УДК 721.011:624.07

© В. Г. Темнов, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I)
E-mail: vgtemnov@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-75-83

© V. G. Temnov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State Transport University
named after Emperor Alexander I)
E-mail: vgtemnov@gmail.com

КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ АРХИТЕКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ ОБЪЕКТОВ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

STRUCTURAL AND POWER APPROXIMATION OF GEOMETRICAL FORMS OF ARCHITECTURAL FUNCTIONAL SPACES OF EXTERNAL ENVIRONMENT OBJECTS

Установлено, что каждой геометрической форме архитектурно-функционального пространства будущего объекта в скрытом виде соответствует своя силовая диаграмма, свое распределение внутренних сил, зависящих только от принятых кинематических граничных условий и метрических соотношений между генеральными параметрами пространства. Показано, что геометрические формы архитектурно-функциональных пространств позволяют априорно определять и изменять направление действия внешних сил на несущие конструктивные системы объектов среды обитания, вследствие чего проектирование в соответствии с их силовыми диаграммами открывает возможности создания в среде САПР равнопрочных конструктивных систем с минимальными энергетическими затратами. Предложена алгоритмическая модель конструктивно-силовой аппроксимации геометрических форм архитектурно-функциональных пространств объектов среды обитания.

Ключевые слова: архитектурно-функциональное пространство, среда обитания, конструкции бионического типа, система автоматизированного проектирования (САПР), напряженно-деформированное состояние (НДС), конструктивно-силовая аппроксимация геометрических форм, математическое программирование.

It is established that to each geometrical form of architectural and functional space of the future architectural object there corresponds, in a hidden form, its own power diagram and a distribution of internal forces depending only on the accepted kinematic boundary conditions and metric ratios between the general parameters of space. It is shown that geometrical forms of architectural and functional spaces allow a priori defining and changing the direction of external forces acting to the bearing constructive systems of objects of external environment. Therefore, the design according to their power diagrams ensures a possibility of creating in the CAD medium equally efficient constructive systems with the minimum energy consumption. There is offered an algorithmic model of constructive power approximation of geometrical forms of architectural and functional spaces of external environment objects.

Keywords: architectural and functional space, external environment, structures of bionic type, computer-aided design system (CAD), stress and strain state (SSS), structural and power approximation of geometrical forms, mathematical programming.

Пространство с позиции философии — одна из объективных форм существования материи, характеризующаяся протяженностью во всех направлениях, а также объемом.

Логически мыслимое пространство — это не только место, способное вместить различные

объекты, но и среда, в которой осуществляются различные формы жизни.

К такому пространству относится биосфера Земли, вмещающая различные естественные среды обитания живых организмов. Иерархическая структура сред обитания живых организ-

мов, предложенная автором [1], представлена на рис. 1.

1. Геометрические формы архитектурно-функциональных пространств

Первоосновой искусственной среды обитания являются утилитарные (лат. *utilitas* — польза) архитектурно-функциональные пространства с их многообразием форм. Под этими пространствами понимаются праксеологические модели эффективной деятельности людей (греч. *praktikos* — деятельный + *logos* — наука о рациональной деятельности людей), вмещающие технологическое оборудование, предметы средового наполнения.

В основе моделей этих пространств лежит создание нормативно упорядоченных материально-пространственных условий для осуществления жилой, общественной или производственной жизнедеятельности человека, органически свя-

занной с существующим на данный момент общественным укладом, экономикой, искусством, культурой, а также достижениями в области строительной техники.

Архитектурно-функциональные пространства основаны на измерении в прямоугольной системе координат и представлении в виде геометрических форм. С позиции геометрий Эвклида, Лобачевского, Римана эти пространства могут иметь сферическую, кубическую, цилиндрическую, гиперболическую, параболическую формы или иные, получаемые на основе их комбинаций.

При этом форма и структура утилитарного пространства должны выбираться из соображений практичности (пользы и прочности), комфорта и художественно-эстетического качества, с позиции архитектурного стиля (рис. 2).

Формируя утилитарное пространство, проектировщик не должен осуществлять простое

Рис. 1. Иерархическая структура сред обитания живых организмов

Рис. 2. Конструктивная аппроксимация архитектурно-функционального пространства: а — геометрическое построение пространства; б — мобильный дом на базе конструкции бионического типа (инж. В. Г. Темнов); в — бумажный дом (арх. Shigeru Ban [2])

арифметическое сложение полезности, прочности и красоты, а обязан интегрировать упомянутые факторы, влияющие на форму и структуру пространства на основе *социального, экологического, эстетического осмысления с учетом ресурсосбережения* [7].

Реальное возникновение и дальнейшее существование утилитарного пространства среды обитания непосредственно связаны с его материализацией несущими и ограждающими строительными конструкциями, которые не только выделяют и организуют это пространство, а в сочетании с ним определяют художественный образ создаваемого объекта среды обитания (рис. 3) [7].

2. Силовые диаграммы геометрических форм архитектурно-функциональных пространств

Каждой геометрической форме архитектурно-функционального пространства будущего объекта в скрытом виде соответствует своя силовая диаграмма, свое распределение внутренних сил

(моментов M , поперечных сил Q и продольных сил N), зависящих только от принятых кинематических граничных условий, метрических соотношений между генеральными параметрами пространства (длиной l , шириной b , высотой h), величины и направления действия внешних сил (активных P и реактивных R). Геометрические формы позволяют также априорно определять и изменять направление действия внешних сил на несущие конструктивные системы, аппроксимирующие архитектурно-функциональные пространства объектов среды обитания.

Для получения силовой диаграммы архитектурно-функционального пространства объекта среды обитания достаточно материализовать это пространство условной несущей конструктивной системой, составить ее расчетно-конструктивную схему и решить задачу определения напряженно-деформированного состояния (НДС).

Остановимся на несущей системе из перекрестных рамных конструкций, охватываю-

Рис. 3. Жилой и культурно-бытовой комплекс для лесозаготовителей Сибири, разработанный на основе бионических конструкций (арх. Ю. С. Лебедев, инж. В. Г. Темнов, дизайнер Е. Н. Поляков [3])

щих геометрическое построение архитектурно-функционального пространства объекта среды обитания (рис. 4).

Определим НДС несущей конструктивной системы, подверженной силовым воздействиям от нагрузки q , равномерно распределенной по верхней части поверхности пространства (см. рис. 4, в).

Задача строительной механики, связанная с определением действительного напряженного состояния на основе энергетических экстремальных принципов, достовернее всего отражает физический смысл НДС конструктивных систем. Один из таких принципов сформулирован Кастильяно и Дж. Майером [4]. Согласно этому принципу при действии на конструктивную систему внешних сил, вызванных заданными нагрузками, из всех возможных равновесных состояний в ней устанавливается то, при котором потенциальная энергия деформаций принимает минимальное значение.

Математическая модель задачи определения НДС конструктивной системы, сформулированная согласно вышеприведенному экстремальному принципу, имеет вид:

$$W(X) = \frac{1}{2}(DX, X) + (C, X) \rightarrow \min \quad (2.1)$$

при ограничениях

$$A \cdot X = P, \quad (2.2)$$

$$X \leq Z^{(+)}, \quad (2.3)$$

$$-X \leq Z^{(-)}, \quad (2.4)$$

где X — искомый вектор усилий; C — заданный вектор дополнительных усилий, которые могут быть вызваны температурными изменениями, осадками оснований или созданы в результате преднапряжения конструктивной системы; $Z^{(+)}$, $Z^{(-)}$ — векторы пределов текучести соответствен-

но на растяжение и сжатие; D — заданная положительно определенная матрица податливости системы; A — заданная матрица условий равновесия.

Математическая модель (2.1)–(2.4) представляет собой задачу определения НДС конструктивных систем в общем виде, где целевая функция в виде квадратичной формы (2.1) выражает обобщенную потенциальную энергию деформации конструктивной системы; система алгебраических уравнений (2.2) отражает условия равновесия конструктивной системы; неравенства (2.3)–(2.4) представляют условия, учитывающие физические свойства материалов.

Поскольку матрица податливости D является положительно определенной, то $W(X)$ является строго выпуклой вниз функцией цели. Ограничения (2.2)–(2.4) вследствие их линейности образуют выпуклую область. Отсюда согласно теории математического программирования задача (2.1)–(2.4) имеет единственное решение, если только допустимая область, хотя бы и неограниченная, не пуста.

В результате решения задачи (2.1)–(2.4) получаем развернутую диаграмму распределения внешних силовых воздействий (активных и реактивных сил) и внутренних усилий (моментов M , поперечных сил Q и продольных сил N) относительно конкретного архитектурно-функционального пространства (рис. 5).

3. Конструирование несущих систем в соответствии с силовыми диаграммами геометрических форм архитектурно-функциональных пространств

Диаграммы распределения внешних силовых воздействий (активных и реактивных сил) и внутренних усилий относительно конкретного

Рис. 4. Процесс материализации архитектурно-функционального пространства условной несущей конструктивной системой: а — геометрическое построение пространства; б — дизайн внутреннего пространства; в — система перекрестных рамных конструкций, охватывающих исходное архитектурное пространство

Рис. 5. Развернутая диаграмма распределения внешних силовых воздействий (активных и реактивных сил) и внутренних усилий относительно конкретного архитектурно-функционального пространства: а — эпюра M ; б — эпюра Q ; в — эпюра N

архитектурно-функционального пространства позволяют получать *несущие конструкции равного сопротивления*, то есть конструкции, в каждом поперечном сечении которых максимальные напряжения одинаковы.

Остановимся на отдельной конструкции из числа принятых в расчетно-конструктивной схеме (рис. 6) и на ее основе определим геометрические параметры поперечных сечений и объем конструкции (балки) равного сопротивления.

Итак, однопролетная балка с обоими защемленными концами, постоянного прямоугольного сечения, пролетом l подвержена действию внешней равномерно распределенной нагрузки q (рис. 6, а).

Определим усилия в балке и построим эпюры M_x и Q_y . Для этого достаточно провести сечение на расстоянии z от начала координат и рассмотреть равновесие отсеченной части балки (рис. 6, б), учитывая величины реакций опор

$$R_A = R_B = \frac{ql}{2}; M_A = M_B = \frac{ql^2}{12}; H = 0.$$

После этого составить уравнения равновесия:

$$\Sigma M_x = 0;$$

$$M_A - R_A \cdot z + \frac{qz^2}{2} - M_x = \frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2} - M_x = 0;$$

$$\Sigma Y = 0, R_A - qz = \frac{1}{2}q(l - z) = 0$$

и в результате их решения получить искомые функции:

$$M_x(z) = \frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2} \text{ и } Q_y(z) = \frac{ql}{2} - qz. \quad (3.1)$$

Графики изменения этих функций по длине конструкции (эпюры усилий Q_y, M_x) представлены в таблице.

Определим меняющиеся по длине конструкции геометрические параметры $b(z)$ и $h(z)$ поперечных сечений $F(z)$ и ее объем V . Для этого воспользуемся полученными функциями $M_x(z)$, $Q_y(z)$ и условием равнопрочности [5]:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x(z)}{W_x(z)} = \text{const} = [\sigma], \quad (3.2)$$

здесь $\sigma_{\max}$, $[\sigma]$ — соответственно максимальные и допускаемые напряжения в поперечном сечении балки; $W_z = \frac{F(z)h(z)}{6} = \frac{b(z)h^2(z)}{6}$ — момент сопротивления площади прямоугольного поперечного сечения $F(z)$.

После подстановки в уравнение (3.2) величин M_x и W_x условие равнопрочности можно представить в трех вариантах:

$$\sigma_{\max} = 6 \left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2} \right) / b(z)h^2(z) = [\sigma], \quad \text{при } b = \text{const}; \quad (3.3)$$

$$\sigma_{\max} = 6 \left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2} \right) / b(z)h^2(z) = [\sigma], \quad \text{при } h = \text{const}; \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\max} = 6 \left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2} \right) / b(z)h^2(z) = [\sigma], \quad \text{при } b/h = c = \text{const}. \quad (3.5)$$

Теперь из условия равнопрочности (3.3) при $b = \text{const}$ установим зависимость изменения высоты h_z по длине равнопрочной балки:

$$h_z = \sqrt{6M_x / b[\sigma]} = \sqrt{6\left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2}\right) / b[\sigma]} \quad (3.6)$$

и покажем характерные величины h_z при

$$\left. \begin{aligned} z=0, h_0 &= \sqrt{ql^2 / 2b[\sigma]}; \\ z=l, h_l &= \sqrt{ql^2 / 2b[\sigma]}; \\ z=l/2, h_{l/2} &= \sqrt{ql^2 / 4b[\sigma]}. \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

На рис. Т1 (см. таблицу) представлена равнопрочная конструкция с защемленными концами, у которой по длине l ширина сечения b_z постоянная, а высота h_z переменная.

Из условия равнопрочности (3.4) при $h = \text{const}$ установим зависимость изменения b_z по длине равнопрочной балки:

$$b_z = 6M_x / h_z^2 [\sigma] = 6\left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2}\right) / h_z^2 [\sigma] \quad (3.8)$$

и покажем характерные величины b_z при

$$\left. \begin{aligned} z=0, b_0 &= ql^2 / 2h_z^2 [\sigma]; \\ z=l, b_l &= ql^2 / 2h_z^2 [\sigma]; \\ z=l/2, b_{l/2} &= ql^2 / 4h_z^2 [\sigma]. \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

На рис. Т2 (см. таблицу) представлена равнопрочная конструкция с защемленными концами,

у которой по длине l высота h_z постоянная, а ширина сечения b_z переменная.

Теперь из условия равнопрочности (3.5)

$$\sigma_{\max} = 6\left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2}\right) / b(z)h^2(z) = [\sigma],$$

при $b/h = c = \text{const}$ установим зависимости изменения h_z и b_z по длине равнопрочной балки:

$$h_z = \sqrt[3]{6M_x / c[\sigma]} = \sqrt[3]{6\left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2}\right) / c[\sigma]} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} b_z &= \sqrt[3]{6M_x c^2 / [\sigma]} = \\ &= \sqrt[3]{6c^2\left(\frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2}\right) / [\sigma]}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Покажем характерные величины h_z и b_z при

$$\left. \begin{aligned} z=0, h_0 &= \sqrt[3]{ql^2 / 2c[\sigma]}; b_0 = \sqrt[3]{ql^2 c^2 / 2[\sigma]}; \\ z=l, h_l &= \sqrt[3]{ql^2 / 2c[\sigma]}; b_l = \sqrt[3]{ql^2 c^2 / 2[\sigma]}; \\ z=l/2, h_{l/2} &= \sqrt[3]{ql^2 / 4c[\sigma]}; b_{l/2} = \sqrt[3]{ql^2 c^2 / 4[\sigma]}. \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

На рис. Т3 (см. таблицу) представлена равнопрочная конструкция с защемленными концами, у которой по длине l отношение ширины b_z к высоте h_z поперечного сечения постоянное.

При этом такие геометрические параметры равнопрочных конструкций, как l , a , определя-

Основные уравнения определения усилий в равнопрочных балках

Схема загрузки однопролетной балки с защемленными концами. Эпюры M и Q	Опорные реакции. Изгибающие моменты. Поперечные силы	Варианты равнопрочных конструкций
$R_A = R_B = \frac{ql}{2}$ $M_A = M_B = \frac{ql^2}{12}$ $M_x = \frac{ql^2}{12} - \frac{1}{2}qlz + \frac{qz^2}{2}$ $M_{\max} = M_l = ql^2 / 12$ $M_{l/2} = ql^2 / 24$ $Q_y = q\left(\frac{l}{2} - z\right)$ $Q_{\max} Q_A = Q_B = \frac{ql}{2}$	<p>Рис. Т1 при $b = \text{const}$:</p> <p>Рис. Т2 при $h = \text{const}$:</p> <p>Рис. Т3 при $b/h = c = \text{const}$:</p>

Рис. 6. Однопролетная балка с обоими защемленными концами: а — расчетная схема балки; б — отсеченная часть балки; в — прямоугольное поперечное сечение балки

ются исходя из равенства значений изгибающих моментов в середине балки, выраженные через величины пролетов l и l_1 :

$$M_{l/2} = M_{l_1/2} \text{ или } \frac{gl^2}{24} = \frac{gl_1^2}{8}.$$

Отсюда

$$l_1 = \sqrt[3]{l^2/3}, a = (l - l_1)/2 = (l - \sqrt[3]{l^2/3})/2. \quad (3.13)$$

Конструкции равного сопротивления, которые естественно вытекают из силовых диаграмм геометрических форм архитектурно-функциональных пространств, позволяют материализовать последние при меньших затратах материала.

4. Алгоритмическая модель конструктивно-силовой аппроксимации геометрических форм архитектурно-функциональных пространств

При проектировании в среде САПР конструктивных систем, материализующих геометрические формы архитектурно-функциональных пространств, предлагается использовать алгоритмическую модель, то есть последовательный ряд математических моделей, имитирующих процесс конструирования объектов среды обитания в форме алгоритма [6].

Представим алгоритмическую модель как укрупненную итеративную схему из пяти основ-

ных блоков, находящихся в циклической связи между собой (рис. 7).

При заданных граничных условиях осуществляется проектирование в среде САПР геометрических форм архитектурно-функциональных пространств объекта среды обитания (блок 1).

На основе полученных метрических соотношений между генеральными параметрами (длиной l , шириной b , высотой h) архитектурно-функционального пространства и внешних силовых воздействий (активных P , реактивных R) создается расчетно-конструктивная схема архитектурно-функционального пространства объекта среды обитания (блок 2).

Построение силовой диаграммы архитектурно-функционального пространства объекта среды обитания (блок 3) осуществляется на основании параметров напряженно-деформированного состояния, полученных в результате решения задачи (2.1)–(2.4).

Далее в соответствии с полученными силовыми диаграммами геометрических форм архитектурно-функциональных пространств (блок 3) осуществляется проектирование средствами САПР равнопрочных несущих конструкции объектов среды обитания (блок 4).

На базе программных средств САПР осуществляется решение задачи оптимизации равнопрочных несущих конструктивных систем объектов среды обитания по энергетическим затратам (блок 5).

Математическая модель задачи оптимизации имеет следующий вид:

$$f(\eta) = (\theta, m) \rightarrow \min \quad (4.1)$$

при ограничениях:

$$A[W^{(j)}]m = P^{(j)}; \quad (4.2)$$

$$m \leq m^*; \quad (4.3)$$

$$-m \leq 0, \quad (4.4)$$

где θ — заданный вектор энергозатрат на единицу массы конструктивного элемента; W — вектор ускорений деформирования конструктивных элементов; m^* — предельная величина искомой массы конструктивной системы.

Представленная в матрично-векторной форме система уравнений (4.2) получается путем последующих преобразований системы уравнений равновесия, выраженных через узловые перемещения R несущей конструкции

Рис. 7. Укрупненная блок-схема алгоритма конструирования объектов среды обитания

$$AD^{-1}A^T R = P) \equiv (A[W]m = P).$$

Математическая модель задачи включает: целевую функцию, выражающую энергозатраты (4.1); систему уравнений равновесия (4.2); систему неравенств, представляющих ограничения на величину искомой массы (4.3) и на неотрицательность этой массы (4.4).

Задача оптимизации равнопрочных несущих конструктивных систем (4.1)–(4.4), предложенная автором [7], представляет собой задачу математического программирования, успешно реализуемую в среде САПР.

На рис. 8, 9 представлены результаты конструктивно-силовой аппроксимации архитектурно-функциональных пространств равно-

Рис. 8. Ангар для гражданских узкофюзеляжных самолетов средней дальности с пролетом 54 м (проф. В. Г. Темнов, магистр Д. С. Алейников)

Рис. 9. Пешеходный переход через ул. Егорова, Санкт-Петербург (проф. В. Г. Темнов, инж.-арх. А. С. Рыбкин, А. С. Трапезников)

прочными конструкциями. Несущая рамная конструкция ангара (см. рис. 8) получена исходя из условия равнопрочности (4.3), а несущая конструкция пешеходного перехода (см. рис. 9) — из условия равнопрочности (4.4).

Библиографический список

1. Темнов В. Г. Принятие конструктивных решений при проектировании искусственной среды обитания // Актуальные вопросы совершенствования системы высшего профессионального образования: сб. науч. тр. № 2. СПб.: Невский институт управления и дизайна, 2010. С. 183–191.
2. Новейшая архитектура / под ред. Филиппа Ходидьо; пер. с англ. А. М. Ведюшкина. М.: АСТ: Астрель, 2008. 192 с.
3. IL32 Katalog einer Ausstellung in Moskau «Natürliche Konstruktionen». Stuttgart: Universität Stuttgart, 1983. 108 S.

4. Чирас А. А. Двойственность в задачах строительной механики, теории упругости и пластичности // Литовский механический сборник. 1968. № 2 (3). С. 34–54.

5. Филин А. П. Прикладная механика твердого деформированного тела. М.: Наука, 1981. Т. 2. 616 с.

6. Системы автоматизированного проектирования: В 9 кн. Кн. 9. Иллюстрированный словарь / под ред. И. П. Норенкова. М.: Высшая школа, 1986. 159 с.

7. Темнов В. Г. Архитектурно-конструктивное моделирование строительных объектов среды обитания средствами САПР // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 92–100.

References

1. Temnov V. G. *Prinyatie konstruktivnykh resheniy pri projektirovanii iskusstvennoy sredy obitaniya* [Making constructive decisions at design of the external environment]. *Sb. nauch. tr. no. 2 «Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya sistemy vysshego professional'nogo obrazovaniya»* [Coll. of sci. works no. 2 "Topical issues of improvement of system of higher education"]. St. Petersburg, Nevsky Institute of Management and Design Publ., 2010, pp. 183–191.

2. *Noveyshaya arkhitektura* [The latest architecture]. Ed. by Filip Khodid'o. Transl. from English by Vedyushkin A. M. Moscow, Astrel' Publ., 2008, 192 p.

3. *IL32 Katalogeinausstellung in Moskau "Naturliche Konstruktionen"* [Catalogue of the exhibition "Natural constructions" in Moscow]. Stuttgart, University Stuttgart, 1983, 108 p.

4. Chiras A. A. *Dvoystvennost' v zadachakh stroitel'noy mekhaniki, teorii uprugosti i plastichnosti* [Duality in problems of structural mechanics, the theory of elasticity and plasticity]. Coll. of works on mechanics, Vilnius, 1968, no. 2(3), pp. 34–54.

5. Filin A. P. *Prikladnaya mekhanika tvyordogo deformirovannogo tela* [Applied mechanics of the solid deformed body]. Moscow, Nauka Publ., 1981, vol. 2, 616 p.

6. *Sistemy avtomatizirovannogo projektirovaniya* [Computer-aided engineering systems]. In 9 books. *Book 9. Illyustrirovannyi slovar'* [Illustrated dictionary]. Ed. by Norenkov I. P. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1986, 159 p.

7. Temnov V. G. *Arkhitekturno-konstruktivnoe modelirovanie stroitel'nykh obektov sredy obitaniya sredstvami SAPR* [Architecture and construction modeling of building objects of the living environment using the CAD software]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 3(50), pp. 92–100.