



## МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТАЛЕБЕТОННЫХ БАЛОК

**В. В. Веселов<sup>1</sup>, А. М. Фёдоров<sup>2</sup>**

*ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I»,*

*9, пр. Московский, Санкт-Петербург, Россия, 190031.*

*E-mail: <sup>1</sup>veselov.1977@inbox.ru, <sup>2</sup>Afedorov298@yandex.ru*

*Получена 26 марта 2018; принята 25 мая 2018.*

**Аннотация.** В статье рассматриваются сталебетонные балки пролетных строений мостов, выполнен анализ напряженно-деформированного состояния сталебетонной балки различными методами, в т. ч. с применением программно-вычислительного комплекса SCAD. Предлагается к применению неразрезная комбинированная балка, состоящая из замкнутого стального контура, образованного двумя стальными стенками криволинейного очертания, верхнего и нижнего поясов с заполнением контура бетоном в сжатой части сечения. Современные Нормы не предлагают однозначного варианта расчета сталебетонной балки замкнутого контура произвольной формы, заполненного внутри бетоном. Расчет сталебетонных балок, как элементов разнородной упругости позволяет установить значения напряжений при минимальных трудозатратах и небольшой погрешности. Использование комбинированных сталебетонных конструкций в качестве пролетного строения мостового сооружения позволяет значительно снизить местные напряжения, как в бетоне, так и стальной оболочке, а также увеличить изгибную и крутильную жесткости сталебетонной балки, существенно повысить местную устойчивость стальных элементов балки.

**Ключевые слова:** мостовые сооружения, сталебетонные конструкции, неразрезная балка, напряженно-деформированное состояние, методы расчета.

## МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕБЕТОННИХ БАЛОК

**В. В. Веселов<sup>1</sup>, О. М. Федоров<sup>2</sup>**

*ФДБОУ ВО «Петербургський державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра І»,  
9, пр. Московський, Санкт-Петербург, Росія, 190031.*

*E-mail: <sup>1</sup>veselov.1977@inbox.ru, <sup>2</sup>Afedorov298@yandex.ru*

*Отримана 26 березня 2018; прийнята 25 травня 2018.*

**Анотація.** У статті розглядаються сталебетонні балки прогонових будов мостів, виконаний аналіз напружено-деформованого стану сталебетонної балки різними методами, у т. ч. із застосуванням програмно-обчислювального комплексу SCAD. Пропонується до застосування нерозрізна комбінована балка, що складається із замкнутого залізного контура, утвореного двома сталевими стінками криволінійного обрису, верхнього і нижнього поясів із заповненням контура бетоном в стислій частині перерізу. Сучасні Норми не пропонують однозначного варіанта розрахунку сталебетонної балки замкнутого контура довільної форми, заповненого всередині бетоном. Розрахунок сталебетонних балок як елементів різнорідної пружності дозволяє встановити значення напружень при мінімальних затратах і невеликій похибці. Використання комбінованих сталебетонних конструкцій як прогону мостової споруди дозволяє значно знизити місцеві напруження як в бетоні, так і сталевій оболонці, а також збільшити згинальну і крутильну жорсткість сталебетонної балки, істотно підвищити місцеву стійкість сталевих елементів балки.

**Ключові слова:** мостові споруди, сталебетонні конструкції, нерозрізна балка, напружено-деформований стан, методи розрахунку.

## CALCULATION METHODS OF COMPOSITE BEAMS MADE OF STEEL AND CONCRETE

Vitaly Veselov<sup>1</sup>, Aleksandr Fedorov<sup>2</sup>

*Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,  
9, Moskovsky pr., St. Petersburg, Russia, 190031.*

*E-mail: <sup>1</sup>veselov.1977@inbox.ru, <sup>2</sup>Afedorov298@yandex.ru*

*Received 26 March 2018; accepted 25 May 2018.*

**Abstract.** The article considers a composite beam made of steel and concrete for span structures of bridges, analysis of the stress-strain state of a steel-concrete beam by various methods, incl. usage of the software system Structure CAD Office for structural analysis and design. It has been suggested to use a multi-span continuous beam consisting of a closed steel contour formed by two walls of curvilinear contour, upper and lower belts of the beam, with filling of the contour with concrete in a compressed section of the beam. Current Standards do not offer single-valued method of calculation of a composite beam made of steel and concrete of a closed contour of an arbitrary shape filled with concrete. Calculations of the a composite beam made of steel and concrete as elements of heterogeneous elasticity allows to calculate the stress values with minimal effort and small measurement error. Usage of the composite structures made of steel and concrete for spun structures of bridges allows to significantly reduce the local stresses in concrete and in steel shell, also it allows to increase the bending and torsional rigidity of the beam, significantly increase local sustainability of steel elements.

**Keywords:** bridge structures, composite beam made of steel and concrete, multi-span beam, stress-strain state, methods of calculation.

### Введение

В настоящее время в мостовых сооружениях все большее применение получают комбинированные конструкции (сталебетонные и сталежелезобетонные), что в т. ч. актуально с развитием скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта [1]. Конструктивные решения комбинированных конструкций могут быть весьма разнообразны [2], [3] и достаточно активно используются в зарубежной практике строительства [4]. Применение сталебетонных балок весьма перспективно и позволит компенсировать недостатки традиционных конструкций пролетных строений мостов. В мостовых конструкциях с применением железобетонных балок существенной проблемой является образование и раскрытие трещин [5], в стальных балках также отмечается появление трещин, что связано с усталостными разрушениями [6].

Рациональность сталебетонных балок достигается за счет замкнутого контура балки, максимального использования прочностных характеристик бетона и других преимуществ, характерных для сталебетонных конструкций [7]. Преимущества сталебетонных балок в т. ч. подтверждаются экспериментально [8].

Так, например, конструкция сталебетонной балки пролетного строения моста (рис. 1), запатентованная авторами [9], имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными конструкциями металлических и железобетонных пролетных строений мостовых сооружений [3]. Такие балки будут весьма актуальны в пролетных строениях железнодорожных мостов, к которым предъявляются особые требования по обеспечению безопасности и комфортности движения пассажирского поезда через ограничения вертикальной жесткости пролётных строений [10, 11].

Однако методы оценки напряженно-деформированного состояния таких конструкций, а также прочностные расчеты недостаточно развиты в современных Норммах.

### Постановка задачи исследования

Существующие нормы предлагают методы расчета сталебетонных и сталежелезобетонных балок в зависимости от их конструктивного решения. СП «Конструкции сталежелезобетонные» [12] не предлагают однозначного варианта расчета сталебетонной балки замкнутого контура произвольной формы, заполненного внутри бе-

тоном. Проблемы аналогичного характера имеются и в зарубежных Норммах [13].

Оценка напряженно-деформированного состояния сталебетонной балки в общем случае может производиться несколькими способами:

- расчет балки как элемента разнородной упругости [14];
- расчет сталебетонной балки согласно положениям СП [12];
- расчет балки, состоящей из двух стержней, объединенных жесткими вставками;
- программный расчет объемно-пространственной модели, например, в программно-вычислительном комплексе SCAD.

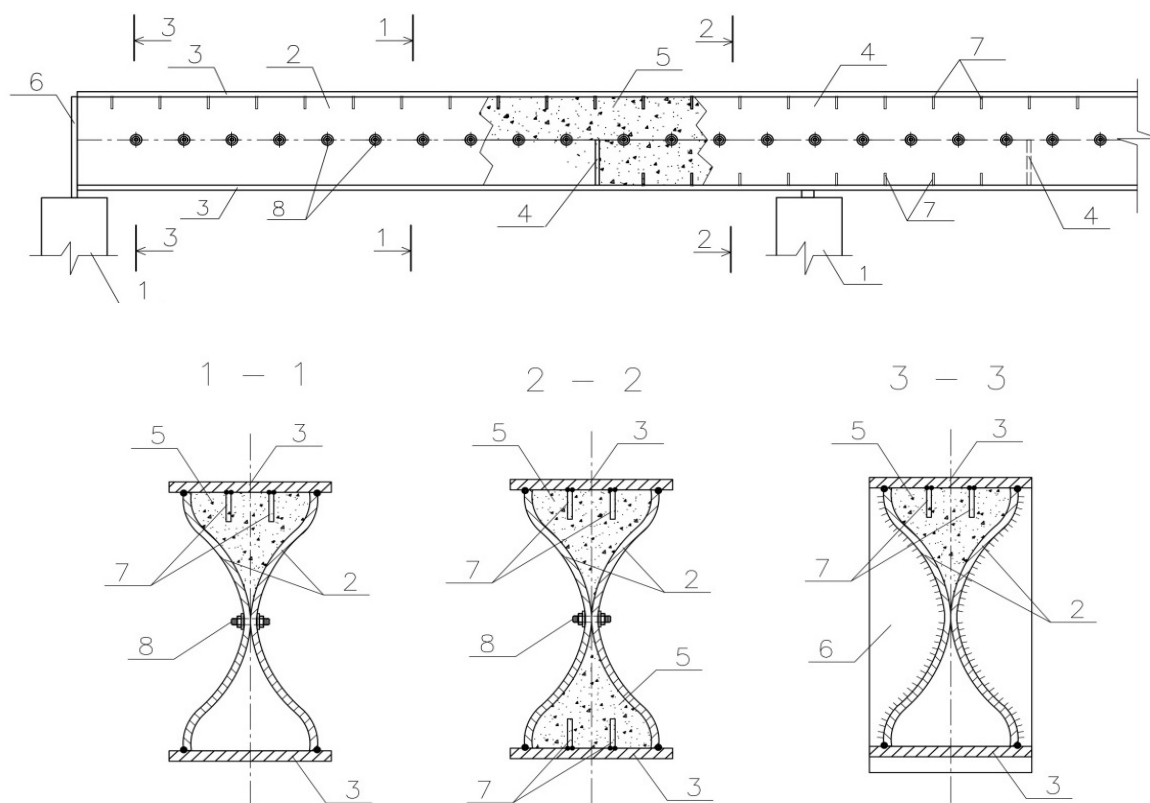
Для анализа работы сталебетонного элемента принята однопролетная разрезная балка типового пролета  $L = 30$  м. Балка состоит из замкнутого стального контура, образованного двумя стальными стенками криволинейного очертания, верхнего и нижнего поясов с заполнением контура бетоном в сжатой части сечения (рис. 1).

Согласно положениям СП «Мосты и трубы» [15] минимальная необходимая ширина сечения

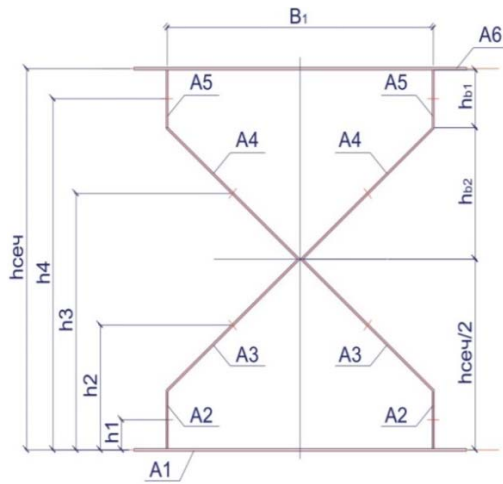
балки составит  $B_1 = 1\,520 + 80 = 1\,600$  мм. Высота сечения балки принимается конструктивно из условия изгибной жесткости  $h_{сеч} = 2$  м, толщина стенок предварительно принята 12 мм, поясов – 14 мм. Для расчета балки сложная криволинейная форма бетонного заполнения приводится к упрощенной эквивалентной форме (рис. 2), максимальная ширина бетонного заполнения верхней части сечения составляет 1 600 мм, а высота  $h_{b1} = 300$  мм.

В качестве постоянной нагрузки принята нагрузка от собственного веса балки с железобетонным полотном  $q_{пост.} = 245,4$  кН/м. Полезная нагрузка принята действующей от подвижного железнодорожного состава класса С14. В качестве подвижного состава выбран двухсистемный электропоезд «ЭМ» (Ласточка) с максимальной нагрузкой на ось  $P = 200$  кН (20,39 тс).

Определение значения эквивалентной равномерно распределенной полезной нагрузки производится по методике, изложенной в СП «Мосты и трубы» [15]. Таким образом, нормативное значение эквивалентной равномерно распределенной



**Рисунок 1.** Конструкция сталебетонной балки: 1 – опора, 2 – стенка, 3 – пояс, 4 – ребро, 5 – бетон, 6 – опорное ребро, 7 – упоры, 8 – стяжные шпильки.



**Рисунок 2.** Геометрические параметры балки для расчета.

нагрузки составит  $q_n = 160,5$  кН/м, а расчетная нагрузка с учетом коэффициента динамичности –  $q = 208,7$  кН/м. Тогда максимальные значения изгибающего момента и поперечной силы в балке составят  $M_{\max} = 28\,575$  кНм,  $Q_{\max} = 3\,810$  кН.

Основные характеристики материалов и сечений, принятые в расчете:

– модули упругости стали и бетона

$$E_s = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}, E_b = 0,325 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

– площади сечения стальной и бетонной частей  $F_s = 0,121 \text{ м}^2$ ,  $F_b = 1,04 \text{ м}^2$ .

### 1. Расчет балки как элемента разнородной упругости

Балка разнородной упругости – балка, у которой отдельные группы волокон имеют различные модули упругости [14]. В данном случае балка состоит из бетонных и стальных групп волокон.

Расчет сечения балки разнородной упругости сводится к определению напряжений, действующих в приведенном к выбранному материалу сечении. После определения общего напряженного состояния приведенного сечения производится вычисление напряжений, действующих в элементах сечения с разнородной упругостью, с построением эпюр.

Приведение сечения балки производится к стали.

Приведенная к стали площадь сечения:

$$F_{np}^s = F_s + F_b \cdot \frac{E_b}{E_s} = 0,285 \text{ м}^2; \quad (1)$$

статический момент приведенного к стали сечения относительно верха сечения:

$$\begin{aligned} S_s^{np} &= S_s + S_b \cdot \frac{E_b}{E_s} = \\ &= F_s \cdot \frac{h}{2} + F_b \cdot h_b \cdot \frac{E_b}{E_s} = 0,177 \text{ м}^3, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $h_b$  – расстояние от центра тяжести бетонной части сечения до верхней части приведенного сечения,  $h_b = S_b / F_b = 0,356$  м;

расстояние от центра тяжести приведенного сечения к стали до верхней части балки:

$$a = \frac{S_s^{np}}{F_{np}^s} = 0,621 \text{ м}; \quad (3)$$

момент инерции приведенного сечения балки относительно центра тяжести:

$$I_{np}^s = I_s + I_b \cdot \frac{E_b}{E_s} = 0,11356 \text{ м}^4, \quad (4)$$

где  $I_s = 0,093123 \text{ м}^4$ ,  $I_b = I_{b1} + I_{b2} = 0,1296 \text{ м}^4$ .

Далее можно построить эпюры нормальных напряжений для стальной и для бетонной частей сечения (рис. 3).

Нормальные напряжения в уровне верхней части сечения:

$$\sigma_{s-}^{1-1} = \frac{M_z}{I_{np}^s} \cdot y_{1-1} = 156,26 \text{ МПа}; \quad (5)$$

– нормальные напряжения в уровне нижней части сечения:

$$\sigma_{s+}^{4-4} = \frac{M_z}{I_{np}^s} \cdot y_{4-4} = 346,99 \text{ МПа}; \quad (6)$$

– напряжения равны в уровне нижней части бетонной части сечения:

$$\sigma_{b+}^{3-3} = \frac{M_z}{I_{np}^s} \cdot y_{3-3} \cdot \frac{E_b}{E_s} = 3,14 \text{ МПа}; \quad (7)$$

– напряжения в уровне сопряжения прямоугольного и треугольного участков бетонной части сечения:

$$\sigma_{b-}^{2-2} = \frac{M_z}{I_{np}^s} \cdot y_{2-2} \cdot \frac{E_b}{E_s} = 12,74 \text{ МПа}; \quad (8)$$

– напряжения в уровне верхней части бетонной части сечения:

$$\sigma_{b-}^{1-1} = \frac{M_z}{I_{np}^s} \cdot y_{1-1} \cdot \frac{E_b}{E_s} = 24,65 \text{ МПа.} \quad (9)$$

## 2. Расчет сталебетонной балки согласно положениям СП 266.1325800.2016

Методики расчета сталебетонных конструкций с использованием бетона в замкнутом контуре, образованном двумя стенками и верхним поясом, не существует в СП [12]. В указанном своде правил существуют положения по расчету конструкций, близких к данному типу.

Одним из близких по типу являются трубобетонные изгибаемые конструкции, однако методику расчета таких конструкций невозможно использовать в связи с различием конструктивной формы и устройства балок.

Другой тип конструкций – комбинированные балки с использованием прокатных или сварных стальных двутавров и железобетонных плит, выполненных по профилированному стальному настилу, объединенному со стальными балками [12].

Работа сталебетонной балки, рассматриваемой в данном расчете, устроена по аналогичному принципу, однако бетон располагается в пределах сечения балки, а не устраивается по верхнему поясу. Расчет производится в соответствии с положениями раздела 6.2.1 (п. 6.2.1.5) [12].

Для определения границы сжатой зоны бетона сечения производится определение положения нейтральной оси приведенного сечения балки. С учетом наличия бетонной вставки только в верхней части сечения нейтральная ось сече-

ния сместится к верхнему поясу. В бетонной части сечения ниже нейтральной оси будут действовать растягивающие напряжения. Согласно положениям СП [12] бетон, находящийся в растянутом состоянии, в расчете не учитывается.

Если сечение стальной части балки не осесимметричное, то возможно возникновение ситуации, при которой нейтральная ось, несмотря на введение бетонной вставки, будет находиться ниже бетонной части сечения балки. Это значит, что бетонная часть сечения будет полностью находиться в сжатом состоянии.

Геометрические характеристики приведенного сечения приняты выше. Определение напряжений, действующих в верхнем и нижнем поясах балки, производится при условии, что бетон воспринимает сжимающее усилие:

$$N_b = A_{бсж} \cdot R_b.$$

Напряжение в верхнем поясе:

$$\sigma_{с.н.} = \frac{M - Z_{bst} \cdot N_b}{W_{fstе}} - \frac{N_b}{A_{st}} = 118,47 \text{ МПа,} \quad (10)$$

напряжение в нижнем поясе:

$$\sigma_{н.н.} = \frac{M - Z_{bst} \cdot N_b}{W_{fstн}} + \frac{N_b}{A_{st}} = 363,65 \text{ МПа,} \quad (11)$$

где  $W_{fstе}$  – момент сопротивления верхнего пояса стальной части сечения;

$W_{fstн}$  – момент сопротивления нижнего пояса стальной части сечения;

$Z_{bst}$  – расстояние между центром тяжести сечения стальной части сечения и центром тяжести сечения сжатой бетонной части сечения;

$A_{st}$  – площадь стальной части сечения балки.

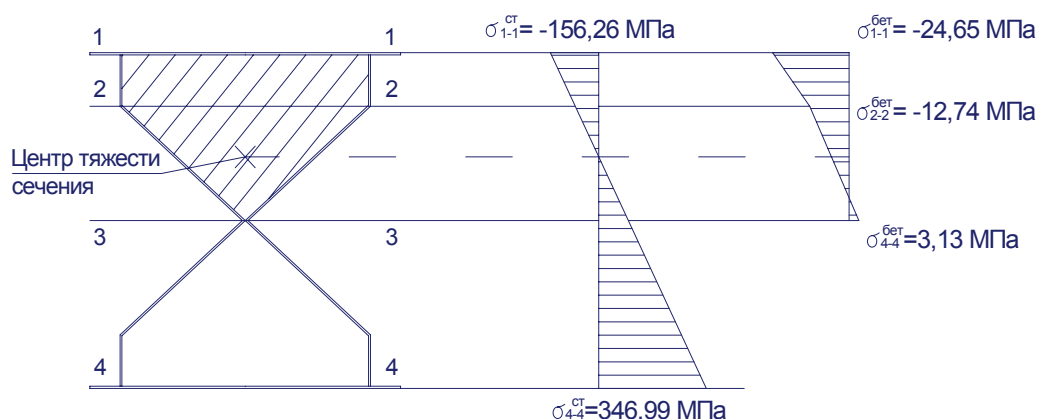


Рисунок 3. Эпюра нормальных напряжений в сечении балки.

### 3. Расчет балки, состоящей из двух стержней, объединенных жесткими вставками

Расчет сталебетонной балки как элемента, состоящего из нескольких стержней, основывается на положении, что бетонная часть сечения воспринимает преимущественно сжимающие напряжения, т. е. работает как внецентренно сжатый элемент, а металлическая балка – как внецентренно растянутый элемент.

Бетонная часть сечения, расположенная ниже нейтральной оси, в данном случае не рассматривается, так как ее наличие не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние системы.

Нейтральная ось приведенного сечения проходит на расстоянии  $a = 0,621$  м от верха сечения. Для определения внутренних усилий, действующих во внецентренно сжатом и внецентренно растянутом стержнях, производится построение расчетной модели в программно-вычислительном комплексе SCAD. Особенность данной расчетной модели заключается в том, что внецентренно сжатый и внецентренно растянутый стержни соединены между собой жесткими вставками. Расстояние вводимой жесткой вставки равно расстоянию между центрами тяжести поперечного сечения внецентренно сжатого и внецентренно растянутого стержней.

Для определения величины жесткой вставки производится вычисление положения центров тяжести сечения для внецентренно сжатого внецентренно растянутого частей сечения (рис. 4).

Основные параметры материалов и сечений:

- модули упругости стали и бетона
- $E_s = 2,06 \cdot 10^5$  МПа,  $E_b = 0,325 \cdot 10^5$  МПа;
- площади сечения стальной и бетонной частей  $F_s = 0,121$  м<sup>2</sup>,  $F_b = 1,04$  м<sup>2</sup>;
- моменты инерции сечения стальной и бетонной частей  $I_b = 0,05425$  м<sup>4</sup>,  $I_s = 0,0757$  м<sup>4</sup>;
- центры тяжести стального и бетонного сечений относительно верхней грани сечения

$$h_s = 1,0 \text{ м}, h_b = 0,352 \text{ м}.$$

Расстояние между центрами тяжести сечения внецентренно сжатого и внецентренно растянутого сечений составляет  $h = 0,644$  м. Расчетная модель балки сформирована в программно-вычислительном комплексе SCAD и определены усилия в стальном и бетонном элементах:

$$M_s = 19168,12 \text{ кНм}, N_s = 11239,95 \text{ кН};$$

$$M_b = 2168,37 \text{ кНм}, N_b = -11239,95 \text{ кН}.$$

Нормальные напряжения в уровне верхнего пояса стального стержня:

$$\sigma_{s-} = \frac{N_{\text{прод}}^{\text{расч}}}{F_s} - \frac{M_{\text{изг}}^{\text{расч}}}{I_s} \cdot y = -160,32 \text{ МПа}. \quad (12)$$

Нормальные напряжения в уровне нижнего пояса стального стержня:

$$\sigma_{s+} = \frac{N_{\text{прод}}^{\text{расч}}}{F_s} + \frac{M_{\text{изг}}^{\text{расч}}}{I_s} \cdot y = 346,1 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Нормальные напряжения в уровне верхней части сечения бетонного стержня:

$$\sigma_{b-} = \frac{N_{\text{прод}}^{\text{сж}}}{F_b} - \frac{M_{\text{изг}}^{\text{сж}}}{I_b} \cdot y = -25,08 \text{ МПа}. \quad (14)$$

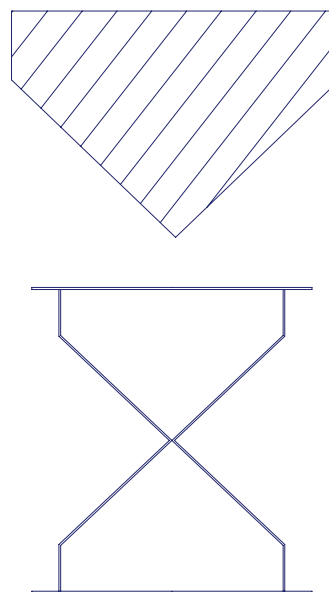
Нормальные напряжения в уровне нижней части сечения бетонного стержня:

$$\sigma_{b+} = \frac{N_{\text{прод}}^{\text{сж}}}{F_b} + \frac{M_{\text{изг}}^{\text{сж}}}{I_b} \cdot y = 14,89 \text{ МПа}. \quad (15)$$

Привязка центра тяжести сечения бетонного стержня относительно оси балки:

$$y = \frac{N_{\text{прод}}^{\text{сж}} \cdot I_b}{F_b \cdot M_{\text{изг}}^{\text{сж}}} = -0,2754 \text{ м}. \quad (16)$$

Таким образом, нейтральная ось сечения проходит на расстоянии 0,627 м от верхней грани сечения внецентренно сжатого стержня.



**Рисунок 4.** Сечения внецентренно сжатого стержня и внецентренно растянутого стержней балки.

#### 4. Программный расчет объемно-пространственной модели в проектно-вычислительном комплексе SCAD

Для построения пространственной модели сталебетонной балки приняты характеристики сечения, установленные выше.

Модель балки состоит из стенки, выполненной из двух листов, верхнего и нижнего поясов, которые в расчетной модели заданы пластинчатыми конечными элементами с ячейкой до  $0,1 \times 0,1$  м и бетонного заполнения в верхней части сечения, выполненного объемными конечными элементами (рис. 5).

Нагрузка на балку передается по верхнему поясу сечения через два рельса. В качестве результатов расчета рассмотрены:

- вертикальная деформация балки;
- напряжения в нижнем и верхнем поясах балки;
- напряжения в бетонной части сечения.

Максимальная вертикальная деформация балки составляет  $f = -119,3$  мм, максимальное напряжение, действующее в верхнем поясе, составляет  $\sigma_{в.п.} = -157,19$  МПа, максимальное напряжение, возникшее в нижнем поясе, составляет  $\sigma_{н.п.} = 339,8$  МПа (рис. 6, 7). В бетонной части сечения действуют напряжения в диапазоне от 14,62 до  $-24,11$  МПа.

Также был выполнен анализ местных напряжений в стальной стенке сталебетонной балки для нагрузки от оси электропоезда «ЭМ» (Ласточка) с максимальной нагрузкой на ось состава

$P = 200$  кН (20,39 тс). На рельс действует сосредоточенная нагрузка от 1-го колеса оси, равная 100 кН. Максимальное местное напряжение, действующее в стенке, составило  $\sigma_{loc} = 14,1$  МПа, в бетонной части сечения действуют местные напряжения до 0,4 МПа (рис. 8, 9), что свидетельствует об отсутствии значительной концентрации напряжений как в бетоне, так и стальной оболочке.

Результаты расчетов сталебетонной балки по разным методикам представлены в таблице.

#### Результаты исследования

Получены результаты статического расчета пространственной модели сталебетонной балки пролетного строения моста в ПВК SCAD. Они являются максимально достоверными, так как в ней учитывается пространственная работа системы объемных бетонных и пластинчатых стальных элементов. Расчет и построение данной модели являются весьма трудозатратными, однако результаты расчета позволяют достаточно полно анализировать напряженно-деформированное состояние на любом участке балки.

Результаты расчета рассмотренной сталебетонной балки по положениям СП «Конструкции сталежелезобетонные» [12] как балки, состоящей из стального двутавра и железобетонной плиты, выполненной по верхнему поясу балки, имеют существенные отклонения от результатов статического расчета пространственной модели в ПВК SCAD. Поэтому применение данной методики для расчета сталебетонных балок замкнутого контура с заполнением бетоном не представляется возможным.

Расчет сталебетонной балки как элемента, состоящего из внецентренно сжатого и внецентренно растянутого стержней, объединенных жесткими вставками, позволяет достаточно точно получить усилия в стальном и бетонном элементе по отдельности, проанализировать деформации системы при небольших трудозатратах формирования расчетной модели. Значения полученных напряжений имеют отклонения от результатов в пространственной модели в ПВК SCAD до 5 %.

Расчет системы как балки разнородной упругости позволяет установить значения напряжений

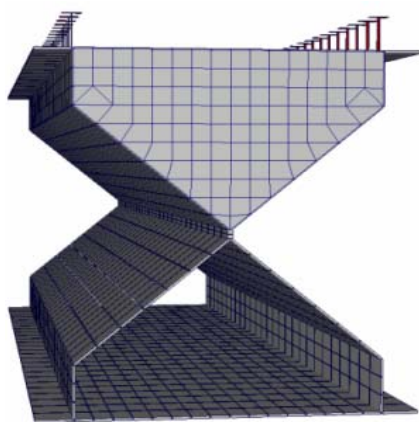


Рисунок 5. Расчетная модель сталебетонной балки (фрагмент).



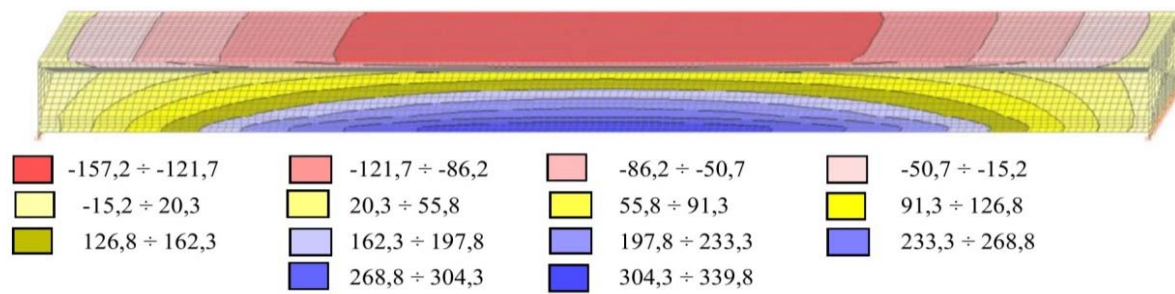


Рисунок 6. Напряжения в стальной части сталебетонной балки, МПа.

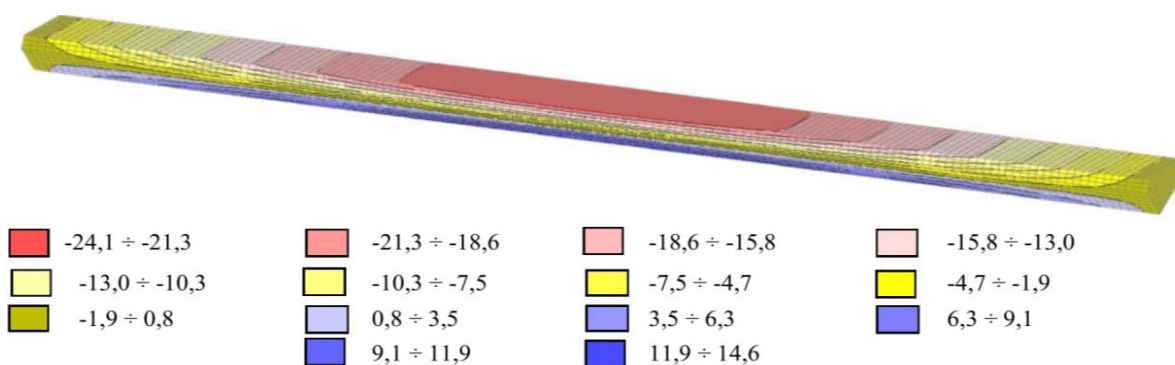


Рисунок 7. Напряжения в бетонной части сталебетонной балки, МПа.

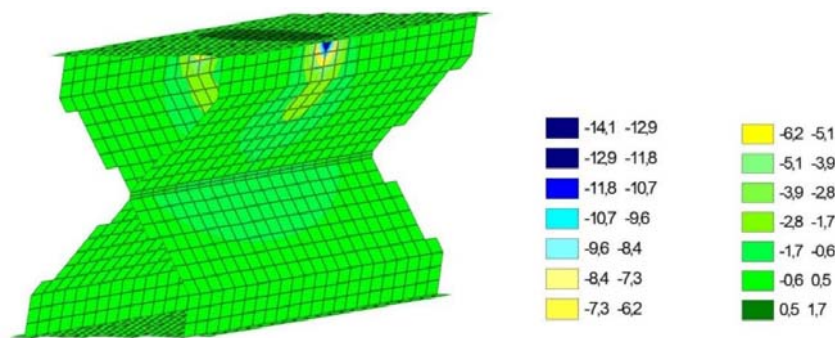


Рисунок 8. Местные напряжения в стальной части сталебетонной балки, МПа.

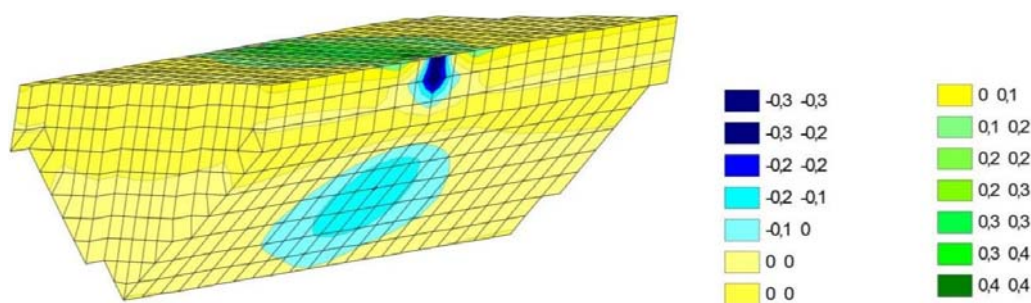


Рисунок 9. Местные напряжения в бетонной части сталебетонной балки, МПа.



Таблица. Результаты расчетов сталебетонной балки

№	Методика расчета	Напряжения, МПа			Прогиб, $f$ , мм
		$\sigma_{в.п.}$	$\sigma_{н.п.}$	$\sigma_{бет.}$	
1	Балка разнородной упругости	-156,26	347,0	-24,65÷3,13	—
2	Расчет балки по положениям СП 266.1325800.2016	118,47	363,6	-17	—
3	Расчет балки, состоящей из двух стержней, объединенных жесткими вставками	-160,32	346,1	-25,08÷14,89	-115,2
4	Пространственная модель балки	-157,19	339,8	-24,11÷14,62	-119,3

при минимальных трудозатратах. Значения полученных напряжений имеют отклонения от результатов в пространственной модели в ПК SCAD не более 2 %. Данный метод расчета может быть рекомендован как достаточно точный и наименее затратный при оценке напряженно-деформированного состояния сталебетонной балки.

Использование комбинированных сталебетонных конструкций в качестве пролетного строения мостового сооружения позволяет значительно снизить местные напряжения как в бетоне, так и стальной оболочке, а также увеличить изгибную и крутильную жесткости сталебетонной балки, существенно повысить местную устойчивость стальных элементов балки.

## Литература

1. Бушуев, Н. С. О перспективах развития высокоскоростных железнодорожных Магистралей в России [Текст] / Н. С. Бушуев, Д. О. Шульман // Бюл. результатов науч. исследований. – 2017. – Вып. 3. – С. 7–13.
2. Клименко, Ф. Є. Металеві конструкції [Текст] / Ф. Є. Клименко, В. М. Барабаш, Л. І. Стороженко; за ред. Ф. Є. Клименко. – 2-ге вид., випр. і доп. – Львів : Світ, 2002. – 312 с.
3. Веселов, В. В. Эффективность применения сталебетонных балочных конструкций [Текст] / В. В. Веселов // Строительные материалы, конструкции и сооружения XXI века : материалы I Международной научно-практической конференции. – СПб. : ПГУПС. – 2016. – С. 48.
4. Salmon, Ch. G. Handbook of composite construction Engineering. Ch.2: Composite steel-concrete construction [Текст] / Ch. G. Salmon. – New York, 1982. – P. 41–79.
5. Веселов, В. В. Эксплуатационная надежность пролетных строений мостов и пути ее повышения [Текст] / В. В. Веселов, А. М. Федоров // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения : материалы VIII Международной научно-практической конференции. – СПб. : ПГУПС, 2017. – С. 41–45.
6. Rossow, Mark P. FHWA Bridge Inspector's Manual. Sections 8.1–8.2. Federal Highway Administration [Электронный ресурс] / Mark P. Rossow. – Режим доступа: <https://pdhonline.com/courses/c482/FHWA Bridge Inspector's Manual Section 8-1&2.pdf>.

## References

1. Bushuyev, N. S. About the perspectives of development of the high-speed railroads in Russian Federation. In: *Bulletin of the results of scientific research*, 2017, Issue 3, pp. 7–13. (in Russian)
2. Klymenko, F. E.; Barabash, V. M.; Storozhenko, L. I. Metal constructions: Textbook. 2nd edition. and add. Lviv: Svit, 2002. 312 p. (in Ukrainian)
3. Veselov, V. V. Effectiveness of usage of the composite beam structures made of steel and concrete. In: *Building materials, constructions of the XXI century: materials of the 1st international scientific and practical conference*. St. Petersburg: St. Petersburg state University of railway engineering, 2016, p. 48. (in Russian)
4. Salmon, Ch. G. Handbook of composite construction Engineering. Ch. 2: Composite steel-concrete construction. New York, 1982, pp. 41–79.
5. Veselov, V. V.; Fedorov, A. M. Bridge superstructures operate reliability and methods of its improvement. In: *Inspection of buildings and structures: problems and their solutions: materials of the VIII International scientific and practical conference*. St. Petersburg: St. Petersburg state University of railway engineering, 2017, pp. 41–45. (in Russian)
6. Rossow, Mark P. FHWA Bridge Inspector's Manual. Sections 8.1–8.2. Federal Highway Administration. Mode of access: <https://pdhonline.com/courses/c482/FHWA Bridge Inspector's Manual Section 8-1 & 2.pdf>.
7. Kikin, A. I.; Sangarovskiy, R. S.; Trull V. A. Structures made of steel pipes filled with concrete. Moscow: Stroyizdat, 1974. 144 p. (in Russian)

7. Кикин, А. И. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном [Текст] / А. И. Кикин, Р. С. Санжаровский, В. А. Труль. – М. : Стройиздат, 1974. – 144 с.
8. Кришан, А. Л. Экспериментальное исследование прочности и жесткости сталебетонной балки [Текст] / А. Л. Кришан Д. И. Назаренко // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и дизайна : материалы Международной студенческой научной конференции института строительства, архитектуры и искусства. – Магнитогорск : МГТУ, 2014. – С. 208–210.
9. Веселов, В. В. Многопролетная несущая балка : пат. 176462. Российская Федерация, МПК E04C3/07, E04C3/293 [Текст] / В. В. Веселов, А. М. Фёдоров ; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I. – № 2017131968; заявл. 12.09.17; опубли. 19.01.18. – Бюл. № 2.
10. Козьмин, Ю. Г. Особенности динамического воздействия на мосты поездов, сформированных из однотипных вагонов [Текст] / Ю. Г. Козьмин, В. В. Кондратов // Вопросы статической и динамической работы, оценки грузоподъемности и эксплуатационной надежности мостов : межвуз. сб. науч. трудов. – Днепропетровск : Транспорт, 1988. – С. 167–173.
11. Dyachenko, L. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways [Электронный ресурс] / L. Dyachenko, A. Benin // Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND'2017 : MATEC Web Conf. – 24 May 2017. Vol. 107. P. 7. – Режим доступа: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/21/mateconf\\_dyn2017\\_00014/mateconf\\_dyn2017\\_00014.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/21/mateconf_dyn2017_00014/mateconf_dyn2017_00014.html).
12. СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования [Текст] / Минстрой России. – М., 2016. – 124 с.
13. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings [Текст] / European Committee for Standardization. – This European Standard was approved by CEN on 16 April 2004. – 227 p.
14. Дарков, А. В. Сопротивление материалов : учебник для ВТУЗов [Текст] / А. В. Дарков, Г. С. Шапиро. – Изд. 4-е. – М. : Высш. школа, 1975. – 654 с.
15. СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализир. ред. СНиП 2.05.03-84\* [Текст] / Минрегион России. – М., 2010. – 340 с.
8. Krishan, A. L.; Nazarenko, D. I. Experimental research of the strength and stiffness of the beam made of steel and concrete. In: *Actual problems of architecture, construction and design: materials of the International student scientific conference of the Institute of construction, architecture and art*. Magnitogorsk: MSTU, 2014, pp. 208–210. (in Russian)
9. Veselov, V. V.; Fedorov, A. M. Multispan load-carrying beam: pat. 176462 Russian Federation, IPC E04C3/07, E04C3/293; declarer and patent owner Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. №. 2017131968; Appl. 12.09.17; publ. 19.01.18, Bul. No. 2. 2 p. (in Russian)
10. Kozmin, Y. G.; Kondratov, V. V. Features of the dynamic impact on the bridges from the trains formed from the same type of wagons. In: *Items of static and dynamic work, estimation of the carrying capacity and the operational reliability of bridges: interuniversity collection of scientific works*. Dnepropetrovsk: Transport, 1988, pp. 167–173. (in Russian)
11. Dyachenko, L.; Benin A. An assessment of the dynamic interaction of the rolling stock and the long-span bridges on high-speed railways. In: *Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND'2017: MATEC Web Conf.* 24 May 2017. Volume 107. P. 7. Mode of access: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/21/mateconf\\_dyn2017\\_00014/mateconf\\_dyn2017\\_00014.html](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/21/mateconf_dyn2017_00014/mateconf_dyn2017_00014.html).
12. SP 266.1325800.2016. Composite steel and concrete structures. Design rules. Moscow, 2016. 124 p. (in Russian)
13. EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings / European Committee for Standardization. This European Standard was approved by CEN on 16 April 2004. 227 p.
14. Darkov, A. V.; Shapiro, G. S. Strength of materials: textbook for Higher educational institutions. Ed.4-th. Moscow: High. school, 1975. 654 p. (in Russian)
15. SP 35.13330.2011. Bridges and culverts. Updated revision SNiP 2.05.03-84\*. Moscow, 2010. 340 p. (in Russian)

**Веселов Виталий Владиславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Научные интересы: надежность строительных конструкций, подкрановые конструкции, сталебетонные конструкции.

**Фёдоров Александр Михайлович** – магистрант ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Научные интересы: мостовые сооружения, сталебетонные конструкции.

**Веселов Віталій Владиславович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних конструкцій ФДБОУ ВО «Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра I». Наукові інтереси: надійність будівельних конструкцій, підкранові конструкції, сталебетонні конструкції.

**Федоров Олександр Михайлович** – магістрант ФДБОУ ВО «Петербурзький державний університет шляхів сполучення Імператора Олександра I». Наукові інтереси: мостові споруди, сталебетонні конструкції.

**Veselov Vitaly** – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Building Constructions Department, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. Scientific interests: reliability of building structures, crane structures, and composite structures made of steel and concrete.

**Fedorov Aleksandr** – Master's student Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. Scientific interests: bridge structures, composite structures made of steel and concrete.