma$ - $\varepsilon$ , т.е. бетон испытывает только упругие деформации. Также можно говорить о незначительном увеличении контактных трещин на границе частиц заполнителя и матрицы [9], что подтверждают результаты конечно-элементного моделирования. Напряжения в арматурной стали и нижнем опорном листе достигают максимальных значений: 228 МПа (табл. 4) и 47,9 МПа (табл. 3) соответственно, что составляет  $228/364=63\%$  (для арматурной стали) и  $47,9/335=14,3\%$  (для стального опорного листа) от предела текучести стали. Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что нейтральная ось (для сечений в середине пролета), разделяющая растянутую и сжатую зоны, располагается примерно на уровне центра тяжести приведенного сечения. Модуль упругости бетона равен начальному модулю упругости бетона. Но хотя в сжатой зоне бетон работает упруго, в растянутой напряжения приближаются к предельным (ближе к нижней грани), что сопровождается появлением пластических деформаций и трещин.

Для нормальных сечений у края опоры можно сделать вывод о достижении бетоном предельных деформаций растяжения у верхней грани плиты максимальные растягивающие напряжения данной области достигают  $f_{ct}=1,8$  МПа,  $\varepsilon=f_{ct}/E=1,83/3.7 \times 10^5$  для данной области, очевидно, что гипотеза плоских сечений будет нарушена. Напряжения в арматурной стали достигают максимальных значений:  $f_y=228$  МПа (табл. 3)  $228/364=63\%$  от предела прочности стали

Расчет по второй группе предельных состояний показал, что конструкция достигает предела внутреннего трещинообразования, но сила обжатия трещины значительно превышает нормативное значение. Прогибы конструкции при воздействии нагрузок значительно меньше требуемых нормативными документами [7].

На основании всего вышеизложенного можно сделать вывод о целесообразности использования сталежелезобетонной плиты КНЭСК в данной конструкции моста т.к. она обладает рядом преимуществ перед известными конструкциями и отвечает всем требованиям.

В качестве исследуемой плиты пролетного строения уникального автодорожного путепровода, строящегося в г. Минске на пересечении с ж. д. путями ст. Минск-Северный (от 1-го городского транспортно-кольца – пр. Машерова до ул. Харьковской) проектантом – РУП «Мостострой» – была принята плита из КНЭСК.

## Литература

1. Композитный несущий элемент строительных конструкций. Патент РБ № 4082. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 29.07.1997. Выдан 29.06.2001. Кузменко И.М., Фридкин В.М., Носарев А.В. и др.
2. Композитный несущий элемент строительных конструкций. Патент РФ №2181406. Опубликовано 20.04.2002, бюллетень №11. Приоритет с 29.07.1997. Кузменко И.М., Фридкин В.М., Носарев А.В. и др.
3. Кузменко И.М., Павлюк С.К., Фридкин В.М. и др. Применение сварных несущих элементов в новых композитных строительных конструкциях. «Сварочное производство», № 9, 2003, стр. 47-50.
4. Фридкин В.М., Чесноков С.А., Кузменко И.М. и др. Инженерно-экологические и конструктивно-технологические проблемы создания инженерных барьеров при долговременном хранении и окончательном захоронении отработавшего ядерного топлива в недрах Земли. Горный информационно-аналитический бюллетень. Изд-во Московского государственного горного университета Москва, №4, 2005, стр.88-94.
5. Чесноков С.А., Носарев А.В., Фридкин В.М., Кузменко И.М. и др. Новые возможности создания инженерных сооружений для обеспечения экологической и антитеррористической безопасности промышленной утилизации некоторых видов технической продукции. Сб. статей Международного научно-технического конгресса по безопасности. Москва ноябрь 2005, с. 57-61.
6. Фридкин В.М. Принципы формообразования в теории линейно-протяженных сооружений. – М.: Издательство «Ладья», 2006. – 510 с.
7. СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 215 с.

8. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия/Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. - 36 с.