

УДК 624.01:023.87

ВОЗДЕЙСТВИЕ НАГРУЗОК ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА МОСТОВОЕ ПОЛОТНО ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИТНОГО НЕСУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

канд. техн. наук, доц. И.М. КУЗМЕНКО, В.Н. МЕДВЕДЕВ
 (Белорусско-Российский университет, Могилев)

Конструкции с применением композитного несущего элемента строительных конструкций имеют ряд преимуществ, таких как простота устройства, хорошее сцепление бетонного заполнителя и стальной составляющей и др. Но так как конструкция является новой и мало изученной, существует проблема оценки ее несущей способности.

Приводится аналитический расчет методом конечных элементов плиты композитного несущего элемента строительных конструкций 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 и их влияние на несущую способность конструкции и на перераспределение усилий в плите.

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 Московским государственным университетом путей сообщения (МИИТ), был разработан композитный несущий элемент строительных конструкций (КНЭСК) [1, 2]. В работах [3 – 5] дано описание элемента (рис. 1) и показаны возможные области его применения в сооружениях различного назначения.

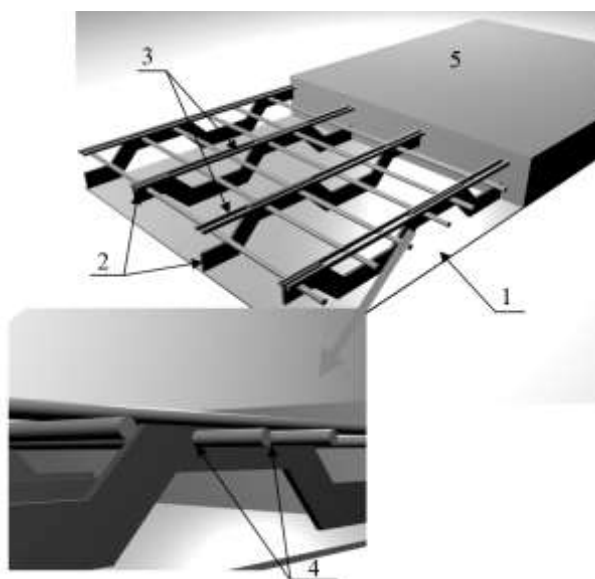


Рис. 1. Общий вид композитного несущего элемента строительных конструкций

Композитный несущий элемент строительных конструкций состоит из стальной и бетонной 5 составляющих. В свою очередь стальная составляющая представляет собой стальной лист 1, к которому посредством сварки присоединены фасонная листовая 2 и круглая арматура 3, 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. 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 на основании изучения конечно-элементной модели, был проведен анализ НДС плиты КНЭСК, использованной в качестве мостового полотна с пролетом в свету 2,9 м, 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), которые 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 (выбран в соответствии с удобством монтажа сварных элементов). Таким образом, в рассматриваемом случае на дистанции 1000 мм будет расположено 5 фасонных элементов. Размеры всех элементов КНЭСК приведены на рисунке 2. Ширина плиты принята из расчета на один погонный метр.

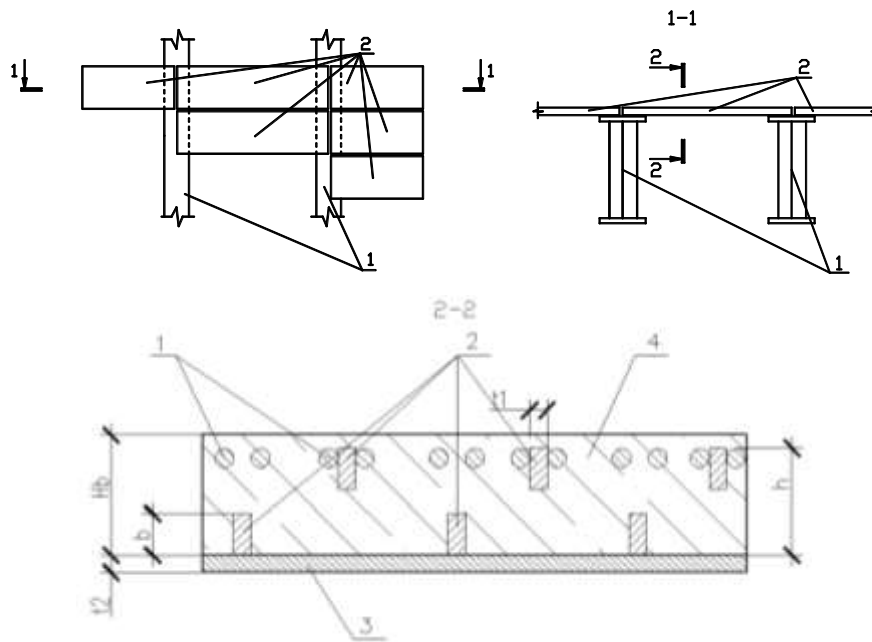


Рис. 2. Пролетное мостовое строение:

- 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

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 $E = 3,7 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\eta = 0,2$, коэффициент поверхности трещины (shear transfer coefficient) $\beta_t = 0,2$;

- стержневая сталь класса S400 с $f_{yd} = 364$ МПа и листовая сталь с $f_y = 335$ МПа, модуль упругости для стали $E = 2 \cdot 10^6$ 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 моделирования физической нелинейности бетона в программном комплексе ANSYS используются 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 ε ; ε_0 – предельные деформации в бетоне.

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 трехмерных твердотельных элементов. При моделировании конструкции были использованы конечные элементы, приведенные в таблице 1, выбор которых позволил учесть физическую нелинейность бетона.

Таблица 1

Краткое описание конечных элементов, использованных при анализе несущей способности КНЭСК

Название	Описание конечных элементов (КЭ)	Количество КЭ в модели	Место использования
Solid 65	3-х мерный кубический элемент. Имеет 10 узлов и поддерживает физически нелинейные свойства бетона при сложных видах деформирования	13540	Заполнитель (бетон)
Link 8	Балочный элемент, имеющий 2 узла с двумя степенями свободы	860	Стержневая арматура
Solid 45	3-х мерный кубический элемент имеет 10 узлов	3456	Стальной опорный лист, стержневая арматура

При разработке проекта уникального автодорожного путепровода, строящегося в г. Минске на пересечении с железнодорожными путями ст. Минск – Северный (от 1-го городского транспортного кольца – пр. Машерова до ул. Харьковской) проектантом РУП «Мостострой», г. Минск, в качестве плиты пролетного строения проезжей части была принята плита из КНЭСК.

В качестве исследуемой плиты пролетного строения проезжей части рассматривалась плита из КНЭСК с размерами, соответствующими вышепредставленному проекту. 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 (ветровые нагрузки, снеговые нагрузки, вес наледи и др.). Схема приложения нагрузок к пролетной конструкции КНЭСК приведена на рисунке 3. Краткое описание нагрузок приводится в таблице 2.

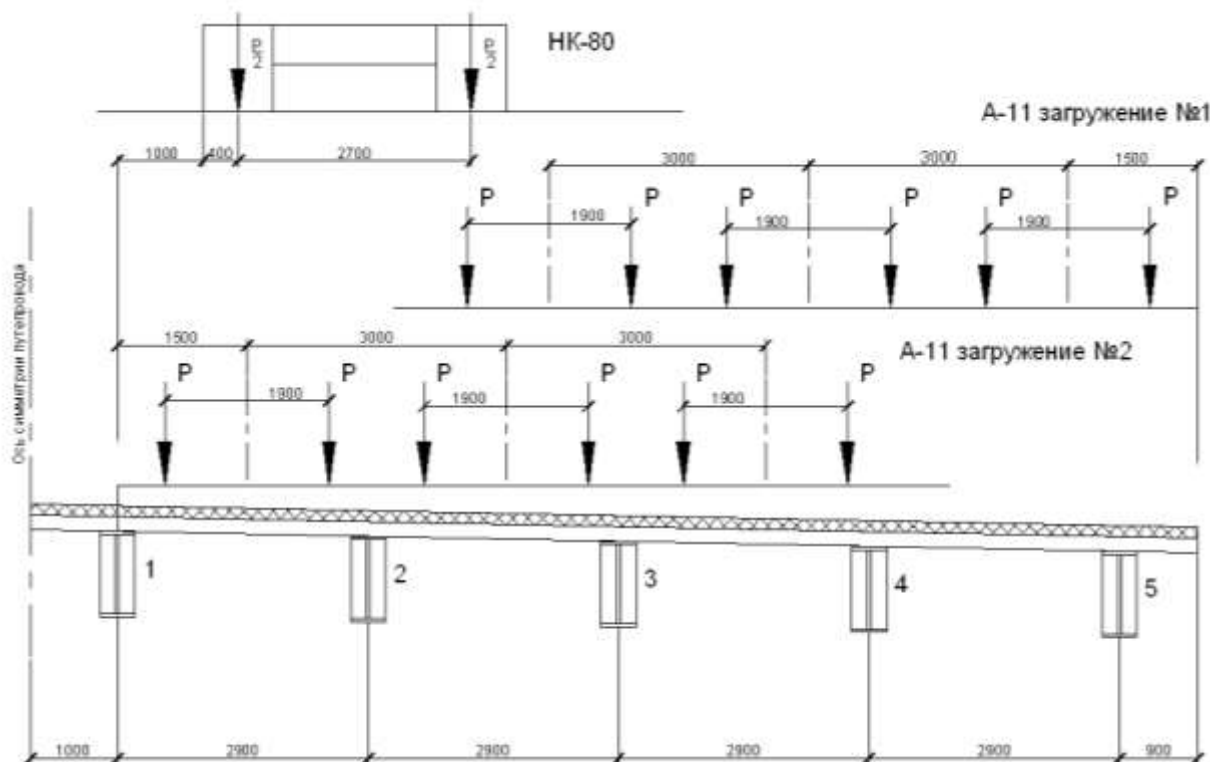


Рис. 3. Расчетное расположение колес на плите при воздействии нагрузки НК-80 и А-11

Таблица 2

Описание нагрузок, приложенных к пролетному строению КНЭСК

Название	Краткое описание	Величина	Нормативная ссылка
Собственный вес конструкций	–	0,39 т/пм	СНиП 2.05.03-84
Вес асфальтобетонного покрытия	–	0,299 т/пм	СНиП 2.05.03-84
НК-80	Колесная нагрузка, от действия подвижного состава 8-колесной	80 тс	СНиП 2.05.03-84
A-11	Колесная нагрузка от 4-колесной машины	11 тс	СНиП 2.05.03-84

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

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 таблицах 3 – 5.

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	0,4L* 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

* L – пролет плиты.

Таблица 5

Значения максимальных напряжений в КНЭСК при нагрузке A-11

Материал	Элемент КНЭСК, знак напряжений	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

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° от воздействия поперечной силы.

Исходя из полученных результатов, можно судить о том, что конструкция в приопорных зонах работает в 1-й стадии. Можно говорить и о нарушении сцепления между стальным листом и бетоном и перераспределении усилий в центре пролета, о чем свидетельствуют вертикальные трещины.

Характер образования трещин в правой приопорной зоне указывает на перераспределение внутренних усилий, нейтральная ось сместилась к наиболее сжатой грани сечения, тем самым уменьшив высоту сжатой зоны. Также 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 (рис. 4), данные значения не превышают допустимых нормативными документами [7]:

$$1/400L = 1/400 \cdot 2900 = 7,25 \text{ мм.}$$

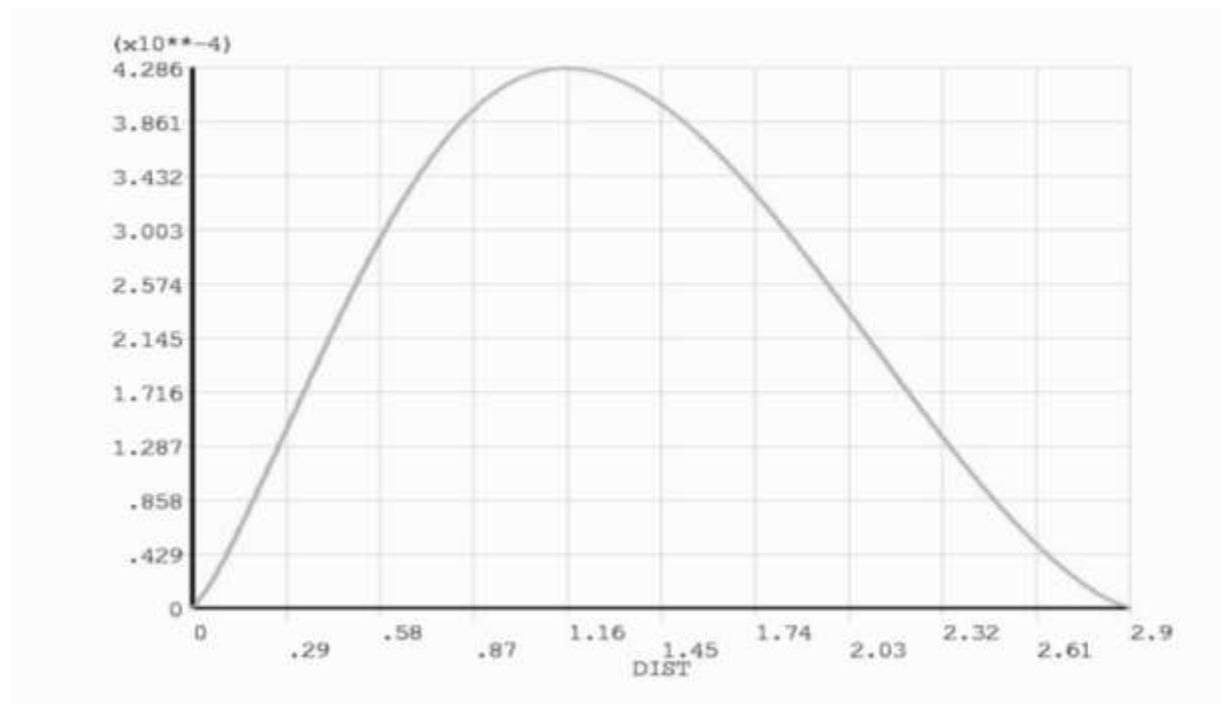


Рис. 4. Прогиб в сталежелезобетонной плите КНЭСК при нагрузке НК-80

Выводы

- Для сечений, расположенных в центре пролета, характерно следующее:
 - усилия от воздействия нагрузок от подвижного состава НК-80 на верхней грани бетона составляют $0,24f_c'$ ($5,18/30 = 0,24f_c'$); f_c' – напряжения в пиковой точке диаграммы деформирования, следовательно, материал (бетон у верхней грани) работает на начальном участке зависимости $\sigma - \epsilon$, т.е. бетон испытывает только упругие деформации;
 - контактные трещины незначительно увеличиваются на границе частиц заполнителя и матрицы, что подтверждают результаты конечно-элементного моделирования;
 - напряжения в арматурной стали и стальном опорном листе достигают максимальных значений: 228 МПа (см. табл. 4) и 47,9 МПа (см. табл. 3) соответственно, что составляет 63 % ($228/364 = 63\%$) для арматурной стали и 14,3 % ($47,9/335 = 14,3\%$) для стального опорного листа от предела текучести стали;
 - нейтральная ось располагается примерно на уровне центра тяжести приведенного сечения. Модуль упругости бетона равен его начальному модулю упругости;
 - в сжатой зоне бетон работает упруго, а в растянутой зоне напряжения приближаются к предельным (ближе к нижней грани), что сопровождается появлением пластических деформаций и трещин.
- Для нормальных сечений у края опоры:
 - в бетоне деформации растяжения достигают предельных значений у верхней грани плиты;
 - максимальные растягивающие напряжения достигают значений $f_{ct} = 1,8$ МПа, тогда $\epsilon = f_{ct} / E = 1,83/3,7 \cdot 10^5$, следовательно, гипотеза плоских сечений будет нарушена;
 - напряжения в стальной арматуре достигают максимальных значений $f_y = 228$ МПа (см. табл. 3), что составляет 63 % ($228/364 = 63\%$) от предела прочности стали.

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

4. Необходимо обратить внимание на то, что трещины, возникающие в бетоне нижней части плиты КНЭСК, защищены от агрессивного воздействия окружающей среды благодаря внешнему листовому армированию.

5. Таким образом, использование сталежелезобетонной плиты КНЭСК целесообразно в конструкции проезжей части моста, так как она обладает рядом преимуществ, таких как высокая несущая способность, долговечность, высокие эксплуатационные качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Композитный несущий элемент строительных конструкций: пат. 4082 Респ. Беларусь, МПК7 Е 04С 2/28 / И.М. Кузменко, В.М. Фридкин, А.В. Носарев, С.К. Павлюк, А.В. Семенов, В.А. Попковский, А.А. Филатенков; заявитель Могилев. Машиностр. ин-т. – № 970421; заявл. 97.07.29; опубл. 01.09.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2001. – № 2. – С. 104.
2. Композитный несущий элемент строительных конструкций: пат. 2181406 Рос. Федер., МПК7 Е 04С 2/28 / И.М. Кузменко, В.М. Фридкин, А.В. Носарев, С.К. Павлюк, А.В. Семенов, В.А. Попковский, А.А. Филатенков; заявитель Могилев. Машиностр. ин-т. – № 970421; заявл. 97.07.29; опубл. 01.09.30.
3. Применение сварных несущих элементов в новых композитных строительных конструкциях / И.М. Кузменко [и др.] // Сварочное производство. – Могилев, 2003. – 223 с.
4. Инженерно-экологические и конструктивно-технологические проблемы создания инженерных барьеров при долговременном хранении и окончательном захоронении отработавшего ядерного топлива в недрах Земли / В.М. Фридкин [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – № 4. – Изд-во Моск. гос. горного ун-та. – М., 2005. – 124 с.
5. Новые возможности создания инженерных сооружений для обеспечения экологической и антитеррористической безопасности промышленной утилизации некоторых видов технической продукции: сб. ст. междунар. науч.-техн. конгр. по безопасности, Москва, ноябрь 2005 г. / С.А. Чесноков [и др.]. – М., 2005. – 345 с.
6. Фридкин, В.М. Принципы формообразования в теории линейно-протяженных сооружений / В.М. Фридкин. – М.: Изд-во «Ладья», 2006. – 510 с.
7. Мосты и трубы: СНиП 2.05.03-84 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 215 с.
8. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.

Поступила 28.09.2007