

Редакционный совет:

Пилипенко О.В. д-р техн. наук., проф.,
председатель
Голенков В.А. д-р техн. наук, проф.,
зам. председателя
Пузанкова Е.Н. д-р пед. наук, проф.,
зам. председателя
Радченко С.Ю. д.т.н., проф.,
зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,
секретарь
Авдеев Ф.С. д-р пед. наук, проф.
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Желтикова И.В. канд. филос. наук, доц.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук., проф.
Зомитева Г.М. канд. экон. наук, доц.
Колчунов В.И. д-р техн. наук., проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Косыкин А.В. д-р техн. наук., проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук., проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук., проф.
Уварова В.И. канд. филос. наук., доц.

Главный редактор:

Колчунов В.И. акад. РААСН, д.т.н., проф.

Заместители главного редактора:

Данилевич Д.В. канд. техн. наук, доц.
Колесникова Т.Н. д-р арх., проф.
Коробко В.И. д-р техн. наук, проф.

Редакция:

Бок Т. д-р техн. наук., проф. (Германия)
Бондаренко В.М. акад. РААСН,
д-р техн. наук, проф. (Россия)
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Емельянов С.Г. чл.-корр. РААСН,
д-р техн. наук, проф. (Россия)
Карпенко Н.И. акад. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Коробко А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Король Е.А. чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Римшин В.И. чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Сергейчук О.В. д-р техн. наук, проф. (Украина)
Серпик И.Н. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Тамразян А.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Тур В.В. д-р техн. наук., проф. (Белоруссия)
Турков А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)
Федоров В.С. акад. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Федорова Н.В. советник РААСН,
д-р техн. наук, проф. (Россия)
Чернышов Е.М. акад. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)
Шах Р. д-р техн. наук, проф. (Германия)
Ответственный за выпуск:
Савин С.Ю. к.т.н.

Адрес редакции:

302006, Россия, г. Орел, ул. Московская, 77
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
www.oreluniver.ru/science/journal/sir/
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169
от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294** по объединенному
каталогу «Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2018

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Алексейцев А.В., Безбородов Е.Л. Эволюционный поиск параметров систем «протезирования» деревянных балочных конструкций	3
Гавриленко А. Б., Кирсанов М. Н. Аналитическая оценка жесткости шпренгельной фермы	12
Зернов И.И., Пестрякова Е.А., Харитонов С.С. Воздействие высокоскоростного подвижного состава на верхнее строение пути и конструкции обделок тоннелей из опускных секций	18
Коробко А.В., Калашникова Н.Г., Лыгина Ю.Е. Геометрическая жесткость кручения сечений в виде правильных многоугольников	27
Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Псевдосферические оболочки в строительной индустрии	32
Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием	41
Семенов А.А., Порываев И.А., Шамилова Э.Р., Семенов С.А. Алгоритм поиска оптимальных параметров центрально сжатых стоек трубчатого сечения переменной жесткости	51
Травуш В.И., Маруфий А.Т., Цой А.В. Определение ширины полосы замоченных лессовых грунтов в глубине массива, приводящей к началу проявления их просадочных деформаций	61
Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О. Исследования составных деревянных балок с наклонно-вкленными связями сдвига из стеклопластиковой арматуры	67

Безопасность зданий и сооружений

Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности грунтового основания фундамента по критерию осадки при реконструкции сооружения с возрастанием нагрузки	76
--	----

Архитектура и градостроительство

Бакаева Н.В., Черняева И.В. Вопросы озеленения городской среды при реализации функций биосферосовместимого города	85
Звягинцева А.В., Иващук О.А. Взаимосвязь градостроительного и социально-экономического развития городов России	95
Сысоева Е.В., Гельманова М.О. Исследование зеленой кровли в покрытиях зданий общественного назначения	105

Строительные материалы и технологии

Абдрахимова Е.С., Рошупкина И.Ю., Абдрахимов В.З., Кайракбаев А.К., Колпаков А.В. Влияние топливосодержащих отходов на структуру пористости теплоизоляционного материала	113
Макеев А.И., Чернышов Е.М. Экспериментальные исследования закономерностей влияния размерно-геометрических параметров щебня на потенциал сопротивления бетонов разрушению	121

Editorial council:

Pilipenko O.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.,
President*
Golenkov V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof.,
Vice-president*
Puzankova E.N. *Doc. Sc. Ped., Prof.,
Vice-president*
Radchenko S.Y. *Doc. Sc. Tech., Prof.,
Vice-president*
Borzenkov M.I. *Candidat Sc. Tech.,
Docent, Secretary*
Astafichev P.A. *Doc. Sc. Law., Prof.*
Avdeyev F.S. *Doc. Sc. Ped., Prof.*
Ivanova T.N. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Kolchunov V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Konstantinov I.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Koskin A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Novikov A.N. *Doc. Sc. Tech., Prof.*
Popova L.V. *Doc. Ec. Tech., Prof.*
Uvarova V.I. *Candidat Sc. Philos.,
Docent*
Zheltikova I.V. *Candidat Sc. Philos.,
Docent*
Zomiteva G.M. *Candidate Sc. Ec., Docent*

Editor-in-chief

Kolchunov V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Editor-in-chief assistants:

Danilevich D.V. *Candidat Sc. Tech., Docent.*
Kolesnikova T.N. *Doc. Arc., Prof.*
Korobko V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Editorial committee

Bock T. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)*
Bondarenko V.M. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Gordon V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Emelyanov S.G. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Karpenko N.I. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Korobko A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Korol E.A. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Rimshin V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Sergeyчук O.V. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)*
Serpik I.N. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Tamrazyan A.G. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Tur V.V. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)*
Turkov A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Fedorov V.S. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Fedorova N.V. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Chernyshov E.M. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*
Schach R. *Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)*

Responsible for edition:

Savin S.Yu. *Candidat Sc. Tech*

The edition address:

302006, Orel, Moskovskaya Street, 77
+7 (4862) 73-43-49
www.oreluniver.ru/science/journal/sir/
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications

The certificate of registration:
ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»
86294

© Orel State University, 2018

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Alekseytsev A.V., Bezborodov E.L. Evolutionary search of recovery systems parameters for timber beam structures	3
Gavrilenko A. B., Kirsanov M. N. Analytical evaluation of stiffness of the truss ...	12
Zernov I.I., Pestryakova E.A., Kharitonov S.S. The impact of high-speed rolling stock on the superstructure and the design of immersed tunnels	18
Korobko A.V., Kalashnikova N.G., Lygina Yu. E. Geometrical stiffness of torseon cross-sections in the form of regular polygons	27
Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Pseudospherical shells in building industry	32
Manaenkov I.K. Perfection of the concrete compression diagram with indirect reinforcement	41
Semenov A.A., Porivaev I.A., Shamilova E.R., Semenov S.A. Algorithm of searching the optimum parameters of centrally compressed streams of tubular cross section of variable rigidity	51
Travush V.I., Marufii A.T., Tsoi A.V. Calculation method of a width of stripe of soaked loessial soil in deep levels of massive which leads to the start of their collapsible deformations	61
Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Stoyanov V.O. Study of composite wooden beams with tilt-included relationship bonds from fiberglass fittings	67

Building and structure safety

Utkin V.S., Solovyev S.A. Soil base reliability analysis by criterion of settlement at reconstruction of the structure with load increase	76
--	----

Architecture and town-planning

Bakaeva N. V., Chernyaeva I.V. Issues of greening the urban environment in the implementation of the functions of the biosphere-compatible city	85
Zviagintseva A.V., IvaschuK O.A. The town-building and social-economic development relationship in Russian cities	95
Sysoeva E.V., Gelmanova M.O. Principles of sustainable development when designing «green roof» on public buildingsroofs	105

Construction materials and technologies

Abdrakhimova E. S., Roshchupkina I. YU., Abdrakhimov V. Z., Kayrakbaev A. K., Kolpakov A. V. The impact of fuel containing wastes on the structure and porosity of the insulating material	113
Makeev A.I., Chernyshov E.M. Experimental investigations of the regularities of influence of dimensional-geometric parameters of the crusher and the potential of concrete resistance to destruction	121

УДК 624.3

АЛЕКСЕЙЦЕВ А.В., БЕЗБОРОДОВ Е.Л.

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОИСК ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ «ПРОТЕЗИРОВАНИЯ» ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматривается методика оптимального проектирования систем восстановления несущей способности деревянных балок с помощью внешнего протезирования. Эта задача является актуальной при реконструкции объектов культурного наследия, имеющих поврежденные несущие конструкции из дерева. В качестве протезов применены рамные стержневые системы, для которых рациональные решения находятся на дискретных множествах варьируемых параметров с использованием микрогенетического алгоритма. В отличие от классической схемы эволюционного моделирования вводится только оператор адаптивной многоточечной мутации. Целевая функция формируется с возможностью учета приоритетов осуществления как единовременных затрат на устройство протезирования, так и затрат на эксплуатацию в течение расчетного периода. Приведен пример проектирования протезирования балки, где с помощью восстановительного опорного и превентивно устанавливаемого пролетного протезов обеспечивается требуемая прочность и жесткость конструкции.

Ключевые слова: эволюционное моделирование, микрогенетический алгоритм, протезирование деревянных конструкций, восстановление несущей способности, адаптивная мутация, оптимизация, прочность, жесткость, объекты культурного наследия

Введение. Вопросы расчета и проектирования деревянных конструкций являются важными для современных исследований в строительной науке [1, 2]. Одним из актуальных направлений в этой области является протезирование балочных конструкций, используемое при реставрации и реконструкции объектов культурного наследия, а также при восстановлении несущей способности поврежденных систем перекрытий и стропил с большим периодом эксплуатации. Значительный объем исследований связан с экспериментальным изучением работы восстановленных конструкций. При этом важными представляются методы расчета их напряженно-деформированного состояния и выбора рациональных параметров. Так, в работе [3] деревянные балочные конструкции восстанавливаются с помощью клеиваемых стержней, в статье [4] для многослойных клееных балок с расслоениями используются винты-саморезы с фанерными листами и доказывається, что наибольший эффект достигается от превентивного ремонта. В исследованиях [5] деревянные перекрытия восстанавливаются клеиваемыми стальными листами. В ряде случаев для длительно эксплуатируемых конструкций используются стальные рамные протезы [6, 7]. При этом предельная нагрузка на конструкцию оценивается экспериментальным путем. Кроме стальных протезов получают распространение и железобетонные [8], которые крепятся к деревянным элементам приклеиваемой арматуры периодического профиля. Такие протезы служат для усиления узлов деревянных рам. В некоторых работах, например, [9], восстановление конструкций рекомендуется проводить только с использованием внешнего протезирования, при этом предпочтителен превентивный ремонт.

Важное место занимают вопросы расчета напряженно-деформированного состояния деревянных систем, оборудованных протезами [7]. В настоящее время получают развитие три основных метода. Первый основан на применении метода конечных элементов в объемной постановке с возможностью задания физически нелинейного поведения материала, спо-

собного к сильному размягчению. Второй базируется на применении теорем метода предельного равновесия с использованием жесткопластической модели материала, что позволяет достаточно точно воспроизводить режимы хрупкого разрушения. Последний основан на предпосылках континуальной микромеханики при ограничении упругих деформаций. Все три метода применяются на моделях структурных ячеек древесины.

Вопросам оптимизации параметров для систем протезирования деревянных конструкций в литературе внимания практически не уделяется. В данной статье предлагается реализовать такую вычислительную схему. Общий итерационный процесс будет базироваться на модификации смешанной стратегии эволюционного моделирования [11]. При этом для выбора рациональных параметров систем стальных протезов нами будет использоваться микрогенетический алгоритм. Варьируемые параметры представляются дискретными множествами значений, а в качестве инструмента для расчета напряженно-деформированного состояния используем метод конечных элементов. Разработанная методика позволит получать проектные решения минимальной стоимости при одновременном обеспечении прочности и жесткости восстановленных протезами балочных конструкций.

Постановка задачи. Будем рассматривать балки или их системы, имеющие локальные повреждения опорных узлов или других частей древесины. Для восстановления несущей способности этих объектов используем стальные протезы, соединяемые с неповрежденной древесиной конструкции. Поврежденная древесина при этом полностью удаляется. Узлы соединения протезов сварные. С целью удовлетворения эксплуатационных требований могут использоваться превентивно устанавливаемые протезы, в том числе и с преднапрягаемыми элементами. Для оценки напряженно-деформированного состояния восстановленного объекта будем использовать метод конечных элементов. При этом деформируемое тело деревянной конструкции будем моделировать объемными элементами, а систему протезирования – пространственными стержнями. Структуру протеза считаем топологически неизменяемой, а для осуществления оптимизации параметров ставим задачу условной минимизации:

$$(C_r w_1 + C_m w_2) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_r – единовременные затраты, включающие стоимость устройства системы протезирования; C_m – эксплуатационные затраты восстановленной конструкции при допущении условия ее безотказности; w_1, w_2 – коэффициенты, определяющие в долях от единицы степень важности единовременных капиталовложений и затрат на поддержание эксплуатационных качеств системы: $w_1 + w_2 = 1$.

Величину C_r будем определять на основе выражения

$$C_r = c_{mat} m_{mat} + c_n m_n + c_w, \quad (2)$$

где c_{mat}, c_n – стоимости единицы массы материалов стержней и узловых соединений соответственно; c_w – стоимость работ по устройству системы протезирования; $m_{mat} = f(\{G_b\})$, – масса стержней; $m_n = f(\{G_n\})$ – масса материалов для обустройства узловых соединений.

Элемент множества $\{G_b\}$ варьируемых характеристик стержней представим в виде

$$G_{bi} = \{A_i, J_{xi}, J_{yi}, J_{zi}, \vec{e}_i, h_{1i}, h_{2i}, h_{3i}, h_{4i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}, b_{4i}\}, \quad i \in [1; N], \quad (3)$$

где A_i – значение площади профиля, выбираемого для стержня i ; J_{xi}, J_{yi}, J_{zi} – значения центральных моментов инерции относительно местных осей элементов; \vec{e}_i – вектор эксцентриситета, определяющего ориентацию сечения в глобальной системе координат конечно-элементной модели; $h_{1i} - h_{4i}, b_{1i} - b_{4i}$ – координаты точек сечения стержня, в которых вычисляются напряжения; N – число стержней, совпадающее с размером множества $\{G_b\}$.

Множество $\{G_n\}$ представим совокупностью элементов

$$G_{nj} = \{\{m_l\}, m_{pl}\}, j \in [1; M], l \in [1; n_j], \quad (4)$$

где m_l – масса сварного шва на элементе l , соединенного в узле j с фасонкой; m_{pl} – масса фасонки; M – общее число узлов протеза, определяющее размер множества $\{G_n\}$; n_j – число стержней, сходящихся в узле j . Стоимость c_w можно приближенно определить на основе анализа смет объектов-аналогов как долю затрат от суммы двух слагаемых в формуле (2).

Затраты C_m определим зависимостью

$$C_m = \sum_{\tilde{i}=1}^{T_m} \frac{C_{\tilde{i}}}{(1+e)^{\tilde{i}}}, \quad (5)$$

где $C_{\tilde{i}}$ – прогнозируемые затраты на эксплуатацию (поддержание работоспособности) в году \tilde{i} , T_m – период эксплуатации восстановленной конструкции, e – коэффициент дисконтирования. Очевидно, что для подсчета значения C_m необходимо в качестве исходных данных иметь сведения о затратах по годам на поддержание работоспособности восстановленной конструкции в виде множества $C = \{C_1, \dots, C_{T_m}\}$

В качестве активных ограничений принимаем условия равновесия конечно-элементной модели, прочность и устойчивость стержней системы протезирования, жесткость восстанавливаемой конструкции, условия симметрии системы протезирования. Пассивными ограничениями полагаем общую устойчивость конструкции и местную прочность в местах соединения протезов с твердой (неповрежденной) древесиной.

Метод решения задачи. Поставленная задача переборного типа на дискретных множествах варьируемых параметров может решаться с помощью стохастических эвристических подходов. Одним из них является эволюционный поиск. Будем модифицировать алгоритм с комбинированной схемой учета ограничений [11], модифицируя ряд предлагаемых в этой работе вычислительных процедур. Под особью будем понимать вариант объекта формируемый случайным образом с использованием множеств $\{G_b\}$ допустимых значений варьируемых параметров. Под популяцией – группу особей, рассматриваемую на каждом шаге итерационного процесса. Элитная популяция – это группа, содержащая лучшие с точки зрения удовлетворения условия (1) решения. Отличие предлагаемого алгоритма от изложенного в [11] в том, что оператор кроссинговера и селекции использоваться не будет, вместо этого вводится схема случайного отбора среди первых особей из элитных популяций. Такой алгоритм получил название микрогенетического. Приведем его основные этапы.

1. Формируем путем случайной генерации основную популяцию P_A , задавая четное целое число $N \in [6; 50]$. При этом на данном этапе элитные популяции, содержащие лучшие решения для C_r и C_m соответственно $P_B(C_r) = \emptyset$, $P_B(C_m) = \emptyset$. Популяцию P_A разделяется на группы P_1 и P_2 так, что $P_A = P_1 + P_2$, $P_1 \subset P_A$, $P_2 \subset P_A$, $P_1 \not\subset P_2$. Также вводим штрафную популяцию P_p , в которой будут размещаться особи с некоторыми небольшими нарушениями ограничений.

2. Начинается итерационный процесс.

2.1 Для каждой особи из популяции P_A проверяются активные ограничения. Для этих целей может быть использован решатель промышленного пакета прикладных программ, например, комплекса NX Nastran или Ansys, при этом форматы входных и выходных данных можно получить в текстовом виде. Если ограничения выполняются, то особь рассматривается в качестве кандидатуры на вхождение в элитные популяции $P_B(C_r)$ и $P_B(C_m)$.

2.2 Формирование элитных популяций. В предлагаемом нами алгоритме будет три элитных популяции. Первая Π содержит особи-кандидаты на итоговое решение, вторая – $\Pi_B(C_r)$ содержит лучшие решения по критерию минимума затрат на материалы стержней протеза, третья – $\Pi_B(C_m)$ содержит особи с минимальными значениями затрат на устройство узловых соединений.

Популяции $\Pi_B(C_r)$, $\Pi_B(C_m)$ формируются в соответствии с принципами элитизма: особь включается в популяцию, если ее копии там нет, и если значения функции цели для нее меньше максимального значения этой функции для любой особи в популяции. Популяция Π формируется на основе популяций $\Pi_B(C_r)$ и $\Pi_B(C_m)$. При этом рассматривается каждая из особей этих популяций. В соответствии с формулой (1) вычисляется значение функции цели и в соответствии с принципами элитизма особь включается в популяцию.

2.3 Редактирование основной популяции. Условия замены особей в популяции Π_A новыми особями по следующей схеме:

Таблица 1 – Операторы для редактирования элитных популяций

Антецедент	Консеквент
$O_i \in \Pi_1$	$\left\{ \begin{array}{l} \Pi = \emptyset, \rightarrow O_i = \{rnd(\{G_b\})_1, \dots, rnd(\{G_b\})_n\} \\ \Pi \neq \emptyset, \rightarrow O_i = O_{md(\bar{i})} \in \Pi \end{array} \right.$,
$O_i \in \Pi_2$	$O_i = \tilde{O}_i \in \Pi_p$

Здесь O_i – обозначение особи, которая представляет собой одномерный массив с кодами параметров из множества $\{G_b\}$, \bar{i} – случайно выбираемое число, определяющее номер особи, подлежащей выбору; если размер популяции Π более 4, то \bar{i} выбирается случайно из интервала целых чисел от 1 до 4, в другом случае \bar{i} не должно превышать размера этой популяции, $rnd()$ – оператор случайного выбора элемента из множества, n – число варьируемых параметров, в нашем частном случае совпадающее с числом стержней протеза, \tilde{O}_i – особь, для которой ограничения не удовлетворены.

2.4 Редактирование популяции Π_p . Особи, для которых ограничения нарушены, в соответствии с описанным выше принципом элитизма помещаются в популяцию. Для каждой особи \tilde{O}_i по формуле (1) вычисляется величина функции цели, которая умножается на коэффициент штрафа P :

$$P = \left(\begin{array}{l} 1 + \chi \left(\frac{\sigma}{[\sigma]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\sigma}{[\sigma]} - 1 \right) k_\sigma + \chi \left(\frac{N_{cr}}{[N_{cr}]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{N_{cr}}{[N_{cr}]} - 1 \right) k_N + \\ + \chi \left(\frac{\delta}{[\delta]} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\delta}{[\delta]} - 1 \right) k_\delta, \end{array} \right) \quad (6)$$

где k_σ, k_N, k_δ – задаваемые коэффициенты, учитывающие долю значимости штрафа при нарушении соответствующего ограничения, σ, N_{cr}, δ – максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в элементе протеза, максимальная критическая сила для элемента протеза, перемещение восстановленной системы соответственно, $[\sigma], [N_{cr}], [\delta]$ – допускаемые значения этих величин, $\chi(x)$ – функция Хэвисайда от вещественного аргумента x : $\chi(x) = 0$, если $x < 0$; $\chi(x) = 1$, если $x \geq 0$.

2.5 Применение оператора мутации. Пусть варьируемый параметр j некоторой особи

O_i имеет дискретное множество T_j допустимых значений. Это множество имеет w_j элементов. В интервале $(0; 1,0)$ с учетом нормального распределения генерируются значения случайных величин m_p, m_{p1}, m_{p2} , которые сравниваются с управляющими числами мутации m, m_1, m_2 . При $m_p \geq m$ номер значения во множестве T_j выбирается случайно на всем интервале $[1; w_j]$. При $m_p < m$ рассматриваются случаи, представленные в таблице 2.

2.6 Проверка критерия останова вычислений. Если по истечении $n/\sqrt[3]{n!}$ итераций (значение округляется до целого) изменений в популяции Π нет, вычисления останавливаются. Полученный результат считаем решением задачи. Если изменения в элитной популяции есть, то этапы 2.1-2.5 повторяются.

Таблица 2 – Содержание оператора мутации

Номер значения во множестве T_j до мутации	Действия при			
	$m_{p1} < m_1$	$m_{p1} \geq m_1$	$m_{p2} < m_2$	$m_{p2} \geq m_2$
1	+1	+2	-	-
2	-1	+1	+2	-
3	-2	-1	+1	+2
4	-2	-1	+1	+2
...
$w_j - 2$	-2	-1	+1	+2
$w_j - 1$	+1	-1	-2	-
w_j	-1	-2	-	-

Здесь значения -2; -1; +1; +2 – целые числа, на величину которых будет изменяться номер значения параметра во множестве T_j .

3. Проверка пассивных ограничений. Полученный в результате итерационного процесса вариант или несколько вариантов конструкций проверяются путем расчетов по методу конечных элементов с учетом физической и геометрической нелинейности. В случае удовлетворения всех ограничений считаем, что рациональное решение получено.

Пример. Рассмотрим балочное покрытие объекта культурного наследия, расположенного в г. Москва (рис. 1,а). Полная замена балок невозможна, поэтому рассматриваем возможность их протезирования. Характер повреждений опорных частей балок показан на (рис. 1,б). В средних частях балок значительных видимых повреждений нет, но наблюдаются большие прогибы конструкций. Размер поперечного сечения балки 450x250(h) мм. Участок балки с поврежденной древесиной, с учетом ее опоры равен 0,5 м. Балка изготовлена из сосны с модулем упругости 10^4 МПа, плотностью 560 кг/м³ и расчетным сопротивлением изгибу 130 кг/м². Требуется повысить полезную нагрузку на покрытие и запроектировать систему протезирования при нормальных условиях эксплуатации.

Система протезирования состоит из 2-х протезов (см. рис. 1,в поз. 3, 4), элементы которых изготавливаются из стальных угловых профилей и планок. Перемещения протезов в горизонтальном направлении относительно балки фиксируются винтами-саморезами. Все элементы системы протезирования соединяются на сварке. Используется конструкционная сталь С255 с расчетным сопротивлением изгибу 245 МПа. Пролет балки 6 м. Нагрузка от веса конструкций покрытия в соответствии с условиями эксплуатации покрытия принималась равной 7,4 кН/м², что при шаге балок 2,5 м соответствует максимальной действующей на балку линейной равномерно распределенной нагрузке 18,5 кН/м. Учитывалось действие на балку крутящего момента, обусловленного случайными эксцентриситетами приложения нагрузки относительно ее продольной оси. Максимальная величина этих эксцентриситетов

принималась равной 2-4 см. При этом балка разбивалась на 4 равные части по пролету и рассматривались варианты расположения нагрузки в этих частях с учетом различных знаков эксцентриситетов. Опираие балки на стену шарнирное. Считаем стены жесткими телами. Для построения конечно-элементной модели была разработана твердотельная модель, показанная на рис.1,в. Структура показанных на этом рисунке протезов использовалась в качестве исходной и при параметрическом синтезе не изменялась.

Балка схематизировалась в виде объемного тела, а протезы описывались пространственными стержнями. Максимальный прогиб восстанавливаемой системы ограничивался величиной $l/200=3$ см. При расчете затрат на эксплуатацию (5) принималось: $C_{\tilde{i}} = 0,05C_r(\tilde{i} - 1)$, $\tilde{i} \in [1;15]$, $T_m = 15$, $e = 0,25$.

Варьировались параметры стержней (3) независимо для каждого протеза в соответствии со следующей группировкой: 1) горизонтальные пластины; 2) верхние и нижние угловые профили; 3) вертикальные пластины; 4) наклонные пластины. В пределах каждой группы сечение элементов принимается одинаковым. Характеристика варьируемых параметров представлена в таблице 3. В каждом поколении (на итерации) рассматривалось 50 особей. При вычислении функции цели (1) назначалось: $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,6$.

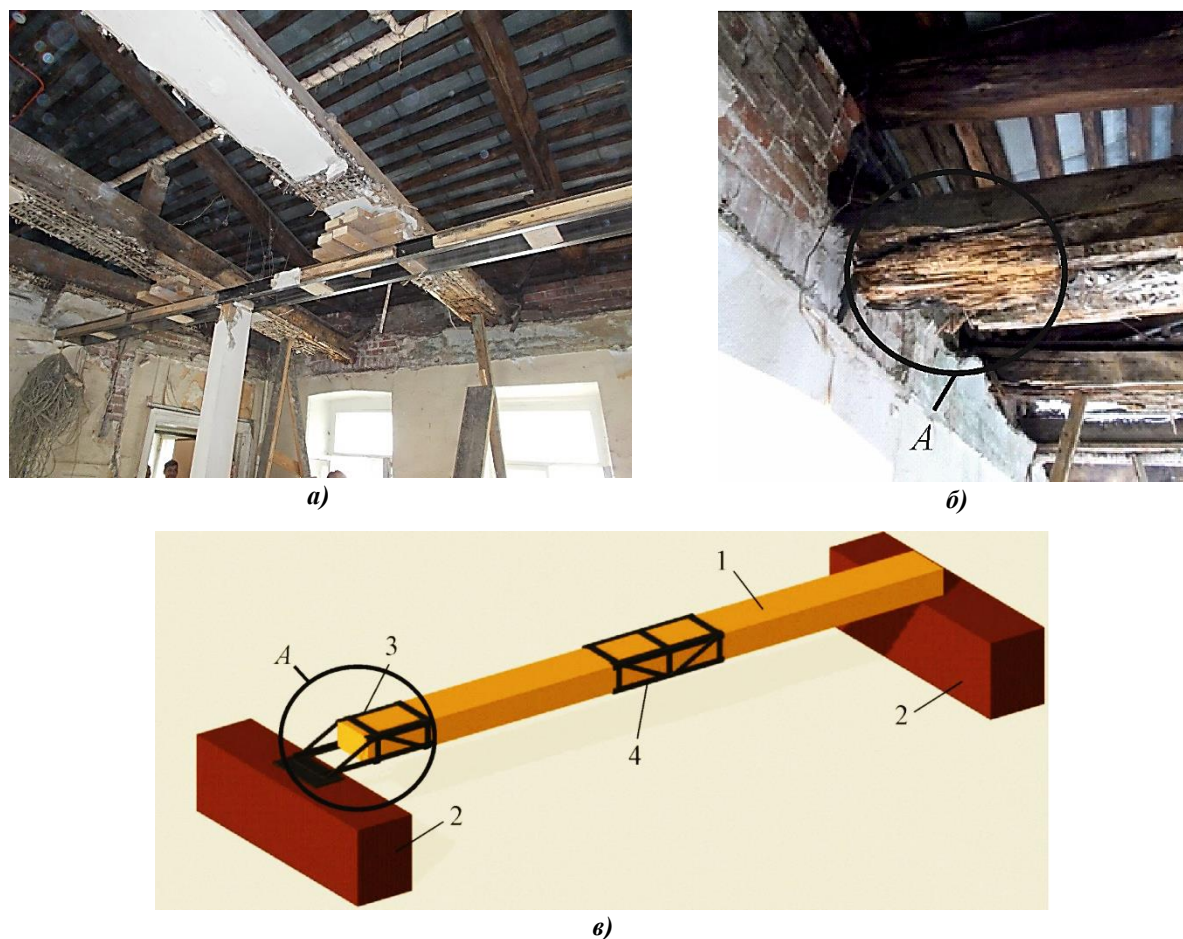


Рисунок 1 – Объекты, подлежащие восстановлению: а – расположение балок покрытия, б – утрата опорного участка балки, в – твердотельная модель: 1 – деревянная балка, 2 – опоры в виде кирпичных стен, 3 – система протезирования опорной части, 4 – система превентивного протезирования, обеспечивающая жесткость балки

Результаты и дискуссия. В классической реализации генетических алгоритмов, приспособленных для оптимизации ферм [9-12], применяются операторы селекции и кроссинговера. Чаще всего для селекции используется метод рулетки [10], где вероятность выбора обратно пропорциональна массе или стоимости объекта. В оператор кроссинговера вводится

наиболее простая одноточечная схема. Результаты расчетов показали, что в данной задаче эти операторы практически не влияют на сходимость. Поэтому мы их не использовали.

Таблица 3 – Варьируемые профили в сечениях стержней

№ группы	Допускаемые для выбора сечения
1	Лист $b \times t$: 1) 20x3; 2) 30x3; 3) 40x3; 4) 50x4; 5) 60x4.
2	Уголок равнополочный DIN 1028: 1) 30x5; 2) 50x5; 3) 60x6; 4) 60x10; 5) 70x7; 6) 75x10; 7) 80x8; 8) 100x10; 9) 120x11; 10) 130x16.
3	Лист $b \times t$: 1) 50x5; 2) 60x5; 3) 70x5; 4) 80x8; 5) 90x9; 6) 100x10; 7) 120x10; 8) 150x10.
4	Лист $b \times t$: 1) 80x6; 2) 100x8; 3) 100x10; 4) 120x10; 5) 150x10; 6) 160x12; 7) 180x15.

В то же время использование только простой одноточечной мутации не позволило относительно быстро находить решения. Для исключения этой проблемы нами использовался регулируемый оператор мутации, описанный в п. 2.5 алгоритма.

Результаты решения задачи изображены на рис. 2,а-б, где цифровыми позициями показаны номера рациональных профилей из таблицы 3. Итоговый вариант проверялся на удовлетворение пассивных ограничений путем расчета в физически нелинейной постановке по методу конечных элементов. В результате все поставленные ограничения удовлетворены. Процесс поиска потребовал выполнить не более 150 итераций генетического алгоритма (7500 расчетов), в то время как полный перебор вариантов связан с выполнением $4,2 \cdot 10^7$ расчетов объекта. График на рис. 2,в характеризует уменьшение стоимости системы протезирования в зависимости от пройденных итераций. Прогиб конструкции составил 2,9 см, напряжения в древесине балки 77 МПа. При моделировании ситуации, когда превентивно устанавливаемый протез в пролете отсутствует, прогиб конструкции составил 5,39 см.

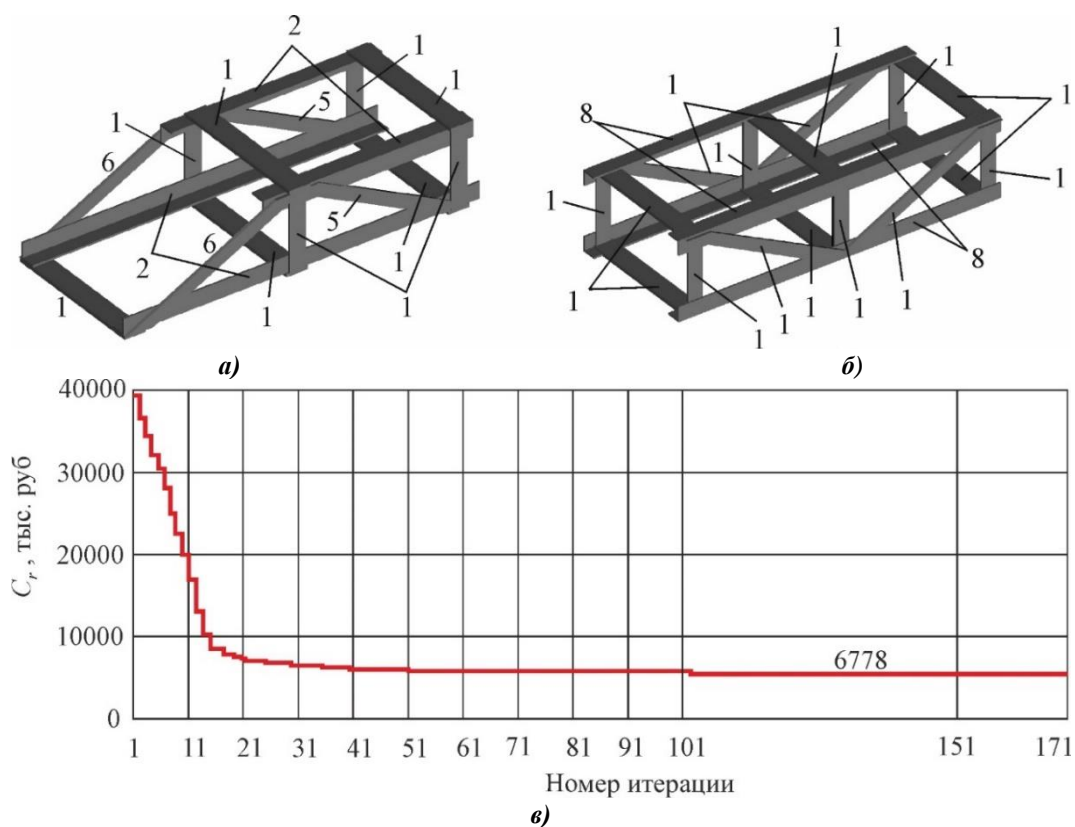


Рисунок 2 – Результаты поиска параметров стержней для опорной (а) и пролетной (б) систем протезирования, характер сходимости итерационного процесса (в)

Вывод. На основе концепции эволюционного моделирования разработана методика поиска рациональных параметров стальных рамных систем восстановления несущей способности деревянных балок. Для получения решения применяется микрогенетический алгоритм, использующий адаптивный оператор мутации. Разработанная методика позволяет удешевлять восстановление конструкций с учетом возможности регулирования уровня их прогибов, что может существенно повысить надежность объектов.

В качестве перспектив дальнейших исследований можно отметить возможности адаптации предлагаемого алгоритма к решению задач сохранения балочных конструкций, восстанавливаемых вклеиваемыми стержневыми элементами, а также к восстановлению перекрытий фанерными или стальными листами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов В.И., Пятикрестовский К.П. [Особенности расчета деревянных конструкций на прочность по деформациям](#) // [Строительство и реконструкция](#). – 2013. – № 2 (46). – С. 25-32.
2. СП 64.13330.2011. Свод правил. Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М., 2011.
3. Pizzo B.; Lauriola M. [Repair of timber end-beams: Some operational aspects](#) / Protection of historical buildings - Prohitech 09: 1st International Conference on Protection of Historical Buildings, Rome, Italy. – 2009. – Vol. 1. – Pp. 397-402.
4. Ferreira J. G., Cruz H.; Silva R. [Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams](#) // [Construction and building materials](#). – 2017. – Vol. 154. – Pp. 384-398.
5. Pizzo B., Gavioli M., Lauriola M.P. Evaluation of a design approach to the on-site structural repair of decayed old timber end beams // [Engineering Structures](#). – 2013. – Vol. 48. – Pp. 611-622.
6. Jorge M.B., Hélder S.S., Eleftheria T. Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses // [Engineering Structures](#). – 2017. – Vol. 140. – Pp. 209-224.
7. Füssl J., Lia M., Lukacevic M., Eberhardsteiner J., Martin C.M. Comparison of unit cell-based computational methods for predicting the strength of wood // [Engineering Structures](#). – 2017. – Vol. 141. – Pp. 427-443.
8. Metelli G., Preti M., Giuriani E. On the delamination phenomenon in the repair of timber beams with steel plates // [Construction and Building Materials](#). – 2016. – Vol. 102. – Pp. 1018-1028.
9. Negrão J.H., Brito L.D., Dias A.G., Júnior C.C., Lahr F.R. Numerical and experimental study of small-scale moment-resistant reinforced concrete joints for timber frames / [Construction and Building Materials](#). – 2016. – Vol. 118, Pp. 89-103.
10. Tamponea G., Ruggieri N. State-of-the-art technology on conservation of ancient roofs with timber structure // [Journal of Cultural Heritage](#). – 2016. – Vol. 22. – Pp. 1019-1027.
11. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y. Mixed Approaches to Handle Limitations and Execute Mutation in the Genetic Algorithm for Truss Size, Shape and Topology Optimization // [Periodica Polytechnica Civil Engineering](#). – 2017. – №.61(3). – Pp. 471-482.

Алексейцев Анатолий Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование зданий и сооружений»

Тел. 8(495)287-49-14 доб. 3059

E-mail: aalexw@mail.ru

Безбородов Евгений Леонидович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва

Старший преподаватель кафедры «Проектирование зданий и сооружений»

Тел. 8(495)287-49-14 доб. 3059

E-mail: orex22@mail.ru

ALEKSEYTSEV A.V., BEZBORODOV E.L.

EVOLUTIONARY SEARCH OF RECOVERY SYSTEMS PARAMETERS FOR TIMBER BEAM STRUCTURES

The technique of optimal design of the recovery systems for the bearing capacity of timber beams using prosthetics with steel spatial systems is considered. This task is relevant for the reconstruction of cultural heritage sites that have damaged structural structures made of wood. Rational solutions are discrete sets of variable parameters using a micro genetic algorithm that uses, unlike the classical scheme of evolutionary modeling, only the operator of an adaptive multi-point mutation. The objective function is formed with the possibility of taking into account the priorities for the implementation of both the one-off costs for the device of prosthetics and the costs of operation during the exploitation period. An example of beam prosthesis is given where the required strength and rigidity of the structure is provided with the help of a restorative supporting and preventively installed span prosthesis.

Key words: evolutionary modeling, micro genetic algorithm, recover of timber structures, bearing capacity, adaptive mutation, optimization, strength, rigidity, objects of cultural heritage

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Pyatikrestovskiy K.P. Osobennosti rascheta derevyannykh konstruksiy na prochnost' po deformatsiyam // Stroitel'stvo i rekonstruksiya. – 2013. – № 2 (46). – S. 25-32.
2. SP 64.13330.2011. Svod pravil. Derevyannyye kleyenyie i tsel'noderevyannyye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-25-80. – M., 2011.
3. Pizzo B.; Lauriola M. [Repair of timber end-beams: Some operational aspects](#) / Protection of historical buildings - Prohitech 09: 1st International Conference on Protection of Historical Buildings, Rome, Italy. – 2009. – Vol. 1. – Pp. 397-402.
4. Ferreira J. G., Cruz H.; Silva R. [Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams](#) // [Construction and building materials](#). – 2017. – Vol. 154. – Pp. 384-398.
5. Pizzo B., Gavioli M., Lauriola M.P. Evaluation of a design approach to the on-site structural repair of decayed old timber end beams // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 48. – Pp. 611-622.
6. Jorge M.B., Hélder S.S., Eleftheria T. Non-destructive assessment, full-scale load-carrying tests and local interventions on two historic timber collar roof trusses // Engineering Structures. – 2017. – Vol. 140. – Pp. 209-224.
7. Füssl J., Lia M., Lukacevic M., Eberhardsteiner J., Martin C.M. Comparison of unit cell-based computational methods for predicting the strength of wood // Engineering Structures. – 2017. – Vol. 141. – Pp. 427-443.
8. Metelli G., Preti M., Giuriani E. On the delamination phenomenon in the repair of timber beams with steel plates // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 102. – Pp. 1018-1028.
9. Negrão J.H., Brito L.D., Dias A.G., Júnior C.C., Lahr F.R. Numerical and experimental study of small-scale moment-resistant reinforced concrete joints for timber frames / Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 118, Pp. 89-103.
10. Tamponea G., Ruggieri N. State-of-the-art technology on conservation of ancient roofs with timber structure // Journal of Cultural Heritage. – 2016. – Vol. 22. – Pp. 1019-1027.
11. Serpik I.N., Alekseytsev A.V., Balabin P.Y. Mixed Approaches to Handle Limitations and Execute Mutation in the Genetic Algorithm for Truss Size, Shape and Topology Optimization // Periodica Polytechnica Civil Engineering. – 2017. – №.61(3). – Pp. 471-482.

Alekseytsev Anatoliy Victorovich

Moscow State University of Civil Engineering

Ph. D of Engineering, Assoc. Prof. of Department “Design of buildings and structures”

Ph.: 8-960-564-33-58

E-mail: aalexw@mail.ru

Bezborodov Yevgeniy Leonidovich

Moscow State University of Civil Engineering

Senior Lecturer of Department “Design of buildings and structures”

Ph.: 8(495)287-49-14 add. 3059

E-mail: orex22@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ ШПРЕНГЕЛЬНОЙ ФЕРМЫ

Рассмотрена плоская балочная ферма, усиленная дополнительными стойками и раскосами. Выводится точная аналитическая зависимость прогиба статически определимой фермы от ее размеров, нагрузки и числа панелей. Рассматривается равномерное нагружение по верхнему поясу, нижнему и сосредоточенной силой в середине пролета. Для определения усилий в стержнях используется метод вырезания узлов, реализованный в программе, написанной в системе компьютерной математики Maple. Обобщение решения на произвольное число панелей производится методом индукции. Выводится рекуррентное уравнение, которому удовлетворяет последовательность коэффициентов. В системе компьютерной математики находится его решение. Полученная зависимость прогиба от числа панелей имеет минимум, позволяющий оптимизировать конструкцию по весу. Находятся формулы для усилий в наиболее сжатых и растянутых стержнях. Анализируются асимптотические свойства решений.

Ключевые слова: ферма, прогиб, индукция, Maple, аналитическое решение

Ферма с треугольной решеткой (рис. 1) усилена шпренгельными элементами. Ставится задача вывода аналитической зависимости прогиба фермы в середине пролета от числа панелей. Применяется алгоритм, предложенный в [1].

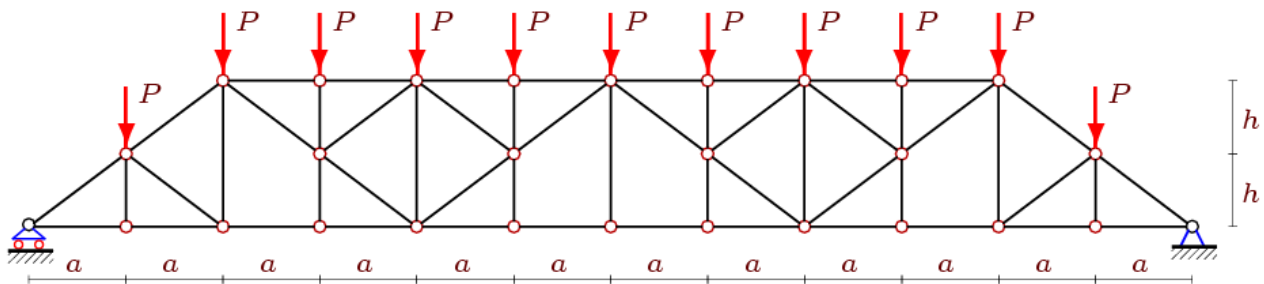


Рисунок 1 – Ферма, $n=3$

В ферме с n панелями содержится $10n-2$ шарниров и $m=20n+4$ стержней вместе с тремя опорными стержнями, два из которых моделируют правую неподвижную шарнирную опору, один — левую подвижную. Усилия в стержнях фермы одновременно с реакциями опор определяются методом вырезания узлов, составлением общей для всей фермы системы уравнений равновесия узлов в проекциях на оси координат. Матрица системы состоит из направляющих косинусов усилий. Для их вычисления в программу вводятся координаты узлов. Приведем характерный фрагмент программы, написанный на языке системы Maple (рис. 2). Начало координат находится в левой опоре:

```
> for i to 4*n+1 do x[i]:=a*(i-1); y[i]:=0; od:
> for i to 4*n-3 do x[i+4*n+1]:=a*i+a; y[i+4*n+1]:=2*h; od:
> for i to 2*n do x[i+8*n-2]:=2*a*i-a; y[i+8*n-2]:=h; od:
```

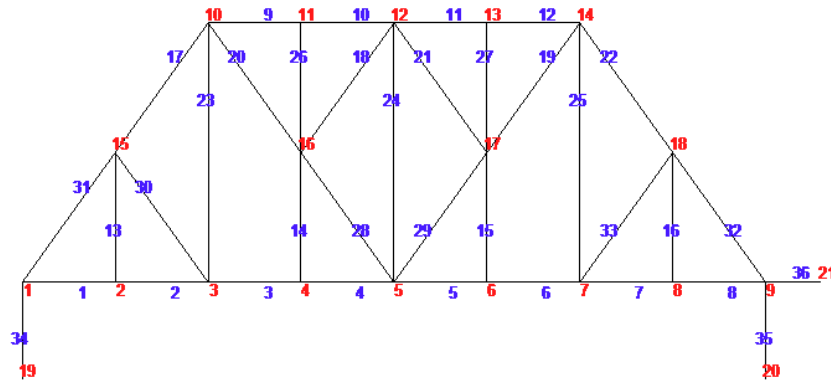


Рисунок 2 – Нумерация узлов и стержней, $n=2$

Конфигурация решетки фермы вводится специальными векторами, содержащими номера концов соответствующих стержней. Стержни нижнего пояса, например, вводятся так

```
> for i to 4*n do N[i]:= [i,i+1]; od:
```

Матрица G направляющих косинусов заполняется в цикле по числу стержней m . Учитывается, что направляющие косинусы противоположных концов одного стержня имеют разные знаки

```
> for i to m do
>   Lxy[1]:=x[N[i][2]]-x[N[i][1]]:
>   Lxy[2]:=y[N[i][2]]-y[N[i][1]]:
> L[i]:=subs(a^2+h^2=c^2,sqrt(Lxy[1]^2+Lxy[2]^2));
> for j to 2 do
>   jj:=2*N[i][2]-2+j:
>   if jj<=m then G[jj,i]:=-Lxy[j]/L[i]:fi;
>   jj:=2*N[i][1]-2+j:
>   if jj<=m then G[jj,i]:= Lxy[j]/L[i]: fi;
> od;
> od:
```

Решение

Решение в системе компьютерной математики Maple дает символьные выражения для усилий, позволяющие по формуле Максвелла – Мора

$$\Delta = \sum_{i=1}^{m-3} \frac{S_i s_i l_i}{EF},$$

получить искомую формулу для перемещения. Введены обозначения: S_i – усилие в стержне i от действия внешней нагрузки, s_i – усилие в стержне i от действия единичной вертикальной силы, приложенной в середине пролета к узлу нижнего пояса, EF – жесткость стержней, l_i – их длины. Суммирование ведется по деформируемым стержням. Три опорные стержня приняты жесткими и в сумму не входят. В результате расчета ферм с разным числом панелей ($n>1$) оказывается, что решение имеет один и тот же вид

$$\Delta_1 = P \frac{Aa^3 + Cc^3}{2h^2 EF}, \tag{1}$$

где $c = \sqrt{a^2 + h^2}$ — длина раскосов. Коэффициенты A и C в полученной формуле зависят только от n . Зависимость коэффициентов от числа панелей можно найти только методом

индукции. Для этого последовательность коэффициентов вводится в аргументы оператора `rgf_findrecur` системы Maple [1], который дает рекуррентное уравнение. Решение уравнения возвращает оператор `rsolve`. Для работы оператора `rgf_findrecur` требуется четное число членов последовательности, достаточное для выявления закономерности. В результате получаем

$$A = (3(-1)^n + 10n^2 + 9 + 20n^4) / 6,$$

$$C = (3 + (-1)^n + 8n^2) / 2.$$

Проверку коэффициентов можно выполнить в численной моде этой же программы при любых значениях n . Аналогично задача решается и для равномерной нагрузки по нижнему поясу фермы. Формула для прогиба почти не отличается от (1)

$$\Delta_2 = P \frac{Aa^3 + Cc^3 + Hh^3}{2h^2 EF}. \quad (2)$$

Коэффициенты A и C при этом остаются прежними, а коэффициент H имеет вид $H = 2(1 - (-1)^n)$. Получим также формулу для прогиба фермы от действия сосредоточенной силы в середине пролета

$$\Delta_3 = P \frac{Aa^3 + Cc^3 + Hh^3}{h^2 EF}. \quad (3)$$

Коэффициенты в этой формуле весьма просты

$$A = n / 3 + 2n^3 / 3,$$

$$C = n,$$

$$H = 1 + (-1)^{n+1}.$$

Линейность задачи позволяет рассчитывать широкий круг задач с разнообразными нагрузками, получающимися комбинацией решений (1) – (3). Найденное решение также легко обобщается на случай различных жесткостей стержней. Так, если, например, жесткость стоек равна $k_h EF$, а жесткость раскосов $k_c EF$, где EF жесткость поясов, то в соответствующую формулу вводятся поправочные коэффициенты [2]:

$$\Delta = P \frac{Aa^3 + Cc^3 / k_c + Hh^3 / k_h}{2h^2 EF}.$$

Анализ прогиба

Сравним прогиб фермы от трех видов нагрузок. Пусть во всех трех случаях суммарная нагрузка одинакова $P_0 = (4n - 1)P$, где P_0 – нагрузка в третьем случае (одна сила в середине пролета). Фиксируем пролет фермы $L = 4na = 40$ м. Обозначим безразмерный прогиб фермы $\Delta' = \Delta EF / (P_0 L)$. Кривые зависимости прогиба середины пролета при $h=4$ м приведены на рисунке 3. Кривые Δ_1 и Δ_2 практически совпадают, отличаясь в четвертой значащей цифре. Резкие скачки кривой Δ_3 объясняются наличием "мигающего" слагаемого в коэффициенте H .

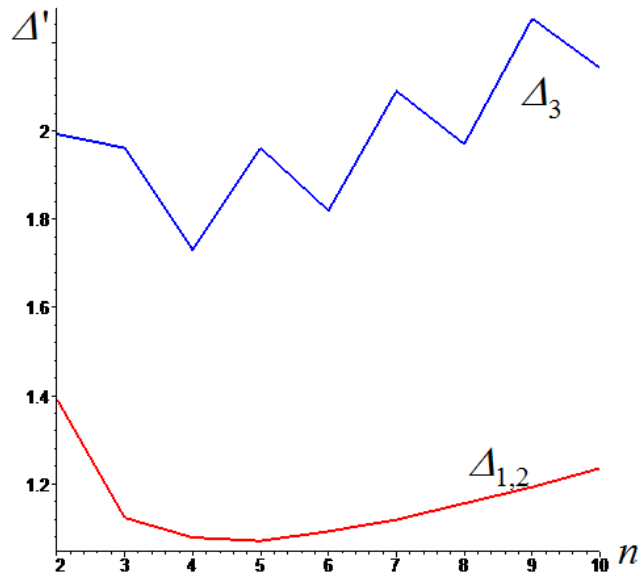


Рисунок 3 – Прогиб в зависимости от числа панелей

С увеличением числа панелей n прогиб растет. Прослеживается наклонная асимптота кривых Δ_1 и Δ_2 . Угол наклона асимптоты следует из предела $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_1' / n = h / (2L)$. Асимптоту кривой $\Delta_3(n)$, имеющей значительные скачки, система Maple не выделяет.

Анализ усилий в стержнях

В процессе вычисления прогиба определялись и усилия во всех стержнях фермы. Для практического инженера наиболее интересны стержни с максимальными сжимающими и растягивающими усилиями. Метод сечений применим здесь только для нечетных n , поэтому выделим интересующие нас усилия из общего решения, полученного методом индукции. Рассмотрим равномерную нагрузку по верхнему поясу. Наиболее сжатый стержень в середине верхнего пояса имеет усилие

$$S_{6n-2} = -\frac{aP(2n^2 + (-1)^n)}{2h},$$

а растянутый стержень в середине нижнего пояса

$$S_{2n} = \frac{aP(2n^2 - 1 - (-1)^n)}{2h}.$$

Выводы

Методом индукции при математической поддержке пакета Maple получены компактные формулы для прогиба фермы с усиленной решеткой. Сложная решетка не позволяет находить усилия непосредственно методом сечений или последовательным вырезанием узлов. Использование же пакета символьных вычислений не только преодолевает "проклятие размерности" — бич систем с большим числом элементов, но и позволяет получить результаты, доступные для математического анализа. Как всегда, цель такого анализа — оптимиза-

ция конструкции по весу, прочности и устойчивости. Полученные оценки могут быть использованы при проектировании и оценке достоверности численных расчетов.

Аналогичные решения методом индукции на основе программы [1] получены для плоских [2-10] и пространственных [12,13] ферм. Обзоры аналитических решений для прогиба плоских ферм даны в работах [14-16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирсанов, М. Н. Maple и Maplet. Решение задач механики/ М.Н. Кирсанов. — СПб.: Изд-во Лань, 2012. — 512 с.
2. Кирсанов, М. Н. Формулы для расчета прогиба и усилий в стержнях симметричной балочной фермы/М. Н. Кирсанов // Строительство и реконструкция. — 2017.— 1(69). — С.19–23.
3. Kirsanov, M. An inductive method of calculation of the deflection of the truss regular type/ M. Kirsanov //Architecture and Engineering. — 2016. — Т. 1.— № 3. — С. 14–17.
4. Voropai, R.A. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss/R.A.Voropai, I.Yu. Kazmiruk// Bulletin of Scientific Conferences.— 2016.— № 2-1(6).— Pp. 10–12.
5. Voropai, R. A. Analysis of the deflection of the regular truss with cross type lattice/R. A. Voropai// Science Almanac.—2016.—N4-3(18). — С.238–240.
6. Shipaeva, A.S. Calculation of the deflection of girder beam loaded on the bottom flange in the system Maple/ A.S. Shipaeva //Science Almanac. —2016.— N 5-3(19).— Pp. 236–239.
7. Bolotina, T. D. The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels/ T. D. Bolotina //Bulletin of Scientific Conferences. —2016.— № 4-3(8). — Pp.7–8.
8. Al-Shahrabi, A. M. Line of influence of the deflection for cantilever truss / A. M. Al-Shahrabi, M.N. Kirsanov // Вестник научных конференций. — 2016. № 2-1(6). — С. 6–7.
9. Dong, X. The dependence of the deflection of the truss from the position of the load for an arbitrary number of panels/ X. Dong, M.N. Kirsanov //Вестник научных конференций.— 2016. —№ 1–4 (5). — С. 6–7.
10. Jiang, H. An analytical expression for the influence line of the truss/ H. Jiang, M.N. Kirsanov // Вестник научных конференций. — 2016. — № 1–5(5). — С.10–11.
11. Ponomareva, M.A. The displacement of the support trusses with parallel belts under uniform load/ M.A. Ponomareva//Научный альманах. —2016. — № 4–3(18). — С.257–259.
12. Ершов, Л.А. Формулы для расчета деформаций пирамидального купола/ Л.А Ершов //Научный альманах. — 2016. — N11-2(25). — С.315-318
13. Кирсанов, М.Н. Расчет пространственной стержневой системы, допускающей мгновенную изменяемость/М. Н. Кирсанов //Строительная механика и расчет сооружений.— 2012.— № 3.— С. 48–51.
14. Кийко, Л. К. Аналитическая оценка прогиба арочной фермы под действием ветровой нагрузки / Л.К. Кийко // Научный вестник. — 2016. — № 1 (7). — С. 247–254.
15. Тиньков, Д. В. Сравнительный анализ аналитических решений задачи о прогибе ферменных конструкций/ Д. В. Тиньков // Инженерно-строительный журнал. — 2015. — №5(57). — С. 66–73.
16. Тиньков, Д. В. Анализ точных решений прогиба регулярных шарнирно-стержневых конструкций/ Д. В. Тиньков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2015.— №6. — С. 21–28.

Гавриленко Антон Борисович

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва
старший преподаватель
E-mail: gavrilenkoab@mpei.ru

Кирсанов Михаил Николаевич

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва
Доктор физико-математических наук, профессор
E-mail: c216@ya.ru

GAVRILENKO A. B., KIRSANOV M. N.

ANALYTICAL EVALUATION OF STIFFNESS OF THE TRUSS

The flat girder, reinforced by additional struts and braces is considered. Displays the exact analytical dependence of the deflection of statically determinate trusses from its size, load and number of

panels. Considered uniform loading on the upper belt, bottom and a concentrated force at Midspan. To determine the forces in the bars the method of cutting out nodes, implemented in a program written in the computer mathematics system Maple is used. Generalization of the solution for an arbitrary number of panels produced by the method of induction. The recurrence equation that satisfies the sequence of coefficients is detected. Solution is obtained in the system of computer mathematics. The dependence of the deflection of the panels has an extremum, which allows to optimize the design for a weight. A formula for forces in the most compression and tie rods are found. Analyzes the asymptotic properties of the solutions.

Keywords: truss, deflection, induction, Maple, analytical solution

REFERENCES

1. Kirsanov, M. N. Maple i Maplet. Resheniye zadach mekhaniki/ M.N. Kirsanov. — SPb.: Izd-vo Lan', 2012. — 512 s.
2. Kirsanov, M. N. Formuly dlya rascheta progiba i usilii v sterzhnyakh simmetrichnoy balochnoy fermy/M. N. Kirsanov // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. — 2017. — 1(69). — S.19–23.
3. Kirsanov, M. An inductive method of calculation of the deflection of the truss regular type/ M. Kirsanov // Architecture and Engineering. — 2016. — T. 1. — № 3. — S. 14–17.
4. Voropai, R.A. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss/R.A.Voropai, I.Yu. Kazmiruk// Bulletin of Scientific Conferences.— 2016.— № 2-1(6).— Pp. 10–12.
5. Voropai, R. A. Analysis of the deflection of the regular truss with cross type lattice/R. A. Voropai// Science Almanac.—2016.—N4-3(18). — S.238–240.
6. Shipaeva, A.S. Calculation of the deflection of girder beam loaded on the bottom flange in the system Maple/ A.S. Shipaeva //Science Almanac. —2016.— N 5-3(19).— Pp. 236–239.
7. Bolotina, T. D. The deflection of the flat arch truss with a triangular lattice depending on the number of panels/ T. D. Bolotina //Bulletin of Scientific Conferences. —2016.— № 4-3(8). — Pp.7–8.
8. Al-Shahrabi, A. M. Line of influence of the deflection for cantilever truss / A. M. Al-Shahrabi, M.N. Kirsanov // Vestnik nauchnykh konferentsiy. — 2016. № 2-1(6). — S. 6–7.
9. Dong, X. The dependence of the deflection of the truss from the position of the load for an arbitrary number of panels/ X. Dong, M.N. Kirsanov //Vestnik nauchnykh konferentsiy.— 2016. —№ 1-4 (5). — S. 6–7.
10. Jiang, H. An analytical expression for the influence line of the truss/ H. Jiang, M.N. Kirsanov // Vestnik nauchnykh konferentsiy. — 2016. — № 1-5(5). — S.10–11.
11. Ponamareva, M.A. The displacement of the support trusses with parallel belts under uniform load/ M.A. Ponamareva//Nauchnyy al'manakh. —2016. — № 4-3(18). — S.257–259.
12. Yershov, L.A. Formuly dlya rascheta deformatsiy piramidal'nogo kupola/ L.A Yershov //Nauchnyy al'manakh. — 2016. — N11-2(25). — S.315-318
13. Kirsanov, M.N. Raschet prostranstvennoy sterzhnevoy sistemy, dopuskayushchey mgnovennuyu izmenyayemost'/M. N. Kirsanov //Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy.— 2012.— № 3.— S. 48–51.
14. Kiyko, L. K. Analiticheskaya otsenka progiba arochnoy fermy pod deystviyem vetrovoy nagruzki / L.K. Kiyko // Nauchnyy vestnik. — 2016. — № 1 (7). — S. 247–254.
15. Tin'kov, D. V. Sravnitel'nyy analiz analiticheskikh resheniy zadachi o progibe fermennykh konstruktsiy/ D. V. Tin'kov // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. — 2015. — №5(57). — S. 66–73.
16. Tin'kov, D. V. Analiz tochnykh resheniy progiba regulyarnykh sharnirno-sterzhnykh konstruktsiy/ D. V. Tin'kov // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. — 2015.— №6. — S. 21–28.

Gavrilenko A. B.

National Research University "MPEI", Moscow
senior lecturer
E-mail:gavrilenkoab@mpei.ru

Kirsanov M. N.

National Research University "MPEI", Moscow
Dr. Sci (Math.), professor
E-mail:c216@ya.ru

ЗЕРНОВ И.И., ПЕСТРЯКОВА Е.А., ХАРИТОНОВ С.С.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ ПУТИ И КОНСТРУКЦИИ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ ИЗ ОПУСКНЫХ СЕКЦИЙ

В связи со стратегической важностью развития скоростного и высокоскоростного движения в России, необходима детальная проработка проблемы воздействия высокоскоростного подвижного состава на верхнее строение пути и искусственные сооружения. В статье рассматривается вопрос воздействия высокоскоростных подвижных нагрузок на балки, для целей определения воздействия высокоскоростного подвижного состава на верхнее строение пути и обделки тоннелей из опускных секций. С использованием функции Грина, преобразования Фурье и теории вычетов определяется общий вид зависимости прогибов в балке от скорости движения нагрузки. Рассмотрен пример определения напряженно деформированного состояния и критических скоростей для балки с использованием полученных в ходе исследования закономерностей. Выявлено, что при расположении железнодорожного пути на мягких грунтах, с учетом современного уровня технического развития, достижение критических скоростей возможно. Эффекты увеличения вибраций, проявляющиеся при достижении подвижным составом критических скоростей, могут быть опасны и требуют детального изучения.

Ключевые слова: *высокоскоростное движение; подвижная нагрузка; преобразование Фурье; функция Грина; критические скорости; верхнее строение пути; тоннели из опускных секций.*

Введение

С момента ввода в эксплуатацию первой в мире высокоскоростной магистрали (ВСМ) в Японии в 1964 году, развитие высокоскоростного движения идет все более высокими темпами [1]. Наличие высокоскоростного железнодорожного транспорта стало одним из показателей уровня технического развития стран, в связи с чем развитие скоростного и высокоскоростного движения является одним из стратегических приоритетов России, что отражено в «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [2].

В связи с вышесказанным, изучение напряженно-деформированного состояния верхнего строения пути и искусственных сооружений при действии нагрузок, определяемых движением высокоскоростного подвижного состава и оптимизация расчетов в данной области, являются актуальными задачами.

В Российском университете железнодорожного транспорта (МИИТ), проблемам, связанным с высокоскоростным движением поездов, уделяется большое внимание. Так в 2015 году в МИИТе под руководством Курбацкого Е. Н. была успешно защищена диссертация «Воздействие высокоскоростных подвижных нагрузок на балки, плиты и полупространство» Нгуен Чонг Тама [3], в которой рассмотрены эффекты существенного возрастания вибраций, генерируемых рельсовым транспортом, и прогибов в конструкции пути, возникающие при движении поездов со скоростями, близкими к скоростям распространения волн Релея в грунтах основания ж/д пути, скоростям волн в плитах основания (критические скорости), и минимальным фазовым скоростям распространения изгибных волн в конструкции верхнего строения пути (критическая скорость верхнего строения пути) [4, 5, 6].

В прошлые годы, эффектам, возникающим при движении поездов с рассматриваемыми типами критических скоростей уделялось недостаточно внимания, так как считалось, что достижение таких скоростей на практике вряд ли возможно [7]. Однако, выполненные в последнее время теоретические исследования и натурные испытания показали, что достижение

и превышение критических скоростей на современном уровне развития техники возможно, при условии размещения пути на участке с мягкими грунтами [8, 9].

Отметим такой факт. При эксплуатации высокоскоростных поездов Х2000 в Швеции на участках с очень мягкими грунтами при увеличении скорости движения от 140 до 180 км/час вибрации грунта возросли в 10 раз. Объяснение этого явления связали с превышением скоростей движения поездов скоростей распространения поверхностных волн Рэлея в подстилающих слоях грунтов [10]. Скорости распространения поверхностных волн Рэлея в грунтах на вышеуказанных участках, составили всего 45м/сек. В технической литературе даже появился такой термин как «транsrэлеевские поезда».

Расчётная модель и метод решения

В настоящей работе тоннель будет рассматриваться как балка на упруго вязком основании, в связи с чем оцениваться будет фазовая скорость распространения изгибных волн в тоннельной обделке.

Для оценки взаимодействия высокоскоростных поездов с конструкцией обделки тоннеля воспользуемся моделью балки Эйлера-Бернулли на упругом основании (рис1) [11]. При необходимости для уточнения расчётных моделей можно использовать и другие модели балок: модели Рэлея и Тимошенко.

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + Ku + C \frac{\partial u}{\partial t} + \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = q(x, t) \quad (1)$$

где: u - прогиб балки, x - координата направления движения подвижной нагрузки, t - время, EI - жесткость балки, E - модуль Юнга, I - момент инерции балки, K - коэффициент постели основания, C - коэффициент вязкого демпфирования основания, ρ – плотность, A – площадь сечения.

Для получения решения на подвижную нагрузку определяется функция Грина уравнения (1). Функции Грина позволяют получить решение линейных уравнений в частных производных в замкнутой форме в виде интеграла [12]. Для этой цели определяется решение дифференциальных уравнений от точечных источников. Функция Грина $G(x, t)$ определяет перемещение балки от мгновенного точечного воздействия, которое представляется в виде произведения дельта функций Дирака:

$$q_{\delta}(x, t) = \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) \quad (2)$$

Для получения функции Грина используются обобщённые функции и преобразование Фурье.

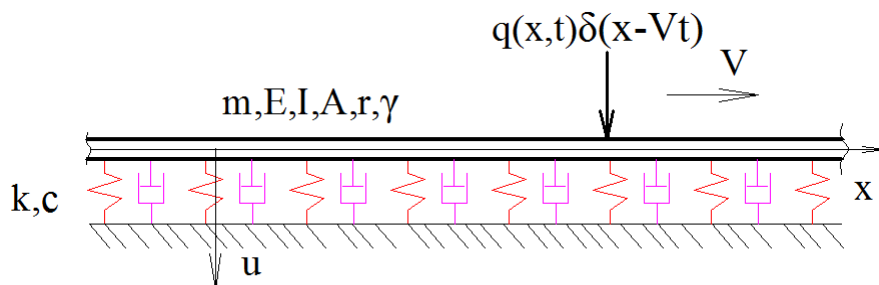


Рисунок 1 - Расчётная схема тоннеля

Ввиду того, что преобразование Фурье может определяться различными способами [13], представим формулы прямого и обратного преобразования, которые будут использоваться в статье:

$$\begin{aligned}\tilde{f}(v, \omega) &= F[f(x, t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) e^{ivx} e^{i\omega t} dx dt \\ f(x, t) &= F^{-1}[\tilde{f}(v, \omega)] = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(v, \omega) e^{-ivx} e^{-i\omega t} dv d\omega\end{aligned}\quad (3)$$

$\tilde{f}(v, \omega)$ - изображение Фурье функции $f(x, t)$

ω и v - параметры преобразования Фурье частота и волновое число.

Кроме того, представим соответствие операции при преобразовании дифференциальных уравнений в область изображений:

$$\begin{aligned}F[f^n(t)] &= (-i\omega)^n \tilde{f}(\omega) \\ F[f^n(x)] &= (-iv)^n \tilde{f}(v)\end{aligned}\quad (4)$$

Отметим так же свойства дельта функций, которые будут использоваться при выводе функции Грина [13]:

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) dx &= f(x_0) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, t) \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) dx dt &= f(x_0, t_0) \\ \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\omega+a)t} dt &= 2\pi \delta(\omega + a)\end{aligned}\quad (5)$$

Используя свойство дельта функций Дирака, запишем преобразование Фурье точечного мгновенного воздействия

$$\tilde{q}_\delta(v, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - x_0) \delta(t - t_0) e^{ivx} e^{i\omega t} dx dt = e^{ivx_0} e^{i\omega t_0}\quad (6)$$

Вывод функции Грина

Для построения функции Грина рассмотрим уравнение колебаний балки на вязкоупругом основании при воздействии мгновенного точечного воздействия (2). Дифференциальное уравнение в таком случае имеет вид:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + Ku + C \frac{\partial u}{\partial t} + \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = q_\delta(x, t)\quad (7)$$

Применив преобразование Фурье по двум переменным к левой и правой частям уравнения (7) получим:

$$\tilde{G}(v, \omega) [EIv^4 + K - iC\omega - \rho A\omega^2] = \tilde{q}_\delta(v, \omega)\quad (8)$$

При выполнении прямого преобразования Фурье используются свойства, представленные в выражениях (4).

Используя выражения (6) и (8), представим функцию Грина в частотной области:

$$\tilde{G}(v, \omega) = \frac{e^{ivx_0} e^{i\omega t_0}}{EIv^4 + K - iC\omega - \rho A\omega^2}\quad (9)$$

Для определения функции Грина в зависимости от времени и пространственной переменной необходимо выполнить обратное преобразование Фурье:

$$G(x, t, x_0, t_0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-iv(x-x_0)} e^{-i\omega(t-t_0)}}{EIv^4 + K - iC\omega - \rho A\omega^2} dv d\omega \quad (10)$$

Для получения решения неоднородного уравнения (1) с произвольной правой частью $q(x, t)$ необходимо выполнить интегрирование:

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} q(x_0, t_0) G(x, t, x_0, t_0) dx_0 dt_0 \quad (11)$$

Интегральное представление решения

Как уже отмечалось выше, функция Грина позволяет получить решение в замкнутой форме в виде интеграла. При воздействии на балку сосредоточенной силы, движущейся с постоянной скоростью, правая часть уравнения определяется выражением:

$$q(x, t) = P\delta(x - Vt) \quad (12)$$

Наличие дельта функции в правой части уравнение позволит упростить выкладки.

Подставляя выражения (10) и (12) в формулу (11), получим

$$u(x, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P\delta(x_0 - Vt_0) e^{-iv(x-x_0)} e^{-i\omega(t-t_0)}}{EIv^4 + K - iC\omega - \rho A\omega^2} dv d\omega dx_0 dt_0 \quad (13)$$

Учитывая свойство функции Дирака (5), упростим выражение (13)

$$u(x, t) = \frac{P}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-iv(x-Vt_0)} e^{-i\omega(t-t_0)}}{EIv^4 + K - iC\omega - \rho A\omega^2} dv d\omega dt_0 \quad (14)$$

Учитывая, что $\int_{-\infty}^t e^{i(\omega+vV)t_0} dt_0 = 2\pi\delta(\omega + vV)$ (см. свойство (5)), получим в подынтегральном выражении множителем функцию Дирака, которая позволит упростить выражение:

$$u(x, t) = \frac{P}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta(\omega + vV) e^{-ivx} e^{-i\omega t}}{EIv^4 + K - iC\omega - \rho A\omega^2} dv d\omega \quad (15)$$

Используя свойство (5) дельта функции, получим

$$u(x, t) = \frac{P}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-iv(x-Vt)}}{EIv^4 + K + iCvV - \rho Av^2V^2} dv \quad (16)$$

Вычисление несобственного интеграла (16) будет выполняться в комплексной плоскости с использованием контурного интегрирования и теории вычетов. Для этой цели найдём корни знаменателя подынтегрального выражения, который представляет собой биквадратное уравнение:

$$EIv^4 + K + iCvV - \rho Av^2V^2 = 0 \quad (17)$$

$$EIv^4 + K + iCvV - \rho Av^2V^2 = 0$$

$$v^4 + 4\beta^4 - \frac{V^2}{\alpha^2 r^2} v^2 = 0$$

$$v^2 = \frac{V^2}{2\alpha^2 r^2} \pm \sqrt{\frac{V^2}{2\alpha^2 r^2} - 4\beta^4}$$

Для определения зависимости прогиба от пространственной координаты можно воспользоваться теорией вычетов, для чего необходимо знать корни знаменателя подынтегрального выражения (17).

$$v^4 - \frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot v^2 V^2 + 4\beta^4 + i\tilde{c}vV = 0 \quad (18)$$

Знаменатель подынтегрального выражения представляет собой полином четвёртого порядка и, следовательно, имеет четыре корня. Два корня расположены в верхней полуплоскости и два в нижней.

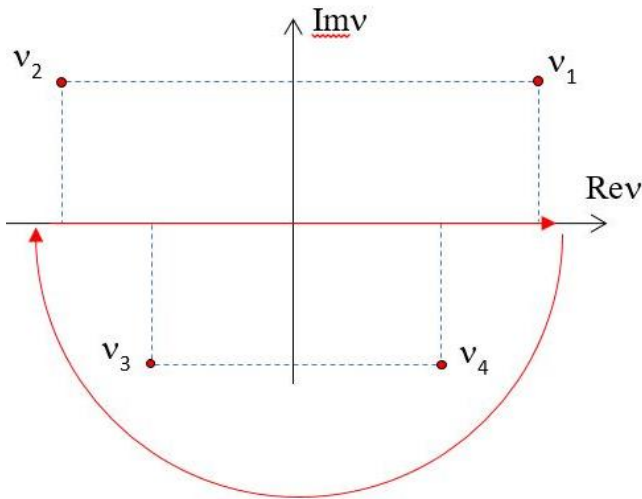


Рисунок 2 – Схема расположения корней знаменателя подынтегрального выражения (17) на комплексной плоскости

Уравнения без учёта вязкого демпфирования:

$$v^4 - \frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot v^2 V^2 + 4\beta^4 = 0$$

$$v_{1,2}^2 = \frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot V^2 \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot V^2\right)^2 - 16\beta^4}$$

$$\left(\frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot V^2\right)^2 - 16\beta^4 = 0 \quad \frac{V}{\alpha r} = \sqrt[4]{\frac{k}{EI}}$$

(19)

$$v^4 - \frac{\rho A}{EI} \cdot v^2 V^2 + \frac{k}{EI} = 0$$

$$\left(\frac{\rho A}{EI}\right)^2 V^4 = 4 \frac{k}{EI} \quad \frac{4kEI}{(\rho A)^2} = V^4$$

$$V = \sqrt[4]{\frac{4kEI}{(\rho A)^2}}$$

Для определения функции прогиба перед движущейся силой при $x - Vt \geq 0$ необходимо вычислить интеграл (10) по контуру, лежащему в нижней полуплоскости (рисунок 2). В выражение для этого интеграла вносят вклад только полюсы, лежащие в нижней полуплоскости. Поэтому функцию прогиба можно представить в виде:

$$u(x, t) = \frac{P}{2\pi EI} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp[-i(x - Vt)v]}{v^4 - \frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot v^2 V^2 + 4\beta^4 + i\tilde{c}vV} dv = \quad (20)$$

$$= \frac{P}{2\pi EI} \left[2\pi i \sum_{\text{Im}v < 0} \frac{\exp[-i(x - Vt)v]}{v^4 - \frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot v^2 V^2 + 4\beta^4 + i\tilde{c}vV} \right]$$

Так как все полюсы первого порядка, вычеты определяются по формуле:

$$\text{res} \left\{ \frac{\exp[-i(x - Vt)v]}{v^4 - \frac{1}{\alpha^2 r^2} \cdot v^2 V^2 + 4\beta^4 + i\tilde{c}vV} \right\}_{\text{Im}v < 0} = \frac{\exp[-i(x - Vt)v_k]}{4v_k^3 - \frac{2}{\alpha^2 r^2} \cdot v_k V^2 + i\tilde{c}V} \quad (21)$$

Таким образом, функцию прогиба можно представить в виде:

$$u(x, t) = \frac{iP}{EI} \sum_{\text{Im}v_k < 0} \frac{\exp[-i(x - Vt)v_k]}{4v_k^3 - \frac{2}{\alpha^2 r^2} \cdot v_k V^2 + i\tilde{c}V} \quad (22)$$

Для определения функции прогиба за движущейся силой при $x - Vt < 0$ необходимо учитывать только полюсы, лежащие в верхней полуплоскости.

$$u(x, t) = \frac{iP}{EI} \sum_{\text{Im}v_k > 0} \frac{\exp[-i(x - Vt)v_k]}{4v_k^3 - \frac{2}{\alpha^2 r^2} \cdot v_k V^2 + i\tilde{c}V} \quad (23)$$

Для определения перемещения произвольного сечения рельса во времени при проезде над ним сосредоточенной силы необходимо зафиксировать пространственную координату (например, $x = 0$).

Так как определение в общем аналитическом виде выражений для корней не представляется возможным, дальнейшие вычисления выполняются в программном комплексе МАТЛАБ.

В качестве примера используется конструкция верхнего строения пути со следующими характеристиками: $K = 7.5$ мПа, $E = 2 \cdot 10^5$ мПа, $I = 3540 \cdot 10^{-8}$ м⁴, $m = 320$ кг/м с учетом массы шпал, вязкое демпфирование: $C = 2\xi\sqrt{Km}$, при $\xi = 0.01$. Сила, передающаяся колесом на рельс: $P = 115$ кН. Такие параметры верхнего строения пути практически не учитывают деформации тоннельной обделки и грунта под основанием обделки. Поэтому величина критической скорости составляет 120 м/с (432 км/ч).

Для выявления зависимости между скоростями движения силы и прогибами, найдем корни выражения (17) при скоростях: $V_1 = 10$ м/с, $V_2 = 50$ м/с, $V_3 = 100$ м/с (таблица 1).

Таблица 1 - Корни выражения (11)

Скорость V, м/с	Корни выражения (11)			
	v_1	v_2	v_3	v_4
10	0.7178 + 0.7166*i	-0.7178 + 0.7166*i	-0.7185 - 0.7166*i	0.7185 - 0.7166*i
50	0.7351 + 0.6974*i	-0.7351 + 0.6974*i	-0.7385 - 0.6974*i	0.7385 - 0.6974*i
100	0.7888 + 0.6337*i	-0.7888 + 0.6337*i	-0.7957 - 0.6337*i	0.7957 - 0.6337*i

Подставляя полученные корни в уравнения (22) и (23) при условии, что $x = 0$, построим график зависимости прогибов балки в начале координат от времени при разных скоростях (рисунок 8).

Отсюда, как показывают расчёты, следует небольшое увеличение максимальных перемещений рельсов при возрастании скорости движения поезда до скорости, близкой к критической, но не превышающей её.

Аналогично, приняв $t = 0$, найдем прогибы балки в момент прохождения силой начала координат при разных скоростях (рисунок 9).

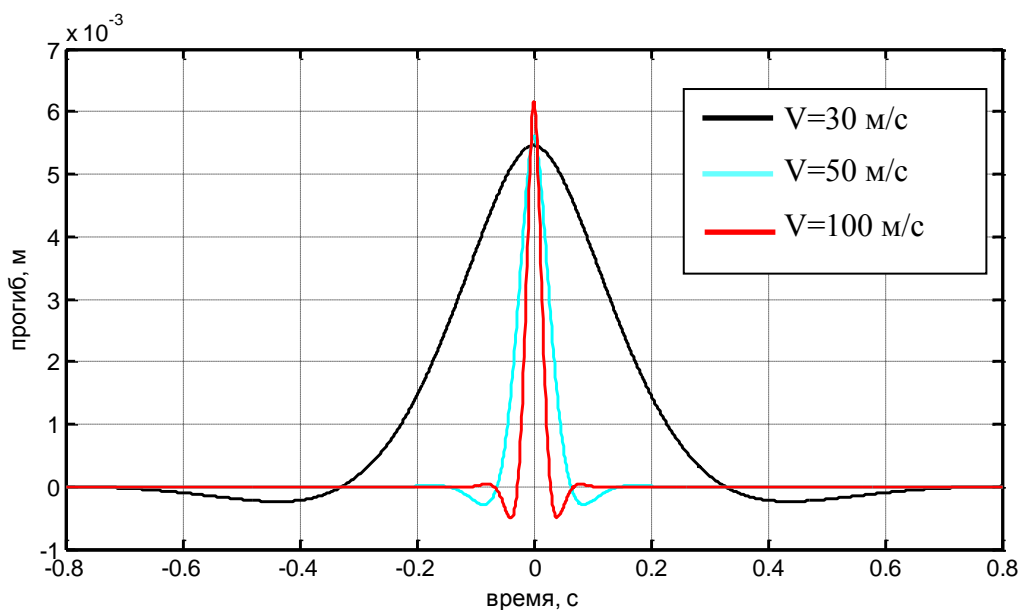


Рисунок 3 – прогибы балки в начале координат ($x = 0$) при разных скоростях движения

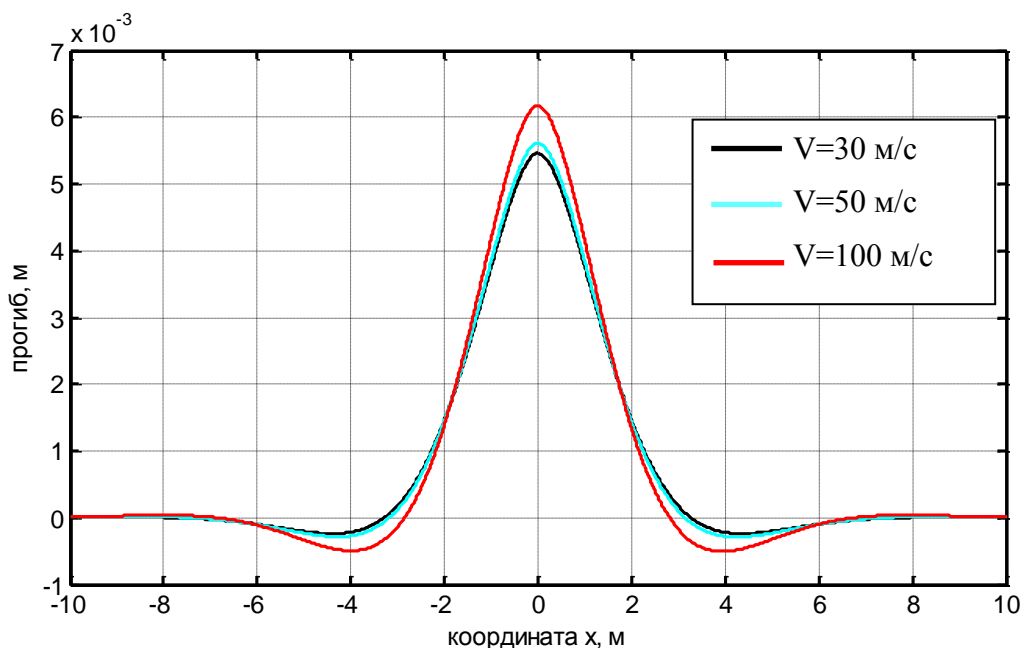


Рисунок 4 – прогибы балки при разных скоростях движения в момент времени $t = 0$

Заключение

При анализе колебаний секций тоннелей из опускных секций можно ожидать, что вибрации при движении даже не высокоскоростных поездов будут значительно выше и даже опасней. Тоннели из опускных секций располагаются на мягких грунтах, в которых скорости волн Рэлея малы, а именно они и будут определять критические скорости.

Авторами настоящей статьи подготовлен к печати материал, в котором анализируется и оценивается воздействие поездов на тоннели из опускных секций. В качестве исходных данных используется материал (инженерно геологические условия) пролива Невельского, по дну которого возможно будет прокладываться тоннель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасёва А. А. Анализ мирового опыта развития высокоскоростного железнодорожного транспорта / А.А. Карасёва, М.А. Васильева // Молодой ученый. — 2016. — №6. — С. 114-117. — URL <https://moluch.ru/archive/110/26636/> (дата обращения: 28.04.2018).
2. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года // [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://doc.rzd.ru>.
3. Нгуен Чонг Там. Воздействие высокоскоростных подвижных нагрузок на балки, плиты и полупространство. Дис. канд. техн. наук. По спец. «Строительная механика». Москва. 2015. Стр. 27.
4. Fryba, F. Vibration of solids and structures under moving loads / F. Fryba. Thomas Telford. ISBN 0-7277-2741-9. 3-d edition 1999. – 521p.
5. Kim, S.M. Stability and dynamic response of Rayleigh beam–columns on an elastic foundation under moving loads of constant amplitude and harmonic variation / S.M. Kim// Engineering structures.–2005. 12p.
6. Kim, S.M. Vibration and dynamic buckling of shear beam-columns on elastic foundation under moving harmonic loads / S.M. Kim, Y.C. Cho// International journal of solid and structures 43.–2006.– 393-412.
7. Тимошенко, С. П. Прочность и колебания элементов конструкций / С. П. Тимошенко. Главная редакция физико-математической литературы. Изд-ва «Наука».– 1975. – 704 с.
8. Krylov, V.V. Vibrational impact of high-speed trains. I. Effect of track dynamics / V.V. Krylov// Journ. Acoust. Soc. Am.– 100 (5).– 3121-3134; erratum 1996.– 101(6), 3810.
9. Krylov, V.V. Spectra of low-frequency ground vibrations generated by highspeed trains on layered ground / V.V. Krylov// Journ. Low Frequency Noise and Vibr.– 1997. – 16(4).– P. 257-270.
10. Madshus, с. (1997) Public announcement made at the conference “Ground Dynamics and Man-made Processes: Prediction, Design, Measurement”, ICE, London, 20 November 1997.
11. Love, A. E. Treatise on the Mathematical theory of Elasticity / A. E. Love. - New York: Dover Publications, 1944.
12. Морс, Ф.М. Методы теоретической физики / Ф.М. Морс, Г. Фешбах. - М., 1958.- Т.1. - 931 с.
13. Брычков Ю.А., Прудников А.П. Интегральные преобразования обобщенных функций. 1977. – 288 с.
14. Гельфанд И. М., Шиллов Г. Е. Обобщенные функции и действия над ними. - М.: Добросвет, 2000. - 400 с.

Зернов Иван Игоревич

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
Студент кафедры «Мосты и тоннели».
127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9.
E-mail: usd.miiit@gmail.com

Пестрякова Екатерина Алексеевна

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
Старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»
127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9.
E-mail: usd.miiit@gmail.com

Харитонов Сергей Сергеевич

Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва
Аспирант кафедры «Мосты и тоннели»
127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9.
E-mail: mr.kharitonov.94@mail.ru

ZERNOV I.I., PESTRYAKOVA E.A., KHARITONOV S.S.

THE IMPACT OF HIGH-SPEED ROLLING STOCK ON THE SUPERSTRUCTURE AND THE DESIGN OF IMMERSSED TUNNELS

In connection with the strategic importance of the development of high-speed traffic in Russia, it is necessary to thoroughly study the problem of the impact of high-speed rolling stock on the superstructure and artificial structures. The article deals with the impact of high-speed rolling load on beams for the purpose of determining the impact of high-speed rolling stock on the superstructure of the track

and design of immersed tunnels. Using the Green's function, the Fourier transform, and the theory of residues, we determine the general form of the dependence of the deflections in the beam on the velocity of the load. An example of the determination of a stress-strain state and critical speed for a beam with use of the regularities obtained in the course of the study is considered. It was revealed that when the railway track is located on soft soils, taking into account the current level of technical development, it is possible to achieve critical speeds. The effects of increasing the vibrations, manifested when the rolling stock reaches critical speeds, can be dangerous and require detailed study.

Keywords: *high-speed running, rolling load, Fourier transformation, Green's function, critical speed, superstructure, immersed tunnels.*

REFERENCES

1. Karasova A. A. Analiz mirovogo opyta razvitiya vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta / A.A. Karasova, M.A. Vasil'yeva // Molodoy uchenyy. — 2016. — №6. — S. 114-117. — URL <https://moluch.ru/archive/110/26636/> (data obrashcheniya: 28.04.2018).
2. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda // [Elektronnyy resurs] / Rezhim dostupa: <http://doc.rzd.ru>.
3. Nguyen Chong Tam. Vozdeystviye vysokoskorostnykh podvizhnykh nagruzok na balki, plity i polupros-transtvo. Dis. kand. tekhn. nauk. Po spets. «Stroitel'naya mekhanika». Moskva. 2015. Str. 27.
4. Fryba, F. Vibration of solids and structures under moving loads / F. Fryba. Thomas Telford. ISBN 0-7277-2741-9. 3-d edition 1999. — 521p.
5. Kim, S.M. Stability and dynamic response of Rayleigh beam-columns on an elastic foundation under mov-ing loads of constant amplitude and harmonic variation / S.M. Kim// Engineering structures.—2005. 12p.
6. Kim, S.M. Vibration and dynamic buckling of shear beam-columns on elastic foundation under moving harmonic loads / S.M. Kim, Y.C. Cho// International journal of solid and structures 43.—2006.— 393-412.
7. Timoshenko, S. P. Prochnost' i kolebaniya elementov konstruktsey / S. P. Timoshenko. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury. Izd-va «Nauka».— 1975. — 704 s.
8. Krylov, V.V. Vibrational impact of high-speed trains. I. Effect of track dynamics / V.V. Krylov// Journ. Acoust. Soc. Am.— 100 (5)— 3121-3134; erratum 1996.— 101(6), 3810.
9. Krylov, V.V. Spectra of low-frequency ground vibrations generated by highspeed trains on layered ground / V.V. Krylov// Journ. Low Frequency Noise and Vibr.— 1997. — 16(4).— P. 257-270.
10. Madshus, c. (1997) Public announcement made at the conference “Ground Dynamics and Man-made Pro-cesses: Prediction, Design, Measurement”, ICE, London, 20 November 1997.
11. Love, A. Ye. Treatise on the Mathematical theory of Elasticity / A. E. Love. - New York: Dover Publica-tions, 1944.
12. Mors, F.M. Metody teoreticheskoy fiziki / F.M. Mors, G. Feshbakh. - M., 1958. T.1. - 931 s.
13. Brychkov YU.A., Prudnikov A.P. Integral'nyye preobrazovaniya obobshchennykh funktsiy. 1977. — 288 s.
14. Gel'fand I. M., Shilov G. Ye. Obobshchonnyye funktsii i deystviya nad nimi. - M.: Dobrosvet, 2000. - 400s.

Zernov I.I.

Russian University of transport (MIIT), Moscow
Student of the Department "Bridges and tunnels".
127994, Moscow, ul. Obratsova, d 9, p. 9.
E-mail: usd.miit@gmail.com

Pestryakova E.A.

Russian University of transport (MIIT), Moscow
Senior lecturer of the Department " Bridges and tunnels»
127994, Moscow, ul. Obratsova, d 9, p. 9.
E-mail: usd.miit@gmail.com

Kharitonov S.S.

Russian University of transport (MIIT), Moscow
Post-graduate student of " Bridges and tunnels»
127994, Moscow, ul. Obratsova, d 9, p. 9.
E-mail: mr.kharitonov.94@mail.ru

УДК 539.374

КОРОБКО А.В., КАЛАШНИКОВА Н.Г., ЛЫГИНА Ю.Е.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ЖЕСТКОСТЬ КРУЧЕНИЯ СЕЧЕНИЙ В ВИДЕ ПРАВИЛЬНЫХ МНОГОУГОЛЬНИКОВ

В статье показано, что приведенная геометрическая жесткость сечений в виде правильного многоугольника при свободном кручении стержня функционально связана с интегральными геометрическими аргументами, характеризующими форму сечения, – коэффициентом формы и отношением конформных радиусов. Приводится сопоставление известных из справочной и научной литературы значений приведенной геометрической жесткости сечений в виде правильных многоугольников при свободном кручении стержня, с соответствующими значениями этого параметра, полученными с использованием интегральных геометрических аргументов сечений – коэффициента формы и отношения конформных радиусов. В первом случае построенная аппроксимирующая функция дает приближение к известным значениям с погрешностью до 1%, а во втором – до 0,5%. Полученные результаты могут быть использованы при расчете геометрической жесткости кручения стержневых конструктивных элементов.

Ключевые слова. Кручение упругих стержней, сечения в виде правильных многоугольников, приведенная геометрическая жесткость сечений, коэффициент формы, отношение конформных радиусов.

Введение

Одной из важнейших задач теории упругости является задача о кручении призматических стержней [1]. Конструкции, испытывающие деформации кручения, широко распространены в строительстве и машиностроении. При расчете стержней на кручение в первую очередь определяется геометрическая жесткость кручения I_k стержня, а затем с её помощью исследуется его напряженно-деформированное состояние. В теории упругости известно немного точных решения этой задачи, в частности, стержни с эллиптическим и прямоугольным сечением. В остальных случаях используются различные приближенные аналитические и численные методы [1], которые являются достаточно трудоемкими.

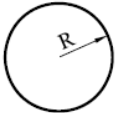
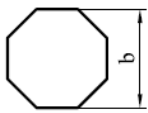
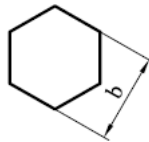

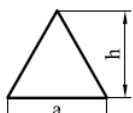
В последние десятилетия к решению задач на кручение привлекаются геометрические методы – изопериметрический метод (ИЗПМ) [2] и метод интерполяции по коэффициенту формы (МИКФ) [3]. В основу этих методов положены изопериметрические свойства геометрической жесткости кручения сечений и интегральных геометрических характеристик – коэффициента формы K_f и отношения конформных радиусов (внутреннего к внешнему \dot{r}/\bar{r}) [3, ..., 8]. Как показали проведенные исследования, указанные геометрические характеристики K_f и \dot{r}/\bar{r} являются аналогом геометрической жесткости сечений I_k . Оказалось, что геометрическая жесткость сечений в виде правильных многоугольников образует часть нижней границы для всего множества значений I_k для стержней с сечением в виде произвольной выпуклой фигуры.

Некоторые задачи о взаимосвязи I_k – K_f уже рассмотрены в научной литературе [3, 6, 7, 8], а к исследованию взаимосвязи I_k – \dot{r}/\bar{r} еще не приступали. Известны лишь публикации [6, ..., 8], в которых использован аргумент \dot{r}/\bar{r} при исследовании задач поперечного изгиба, свободных колебаний и устойчивости упругих пластинок с выпуклым контуром. В связи с этим целью опубликования настоящей статьи является показать специалистам в области строительной механики новые возможности применения методов интерполяции к решению задач свободного кручения призматических стержней.

1 Представление геометрической жесткости сечений в виде правильного многоугольника в зависимости от их коэффициента формы и отношения конформных радиусов

В научной и справочной литературе [1, 9] приводятся значения геометрической жесткости сечений I_k в виде правильного многоугольника, которые представлены в таблице 1 (строка 2). В строке 3 указаны значения приведенной геометрической жесткости сечений $i_k = I_k/A^2$ (A – площадь сечения), в строке 4 – значения коэффициента формы рассматриваемых сечений, а в строке 5 – отношения их конформных радиусов.

Таблица 1 – Известные значения геометрической жесткости сечений в виде правильного многоугольника, их коэффициентов формы и отношений конформных радиусов

№ п/п	Круг	Восьмиугольник	Шестиугольник	Квадрат	Правильный треугольник
1					
2	$I_k = 0,5\pi R^4$	$I_k = 0,115b^4$	$I_k = 0,108b^4$	$I_k = 0,140a^4$	$I_k = ah^3/30$
3	$i_k = 1/(2\pi)$	$i_k = 0,1568$	$i_k = 0,1533$	$i_k = 0,1406$	$i_k = 0,1155$
4	$K_f = 2\pi$	$K_f = 6,6274$	$K_f = 6,9282$	$K_f = 8$	$K_f = 10,392$
5	$\dot{r}/\bar{r} = 1$	$\dot{r}/\bar{r} = 0,9903$	$\dot{r}/\bar{r} = 0,9762$	$\dot{r}/\bar{r} = 0,9139$	$\dot{r}/\bar{r} = 0,7748$

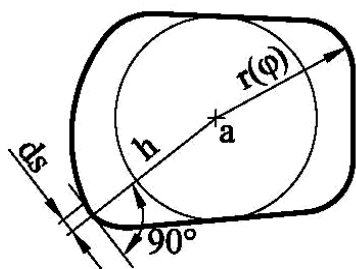


Рисунок 1 - Произвольная односвязная плоская область с выпуклым контуром

Коэффициент формы для произвольной односвязной плоской области с выпуклым контуром представляется контурным интегралом

$$K_f = \min \int_L ds/h, \tag{1}$$

где L – контур области; ds – элемент дуги контура; h – перпендикуляр, опущенный из точки, взятой внутри области на касательную к переменной точке контура (рис. 1). Коэффициент формы является количественной характеристикой формы области: чем меньше K_f , тем более «правильнее» фигура, например, из всех правильных многоугольников наименьшее значение K_f имеет круг.

Подробные сведения об этой интегральной геометрической характеристике, её изопериметрических свойствах и возможностях использования при решении задач теории упругости приведены в монографии [3].

Отношение конформных радиусов (внутреннего к внешнему) для правильных многоугольников определяется по формуле [10]:

$$\frac{\dot{r}}{\bar{r}} = \frac{\Gamma(1-1/n)}{2^{1-2/n} \Gamma(1/2) \Gamma(1/2-1/n)} / \frac{\Gamma(1+1/n)}{2^{1+2/n} \Gamma(1/2) \Gamma(1/2+1/n)}, \tag{2}$$

где n – число сторон n -угольника; $\Gamma(x)$ – Γ -функция (Гамма функция). В диссертации А.А. Черняева [11] по результатам подсчета отношений конформных радиусов для правильных многоугольников построена аппроксимирующая функция

$$\dot{i}/\bar{r} = f + bn^{-1} + cn^{-2} + dn^{-3} + en^{-4}, \quad (3)$$

где $f = 0,99997$; $b = 0,013472$; $c = -0,33812$; $d = -1,9499$; $e = -9,7087$. Погрешность этой функции не превышает 0,01%.

Таблица 2 – Анализ геометрической жесткости кручения
для сечений в виде правильных многоугольников

Форма области	i_k по [9]	K_f	$1/K_f$	i_k по (4)	$\Delta, \%$	\dot{i}/\bar{r}	i_k по (5)	$\Delta, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Круг	0,1592	6,2832	0,1592	0,1592	0	1	0,1592	0
Правильные многоугольники								
8-угольник	0,1568	6,6274	0,1509	0,1554	0,89	0,9903	0,1571	0,19
6-угольник	0,1533	6,9282	0,1443	0,1521	0,78	0,9762	0,1540	0,46
4-угольник	0,1406	8	0,1250	0,1403	0,21	0,9139	0,1412	0,42
3-угольник	0,1155	10,392	0,0962	0,1156	0,09	0,7748	0,1155	0

По исходным данным, приведенным в таблице 1, построены аппроксимирующие функции $i_k - K_f$ и $i_k - \dot{i}/\bar{r}$:

$$i_k = \frac{1}{4,913 + 0,0346K_f^2}; \quad (4)$$

$$i_k = 0,0498 + 0,1094(\dot{i}/\bar{r})^2. \quad (5)$$

В таблице 2 представлен анализ этих функций. В колонке 5 приведены решения, выполненные по формуле (4), а в колонке 8 – решения, выполненные по формуле (5). В первом случае погрешность результатов не превышает одного процента, а во втором – не превышает 0,5%. То есть, использование в качестве аргумента отношения конформных радиусов снижает погрешность приближенных зависимостей вдвое.

Выводы

1 В статье показано, что приведенная геометрическая жесткость сечений в виде правильного многоугольника при свободном кручении стержня функционально связана с интегральными геометрическими аргументами, характеризующими форму сечения, – коэффициентом формы и отношением конформных радиусов.

2 Известные решения, приводимые в справочной и научной литературе о приведенной геометрической жесткости сечений в виде правильных многоугольников при свободном кручении стержней, представлены в зависимости от интегральной геометрической характеристики сечений – коэффициента формы и отношения конформных радиусов. С помощью аппроксимирующей функции $i_k - K_f$ получены результаты, отличающиеся от известных решений в пределах 1%, а с помощью аппроксимирующей функции $i_k - \dot{i}/\bar{r}$ – с погрешностью менее 0,5%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян, Н.Х. Кручение упругих тел [Текст] / Н.Х. Арутюнян, В.Л. Абрамян. – М.: Физматгиз, 1963. – 686 с.
2. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в строительной механике: Теоретические основы изопериметрического метода [Текст] / В.И. Коробко. – М.: Издательство АСВ, 1997. – 390 с.

3. Коробко, А.В. Геометрическое моделирование формой области в двумерных задачах теории упругости [Текст] / А.В. Коробко. – М.: Издательство АСВ, 1999. – 302 с.
4. Коробко, В.И. Графическое представление границ изменения геометрической жесткости сечений в виде выпуклых фигур [Текст] / В.И. Коробко, С.Г. Малых // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №3. – С. 2-7.
5. Korobko, V.I. Isoperimetric Properties of the Torsion Rigidity of Convex Section [Text] / V.I. Korobko, A.V. Korobko, S. Y. Savin, A.A. Chernyaev. // Procedia Engineering, International on Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. pp 1648-1656.
6. Коробко, В.И. Изопериметрический метод в задачах устойчивости пластинок [Текст] / В.И. Коробко, А.Н. Хусточкин. – Ростов-на-Дону: Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы, 1994. – 144 с.
7. Черняев, А.А. Динамический расчет правильных n-угольных, треугольных и ромбических шарнирно опертых пластинок с использованием отношения конформных радиусов в качестве геометрического аргумента [Текст] / А.А. Черняев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2012. - № 2.- С. 63-71.
8. Черняев А.А. Геометрическое моделирование пластинчатых конструкций из условия жесткости [Текст] / А.А. Черняев. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. – V. 8. Issue 4. P. 66-77.
9. Справочник по теории упругости (Для инженеров-строителей) [Текст] / Под редакцией П.М. Варвака, А.Ф. Рябова. – Киев: Будівельник, 1971. – 418 с.
10. Поляна, Г. Изопериметрические неравенства в математической физике [Текст] / Г. Поляна, Г. Сёге. – М.: КомКнига, 2006. – 336 с.
11. Черняев, А.А. Развитие метода интерполяции по отношению конформных радиусов для решения задач поперечного изгиба пластинок [Текст]: дисс. ... канд. технических наук: 05.23.17 / Черняев А.А. – Орел. – 2013. – 211 с.

Коробко Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
д.т.н., профессор кафедры «Мехатроника, механика и робототехника»
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
E-mail: ankor-66@mail.ru

Калашникова Наталья Григорьевна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника, механика и робототехника»
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
E-mail: naka.61@mail.ru

Лыгина Юлия Евгеньевна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
аспирантка кафедры «Строительные конструкции и материалы»
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
E-mail: raduga@mail.ru

KOROBKO A.V., KALASHNIKOVA N.G., LYGINA YU. E

**GEOMETRICAL STIFFNESS OF TORSEON
CROSS-SECTIONS IN THE FORM OF REGULAR POLYGONS**

The article shows that the reduced geometric rigidity of cross sections in the form of a regular polygon with free torsion of the rod is functionally related to the integral geometric arguments characterizing the shape of the cross-section, the form factor and the ratio of the conformal radii. The article considers the comparison of the reputed in the reference and science literature values of the normalized geometrical stiffness of cross-sections in the form of regular polygons at simple bar torsion, with this parameter corresponding values, obtained with the usage of integral geometric cross-sections arguments – form factor and conformal radii relation. In the first instance the constructed approximating function yields to the known values accurate to 1% and in the second instance to 0,5%. The obtained results can be used in calculating the geometric torsional rigidity of the rod structural elements.

***Keywords:** elastic bars torsion, cross-sections in the form of regular polygons, normalized geometrical stiffness of cross-sections, form factor, conformal radii relation.*

REFERENCES

1. Arutyunyan, N.X. Kruchenie uprugix tel [Tekst] / N.X Arutyunyan, V.L. Abramyan. – M.: Fizmatgiz, 1963. – 686 s.
2. Korobko, V.I. Izoperimetriceskij metod v stroitel'noj mexanike: Teoreticheskie osnovy` izoperimetriceskogo metoda [Tekst] / V.I. Korobko. – M.: Izdatel'stvo ASV, 1997. – 390 s.
3. Korobko, A.V. Geometricheskoe modelirovanie formoj oblasti v dvumerny`x zadachax teorii uprugosti [Tekst] / A.V. Korobko. – M.: Izdatel'stvo ASV, 1999. – 302 s.
4. Korobko, V.I. Graficheskoe predstavlenie granicz izmeneniya geometricheskoj zhestkosti sechenij v vide vy`pukly`x figur [Tekst] / V.I. Korobko, S.G. Maly`x // Izvestiya vuzov. Mashinostroenie. – 1986. – №3. – S. 2-7.
5. Korobko, V.I. Isoperimetric Properties of the Torsion Rigidity of Convex Section [Text] / V.I. Korobko, A.V. Korobko, S. Y. Savin, A.A. Chernyaev. // Procedia Engineering, International on Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. pp 1648-1656.
6. Korobko, V.I. Izoperimetriceskij metod v zadachax ustojchivosti plastinok [Tekst] / V.I. Korobko, A.N. Xustochkin. – Rostov-na-Donu: Izd-vo Severo-Kavkazskogo nauchnogo centra vy`sšej shkoly`, 1994. – 144 s.
7. Chernyaev, A.A. Dinamicheskij raschet pravil'ny`x n-ugol'ny`x, treugol'ny`x i rom-bicheskix sharnirno operty`x plastinok s ispol'zovaniem otnosheniya konformny`x radiusov v kachestve geometricheskogo argumenta [Tekst] / A.A. Chernyaev // Stroitel'naya mexanika inzhenerny`x konstrukcij i sooruzhenij. – 2012. - № 2.- S. 63-71.
8. Chernyaev A.A. Geometricheskoe modelirovanie plastinchaty`x konstrukcij iz usloviya zhestkosti [Tekst] / A.A. Chernyaev. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. – V. 8. Issue 4. P. 66-77.
9. Spravochnik po teorii uprugosti (Dlya inzhenerov-stroitelej) [Tekst] / Pod redakciej P.M. Varvaka, A.F. Ryabova. – Kiev: Budivel'nik, 1971. – 418 s.
10. Polia, G. Izoperimetriceskie neravenstva v matematicheskoj fizike [Tekst] / G. Polia, G. Syoge. – M.: KomKniga, 2006. – 336 s.
11. Chernyaev, A.A. Razvitie metoda interpoljacii po otnosheniyu konformny`x radiusov dlya resheniya zadach poperechnogo izgiba plastinok [Tekst]:diss. ... kand. texnicheskix nauk: 05.23.17 / Chernyaev A.A. – Orel. – 2013. – 211 s.

Korobko A.V.

Orel State University named after IS. Turgenev, Orel

Doctor of technical sciences, professor of the department "Mechatronics, mechanics and robotics"

Tel .: +7 (4862) 73-43-49

E-mail: ankor-66@mail.ru

Kalashnikova N.G.

Orel State University named after IS. Turgenev, Orel

Ph.D., associate professor of the department "Mechatronics, Mechanics and Robotics"

Tel .: +7 (4862) 73-43-49

E-mail: naka.61@mail.ru

Lygina Yu.E.

Orel State University named after IS. Turgenev, Orel

post-graduate student of the department "Building structures and materials"

Tel .: +7 (4862) 73-43-49

E-mail: raduga@mail.ru

УДК 624.04'074.4:539.41:513.73

КРИВОШАПКО С.Н., ИВАНОВ В.Н.

ПСЕВДОСФЕРИЧЕСКИЕ ОБОЛОЧКИ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ

Архитекторы, работающие с оболочками, используют в своих проектах, в основном, хорошо зарекомендовавшие себя геометрические формы, которые составляют порядка 5-10% от общего числа известных геометрам поверхностей. Однако есть такая хорошо известная поверхность вращения, которая с XIX века по настоящее время пользуется большой популярностью у математиков-геометров, но она практически неизвестна архитекторам и проектировщикам, нет примеров ее применения в строительной индустрии. Это – псевдосферическая поверхность. Для псевдосферической поверхности с радиусом ребра псевдосферы a гауссова кривизна $K = k_1 k_2$ во всех точках равна постоянному отрицательному числу $K = -1/a^2$. Псевдосфера, или поверхность Бельтрами, образовывается вращением трактрисы, эвольвенты цепной линии. В статье дан обзор известных методов расчета псевдосферических оболочек и исследуется напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с близкими геометрическими параметрами для выявления оптимальных форм. Список использованной литературы из 32 наименований поможет найти дополнительную информацию.

Ключевые слова: псевдосфера, поверхность Бельтрами, трактриса, безмоментная теория расчета, моментная теория расчета, устойчивость псевдосферических оболочек.

Введение

Наиболее известных современных архитекторов можно разделить на три группы. Одна группа стремится создавать высотные сооружения [1], экономя при этом дорогостоящую землю, особенно в городах. Эти архитекторы, полагают, что большепролетные сооружения необходимы только, если они функционально востребованы. В ряде случаев большепролетные сооружения даже сносились, чтобы освободить место для высотных зданий (автобусная станция «Московская», Минск, Белоруссия) или для более доходного сооружения («The King Dome», Сиэтл, США). Другая группа считает, что человеку комфортнее быть ближе к земле [2]. Они присоединяются к мнению бывшего президента Международной ассоциации по оболочкам (1966 г.) проф. А.М. Хааса: «Люди, строящие оболочки, - передовые люди; их объединяет стремление к новым формам, к новым путям решения проблем» [3] и, применяя научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций, они добились выдающихся успехов [4]. Третья группа полагает, что используя традиционные конструкции (стены, колонны, плоские перекрытия) и прямоугольные формы также можно получить хорошие результаты. Они делают упор на дешевые типовые конструкции, формы и высокопрочные материалы.

Архитекторы, работающие с оболочками, используют в своих проектах, в основном, хорошо зарекомендовавшие себя геометрические формы, которые составляют порядка 5-10% от общего числа известных геометрам поверхностей. Это – параболоиды вращения [5], зонтичные, каплевидные, циклические, винтовые, цилиндрические оболочки [6], конические оболочки [7], оболочки со срединными поверхностями в форме коноида и цилиндриоида [8], эллиптического параболоида [9], однополостного гиперболоида [10] и некоторых других [11]. И в каждом конкретном случае архитекторы и инженеры-проектировщики выбирали наиболее оптимальную форму оболочки, основываясь на функциональной необходимости, прочности, эстетике и т.д.

Однако есть такая хорошо известная поверхность вращения, которая с XIX века по настоящее время находится в центре внимания математиков-геометров [12–18], но она практически неизвестна архитекторам и проектировщикам, нет примеров ее применения в строительной индустрии. Это – псевдосферическая поверхность.

Характеристика и способы задания псевдосферы

Для псевдосферической поверхности (рис. 1, рис. 2) радиусом a гауссова кривизна $K = k_1k_2$ во всех точках равна постоянному отрицательному числу $K = -1/a^2$.

Псевдосфера, или *поверхность Бельтрами*, образовывается вращением *трактрисы*, эвольвенты цепной линии $r = \operatorname{ach}(z/a)$, относительно оси Oz .

Уравнение трактрисы имеет вид:

$$x = a \sin u, z = a[\cos u + \ln \operatorname{tg}(u/2)], 0 < u < \pi,$$

где u – угол между осью Oz и касательной к трактрисе. Уравнение трактрисы можно записать также как

$$z = a \ln \frac{a \pm \sqrt{a^2 - r^2}}{r} \mp \sqrt{a^2 - r^2},$$

где верхние знаки относятся к положительной ветви $z > 0$, нижние – к отрицательной $z < 0$ (рис. 2). Длина отрезка касательной к трактрисе от точки касания до точки пересечения с осью z – постоянна и равна $a > 0$. Линия сечения псевдосферы плоскостью xOy (*ребро псевдосферы*) – окружность радиусом a , для всех остальных параллелей $r < a$. Объем одной полости псевдосферы: $V = \pi a^3/3$.

Известны три формы задания псевдосферы при помощи параметрических уравнений [19]. Для дальнейшего применения воспользуемся следующей параметрической формой задания псевдосферической поверхности:

$$x = x(r, \beta) = r \cos \beta, y = y(r, \beta) = r \sin \beta, z = z(r) = a \ln \left[\left(a + \sqrt{a^2 - r^2} \right) / r \right] - \sqrt{a^2 - r^2},$$

где r – расстояние от оси вращения до соответствующей точки псевдосферы ($r < a$), окружность $r = r_{max} = a$ – ребро псевдосферы. Площадь зоны между параллелями $r = a$ и $r = r_0$:

$$S = 2\pi a(a - r_0).$$

В этом случае коэффициенты основных квадратичных форм поверхности и ее главные кривизны примут вид:

$$A = \frac{a}{r}, F = 0, B = r, L = \frac{a}{r\sqrt{a^2 - r^2}}, M = 0, N = -\frac{r\sqrt{a^2 - r^2}}{a}, k_1 = \frac{r}{a\sqrt{a^2 - r^2}}, k_2 = -\frac{\sqrt{a^2 - r^2}}{ar}.$$

Следовательно, псевдосфера задана в криволинейных ортогональных сопряженных координатах r, β , т.е. в линиях главных кривизн.

«Обращение в середине XIX в. геометров к псевдосферическим поверхностям, поверхностям постоянной отрицательной кривизны $K = -1/a^2$, явилось важным шагом в развитии математики. Псевдосферические поверхности имели большое значение для наглядной интерпретации неевклидовой гиперболической геометрии, открытой Н.И. Лобачевским. Последующее развитие математики обнаружило тесную связь псевдосферических поверхностей с теорией сетей, теорией солитонов, аттракторами, нелинейными уравнениями математической физики, преобразованиями Бэклунда и др.» [12].

Обзор примеров расчета псевдосферических оболочек

Безмоментная теория расчета псевдосферических оболочек реализована В.Г. Рекачом [20] для случая однородной задачи. Решение принималось в форме тригонометрического ряда. Он же определил тангенциальные усилия в псевдосферической оболочке постоянной толщины от собственного веса, опертой шарнирно-подвижно в направлении нормали по параллельному кругу $r = 0,5a$.

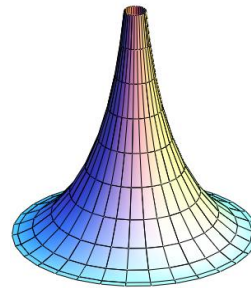


Рисунок 1 - Одна полость псевдосферы

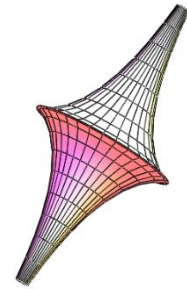


Рисунок 2 - Псевдосфера с двумя полостями

Моментная теория расчета псевдосферических оболочек в линейной постановке при действии поверхностной симметричной и обратносимметричной нагрузки рассматривалась в работе Д. Вернера [21]. Решение проведено в аналитической форме. Численный пример расчета представлен в табличной форме. Для упрощения расчета коэффициент Пуассона был принят равным нулю.

Первая попытка составить обзор всех работ, посвященных псевдосферическим поверхностям и оболочкам, была предпринята в 1998 г. в статье [22]. В ней, помимо исследований Е. Бельтрами, В.Г. Рекача [20], Д. Вернера [21], описываются результаты, полученные Б. Бхаттачарией [23] и А.П. Филиным [24]. А.П. Филин привел формулы для вычисления параметров деформации, уравнения неразрывности деформаций и уравнения равновесия элемента псевдосферической оболочки, заданной в линиях кривизн.

Krawczyk J. [25] рассматривал бесконечно малые деформации тонких упругих оболочек постоянной толщины.

А.А. Калашников [26] определил по безмоментной теории нормальные усилия в псевдосферической оболочке от действия собственного веса, а затем с помощью программы SCAD по МКЭ рассчитал ту же оболочку также на действие собственного веса. Сравнение полученных результатов показало большую разницу в значениях кольцевых нормальных сил на опоре. Изгибающие моменты, в основном, концентрируются около нижней опоры по типу краевого эффекта.

В последние годы появились первые исследования, посвященные устойчивости псевдосферических оболочек. Над этим вопросом работают Михеев А.В. [27], Jasion P., Magnucki K. [28, 29].

Напряженно-деформированное состояние оболочек вращения с близкими геометрическими параметрами

Имеется ряд работ, например, [30], где выдвигаются некоторые критерии по оценке оптимальности выбранного проектного решения. В.В. Новожилов [31] предложил для приближенной оценки оптимальности выбранной формы тонкостенной оболочки вращения использовать результаты их расчета по безмоментной теории. Для расчета выбирались оболочки с близкими геометрическими параметрами (стрела подъема и диаметр оболочки в основании).

Последуем его примеру. На рис. 3 показаны 5 видов оболочек вращения, включая псевдосферическую (рис. 3, а), коническую (рис. 3, б) оболочки; оболочку со срединной поверхностью вращения гиперболы $z = b/x$ вокруг оси Oz (рис. 3, в); со срединной поверхностью вращения астроида (рис. 3, г), и в форме однополостного гиперболоида вращения (рис. 3, д).

Все эти поверхности задаются параметрическими уравнениями:

$$x = x(r, \beta) = r \cos \beta, \quad y = y(r, \beta) = r \sin \beta, \quad z = z(r),$$

где для псевдосферы (рис. 3, а):

$$z = z(r) = a \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - r^2}}{r} - \sqrt{a^2 - r^2},$$

для конуса (рис. 3, б):

$$z = z(r) = -\frac{rH}{r_1 - r_2},$$

для поверхности вращения гиперболы $z = b/x$ вокруг оси Oz (рис. 3, в):

$$z = z(r) = \frac{Hr_1r_2}{(r_1 - r_2)r},$$

для поверхности вращения астроида (рис. 3, г):

$$z = z(r) = (b^{\frac{2}{3}} - r^{\frac{2}{3}})^{3/2},$$

параметр b необходимо найти из равенства:

$$H = (b^{2/3} - r_2^{2/3})^{3/2} - (b^{2/3} - r_1^{2/3})^{3/2},$$

для однополостного гиперболоида вращения (рис. 3, д):

$$z = z(r) = \frac{-H\sqrt{r^2 - b^2}}{(\sqrt{r_1^2 - b^2} - \sqrt{r_2^2 - b^2})},$$

где параметр b может принимать любое значение, но $b < r_2$.

Все неуказанные геометрические параметры приведены на рис. 3. На рис. 3 меридианы псевдосферы показаны сплошной линией, а меридианы остальных поверхностей вращения – тонкой линией с точками.

Толщина оболочки $h = 0,05$ м, поверхностная нагрузка типа собственного веса $q = 100$ кг/м², радиус основания $r_1 = 4$ м, радиус отверстия в вершине $r_2 = 2$ м, стрела подъема $H = 5,15$ м – для всех оболочек одинаковые, $r_2 \leq r \leq r_1$, $0 \leq \beta \leq 2\pi$.

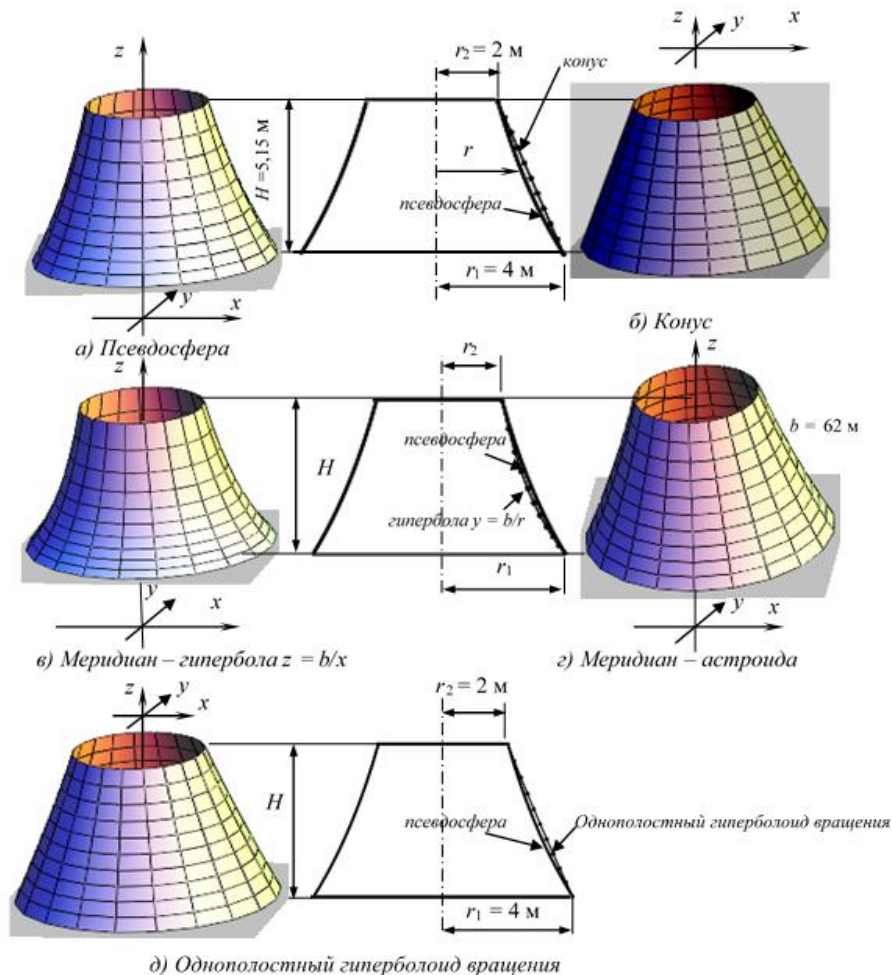


Рисунок 3 – Пять видов поверхностей вращения

При осесимметричном нагружении оболочек вращения поверхностная распределенная нагрузка в направлении криволинейной координаты β равна нулю ($Y = 0$), нормальные усилия (N_r, N_β), поперечные силы (Q_r), изгибающие моменты (M_r, M_β), деформации ($\varepsilon_r, \varepsilon_\beta, \kappa_r, \kappa_\beta$) и перемещения ($W = u_z, u_r$) не зависят от угла долготы β , и, кроме того,

$$S = Q_{\beta} = M_{r\beta} = 0,$$

$$u_{\beta} = \varepsilon_{r\beta} = \kappa_{r\beta} = 0.$$

На рис. 4 представлены результаты расчета рассматриваемых оболочек вращения вариационно-разностным методом при шарнирно неподвижном опирании нижнего края ($r = r_1$) и свободном верхнем крае ($r = r_2$). Принято $E = 3,5 \cdot 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,1$.

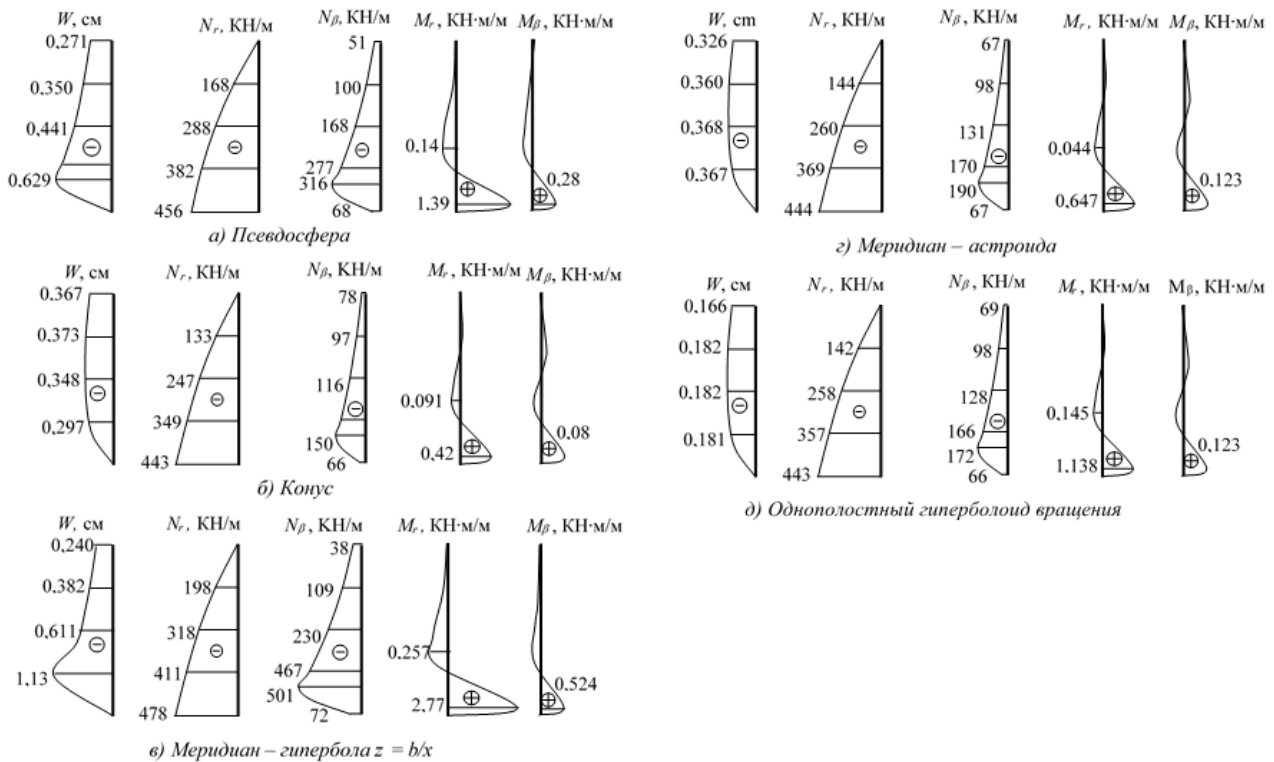


Рисунок 4 – Нормальные перемещения и эпюры нормальных сил и изгибающих моментов

Предложения по применению псевдосферических оболочек в архитектуре и строительной индустрии



Рисунок 5 – Скульптура из нержавеющей стали «Non Object», А. Капур, 2008

Как уже отмечалось ранее, в научно-технической литературе не найдены примеры использования поверхности псевдосферы в строительной отрасли. Только Kenneth Brecher [18] представил примеры псевдосфер, реализованных в природе: гипсовая модель псевдосферы, сделанная В.М. Шиллтингом (V. Martin Schilling) в конце XIX века; большеразмерная фанерная модель псевдосферы «Mathematica», выставленная в музее науки Бостона, созданная Charles и Ray Eames; скульптура из нержавеющей стали для парка (Anish Kapoor, 2008, рис. 5); модель «Поверхность вращения постоянной отрицательной кривизны», автор – Н. Sugimoto, 2004; скульптура из алюминия и стекла того же автора «Conceptual Form 009», 2006; фигура из металлической проволоки «Funicular Polygon of Revolution - Pseudosphere» (Robert Le Ricolais). Все эти математические модели служат образовательным целям.

В остальных случаях авторы ограничивались

только пожеланиями или предложениями по применению этих оболочек вращения с постоянной отрицательной Гауссовой (полной) кривизной.

Б. Бхаттачария [23] предложил использовать псевдосферические оболочки в качестве фундаментов железобетонных дымоходов. Д. Вернер [21] предлагал использовать тонкостенную псевдосферическую оболочку в качестве основания башни телецентра.

Положив в основу своих исследований параметрические уравнения псевдосферы, Ж. Кайдасов [32] ввел в обращение новый вид поверхностей – многотрубчатые «псевдосферы» с наружными циклоидальными и синусоидальными гофрами. По его мнению эти поверхности могут привлечь внимание архитекторов. Название поверхности – «псевдосфера» – взято нами в кавычки, т.к. предложенная поверхность не имеет постоянной отрицательной гауссовой кривизны.

Заключение

Площади фрагментов рассмотренных поверхностей вращения с близкими геометрическими параметрами, естественно, сравнивать с минимальной поверхностью вращения – катеноидом, – площадь фрагмента которой определяется по формуле:

$$A_{\text{кат}} = \pi \left[a^2 \ln |r + \sqrt{r^2 - a^2}| + r\sqrt{r^2 - a^2} \right]_{r_2}^{r_1},$$

где $a \leq r_2$ – радиус горловой окружности, лежащей в плоскости xOy , который определяется из выражения:

$$H = a \left(\text{Arch} \frac{r_1}{a} - \text{Arch} \frac{r_2}{a} \right). \quad (1)$$

Представленные выше две формулы необходимо использовать, если горловая окружность катеноида будет вне рассматриваемого фрагмента катеноида.

Если же горловая окружность будет находиться в пределах рассматриваемой поверхности, как в нашем случае, то эти две формулы необходимо записать в следующей форме:

$$A_{\text{кат}} = \pi \left[a^2 \ln |r + \sqrt{r^2 - a^2}| + r\sqrt{r^2 - a^2} \right]_{r_2}^a + \pi \left[a^2 \ln |r + \sqrt{r^2 - a^2}| + r\sqrt{r^2 - a^2} \right]_{r_1}^a,$$

где $a \leq r_2$ – радиус горловой окружности, лежащей в плоскости xOy , который определяется из выражения:

$$H = a \left(\text{Arch} \frac{r_1}{a} + \text{Arch} \frac{r_2}{a} \right). \quad (2)$$

Можно принять коэффициент оптимальности по площади в виде:

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{A_{\text{пов}}}{A_{\text{катен}}} \geq 1.$$

Естественно, для катеноида в этом случае $\rho_{\text{пов}} = 1$. Однако для рассматриваемого случая $r_1 = 4$ м, $r_2 = 2$ м, $H = 5,15$ м формулы (1), (2) не имеют решения, поэтому сравнить рассматриваемые оболочки (рис. 3) с оболочкой, имеющей срединную минимальную поверхность с теми же геометрическими параметрами, нельзя.

Можно выбрать обратную задачу. Сначала определить по формуле (2) $H_{\text{max}} = 3,65$ м при $a = 1,448$ м для $r_1 = 4$ м, $r_2 = 2$ м, а затем подобрать другие оболочки вращения.

Введем коэффициент оптимальности по площади:

$$\rho_{\text{пов}} = \frac{A_{\text{пов}}}{A_{\text{псевд}}}.$$

Вычисления показали, что из пяти оболочек, представленных на рис. 3, наименьшую площадь срединной поверхности имеет оболочка с гиперболой $z = b/x$ в качестве меридиана ($\rho_{\text{пов}} = 98,25/100,5 = 0,98$), затем идет псевдосфера ($\rho_{\text{пов}} = 1$), оболочка с астроидой ($\rho_{\text{пов}} = 102,86/100,5 = 1,02$) в качестве меридиана, однополостный гиперboloид вращения ($\rho_{\text{пов}} = 103,1/100,5 = 1,03$) и конус ($\rho_{\text{пов}} = 104,1/100,5 = 1,04$). Разница в площадях поверхностей, показанных на рис. 3, очень мала.

Сравнивая эпюры усилий и моментов, представленные на рис. 4, можно сделать вывод, что псевдосферическая оболочка особых преимуществ по этому показателю тоже не имеет.

В.В. Новожилов [31] писал о не востребованности катеноида, т.е. единственной минимальной поверхности вращения, в строительстве в ближайшем будущем. Вероятно, также будет и с псевдосферической оболочкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тринкер А.Б. Высотное строительство в экстремальных условиях // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2017. – № 9. – С. 15-19.
2. Есаулов Г.В. Современные проблемы и тенденции в архитектуре// Жилищное строительство. – 2013. - № 11. – С. 20-26.
3. Кривошапко С.Н. История развития архитектуры пространственных структур и оболочек с элементами расчета: УМК. – М.: Изд-во РУДН, 2015. – 156 с.
4. Сысоева Е.В. Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций// Вестник МГСУ. – 2017. – Том 12. - № 2(101). – С. 131-141.
5. Кривошапко С.Н. К вопросу о применении параболических оболочек вращения в строительстве в 2000-2017 годах// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 4. – С. 4-14.
6. Гринько Е.А. Обзорные работы по геометрии, прочности, устойчивости, динамике и применению оболочек со срединными поверхностями различных классов// Монтажные и специальные работы в строительстве. 2012. № 2. С. 15-21.
7. Мамиева И.А., Разин А.Д. Знаковые пространственные сооружения в форме конических поверхностей// Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 10. – С. 5-11.
8. Кривошапко С.Н. Применение коноида и цилиндриоида при формообразовании зданий и сооружений оболочечного типа// Строительство и реконструкция. – 2017. – № 5(73). – С. 34-44.
9. Bandyopadhyay, J.N. Thin Shell Structures: Classical and Modern Analysis. – New Age Int. Publishers, 1998. – 431 p.
10. Krivoshapko S.N. Static, vibration, and buckling analyses and applications to one-sheet hyperboloidal shells of revolution// Applied Mechanics Reviews. –Vol.55. – No 3. – May 2002. – P.241-270.
11. Подгорный А.Л., Гринько Е.А., Соловей Н.А. Исследование новых форм поверхностей применительно к конструкциям различного назначения// Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 1. С. 140-145.
12. Попов А.Г. Псевдосферические поверхности и некоторые задачи математической физики// Фундаментальная и прикладная математика, Издательский дом «Открытые системы» (МГУ), 2005, том 11, № 1, с. 227—239.
13. Brander, D. Pseudospherical surfaces with singularities// Annali di Matematica Pura ed Applicata. - June 2017, Volume 196, Issue 3, pp 905–928
14. Dorfmeister J.F., Sterling I. Pseudospherical surfaces of low differentiability// Advances in Geometry, Volume 16, Issue 1, Pages 1–20.
15. Emily Coddington. A Brief Account of the Historical Development of Pseudospherical Surfaces from 1827 to 1887... - Press of the New era printing Company, 1905. – 74 p.
16. Кайдасов Ж. О трех видах катушкообразных поверхностей // Достижения науки и образования. 2018. № 1 (23). С. 6-8.
17. Balazs, N. L.; Voros, A. Chaos on the pseudosphere// Physics Reports, 1986, Volume 143, Issue 3, p. 109-240.
18. Kenneth Brecher. Mathematics, Art and Science of the Pseudosphere// Proceedings of Bridges 2013: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture. – P. 469-472.
19. Иванов В.Н., Кривошапко С.Н. Аналитические методы расчета оболочек неканонической формы: Монография. – М.: Изд-во РУДН, 2010. – 542 с.
20. Рекач В.Г. Безмоментная теория расчета псевдосферических оболочек// Изв. Арт. инж. академии. – 1958. – Том 109.
21. Werner D. Ein Vergleich der Schnittkraftverteilung bei antimetrisch und symmetrisch belasteten Rotationsschalen// Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 1967. – N 16, Heft 4.
22. Кривошапко С.Н. Каплевидные, катеноидальные и псевдосферические оболочки// Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1998. – № 11-12. – С. 28-32.
23. Bhattacharyya B. Shell-type foundation for R.C. chimneys// Indian J. Power and River Valley Develop. – 1982. – 32, 5-6. – С. 80-85.
24. Филин А.П. К построению теорий обобщенных сферических и псевдосферических оболочек// Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – № 5. – С. 43-46.
25. Михеев А. В. Локальная устойчивость псевдосферических ортотропных оболочек на упругом основании// Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета ЛЭТИ. – 2013. – № 7. – С. 9-15.

26. Jasion P., Magnucki K. Buckling and post-buckling analysis of an untypical shells of revolution: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2016 6th. 2016. С. 766-771.
27. Jasion P., Magnucki K. Theoretical investigation of the strength and stability of special pseudospherical shells under external pressure // Thin-Walled Structures. 2015. Т. 93. С. 88-93.
28. Кривошапко С.Н., Емельянова Ю.В. К вопросу о поверхности вращения с геометрически оптимальной стрелой подъема// Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2006. – № 2. – С. 11-14.
29. Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. – Л.: «Политехника», 1991. – 656 с.
30. Калашников А.А. Расчет пространственных тонкостенных конструкций в форме псевдосферы// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2005. – № 2. – С. 35-40.
31. Кайдасов Ж. Псевдосфера с наружными гофрами// Academy. –2018.– № 3(30). – С. 3-5.
32. Krawczyk J. Infinitesimal isometric deformations of a pseudospherical shell// Journal of Mathematical Sciences, Vol. 109, No. 1, 2002, pp. 1312-1320.

Кривошапко Сергей Николаевич

Российский университет дружбы народов, г. Москва
д.т.н., профессор департамента архитектуры и строительства,
E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

Иванов Вячеслав Николаевич

Российский университет дружбы народов, г. Москва
д.т.н., профессор департамента архитектуры и строительства,
E-mail: i.v.ivn@mail.ru

KRIVOSHAPKO S.N., IVANOV V.N.

PSEUDOSPHERICAL SHELLS IN BUILDING INDUSTRY

Architects, designing shells, use in their projects, as a rule, geometrical forms well proved themselves, that constitute 5 – 10 % from the surfaces known to geometers. But there is well known surface of revolution which has a great popularity at mathematicians – geometers from the 19th century till present time, but it is unknown practically to architects and designers. There are no examples of its application in building industry. It is a pseudospherical surface. Total curvature $K = k_1k_2$ at all points of the pseudospherical surface with the a radius of its edge is equal to the constant negative number $K = -1/a^2$. Pseudosphere or Beltrami' surface is formed by rotation of the tractrix, evolvent of the chain line. In the manuscript, a review of the known methods of analysis of pseudospherical shells is presented and stress-strain state of the shells of revolution having the same geometrical parameters is studied for the determination of optimal forms. A list of the used references containing 32 names helps to find the additional information.

Key words: *pseudosphere, Beltrami' surface, tractrix, momentless shell theory, stability of pseudospherical shell.*

REFERENCES

1. Trinker A.B. Vysotnoye stroitel'stvo v ekstremal'nykh usloviyakh // Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve. – 2017. – № 9. – S. 15-19.
2. Yesaulov G.V. Sovremennyye problemy i tendentsii v arkhitekture// Zhilishchnoye stroitel'stvo. – 2013. - № 11. – S. 20-26.
3. Krivoshapko S.N. Istoriya razvitiya arkhitektury prostranstvennykh struktur i obolochek s elementami rascheta: UMK. – М.: Izd-vo RUDN, 2015. – 156 s.
4. Sysoyeva Ye.V. Nauchnyye podkhody k raschetu i proyektirovaniyu bol'sheproletnykh konstruksiy// Vestnik MGSU. – 2017. – Tom 12. - № 2(101). – S. 131-141.
5. Krivoshapko S.N. K voprosu o primeneniі parabolicheskikh obolochek vrashcheniya v stroitel'stve v 2000-2017 godakh// Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy. – 2017. – № 4. – С. 4-14.
6. Grin'ko Ye.A. Obzornyye raboty po geometrii, prochnosti, ustoychivosti, dinamike i primeneniyu obolochek so sredinnyimi poverkhnostyami razlichnykh klassov// Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve. 2012. № 2. S. 15-21.
7. Mamiyeva I.A., Razin A.D. Znakovyye prostranstvennyye sooruzheniya v forme konicheskikh poverkhnostey// Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. – 2017. – № 10. – S. 5-11.

8. Krivoshapko S.N. Primeneniye konoida i tsilindroida pri formoobrazovanii zdaniy i sooruzheniy obolocheknogo tipa// Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2017. – № 5(73) . – S. 34-44.
9. Bandyopadhyay, J.N. Thin Shell Structures: Classical and Modern Analysis. – New Age Int. Publishers, 1998. – 431 p.
10. Krivoshapko S.N. Static, vibration, and buckling analyses and applications to one-sheet hyperboloidal shells of revolution// Applied Mechanics Reviews. –Vol.55. – No 3. – May 2002. – P.241-270.
11. Podgornyy A.L., Grin'ko Ye.A., Solovey N.A. Issledovaniye novykh form poverkhnostey primenitel'no k konstruktivnykh razlichnogo naznacheniya// Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya. 2013. № 1. S. 140-145.
12. Popov A.G. Pseudosfericheskiye poverkhnosti i nekotoryye zadachi matematicheskoy fiziki// Fundamental'naya i prikladnaya matematika, Izdatel'skiy dom «Otkrytye sistemy» (MGU), 2005, tom 11, № 1, s. 227—239.
13. Brander, D. Pseudospherical surfaces with singularities// Annali di Matematica Pura ed Applicata. - June 2017, Volume 196, Issue 3, pp 905–928
14. Dorfmeister J.F., Sterling I. Pseudospherical surfaces of low differentiability// Advances in Geometry, Volume 16, Issue 1, Pages 1–20.
15. Emily Coddington. A Brief Account of the Historical Development of Pseudospherical Surfaces from 1827 to 1887... - Press of the New era printing Company, 1905. – 74 p.
16. Kaydasov ZH. O trekh vidakh katushkoobraznykh poverkhnostey // Dostizheniya nauki i obrazovaniya. 2018. № 1 (23). S. 6-8.
17. Balazs, N. L.; Voros, A. Chaos on the pseudosphere// Physics Reports, 1986, Volume 143, Issue 3, p. 109-240.
18. Kenneth Brecher. Mathematics, Art and Science of the Pseudosphere// Proceedings of Bridges 2013: Mathematics, Music, Art, Architecture, Culture. – P. 469-472.
19. Ivanov V.N., Krivoshapko S.N. Analiticheskiye metody rascheta obolochek nekanonicheskoy formy: Monografiya. – M.: Izd-vo RUDN, 2010. – 542 s.
20. Rekach V.G. Bezmomentnaya teoriya rascheta pseudosfericheskikh obolochek// Izv. Art. inzh. akademii. – 1958. – Tom 109.
21. Werner D. Ein Vergleich der Schnittkraftverteilung bei antimetrisch und symmetrisch belasteten Rotationsschalen// Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 1967. – N 16, Heft 4.
22. Krivoshapko S.N. Kaplevidnyye, katenoidal'nyye i pseudosfericheskiye obolochki// Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve. – 1998. – № 11-12. – S. 28-32.
23. Bhattacharyya B. Shell-type foundation for R.C. chimneys// Indian J. Power and River Valley Develop. – 1982. – 32, 5-6. – C. 80-85.
24. Filin A.P. K postroyeniyu teoriy obobshchennykh sfericheskikh i pseudosfericheskikh obolochek// Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 1990. – № 5. – S. 43-46.
25. Mikheyev A. V. Lokal'naya ustoychivost' pseudosfericheskikh ortotropnykh obolochek na uprugom osnovanii// Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta LETI. – 2013. – № 7. – S. 9-15.
26. Jasion P., Magnucki K. Buckling and post-buckling analysis of an untypical shells of revolution: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, SEMC 2016 6th. 2016. S. 766-771.
27. Jasion P., Magnucki K. Theoretical investigation of the strength and stability of special pseudospherical shells under external pressure // Thin-Walled Structures. 2015. T. 93. S. 88-93.
28. Krivoshapko S.N., Yemel'yanova YU.V. K voprosu o poverkhnosti vrashcheniya s geometricheski optimal'noy streloy pod"yema// Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve. – 2006. – № 2. – S. 11-14.
29. Novozhilov V.V., Chernykh K.F., Mikhaylovskiy Ye.I. Lineynaya teoriya tonkikh obolochek. – L.: «Politekhnika», 1991. – 656 s.
30. Kalashnikov A.A. Raschet prostranstvennykh tonkostennykh konstruktivnykh v forme pseudosfery// Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktivnykh i sooruzheniy. – 2005. – № 2. – C. 35-40.
31. Kaydasov ZH. Pseudosfera s naruzhnymi goframi// Academy. –2018.– № 3(30). – S. 3-5.
32. Krawczyk J. Infinitesimal isometric deformations of a pseudospherical shell// Journal of Mathematical Sciences, Vol. 109, No. 1, 2002, pp. 1312-1320.

Krivoshapko S.N.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
DSc, Professor of Department of Architecture and Civil Engineering
E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

Ivanov V.N.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
DSc, Professor of Department of Architecture and Civil Engineering
E-mail: i.v.ivn@mail.ru

УДК 624.012.45

МАНАЕНКОВ И.К.

К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ДИАГРАММЫ СЖАТОГО БЕТОНА С КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

При объемном напряженном состоянии в условиях бокового обжатия происходит повышение прочностных и деформационных характеристик бетона. В реальных конструкциях объемное напряженное состояние возможно создать устройством косвенного армирования, ограничивающего развитие поперечных деформаций. В статье приводится методика построения диаграммы сжатия для бетона, усиленного косвенным армированием в виде поперечных сварных сеток. Подобраны формулы для вычисления характерных точек диаграммы: напряжение и деформации в конце восходящей ветви; напряжение и предельные деформации в конце нисходящей ветви. Рассмотрены результаты испытаний на сжатие более 300 образцов прямоугольных призм с косвенным армированием и показана лучшая сходимость предлагаемых зависимостей в сравнении с СП 63.13330.2012 на большинстве диапазонов прочностных характеристик материалов. Восходящий участок диаграммы принят криволинейным и описывается многочленом четвертой степени. Нисходящий участок принят прямолинейным. Определены параметры косвенного армирования, обеспечивающие эффективное повышение прочностных и деформационных характеристик сжатого бетона.

Ключевые слова: косвенное армирование, сварные сетки, диаграмма сжатия, ограниченный бетон, предельная сжимаемость.

Многочисленные исследования, проведенные в [1-7] свидетельствуют о том, что при объемном напряженном состоянии в условиях бокового обжатия происходит повышение прочностных и деформационных характеристик бетона. В реальных конструкциях объемное напряженное состояние возможно создать устройством армирования, ограничивающего развитие поперечных деформаций бетона. Такое армирование называют косвенным. К настоящему времени разработаны различные варианты конструктивных решений косвенного армирования [8-10], имеющие свои достоинства и недостатки в зависимости от конкретных условий. Одним из вариантов косвенного армирования является применение поперечных сварных сеток. Из-за относительно малого размера ячейки сетка включается в работу на том участке сечения элемента, на котором возникают сжимающие усилия. Благодаря этому, их возможно применить для повышения прочностных и деформационных характеристик сжатого бетона практически в любых конструкциях [11-12]: в сжатых элементах; для усиления опорного стыка колонн и при местном смятии; в сжатой зоне изгибаемых элементов и др.

Одним из наиболее распространенных методов, позволяющих производить расчеты по первой и второй группам предельных состояний, является диаграммный метод, использующий нелинейные деформационные модели бетона и арматуры [133]. Цель исследований – получение диаграммы деформирования для бетона, усиленного сетками косвенного армирования. Первостепенной задачей при построении диаграммы, состоящей из восходящего и нисходящего участков (рисунок 1), являлось определение характерных точек: напряжение и деформации в конце восходящей ветви; напряжение и предельные деформации в конце нисходящей ветви.

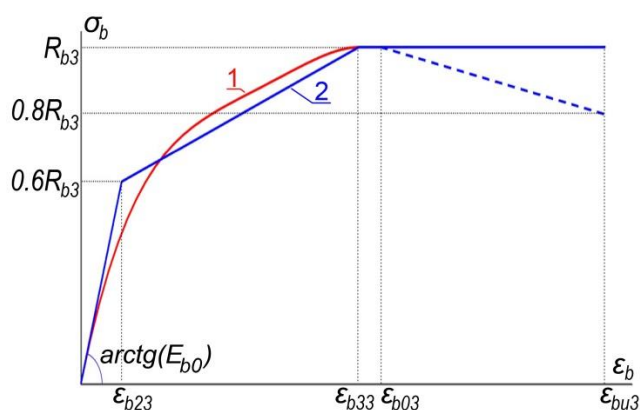


Рисунок 1 - Диаграмма состояния сжатого бетона, армированного сетками: — (1) - криволинейная диаграмма; — (2) - линейризованная (трехлинейная) диаграмма

Методика определения прочности и предельной сжимаемости элементов с косвенным армированием, приведенная в СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции», основана, главным образом, на работе К.К. Бакирова [144], в которой показана лучшая сходимость значений напряжения и деформаций по сравнению с зависимостями, предлагавшимися ранее. Поэтому при дальнейшем анализе выражений для определения параметрических точек диаграммы, сравнение производилось с формулами приложения К СП 63.13330.2012.

Напряжение в конце восходящей ветви R_{b3} определяли на основании зависимости (1) [155]:

$$R_{b3} = \left[\frac{1 - \rho_{xy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{1 - \rho_{xy}}{2} \right)^2 + 9\rho_{xy}} \right] R_b; \quad (1)$$

$$\rho_{xy} = \psi_b \mu_{xy} \frac{R_s}{R_b}$$

где ψ_b – коэффициент неравномерности бокового обжатия бетонного ядра (для прямоугольного сечения $\psi_b=0,375$; для круглого сечения $\psi_b=0,95$); R_s – прочность стержней косвенного армирования на растяжение; R_b – призмная прочность бетона на сжатие; μ_{xy} – коэффициент косвенного армирования, определяемый по СП 63.13330.2012.

Для верификации зависимости (1) были обработаны экспериментальные данные различных исследователей для более 300 центрально сжатых образцов из тяжелого бетона с сетками косвенного армирования. По выражению (2) определялся экспериментальный коэффициент эффективности косвенного армирования K и сравнивался с теоретическим, полученным на основании формулы (1). Результаты представлены на рисунке 2.

$$K = \frac{R_{b3} - R_b}{\mu_{xy} R_s} \quad (2)$$

Стоит отметить, что в ряде экспериментов принят слишком большой шаг сеток, из-за чего коэффициент эффективности косвенного армирования существенно ниже теоретического. Для малых диаметров арматуры сеток, обладающих большей поверхностью сцепления с бетоном, коэффициент эффективности косвенного армирования оказался выше теоретического, однако, ввиду малости процента косвенного армирования, обеспечивается удовлетворительная сходимость опытного и теоретического значений итоговой несущей способности образцов. На основании анализа были выявлены параметры косвенного армирования, при которых обеспечивается сходимость экспериментальных и теоретических значений прочности бетона, усиленного сетками: шаг сеток $S \leq 150 \text{ мм}$, $S \leq 0,8h$ (здесь h – наименьший габарит сеток); диаметр стержней сеток $d \leq 8 \text{ мм}$. Образцы, не удовлетворяющие заявленным критериям, были исключены из дальнейшего анализа.

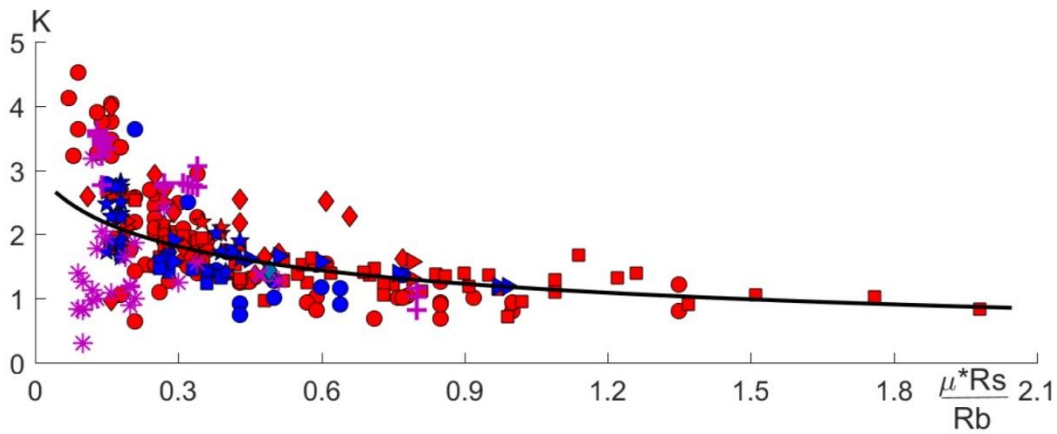


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента K от параметров образцов: — - по формуле (1);

★ - [14]; ● - [16]; ■ - [17]; ◆ - [18]; ▲ - [19]; ▴ - [20]; × - [21];

Диссертационные исследования:

★ - С.И. Роговой ; ● - М. Шериф ; ■, + - Ю.Н. Карнет ; ◆ - А.А. Гончаров ; * - Н.В. Гринева

Сравнение средних отклонений теоретических значений прочности бетона с косвенным армированием от фактических для образцов с различными прочностными характеристиками бетона и арматуры сеток представлено в таблице 1. Установлено, что, для большинства диапазонов прочностных характеристик материалов, формула (1) обеспечивает лучшую сходимости опытных и теоретических значений. Стоит отметить, что для единственного диапазона, по которому сходимость заметно хуже ($R_b=45,5-60,4$ МПа; $R_s=300$ МПа), отклонение идет в запас несущей способности (для всех опытных образцов).

Относительные деформации в вершине диаграммы сжатия ε_{b03} зависят, главным образом, от относительного уровня бокового обжатия и прочности бетона. Зависимость (3) для относительных деформаций принята по аналогии с работой [4] (с пересчетом на российские нормы). Преимуществом данной формулы является ее универсальность (не зависит от природы возникновения усилия бокового обжатия). Необходимо только подобрать зависимость для определения приведенного усилия бокового обжатия σ_{xy} в конкретном случае. При косвенном армировании поперечными сетками усилие обжатия приложено дискретно по длине элемента и неравномерно в пределах ячейки. Все это создает сложности в определении $\sigma_{b,xy}$.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{b03} &= e^n \varepsilon_{b0}; \\ n &= (2,9224 - 0,00408R_b) \left(0,9 \frac{\sigma_{xy}}{R_b} \right)^{(0,3124 + 0,0022R_b)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Определить σ_{xy} можно через коэффициент эффективности косвенного армирования K по формуле, предложенной в [22]:

$$K = \frac{1}{0,1 + 0,9m}, \quad (4)$$

где $m = \sigma_{xy} / R_{b3}$.

В исследованиях [1-4] выявлено значительное влияние прочности бетона на коэффициент K . Учесть это влияние можно добавлением к формуле (4) поправки $\Delta K = 2,9 - \ln R_b$ [10].

Хотя основным фактором, повышающим предельную сжимаемость бетона, является процент косвенного армирования, в исследованиях [14,20] на основании анализа опытных данных установлено, что продольное армирование также влияет на деформации (хотя и в значительно меньшей степени). При этом высокопрочная арматура оказывает существенное

влияние, повышая предельные деформации, а арматура класса А-III (А400) и ниже – незначительное. При внецентренном сжатии элементов с косвенным сетчатым армированием [144,188] предельные деформации бетона на наиболее сжатой грани достигают больших значений, чем при центральном сжатии.

Таблица 1 - Средние отклонения теоретических значений прочности от опытных

№ п/п	Прочность бетона R_b , прочность косвенной ар- матуры R_s	Число опытных образцов n	$\sum_{i=1}^n \left \frac{R_{b3}^{теор.} - R_{b3}^{оп.}}{R_{b3}^{оп.}} \right * \frac{100\%}{n}$	
			По формуле (1)	СП 63.13330.2012.
1.	$R_b=8,0-17,2$ МПа $R_s=729-1008$ МПа	10	7,12	21,93
2.	$R_b=10,1-15,4$ МПа $R_s=590-600$ МПа	5	2,35	13,20
3.	$R_b=18,7-25,0$ МПа $R_s=400-654$ МПа	37	7,19	11,23
4.	$R_b=25,5-35,0$ МПа $R_s=400-600$ МПа	66	9,73	13,54
5.	$R_b=38,9-49,9$ МПа $R_s=400-550$ МПа	14	7,30	9,39
6.	$R_b=46,2-58,0$ МПа $R_s=365-445$ МПа	10	5,65	7,96
7.	$R_b=18,4-22,2$ МПа $R_s=283-348$ МПа	7	10,15	9,45
8.	$R_b=27,0-34,5$ МПа $R_s=300-302$ МПа	17	5,60	8,20
9.	$R_b=45,5-60,4$ МПа $R_s=300$ МПа	22	13,50	9,21

Учитывая вышесказанное, из различных источников для анализа были выбраны результаты испытаний только центрально сжатых железобетонных элементов с продольным армированием из арматуры класса не выше А-III. В таблице 2 произведено сравнение опытных деформаций и теоретических, посчитанных по формулам (3) и по формулам, предложенным в СП 63.13330.2012. Видно, что теоретические значения деформаций по формуле (3) для большинства образцов оказались ближе к опытным значениям, а по остальным образцам теоретические деформации не превышают опытные.

Относительные деформации ε_{bu3} в конце нисходящей ветви принимаем в соответствии с СП 63.13330.2012:

$$\varepsilon_{bu3} = \varepsilon_{bu} \frac{\varepsilon_{b03}}{\varepsilon_{b0}} = \varepsilon_{bu} e^n \tag{5}$$

Напряжение в конце нисходящей ветви σ_{bu3} :

$$\sigma_{bu3} = 0,8R_{b3} \tag{6}$$

что соответствует опытным диаграммам из работы [20].

Известно, что чем ниже класс бетона, тем в меньшей степени косвенное армирование влияет на прочностные характеристики, но при этом сильнее повышаются предельные деформации. Данный факт особенно заметен на опытных диаграммах из работы [177]. Аналогичные выводы сделаны и при анализе результатов полученных по формулам (1) и (3). Это приводит к тому, что вблизи вершины диаграммы появляется пологий (практически горизонтальный) участок $\varepsilon_{b33} - \varepsilon_{b03}$, который тем протяженнее, чем ниже класс бетона и выше процент армирования. Поэтому на участке деформирования от ε_{b33} до ε_{b03} принимаем горизонтальный участок диаграммы с постоянным значением напряжения, равным R_{b3} . Для вычис-

ления ε_{b33} для бетона прочностью $R_b \geq 13 \text{ МПа}$ и косвенным армированием $\mu_{s,xy} \leq 6\%$, $R_s \leq 575 \text{ МПа}$ предлагается зависимость (7):

$$\varepsilon_{b33} = \varepsilon_{b03} \left[(-0,38R_b + 3,31)\mu_{xy} + e^{(0,039R_b - 1)} \right] \leq \varepsilon_{b03}. \quad (7)$$

Таблица 2 - Сравнение теоретических значений относительной деформации в вершине диаграммы деформирования с опытными данными.

№ п/п	Автор исследований	Призменная прочность бетона R_b , МПа	Продольное армирование	Процент продольного армирования μ_s	Сопротивление косвенной арматуры растяжению R_{sp} , МПа	Процент косвенного армирования $\mu_{s,xy}$	$\varepsilon_{b0}^{on.}$	$\varepsilon_{b0}^{теор.}$, по (3)	$\varepsilon_{b0}^{теор.}$, по СП
1.	Henzel J.	13,1	нет	-	575	0,0402	0,0134	0,0129	0,0220
2.	Henzel J.	23,8	нет	-	575	0,0402	0,0089	0,0103	0,0157
3.	Henzel J.	30,9	нет	-	575	0,0402	0,0068	0,0091	0,0133
4.	Henzel J.	13,1	нет	-	575	0,0452	0,013	0,0137	0,0245
5.	Henzel J.	23,8	нет	-	575	0,0452	0,0087	0,0110	0,0174
6.	Henzel J.	30,9	нет	-	575	0,0452	0,0058	0,0097	0,0147
7.	Филиппов Б.П.	30,0	4ø25А-III	0,024	475	0,016	0,005	0,0055	0,0058
8.	Филиппов Б.П.	30,0	4ø25А-III	0,024	475	0,016	0,006	0,0055	0,0058
9.	Филиппов Б.П.	31,5	4ø25А-III	0,024	427	0,049	0,013	0,0085	0,0121
10.	Филиппов Б.П.	34,5	4ø25А-III	0,024	427	0,049	0,014	0,0081	0,0114
11.	Филиппов Б.П.	49,0	4ø25А-III	0,024	475	0,016	0,0035	0,0041	0,0046
12.	Филиппов Б.П.	49,2	4ø25А-III	0,024	475	0,016	0,0037	0,0041	0,0046
13.	Филиппов Б.П.	49,2	4ø25А-III	0,024	427	0,049	0,0090	0,0091	0,0091
14.	Филиппов Б.П.	49,2	4ø25А-III	0,024	427	0,049	0,0095	0,0091	0,0091
15.	Шериф М.	42,7	4ø14А-III	0,0075	447	0,0205	0,0043	0,0049	0,0055
16.	Шериф М.	58,0	4ø14А-III	0,0075	445	0,0202	0,0044	0,0041	0,0046
17.	Шериф М.	58,0	4ø14А-III	0,0075	455	0,052	0,006	0,0063	0,0090
18.	Шериф М.	58,0	4ø14А-III	0,0075	440	0,102	0,008	0,0113	0,0152
19.	Шериф М.	58,0	4ø14А-III	0,0075	460	0,0751	0,0081	0,0085	0,0122
20.	Матков Н.Г.	22,3	4ø6А-I	0,0028	400	0,054	0,008	0,0102	0,0154
21.	Бакиров К.К.	42,0	4ø22А-III	0,016	400	0,0186	0,0043	0,0046	0,0049
22.	Бакиров К.К.	42,0	4ø28А-III	0,027	400	0,0186	0,0045	0,0046	0,0049
23.	Бакиров К.К.	41,2	нет	-	400	0,0186	0,0043	0,0046	0,0049
24.	Бакиров К.К.	42,2	нет	-	400	0,0419	0,0055	0,0065	0,0084
25.	Карнет Ю.Н.	56,3	4ø6,7А-I	0,0043	300	0,026	0,00416	0,0040	0,0044
26.	Карнет Ю.Н.	53,4	4ø6,7А-I	0,0043	300	0,026	0,00415	0,0041	0,0045
27.	Карнет Ю.Н.	58,5	4ø6,7А-I	0,0043	300	0,026	0,00365	0,0039	0,0043
28.	Карнет Ю.Н.	46,0	4ø6,7А-I	0,0043	300	0,0519	0,00523	0,0058	0,0076
29.	Карнет Ю.Н.	57,2	4ø6,7А-I	0,0043	300	0,0519	0,00526	0,0051	0,0066
30.	Карнет Ю.Н.	58,1	4ø6,7А-I	0,0043	300	0,0519	0,00526	0,0050	0,0066

При выборе выражения для восходящего криволинейного участка диаграммы были проанализированы зависимости, предложенные различными исследователями [11,155,233 и др.]. Наиболее простая по форме записи предложена в работе [233]:

$$\sigma_b = R_{b3} \left[a_1 \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b03}} + a_2 \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b03}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b03}} \right)^3 + \dots + a_i \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b03}} \right)^i \right]. \quad (8)$$

Опытные диаграммы аппроксимируются степенным многочленом. Для неармированного бетона обычно бывает достаточно 2 членов ряда, но для бетона с косвенным армированием кривая восходящего участка диаграммы обладает значительно большей выпуклостью.

Ввиду вышесказанного, будем принимать на этапе деформирования от 0 до ε_{b33} зависимость в виде многочлена четвертой степени:

$$\sigma_b = p_1 \varepsilon_b^4 + p_2 \varepsilon_b^3 + p_3 \varepsilon_b^2 + p_4 \varepsilon_b. \quad (9)$$

Коэффициенты многочлена находятся из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_b(\varepsilon_{b13}) &= E_{b0} \\ \sigma_b(\varepsilon_{b23}) &= 0,62R_{b3} \\ \sigma_b(\varepsilon_{b33}) &= R_{b3} \\ \sigma'_b(\varepsilon_{b33}) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

Первое уравнение системы (10) получено исходя из того, что начальный модуль упругости бетона с сетками равен начальному модулю упругости неармированного бетона. Здесь ε_{b13} принимается достаточно малой величиной (в расчетах принято $\varepsilon_{b13} = \varepsilon_{b03} \cdot 10^{-3}$).

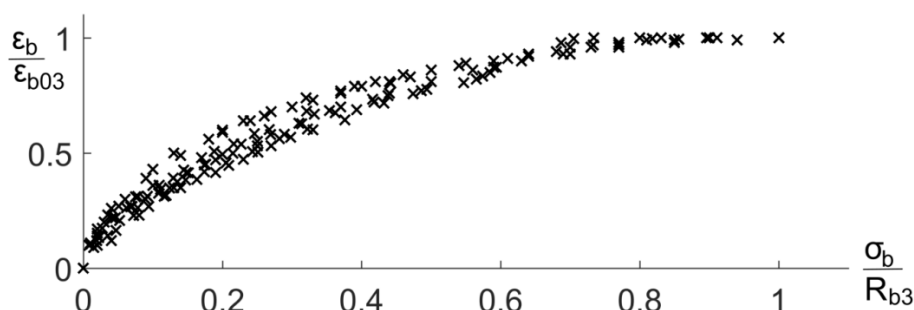


Рисунок 3 - Точки опытных диаграмм сжатия бетона с сетками косвенного армирования в относительных координатах

Второе уравнение получено на основании выводов, приведенных в работе [20] о том, что при построении экспериментальных диаграмм в относительных координатах $(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b03}}; \frac{\sigma_b}{R_{b3}})$

точки диаграмм располагаются достаточно близко для разных процентов армирования и классов бетона. На рисунке 3. представлены точки опытных диаграмм из работ [177,20] для бетонов прочностью $R_b=13,1 \div 30,9$ с коэффициентом косвенного армирования $\mu_{s,xy}=2 \div 5,4\%$. По этим данным была получена точка с осредненными координатами (0.23;0.62). Таким образом, $\varepsilon_{b23}=0,23 \cdot \varepsilon_{b03}$.

В итоге система уравнений (10) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} E_{b0} &= p_1 4\varepsilon_{b13}^3 + p_2 3\varepsilon_{b13}^2 + p_3 2\varepsilon_{b13} + p_4 \\ 0,62R_{b3} &= p_1 \varepsilon_{b23}^4 + p_2 \varepsilon_{b23}^3 + p_3 \varepsilon_{b23}^2 + p_4 \varepsilon_{b23} \\ R_{b3} &= p_1 \varepsilon_{b33}^4 + p_2 \varepsilon_{b33}^3 + p_3 \varepsilon_{b33}^2 + p_4 \varepsilon_{b33} \\ 0 &= p_1 4\varepsilon_{b33}^3 + p_2 3\varepsilon_{b33}^2 + p_3 2\varepsilon_{b33} + p_4 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Решение уравнений (11) позволяет определить коэффициенты многочлена (9), описывающего процесс деформирования на участке восходящей ветви от 0 до ε_{b33} .

Сравнение аналитических диаграмм, полученных по предлагаемой методике, с опытными представлено на рисунке 4.

В [144] установлено, что начало разрушения защитного слоя начинается при деформациях не менее предельных для неармированного бетона. Таким образом, при расчетах параметрические точки диаграммы для бетона защитного слоя можно принимать такие же, как и для неармированного бетона, что не приведет к завышению результатов. При получении диаграмм сжатия для ядра сечения армированного сетками (рисунок 3,б-г), работа защитного слоя учитывалась по диаграмме, предложенной Н.И. Карпенко [22].

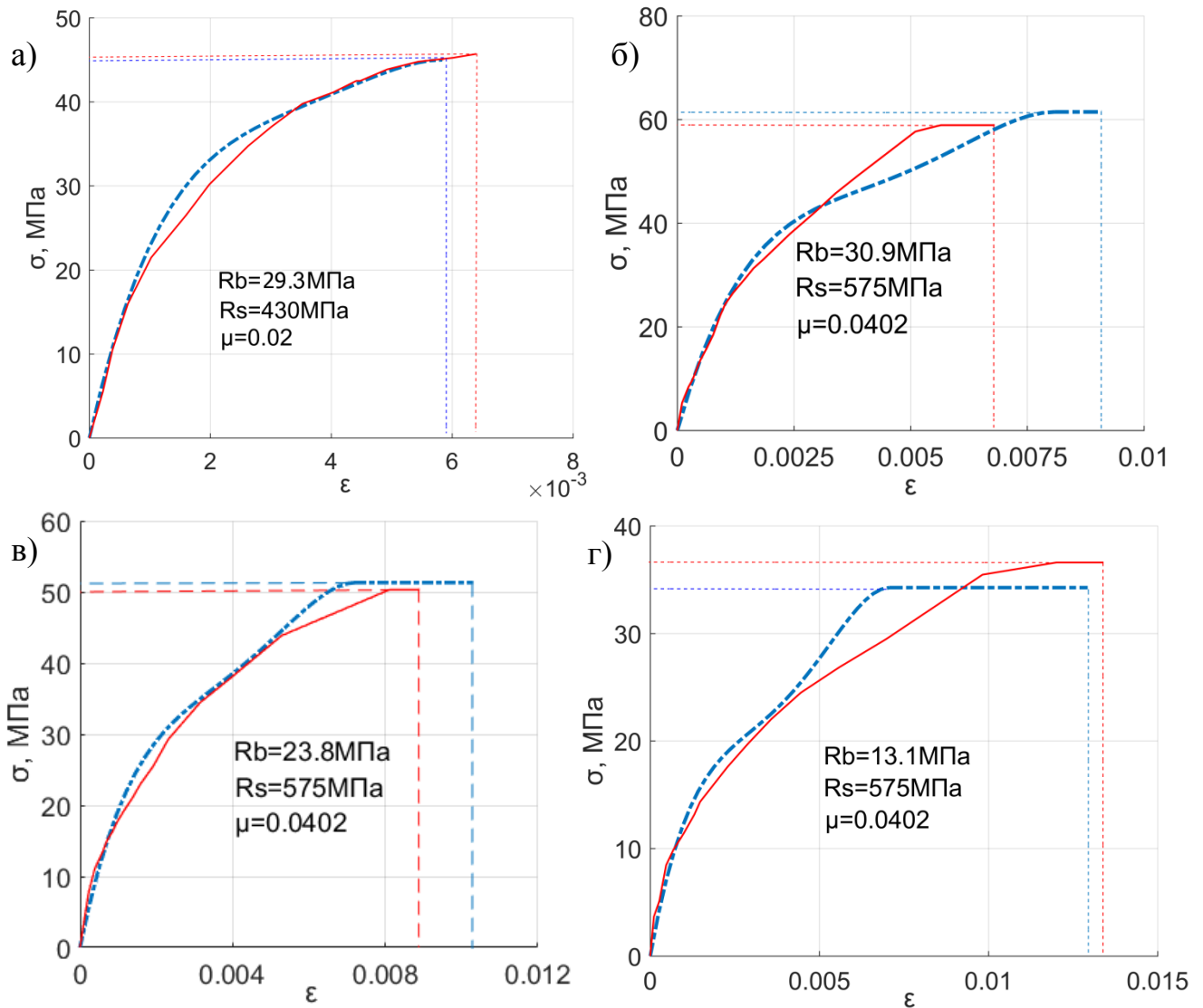


Рисунок 4 - Сравнение аналитических и опытных диаграмм сжатия бетона, усиленного сетками косвенного армирования, на восходящем участке: а) опыты [20]; б)-г) опыты [177];

— — — аналитические диаграммы; — — — опытные диаграммы

Расчет по предложенной криволинейной диаграмме достаточно трудоемок, требует использования ЭВМ и подходит для средних (экспериментальных) значений прочности и модуля упругости бетона. Для инженерных расчетов используются нормативные и расчетные значения прочности, принятые с заданной обеспеченностью. Для таких расчетов предла-

гается упрощенная линеаризованная модель (рисунок 1) по аналогии с трехлинейной диаграммой из СП 63.13330.2012.

Напряжения по трехлинейной диаграмме на разных участках определяются по следующим зависимостям:

$$\left| \begin{array}{l} \text{при } 0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b23} : \\ \sigma_b = E_b \varepsilon_b \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \text{при } \varepsilon_{b23} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b33} : \\ \sigma_b = \left(0,4 \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b23}}{\varepsilon_{b33} - \varepsilon_{b23}} + 0,6 \right) R_{b3} \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} \text{при } \varepsilon_{b33} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{bu3} : \\ \sigma_b = R_{b3} . \end{array} \right|$$

Полученные аналитические диаграммы обеспечивают хорошую сходимость с экспериментальными данными (рисунок 4) и могут закладываться в расчеты железобетонных конструкций, усиленных косвенным армированием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binici B. An analytical model for stress–strain behavior of confined concrete / B. Binici // Eng Struct. – 2005. - № 27. - Pp. 1040–1051.
2. Lu X. Stress–strain relations of high-strength concrete under triaxial compression / X. Lu, C. Hsu // J Mater Civil Eng. – 2007. - № 19(3). - Pp.261-268.
3. Sfer D. Study of the behavior of concrete under triaxial compression / D. Sfer, R. Gettu, G. Etse // J Eng Mech. – 2002. - № 128. - Pp.156-163.
4. Attard M. A stress–strain model for uniaxial and confined concrete under compression / M. Attard, A.K. Samani // Eng Struct. – 2012. - № 41. Pp. 335-349.
5. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно-сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку. Строительство: наука и образование.2013.№4.С.2.
6. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон - взгляд в будущее. Вестник МГСУ. 2014. №4.С. 181-189.
7. Тамразян А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений. Вестник МГСУ. 2011. №2-1. С.77-83.
8. Тамразян А.Г. Испытание трубобетонных образцов малого диаметра с высоким коэффициентом армирования / А.Г. Тамразян, И.К. Манаенков // Строительство и реконструкция. – 2017. - №4 (72). - С.57-62.
9. Krishan A.L. Load-bearing capacity of short concrete-filled steel tube columns of circular cross section / A.L. Krishan, E.A. Troshkina, V.I. Rimshin, V.A. Rahmanov, V.L. Kurbatov // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. - 2016. Т. 7. № 3. - Pp. 2518-2529.
10. Кришан А.Л. Определение разрушающей нагрузки сжатых трубобетонных элементов / А.Л. Кришан, А.И. Заикин, М.С. Купфер // Бетон и железобетон. - 2008. - № 2. - С.22-24.
11. Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных элементов с поперечным сетчатым армированием / Б.С. Расторгуев, Д.С. Ванус // Промышленное и гражданское строительство. - 2009. - № 10. - С. 53-54.
12. Тамразян А.Г. К расчету изгибаемых железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны / А.Г. Тамразян, И.К. Манаенков // Промышленное и гражданское строительство. - 2016. - № 7. - С. 41-44.
13. Тамразян А.Г. К расчету плоских железобетонных перекрытий с учетом фактической жесткости сечения / А.Г. Тамразян, И.К. Манаенков // Научное обозрение. - 2015. - № 8. - С. 87-92.
14. Бакиров К.К. Несущая способность сжатых железобетонных элементов прямоугольного сечения с косвенным армированием в виде сеток (При кратковременном действии нагрузки): Дис. ... канд. техн. наук / Бакиров Келес Капашевич. М: 1976. 127 с.
15. Кришан А.Л. Расчет прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием сетками / А.Л. Кришан, Р.Р. Сабиров, М.А. Кришан // Архитектура. Строительство. Образование. - 2014. - № 1 (3). - С.215-224.
16. Довгалюк А.Ф. Исследование сжатых железобетонных элементов с косвенным сетчатым армированием / А.Ф. Довгалюк, В.И. Довгалюк – В сб. МНИИТЭП «Прочность конструкций многоэтажных зданий». М., Стройиздат, 1968.
17. Henzel J. Untersuchungen über die Tragfähigkeit netzbewehrten Betonsäulen [Исследования несущей способности железобетонных колонн]: Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Darmstadt zur Erlangung der würde eines. Doktor-Ingenieurs genehmigte dissertation. – Darmstadt, 1964. Pp. 1-51.
18. Филиппов Б.П. Прочность и деформативность сжатых элементов с косвенным армированием / Б.П. Филиппов, Н.Г. Матков // Бетон и железобетон. - 1973. - № 4. - С.64-86.

19. Петрова К.В. Несущая способность сжатых элементов с поперечными сетками / К.В. Петрова, М.А. Юлдашев, В.И. Попугаев – В сб.: Исследование конструкций из бетонов на пористых заполнителях. НИИЖБ. – М., 1981. – С. 67-111.

20. Матков Н.Г. О диаграммах деформирования сжимаемых железобетонных элементов с продольным и поперечным армированием / Н.Г. Матков - Совершенствование методов расчета статически неопределимых элементов железобетонных конструкций. Тр. ин-та НИИЖБ, 1987. - С. 135-142.

21. Стороженко Л.И. Эффективность сжатых элементов с различными способами армирования / Л.И. Стороженко // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1981. – № 6. – С.26-29.

22. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

23. Байков В.Н. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В.Н. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1977. – № 6. – С.15-18.

Манаенков Иван Константинович

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», г. Москва

Старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

MANAENKOV I.K.

PERFECTION OF THE CONCRETE COMPRESSION DIAGRAM WITH INDIRECT REINFORCEMENT

The strength and deformation characteristics of concrete increase with volumetric stress state under lateral reduction conditions. In real constructions a volumetric stress state can be created by an indirect reinforcement device that limits the development of transverse deformations. The article presents a technique for constructing a curvilinear compression diagram for concrete reinforced by indirect reinforcement in the form of transverse welded meshes. The formulas for calculating the characteristic points of the diagram are presented: the stress and strain at the end of the ascending branch; strain and ultimate deformations at the end of the descending branch. The results of compression tests of more than 300 rectangular prism samples with indirect reinforcement were considered and the best convergence of the proposed formulas is shown in comparison with SP 63.13330.2012 on most strength characteristics ranges. The rising portion of the diagram is assumed to be curvilinear and is described by a polynomial of the fourth degree. The descending section is straightforward. The parameters of indirect reinforcement which ensure the convergence of the calculated strength with the results of the experiments were also revealed.

Key words: indirect reinforcement, welded mesh, compression diagram, confined concrete, ultimate compressibility

REFERENCES

1. Binici B. An analytical model for stress–strain behavior of confined concrete / B. Binici // Eng Struct. – 2005. - № 27. - Pp. 1040–1051.
2. Lu X. Stress–strain relations of high-strength concrete under triaxial compression / X. Lu, C. Hsu // J Mater Civil Eng. – 2007. - № 19(3). - Pp.261-268.
3. Sfer D. Study of the behavior of concrete under triaxial compression / D. Sfer, R. Gettu, G. Etse // J Eng Mech. – 2002. - № 128. - Pp.156-163.
4. Attard M. A stress–strain model for uniaxial and confined concrete under compression / M. Attard, A.K. Samani // Eng Struct. – 2012. - № 41. Pp. 335-349.
5. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Raschet vnetsentrenno-szhatykh zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennuyu dinamicheskuyu nagruzku. Stroitel'stvo: nauka i obrazovaniye.2013.№4.S.2.
6. Tamrazyan A.G. Beton i zhelezobeton - vzhlyad v budushcheye. Vestnik MGSU. 2014. №4.S. 181-189.
7. Tamrazyan A.G. Rekomendatsii k razrabotke trebovaniy k zhivuchesti zdaniy i sooruzheniy. Vestnik MGSU. 2011. №2-1. S.77-83.

8. Tamrazyan A.G. Ispytaniye trubobetonnykh obraztsov malogo diametra s vysokim koeffitsiyentom armirovaniya / A.G. Tamrazyan, I.K. Manayenkov // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. – 2017. - №4 (72). - S.57-62.
9. Krishan A.L. Load-bearing capacity of short concrete-filled steel tube columns of circular cross section / A.L. Krishan, E.A. Troshkina, V.I. Rimshin, V.A. Rahmanov, V.L. Kurbatov // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. - 2016. T. 7. № 3. - Pp. 2518-2529.
10. Krishan A.L. Opredeleniye razrushayushchey nagruzki szhatykh trubobetonnykh elementov / A.L. Krishan, A.I. Zaikin, M.S. Kupfer // Beton i zhelezobeton. - 2008. - № 2. - S.22-24.
11. Rastorguyev B.S. Raschet zhelezobetonnykh elementov s poperechnym setchatym armirovaniyem / B.S. Rastorguyev, D.S. Vanus // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2009. - № 10. - S. 53-54.
12. Tamrazyan A.G. K raschetu izgibayemykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniyem szha-toy zony / A.G. Tamrazyan, I.K. Manayenkov // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. - 2016. - № 7. - S. 41-44.
13. Tamrazyan A.G. K raschetu ploskikh zhelezobetonnykh perekrytiy s uchetoм fakticheskoy zhestkosti secheniya / A.G. Tamrazyan, I.K. Manayenkov // Nauchnoye obozreniye. - 2015. - № 8. - S. 87-92.
14. Bakirov K.K. Nesushchaya sposobnost' szhatykh zhelezobetonnykh elementov pryamougol'nogo secheniya s kosvennym armirovaniyem v vide setok (Pri kratkovremennom deystvii nagruzki): Dis. ... kand. tekhn. nauk / Bakirov Keles Kapashevich. M: 1976. 127 s.
15. Krishan A.L. Raschet prochnosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniyem setkami / A.L. Krishan, R.R. Sabirov, M.A. Krishan // Arkhitektura. Stroitel'stvo. Obrazovaniye. - 2014. - № 1 (3). - S.215-224.
16. Dovgalyuk A.F. Issledovaniye szhatykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym setchatym armirovaniyem / A.F. Dovgalyuk, V.I. Dovgalyuk – V sb. MNIITEP «Prochnost' konstruktsiy mnogoetazhnykh zdaniy». M., Stroyizdat, 1968.
17. Henzel J. Untersuchungen über die Tragfähigkeit netzbewehrten Betonsäulen [Issledovaniya nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh kolonn]: Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Darmstadt zur Erlangung der würde eines. Doktor-Ingenieurs genehmigte dissertation. – Darmstadt, 1964. Pp. 1-51.
18. Filippov B.P. Prochnost' i deformativnost' szhatykh elementov s kosvennym armirovaniyem / B.P. Filippov, N.G. Matkov // Beton i zhelezobeton. - 1973. - № 4. - S.64-86.
19. Petrova K.V. Nesushchaya sposobnost' szhatykh elementov s poperechnymi setkami / K.V. Petrova, M.A. Yuldashev, V.I. Popugayev – V sb.: Issledovaniye konstruktsiy iz betonov na poristyykh zapolnitelyakh. NIIZHB. – M., 1981. - S. 67-111.
20. Matkov N.G. O diagrammakh deformirovaniy szhimayemykh zhelezobetonnykh elementov s prodol'nym i poperechnym armirovaniyem / N.G. Matkov - Sovershenstvovaniye metodov rascheta staticheskoye neopredelimykh elementov zhelezobetonnykh konstruktsiy. Tr. in-ta NIIZHB, 1987. - S. 135-142.
21. Storozhenko L.I. Effektivnost' szhatykh elementov s razlichnymi sposobami armirovaniya / L.I. Storozhenko // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. – 1981. – № 6. – S.26-29.
22. Karpenko N.I. Obschiye modeli mekhaniki zhelezobetona. M.: Stroyizdat, 1996. 416 s.
23. Baykov V.N. Postroyeniye zavisimosti mezhdu napryazheniyami i deformatsiyami szhatogo betona po sisteme normiruyemykh pokazateley / V.N. Baykov, S.V. Gorbatoв, Z.A. Dimitrov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. – 1977. – № 6. – S.15-18.

Manaenkov I.K.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Senior teacher of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: manaenkov.i.k@gmail.com

СЕМЕНОВ А.А., ПОРЫВАЕВ И.А., ШАМИЛОВА Э.Р., СЕМЕНОВ С.А.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ СТОЕК ТРУБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

Приведены результаты исследований по поиску оптимальных параметров центрально сжатых элементов плоских и пространственных стержневых несущих металлических конструкций. Для стержней, шарнирно опертых по концам, проведен анализ изменения критической силы в зависимости от соотношения жесткостей участков и их относительных длин. Выявлен глобальный экстремум значения целевой функции объема стержня. Полученные соотношения позволили определить диапазон области рациональных решений для практического применения. Разработан инженерный алгоритм поиска оптимальных параметров центрально сжатых стержней переменной жесткости из тонкостенных труб круглого сечения. Проведены численные исследования работоспособности предложенного алгоритма. Приведен пример расчета, подтверждающий корректность алгоритма. Проиллюстрирован эффект экономии материала (до 14%) по сравнению со стержнями постоянного сечения.

Ключевые слова: продольный изгиб, устойчивость, критическая сила, переменная жесткость, оптимизация, алгоритм расчета.

Плоские и пространственные стержневые металлические конструкции покрытий зданий и сооружений рассматриваются, как шарнирно стержневые системы. Сечения центрально сжатых стержней целесообразно назначать в виде тонкостенных труб круглого или квадратного постоянного по всей длине сечения (из условия равностойчивости в разных плоскостях). Для снижения материалоемкости таких конструкций имеет смысл применять стержни переменной жесткости.

Первая попытка решения задачи устойчивости стержня переменной жесткости при минимальной массе принадлежит Лагранжу [1, 2, 3]. Решения этой задачи в общем виде до сих пор не найдено. Вопросы исследования устойчивости стержней при продольном изгибе приведены в фундаментальных трудах [4-13]. Попытки создать алгоритмы определения оптимальных параметров стоек переменной жесткости для конкретных задач предпринимаются исследователями и сегодня [14-19]. Как правило, методика сводится к интуитивному назначению математической функции $f(x)$ изменения жесткости стержня по длине и для произвольно заданных исходных параметрах EI_0 реализуется итерационный процесс поиска неизвестных с назначенной сходимостью, что бы минимизировать функцию цели (объем стержня при постоянной критической силе) либо определить максимум целевой функции (критическую силу при заданном объеме).

Для практических задач проектирования стержни переменного сечения должны рассматриваться как элементы с кусочно-постоянной жесткостью, при этом количество участков изменения жесткости целесообразно принимать от 2 до 3 [20]. В статье разработан инженерный алгоритм подбора оптимальных параметров стоек, состоящих из трех участков для частной задачи тонкостенных труб круглого сечения.

Существует аналитическое решение определения критической силы для стоек переменного сечения [6], шарнирно опертых по концам (рисунок 1).

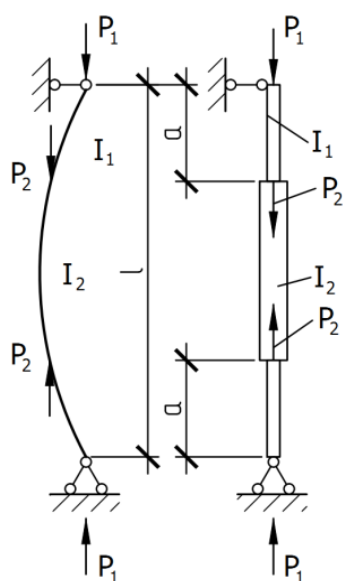


Рисунок 1 - Расчетная схема стержня переменного сечения

Уравнение устойчивости при $P_2 = 0$ и $P_1 = P$ в рассматриваемом случае записывается в виде

$$\operatorname{tg}(k_1 \cdot a) \cdot \operatorname{tg}[k_2 \cdot (l/2 - a)] = k_1 / k_2, \quad (1)$$

где

$$k_1 = \sqrt{\frac{P}{EI_1}} \quad \text{и} \quad k_2 = \sqrt{\frac{P}{EI_2}}.$$

Приняв

$$l = 1,0 \text{ м}, \alpha = \frac{a}{l}, \beta = \frac{EI_1}{EI_2}, k_2 = k, k_1 = k \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta}},$$

получим уравнение устойчивости в виде

$$\operatorname{tg}\left(k \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{1}{\beta}}\right) \cdot \operatorname{tg}[k \cdot (1/2 - \alpha)] = \sqrt{\frac{1}{\beta}}. \quad (2)$$

Для диапазона изменения величин α (относительная величина отсека меньшей жесткости) в пределах 0,1-0,45, и β (соотношение изгибных жесткостей участков стержня) в пределах 0,3-1,0 определены корни уравнения (2) k .

Величина критической силы в рассматриваемом случае определяется по формуле:

$$P_{cr} = k^2 EI_2 \quad (3)$$

Уместно определить значения k^2 , которые сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Величина k^2 при различных исходных параметрах

Относит. длина α	Соотношение изгибных жесткостей участков β									
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25
0,1	9,872	9,853	9,834	9,816	9,784	9,741	9,672	9,629	9,560	9,468
0,15	9,872	9,822	9,766	9,691	9,585	9,443	9,236	9,084	8,886	8,608
0,175	9,872	9,797	9,703	9,591	9,437	9,223	8,904	8,679	8,393	8,003
0,2	9,872	9,766	9,629	9,462	9,242	8,946	8,509	8,214	7,840	7,350
0,25	9,872	9,672	9,437	9,139	8,762	8,271	7,607	7,182	6,677	6,061
0,3	9,872	9,548	9,175	8,726	8,185	7,513	6,677	6,175	5,607	4,960
0,35	9,872	9,400	8,880	8,271	7,579	6,770	5,823	5,295	4,718	4,088
0,4	9,872	9,236	8,550	7,801	6,980	6,081	5,090	4,558	4,000	3,411
0,45	9,872	9,060	8,220	7,344	6,426	5,466	4,465	3,952	3,423	2,883

Отметим, что при $\beta = 1$ (стержень постоянного сечения) значение $k^2 = \pi^2$, что соответствует формуле Эйлера.

Рассмотрена равноустойчивая стойка круглого сечения из тонкостенной трубы постоянным диаметром D и толщинами стенок S_1 и S_2 по участкам.

Для сечений тонкостенных труб круглого сечения ($D/s = 15...40$) радиус инерции сечения тонкостенных труб i

$$i = 0,353D_{cp} = \sqrt{\frac{I(D,s)}{A(D,s)}} \approx const .$$

Следовательно, можно допустить

$$A(D,s) = c \cdot I(D,s) , \tag{4}$$

где c - некоторая постоянная.

Задача оптимального проектирования заключается в определении соотношения жесткостей участков стержня $\beta = \frac{EI_1}{EI_2}$ и их длин $\alpha = \frac{a}{l}$, при которых достигается минимальная масса (объем) с учетом действия критической силы $P_{cr} = const$.

Выражение целевой функции (объем стойки) можно записать в виде

$$V = \sum A_i \cdot l_i = 2 \cdot \alpha \cdot l \cdot A_1 + (1 - 2 \cdot \alpha) \cdot l \cdot A_2 , \tag{5}$$

где α - относительная длина приопорной части стойки (при постоянном сечении $\alpha = 0$).

Учитывая зависимости (3) и (4), целевую функцию (условную материалоемкость) можно представить в виде

$$V_{усл} = \frac{1}{k^2} \cdot [2 \cdot \alpha \cdot \beta + (1 - 2 \cdot \alpha)] \tag{6}$$

Используя данные таблицы 1, вычислены значения $100 \cdot V_{усл}$ для рассматриваемого диапазона исходных параметров (таблица 2). Цветом отмечена область минимальных значений целевой функции.

Таблица 2 – Условная материалоемкость $V_{усл} \cdot 100$

Относит. длина α	Соотношение изгибных жесткостей участков β									
	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,25
0,1	10,13	9,95	9,76	9,58	9,40	9,24	9,10	9,04	9,00	8,98
0,15	10,13	9,88	9,63	9,39	9,18	9,00	8,88	8,86	8,89	9,00
0,175	10,13	9,85	9,58	9,33	9,11	8,94	8,87	8,90	9,00	9,22
0,2	10,13	9,83	9,55	9,30	9,09	8,94	8,93	9,01	9,18	9,52
0,25	10,13	9,82	9,54	9,30	9,13	9,07	9,20	9,40	9,73	10,31
0,3	10,13	9,84	9,59	9,40	9,28	9,32	9,59	9,88	10,34	11,09
0,35	10,13	9,89	9,68	9,55	9,50	9,60	9,96	10,29	10,81	11,62
0,4	10,13	9,96	9,82	9,74	9,74	9,87	10,22	10,53	11,00	11,73
0,45	10,13	10,04	9,98	9,94	9,96	10,06	10,30	10,50	10,81	11,27

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация таблицы 2, где выявлен явно выраженный экстремум целевой функции.

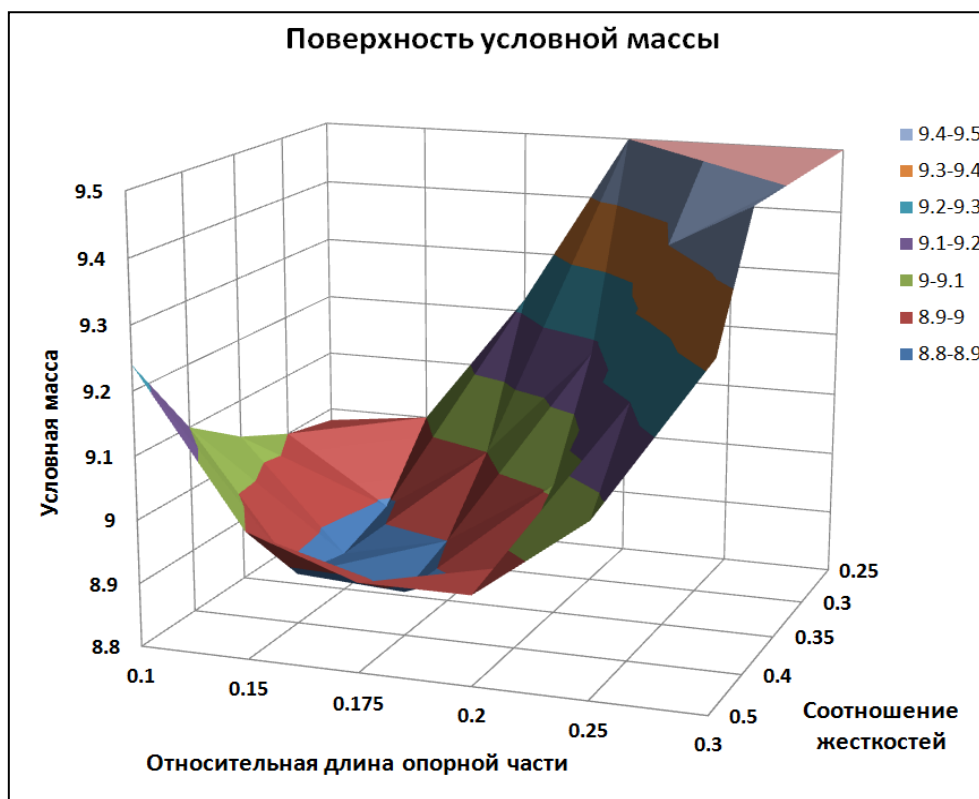


Рисунок 2 – Графическое представление целевой функции

Для уточнения области аргументов, в которой целевая функция имеет минимальные значения, рассмотрен более узкий интервал в диапазонах $\alpha = \frac{a}{l} = 0,153...0,157$ и

$$\beta = \frac{EI_1}{EI_2} = 0,356...0,364.$$

Результаты расчетов приведены в таблице 3 и на рисунке 3.

Таблица 3 – Условная материалоемкость в зоне экстремума $100 \cdot V_{\text{усл}}$

Относит. длина α	Соотношение изгибных жесткостей участков β						
	0.356	0.358	0.360	0.362	0.364	0.366	0.368
0.153	8.86011	8.86004	8.86004	8.86012	8.86027	8.86049	8.86078
0.154	8.86015	8.86001	8.85995	8.85996	8.86004	8.86019	8.86042
0.155	8.86033	8.86011	8.85998	8.85992	8.85993	8.86002	8.86018
0.156	8.86063	8.86035	8.86014	8.86001	8.85995	8.85997	8.86007

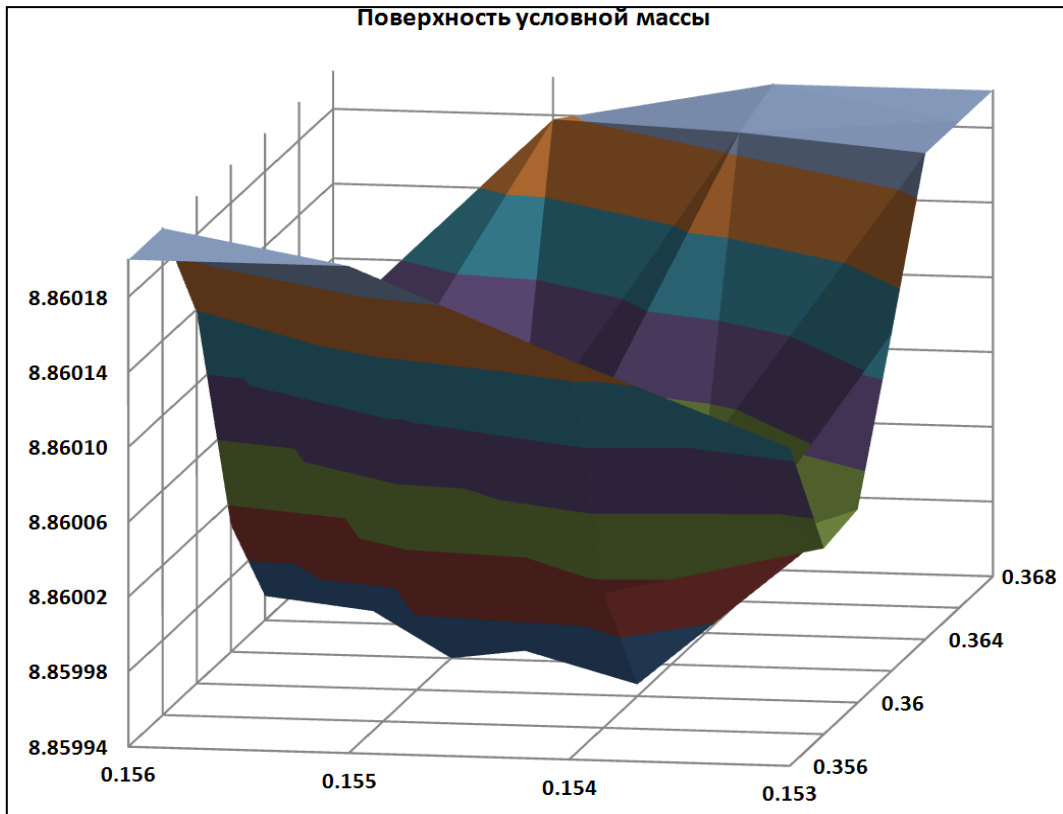


Рисунок 3 – Область минимальных значений целевой функции

На основании проведенных численных исследований разработан алгоритм инженерного расчета оптимальных параметров стоек переменного сечения, приведенный на рисунке 4.

Для иллюстрации реализации предложенного алгоритма рассмотрим конкретный численный пример.

Численный пример

Исходные данные:

$$E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}; R_y = 315 \text{ МПа}; N = 981 \text{ кН}; l = 8 \text{ м}; \rho = 77 \text{ кН/м}^3.$$

Задаем гибкостью $\lambda = 110$.

Определяем средний диаметр стойки постоянного сечения

$$D_0 = l / (0,353 \cdot \lambda) = 800 / (0,353 \cdot 110) = 20,6 \text{ см}.$$

Определяем толщину стенки

$$s_0 = \frac{8 \cdot P_{cr} \cdot l^2}{\pi^3 \cdot E \cdot D_0^3} = \frac{8 \cdot 981 \cdot 800^2}{\pi^3 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 20,6^3} = 0,9 \text{ см}.$$

Назначаем для стойки постоянного сечения трубу 215x9

$$I_0 = 3095,5 \text{ см}^4; A_0 = 58,25 \text{ см}^2.$$

Расчет на устойчивость определил $K_0 = 1,004$.

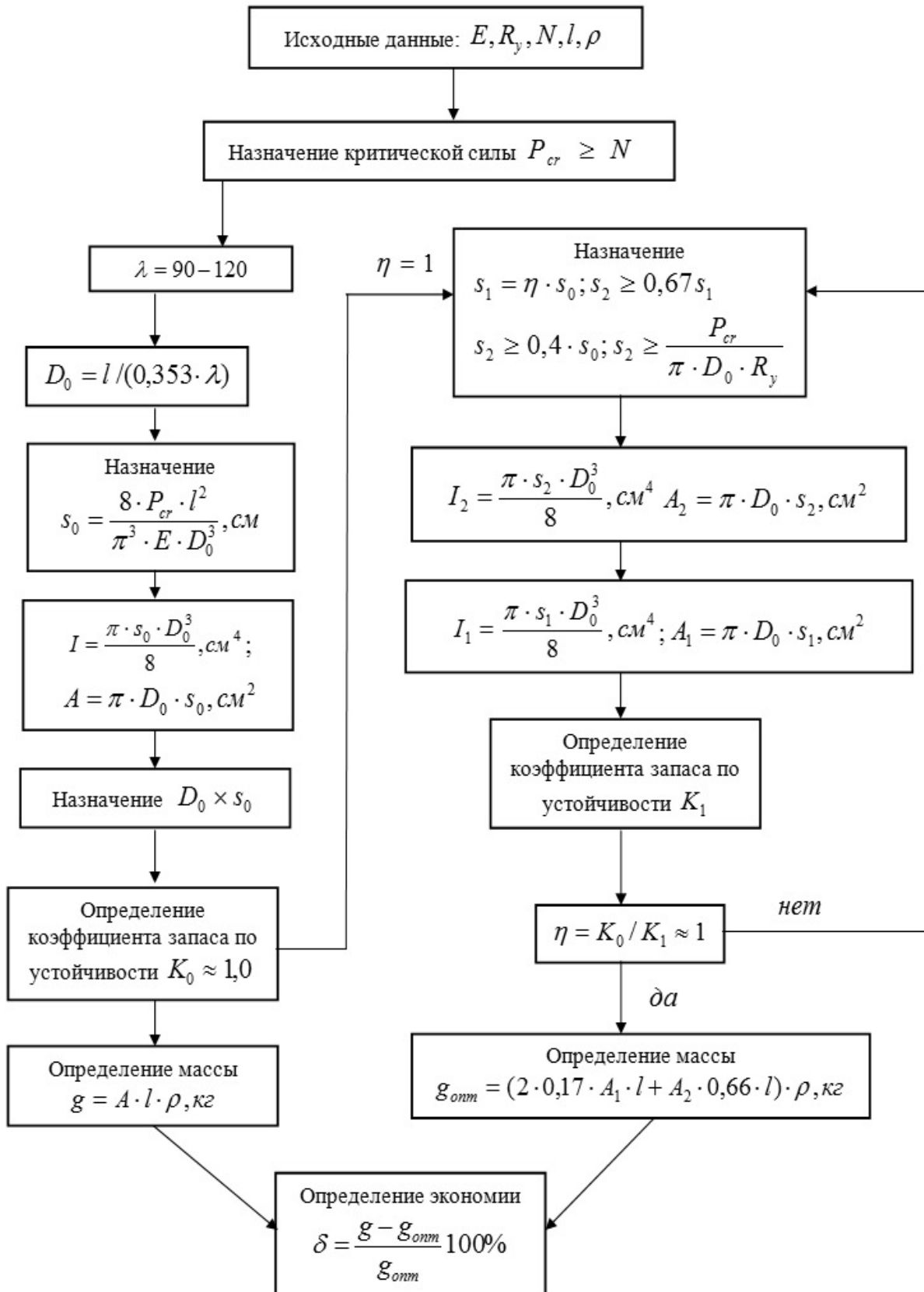


Рисунок 4 – Алгоритм поиска оптимальных параметров тонкостенной трубы переменного сечения

Определяем толщины стойки переменного сечения

$$s_1 = 9,0 \text{ мм}; s_2 \geq 0,4 \cdot s_0 = 3,6 \text{ мм}; s_2 \geq \frac{P_{cr}}{\pi \cdot D_0 \cdot R_y} = 4,8 \text{ мм}.$$

Принимаем сечение приопорных участков 215x4,8.

$$I_2 = 1751,6 \text{ см}^4; A_2 = 31,7 \text{ см}^2.$$

Расчет на устойчивость определил $K_1 = 0,969$.

Определим коэффициент перерасчета $\eta = K_0 / K_1 = 1,036$.

Корректируем толщину стенки сечения средней части $s_1 \geq 1,036 \cdot 9,0 = 9,4 \text{ мм}$.

$$I_1 = 3214,8 \text{ см}^4; A_1 = 60,72 \text{ см}^2.$$

Расчет на устойчивость определил $K_1 = 1,00$.

Определяем материалоемкость полученных решений

$$g_0 = A_0 \cdot l \cdot \rho = 58,25 \cdot 800 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 365,8 \text{ кг}.$$

$$g_{opt} = (2 \cdot 0,156 \cdot 31,7 \cdot 800 + 60,72 \cdot 0,688 \cdot 800) \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 324,4 \text{ кг}$$

Экономия материала составляет 12,8%

При использовании труб по ГОСТ 10704-91 экономия материала составляет 12 %.

Предложенная методика была применена при проектировании стропильной фермы покрытия пролетом 42 м с параллельными поясами. Экономия металла по решетке составила 11 %. Для данной конструкции был получен экономический эффект в размере 5,1 % по критерию приведенные затраты с учетом стоимости материала и затрат на изготовление конструкции (устройство сварного шва при стыковке участков труб с разными параметрами).

Основные выводы:

1. Для стойки переменного сечения из тонкостенных труб одинакового диаметра существует единственное оптимальное решение соотношения жесткостей и относительных длин участков, отвечающее минимальной материалоемкости.

2. Выявлено, что область рациональных решений находится в интервале соотношения жесткостей $\beta = \frac{EI_1}{EI_2} = 0,357 \dots 0,364$ и относительных длин участков

$$\alpha = \frac{a}{l} = 0,153 \dots 0,156.$$

3. Для практических расчетов допустимо применять более широкий диапазон $\alpha = \frac{a}{l} = 0,15 \dots 0,17$ и $\beta = \frac{EI_1}{EI_2} = 0,35 \dots 0,4$, в котором значение целевой функции изменится не более чем на 0,5%.

4. Экономия материала при использовании стойки с оптимальными параметрами достигает 12 % по сравнению со стержнем постоянного сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Egorov Y.V. On Lagrange problem about the strongest column // Rapport Interne 02-16. Univeriite Paul Sabatier, Toulouse. 2002. Pp. 1-7.
2. Сейранян А.П. Задача Лагранжа о наивыгоднейшем очертании колонны // Успехи механики. 2003. № 2. С. 45-96.
3. Kanno Y. Necessary and sufficient conditions for global optimality of eigenvalue optimization problems [Необходимые и достаточные условия минимума целевой функции в задачах оптимизации] // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2001. № 22. Pp. 248-252.
4. Биргер И.А. Прочность. Устойчивость. Колебания // справ.: в 3 т. . — т. 3 / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко : М.: Машиностроение, 1968. — 568. с.
5. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. — М: Наука. 1975. —984. с.
6. Киселев В.А. Строительная механика. Спецкурс. Динамика и устойчивость. – М.: Стройиздат. 1980. – 616 с.
7. Ржаницын А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1955. — 476. с.
8. Лейтес С. Д. Устойчивость сжатых стержней, жёсткость которых изменяется по степенному закону / Материалы по металлическим конструкциям. М.: Стройиздат. 1962. С. 13-74.
9. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. Том 1.-М.: Издательство СКАД СОФТ, 2010-670с.
10. Bleich N.N. Nonlinear creep deformations of columns of rectangular cross section [Нелинейные поперечные деформации колонн квадратного поперечного сечения] // Yourn. of Appl. Mech. Dec. 1959.
11. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. — 2-е изд. перераб. и доп. : М.: Машиностроение, 1991. — 336. с.
12. Болотин В.В. О понятиях устойчивости в строительной механике. Проблемы устойчивости в строительной механике // Сб. статей. М.: Стройиздат. 1965. — С. 6-27.
13. Андреев В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел // : М.: Издательство АСВ, 2002. — 288. с.
14. Муханов В.В. Оптимизация строительных конструкций на основе численного и аналитического решения задач механики неоднородных тел. Автореферат дисс. канд техн. наук. - Ростов-на-Дону, РГСУ. 2103 – 24 с.
15. Никора Н.Д. Продольный изгиб стержней переменной жесткости с учетом деформаций ползучести и температурных воздействий. Дисс. канд техн наук. Ростов, РГСУ. 2016. 120с.
16. Клименко Е.С. Устойчивость сжатых неоднородных стержней с учетом физической нелинейности материала: монография: / . Ростов на Дону: РГСУ. 2012. 77 с.
17. Кулинич И.Г. Устойчивость продольно-сжатых стержней переменной жесткости при ползучести. Автореферат канд техн наук, Ростов РГСУ. 2012 24 с.
18. Кулинич И.Г., Ливанов В.В., Блягоз А.М. Выпучивание стеклопластиковых стержней переменной жесткости// Новые технологии. 2012. №4, с. 75-81.
19. Сеницкий Ю.Э., Ишутин А.С. Общая устойчивость сжатых составных стержней переменного сечения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. 2015. Т. 19, № 2. С. 341-357.
20. Семенов А.А., Маляренко А.А., Старцева Л.В., Порываев И.А. Строительная механика (спецкурс). Применение ПК SCAD Office для решения задач динамики и устойчивости стержневых систем. Учебное пособие / М.: Изд. СКАД СОФТ, Издательский дом АСВ. 2016. – 255 с.

Семенов Александр Александрович

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа

Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций

E-mail: asfugntu@yandex.ru

Порываев Илья Аркадьевич

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций
E-mail: iporivaev@gmail.com

Шамилова Эльвира Рамилевна

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа
магистрант кафедры строительных конструкций
E-mail: shamilova-ella@mail.ru

Семенов Сергей Александрович

ООО «ЦЕНТРПРОЕКТ», г. Уфа
инженер
E-mail: S77@yandex.ru

SEMENOV A.A., PORIVAEV I.A., SHAMILOVA E.R., SEMENOV S.A.

**ALGORITHM OF SEARCHING THE OPTIMUM PARAMETERS
OF CENTRALLY COMPRESSED STREAMS OF TUBULAR
CROSS SECTION OF VARIABLE RIGIDITY**

Research on finding of optimal parameters of compressed members of flat and space rod bearing steel structures is shown. For hinged ends rods an analysis of variability of critical force depending on the ratio of shear sections and their relative lengths. Identified global minimum of the objective function of the volume of the rod. The obtained correlation allowed defining the range of the field of rational solutions for practical use. Designed using developed algorithm of engineering optimal parameters compressed rods of variable stiffness of thin-walled pipes of circle section. Numerical investigations conducted health proposed algorithm. An example of calculation, confirming correctness of techniques. Showed a significant effect (up to 14%) savings in material consumption compared to rods of uniform cross-sections.

Key words: lateral deflection, stability, critical force, variable stiffness, algorithm of optimization.

REFERENCES

1. Egorov Y.V. On Lagrange problem about the strongest column // Rapport Interne 02-16. Univeriite Paul Sabatier, Toulouse. 2002. Pp. 1-7.
2. Seyranyan A.P. Zadacha Lagranzha o naivygodneyshe ochertanii kolonny // Uspekhi mekhaniki. 2003. № 2. S. 45-96.
3. Kanno Y. Necessary and sufficient conditions for global optimality of eigenvalue optimization problems [Neobkhodimyye i dostatochnyye usloviya minimuma tselevoy funktsii v zadachakh optimizatsii] // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2001. № 22. Pp. 248-252.
4. Birger I.A. Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya // sprav.: v 3 t. . — t. 3 / pod red. I.A. Birgera, YA.G. Panovko : M.: Mashinostroyeniye, 1968. — 568. s.
5. Vol'mir A.C. Ustoychivost' deformiruyemykh sistem. — M.: Nauka. 1975. — 984. s.
6. Kiselev V.A. Stroitel'naya mekhanika. Spetskurs. Dinamika i ustoychivost'. — M.: Stroyizdat. 1980. — 616 s.
7. Rzhantsyn A.R. Ustoychivost' ravnovesiya uprugikh sistem. — M.: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury. 1955. — 476. s.
8. Leytes S. D. Ustoychivost' szhatykh sterzhney, zhostkost' kotorykh izmenyayetsya po stepennomu zakonu / Materialy po metallicheskim konstruksiyam. M.: Stroyizdat. 1962. S. 13-74.
9. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Ustoychivost' ravnovesiya konstruksiy i rodstvennyye problemy. Tom 1.- M.: Izdatel'stvo SKAD SOFT, 2010-670s.
10. Bleich N.N. Nonlinear creep deformations of columns of rectangular cross section [Nelineynyye poperechnyye deformatsii kolonn kvadratnogo poperechnogo secheniya] // Yourn. of Appl. Mech. Dec. 1959.
11. Alfutov H.A. Osnovy rascheta na ustoychivost' uprugikh sistem. — 2-ye izd. pererab. i dop. : M.: Mashinostroyeniye, 1991. — 336. s.

12. Bolotin V.V. O ponyatiyakh ustoychivosti v stroitel'noy mekhanike. Problemy ustoychivosti v stroitel'noy mekhanike // Sb. statey. M.: Stroyizdat. 1965. — S. 6-27.
13. Andreyev V.I. Nekotoryye zadachi i metody mekhaniki neodnorodnykh tel // : M.: Izdatel'stvo ASV, 2002. — 288. s.
14. Mukhanov V.V. Optimizatsiya stroitel'nykh konstruksiy na osnove chislennogo i analiticheskogo resheniya zadach mekhaniki neodnorodnykh tel. Avtoreferat diss. kand tekhn. nauk. - Rostov-na-Donu, RGSU. 2103 – 24 s.
15. Nikora N.D. Prodol'nyy izgib sterzhney peremennoy zhestkosti s uchetom deformatsiy polzuchesti i temperaturnykh vozdeystviy. Diss. kand tekhn nauk. Rostov, RGSU. 2016. 120s.
16. Klimenko Ye.S. Ustoychivost' szhatykh neodnorodnykh sterzhney s uchetom fizicheskoy nelineynosti materiala: monografiya: /. Rostov na Donu: RGSU. 2012. 77 s.
17. Kulinich I.G. Ustoychivost' prodol'no-szhatykh sterzhney peremennoy zhestkosti pri polzuchesti. Avtoreferat kand tekhn nauk, Rostov RGSU. 2012 24 s.
18. Kuliinich I.G., Livanov V.V., Blyagoz A.M. Vypuchivaniye stekloplastikovyykh sterzhney peremennoy zhestkosti// Novyye tekhnologii. 2012. №4, s. 75-81.
19. Senitskiy YU.E., Ishutin A.S. Obshchaya ustoychivost' szhatykh sostavnykh sterzhney peremennogo secheniya // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskiye nauki. 2015. T. 19, № 2. S. 341-357.
20. Semenov A.A., Malyarenko A.A., Startseva L.V., Poryvayev I.A. Stroitel'naya mekhanika (spetskurs). Primeneniye PK SCAD Office dlya resheniya zadach dinamiki i ustoychivosti sterzhnevyykh sistem. Uchebnoye posobiye / M.: Izd. SKAD SOFT, Izdatel'skiy dom ASV. 2016. – 255 s.

Semenov A.A.

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa
Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Building constructions
E-mail: asfugntu@yandex.ru

Porivaev I.A.

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa
Candidate of Technical Sciences, senior lecturer, Department of Building constructions
E-mail: iporivaev@gmail.com

Shamilova E.R.

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), Ufa
Master's degree student, Department of Building constructions
E-mail: shamilova-ella@mail.ru

Semenov S.A.

Centr proekt ltd, Ufa
engineer
E-mail: S77@yandex.ru

ТРАВУШ В.И., МАРУФИЙ А.Т., ЦОЙ А.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ПОЛОСЫ ЗАМОЧЕННЫХ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ В ГЛУБИНЕ МАССИВА, ПРИВОДЯЩЕЙ К НАЧАЛУ ПРОЯВЛЕНИЯ ИХ ПРОСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

В статье предложена методика определения начальной ширины горизонтальной полосы замоченных лессовых грунтов внутри массива, после достижения которой начнут проявляться просадочные деформации грунтов. Замачивание грунтов приводит к прохождению двух механических процессов - релаксации вертикальных напряжений в грунте внутри полосы и формированию в массиве грунта над полосой разгружающего свода за счет арочного эффекта. Расчетная степень уменьшения вертикальных напряжений, имевшихся в грунте до замачивания, определяется по специальной лабораторной методике в период проведения инженерно-геологических изысканий площадки строительства. Высота сформированного над полосой разгружающего свода определяется по формуле М.М. Протодьяконова.

Совместное сравнительное рассмотрение формулы остаточного вертикального напряжения в замоченном грунте и формулы давления на полосу, создаваемое весом грунтов внутри свода, позволяет получить формулу ширины полосы, при которой начнут происходить просадочные деформации замоченных грунтов.

Ключевые слова: лессовый просадочный грунт, полоса замоченного грунта, просадочные деформации, релаксация напряжений, разгружающий свод, арочный эффект в грунтах.

При проектировании зданий и сооружений существует необходимость оценки возможности появления просадочных деформаций грунтов в различных случаях их замачивания. Одним из таких случаев является локальный куполообразный подъем уровня подземных вод в нижней части просадочной толщи [1, 2], который с рядом упрощений можно отобразить расчетной схемой, приведенной на рисунке 1.

Пусть в грунтовом массиве ниже глубины H по горизонтальной полосе шириной L и толщиной d произошло замачивание просадочного от собственного веса грунта. Подстилающий грунт и грунт по бокам полосы рассматривается как жесткое основание. До замачивания грунтов вертикальные напряжения от собственного веса грунта на глубине H составляли $\sigma_{zg} = \gamma H$ (где γ – удельный вес грунта, тс/м³).

В рассматриваемой расчетной схеме имеет местохождение двух следующих механических процессов.

1. Процесс релаксации напряжений, заключающийся в том, что если в грунте, находящемся внутри полосы, невозможно протекание деформаций, то после его замачивания напряжения в нем уменьшаются. В работе [3] такое состояние названо “фиксированным исходным деформированным состоянием грунта”, в этой же работе приводятся результаты лабораторных испытаний образцов лессового грунта в условиях этого состояния, которые свидетельствуют, что в замоченном лессовом грунте наблюдается релаксация, как касательных, так и нормальных напряжений. В работе [4] приведены результаты исследований релаксации вертикальных напряжений при принудительном сжатии образцов лессового суглинка в компрессионных приборах и последующем замачивании грунта. Использовался лабораторный стенд, аналогичный по конструкции с описанным в работе [5] “стендом для исследования релаксации напряжений” и в работе [6] “компрессиомером - релаксо

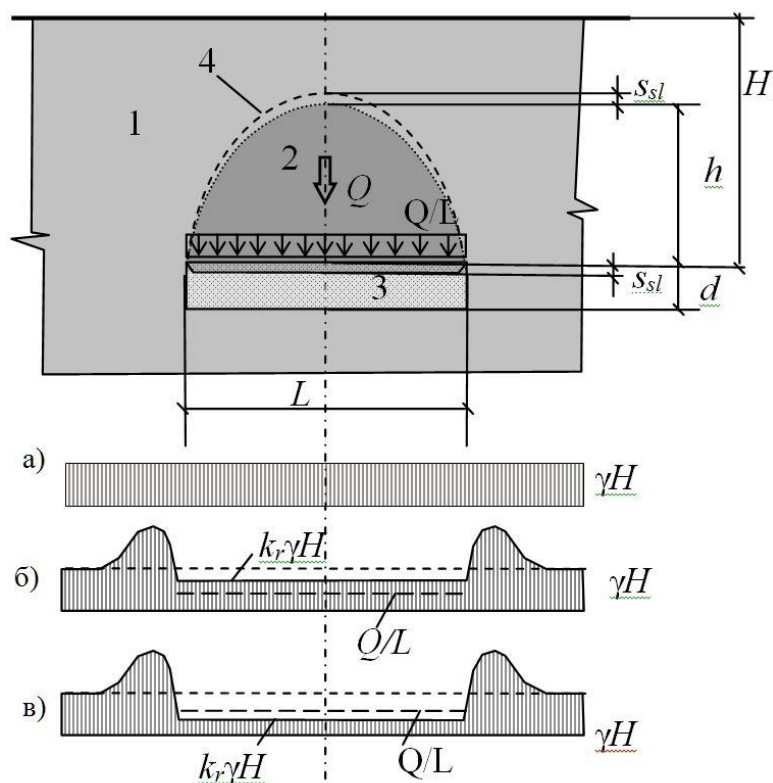


Рисунок 1 - Расчетная схема для определения просадочных деформаций залегающей в глубине массива горизонтальной полосы замоченного лессового грунта:

1 - грунтовый массив, 2 - свод обрушения, 3 - горизонтальная полоса замоченного грунта, 4 - разгружающий свод, s_{sl} - просадка полосы, а) распределение вертикальных напряжений в полосе и прилегающих к ней боковых участках до замачивания грунтов; б) то же, после замачивания грунтов полосы в случае отсутствия просадочных деформаций ($k_r \gamma H \geq Q/L$); в) то же, после замачивания грунтов полосы в случае наличия просадочных деформаций ($k_r \gamma H \leq Q/L$).

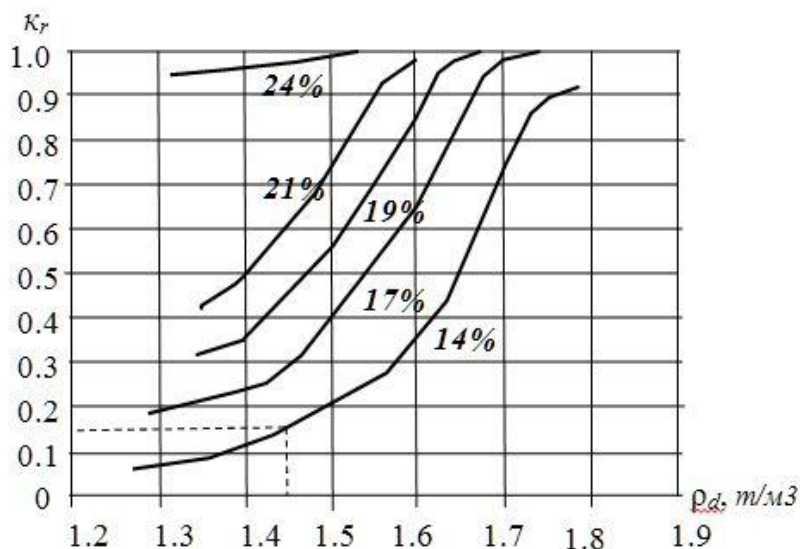


Рисунок 2 - Графики зависимости « k_r - ρ_d » для грунта с различной начальной влажностью W_0 , % (рисунок из работы [8]): k_r - коэффициент релаксации напряжения в замоченном грунте, ρ_d - плотность сухого грунта, грунт - лессовый суглинок (м-район Анар г. Ош). Влажность грунта на границе раскатывания $W_p=16\%$, влажность грунта на границе текучести - $W_L=28\%$.

метром". Образец грунта в компрессионном приборе при помощи винтового пресса принудительно сжимался на заданную величину деформации и затем, сохраняя образец грунта под этой постоянной деформацией в течении всего эксперимента, производилось его замачивание. В ходе опыта измерялись вертикальные напряжения в образце грунта. Экспериментальным путем были получены графики зависимости коэффициента релаксации напряжений k_r от плотности сухого грунта ρ_d для образцов грунта с различной начальной влажностью W_0 . Коэффициентом релаксации напряжений k_r названо отношение стабилизированного вертикального напряжения в образце грунта после его замачивания к напряжению до замачивания. Полученные графики приведены на рис.2 .

2. Процесс образования разгружающего свода в массиве грунта над замоченной полосой. Наличие аналогии между возникновением параболического свода естественного равновесия (разгружающего свода) над горной выработкой и образованием такого же свода в просадочном грунте при его замачивании инфильтрующейся из канала водой, отмечается в работах [1, 2, 3, 7, 8]. В Межгосударственном стандарте [9] определение давления на кровлю тоннеля производится с учетом формирования над ним разгружающего свода параболического очертания. Высоту свода h определяется по формуле (1)

$$h = L / 2f \quad (1)$$

где f – коэффициент крепости пород (по М.М. Протоdjяконову).

Для различных грунтов и их состояний по влажности значения коэффициента f приводятся в соответствующей нормативной и научной литературе. Например, для суглинков твердой консистенции, лесса $f = 0,8$, для супесчано-суглинистых грунтов твердой консистенции $f = 0,7$, для суглинков полутвердой консистенции, сырого песка $f = 0,6$, для насыпных грунтов $f = 0,5$, для разжиженного грунта, плывуна $f = 0.1 - 0,3$. Масса грунта внутри свода именуется термином - «свод обрушения» [9] .

Применительно к обсуждаемой в статье расчетной схеме полагается одновременное прохождение двух описанных выше механических процессов - релаксации напряжений и сводообразования. От замачивания грунта внутри полосы происходит уменьшение имевшихся до замачивания грунта напряжений со значений $\sigma_{zg} = \gamma H$ до величины $\sigma = k_r \gamma H$, что приводит к перераспределению вертикальных напряжений от веса грунтов над полосой на примыкающие к ней с боков участки незамоченного грунта (рис.1 б, в). Над полосой формируется разгружающий свод параболического очертания с пролетом равным ширине полосы L , и высотой h , определяемой по формуле (1).

В зависимости от величины оставшихся после релаксации напряжений σ в грунте замоченной полосы напряжения от веса грунтов, расположенных выше свода обрушения, могут полностью или частично перераспределиться на прилегающие к краям полосы незамоченные участки. Вид эпюр вертикальных напряжений в горизонтальном сечении на глубине H после их перераспределения приведен на рис. 1 б,в.

Внутри свода обрушения напряжения от собственного веса грунта перераспределяться не могут. Если принять упрощение, что свод обрушения является твердым телом, то его вес Q будет создавать по верху нижележащей полосы равномерно распределенное давление Q/L , где Q - вес 1 пм грунтовой массы внутри свода.

Основным расчетным положением предлагаемой методики является следующее утверждение. Проявление просадочных деформаций замоченных грунтов полосы начнет происходить при начальной ширине полосы L_0 , при которой давление от веса свода Q/L_0 сравняется с оставшимся напряжением $k_r \gamma H$.

$$k_r \gamma H = Q/L_0 \quad (2)$$

После проявления просадочных деформаций грунтов полосы произойдет отрыв свода обрушения от разгружающего свода (см. рис.1).

С учетом всех принятых упрощений, возможно, записать следующие расчетные формулы:

высота рагружающего свода - определяется по формуле (1) $h = L/2f$,
 площадь параболического сегмента - $A_n = (2/3)hL$,
 вес 1 пм свода обрушения - $Q = L^2\gamma / 3f$,
 равномерно распределенное давление свода на кровлю полосы - $Q / L = L\gamma / 3f$,
 вертикальное оставшееся напряжение в грунте внутри замоченного слоя - $k_r\gamma H$,
 коэффициент релаксации напряжений k_r определяется по графикам на рис. 2 .

Вертикальное перемещение свода обрушения от просадки грунтов полосы произойдут в случае

$$L\gamma / 3f \geq k_r \gamma H \quad (3)$$

Начальная ширина полосы L_o , при достижении которой начнут проявляться просадочные деформации грунтов

$$L_o = 3 k_r f H \quad (4)$$

В случае, если пролет L будет больше L_o , средняя просадка верха полосы составит

$$s_{sl} = \varepsilon_{sl} d \quad (5)$$

где ε_{sl} – коэффициент относительной просадочности при вертикальном напряжении в замоченном грунте $\sigma = L\gamma / 3f - k_r \gamma H$, а с приближенным учетом веса грунта в полосе - при $\sigma = L\gamma / 3f - k_r \gamma H + 0.5 \gamma d$,
 d – толщина полосы замоченных грунтов.

В случае, если σ будет меньше начального давления просадочности p_{sl} , то просадка будет незначительна.

Далее рассмотрим пример расчета горизонтальной полосы толщиной $d = 2$ м замоченного лессового грунта, верх которой находится на глубине $H=20$ м. Плотность сухого грунта $\rho_d = 1,45$ т/м³, природная влажность грунта $W_0 = 14\%$. Удельный вес грунта $\gamma = 1.65$ тс/м³. Коэффициент относительной просадочности при давлении 1 кгс/см² составляет $\varepsilon_{sl1} = 0.03$, при давлении 2 кгс/см² , $\varepsilon_{sl2} = 0.05$. Коэффициент крепости породы для лесса $f = 0.8$.

По полученным в результате лабораторных испытаний грунта графикам на рис.2 определяем коэффициент релаксации напряжений, $k_r = 0.15$.

Начальная ширина полосы L_o определится по формуле (3)

$$L_o = 3k_r H f = 3 * 0.15 * 20 * 0.8 = 7.2 \text{ м}$$

При ширине полосы $L=24$ м $> L_o$ вертикальное напряжение в замоченном грунте (с приближенным учетом собственного веса грунта полосы) составит

$$\sigma = (L\gamma)/3f - k_r\gamma H + 0.5\gamma d = (24 * 1.65)/(3 * 0.8) - 0.15 * 1.65 * 20 + 0.5 * 1.65 * 2 = 13,20 \text{ тс/м}^2$$

Для этой величины напряжения интерполяцией определим коэффициент относительной просадочности , $\varepsilon_{sl(1,32)} = 0.036$.

Просадка верха замоченной полосы определится по формуле (4)

$$s_{sl} = \varepsilon_{sl(1,32)} * d = 0.036 * 200 = 7,2 \text{ см}$$

Высота свода обрушения, определенная по формуле (1) $h = L / 2f = 24 / (2 * 0.8) = 15$ м , что меньше высоты расположения верха полосы $H=20$ м, следовательно вершина свода на поверхность земли не выйдет. Между просевшим сводом обрушения и разгружающим сводом образуется зазор (рис. 1) высотой у вершины свода $s_{sl} = 7,2$ см.

Выводы

Предложенная экспериментально - расчетная методика определения критической ширины расположенной в глубине массива горизонтальной полосы замоченных просадочных грунтов, может быть применена при решении ряда практических задач проектирования зданий и сооружений на просадочных грунтах. Например, к числу таких задач можно отнести: определение просадочных деформаций грунтовых основания в случае куполообразного подъема подземных вод в нижней части просадочной толщи, определение просадок насыпей земляного полотна автомобильных и железных дорог в случае появления в их нижней части полособразных участков мокрого грунта, определение критических размеров локальной зоны аварийного замачивания просадочных грунтов под грунтовой подушкой, приводящих к появлению просадочной мульды на поверхности и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев, Ю.М. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах / Ю.М.Абелев, М.Ю. Абелев. - М.: Госстройиздат, 1968. - 430 с.
2. Крутов, В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах./ В.И.Крутов. - Киев: Изд-во "Будівельник", 1982. - 222 с.
3. Тер – Мартиросян З.Г. Механика грунтов: Учебное пособие./ З.Г. Тер – Мартиросян. – М.: Изд-во АСВ, 2005. – 488с.
4. Травуш В.И. Влияние локального увлажнения лессовых грунтов на перераспределение реактивных отпоров под фундаментами / В.И.Травуш, А.В.Цой, А.Т. Маруфий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. №2. С.2-4.
5. Абелев, М.Ю. Методы строительства промышленных и гражданских зданий на слабых водонасыщенных грунтах. / М.Ю. Абелев. - М.: Стройиздат, 1983. – 248 с.
6. Труфанов А.Н. Метод релаксации напряжений. // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2012. № 5. С. 7-11.
7. Денисов, Н.Я. Строительные свойства лесса и лессовидных суглинков. / Н.Я.Денисов. - М.: Гостройиздат, 1953. - 154 с.
8. Мустафаев, А.А. Основы механики просадочных грунтов./ А.А.Мустафаев.-М.: Стройиздат, 1978.- 262с.
9. СП 120.13330.2012. Свод правил. Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003

Травуш Владимир Ильич

ЗАО "Горпроект", Москва
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор,
E-mail: travush@mail.ru

Маруфий Адилжан Таджимухамедович

Ошский технологический университет, Ош (Киргизия),
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики
E-mail: oshtu-marufi@rambler.ru

Цой Алексей Валентинович

Ошский технологический университет, Ош (Киргизия),
Кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильных дорог
E-mail: aleksey.tsoi.v@gmail.com

TRAVUSH V.I., MARUFII A.T, TSOI A.V.

CALCULATION METHOD OF A WIDTH OF STRIPE OF SOAKED LOESSIAL SOIL IN DEEP LEVELS OF MASSIVE WHICH LEADS TO THE START OF THEIR COLLAPSIBLE DEFORMATIONS

The article proposes calculation method for determining a width of horizontal strip of soaked collapsible soil in deep levels of soil massive after which the collapsible deformation begins to appear.

Soaking of soil leads to two mechanical processes - releasing of vertical pressure in soils inside the stripe and forming of released arch in soil massive above the stripe by arching over it. Calculation method of decrease in vertical pressure in the soil before soaking is defined by special lab methodology during conducting of engineer and geological research of construction field. A height of formed over the stripe arch is calculated by formula of Protodiyakonova M.M.

Joint comparative analysis of the formula of remained vertical pressure in soaked soils and the formula of pressure on the stripe created by weight of soils inside the arch allows to define the formula of a width of the stripe under which collapsible deformations of soaked soils will occur.

Key words: *the loessial collapsible soil, the soaked soil strip, the collapsible deformations, the stress relaxation, the arching in soils.*

REFERENCES

1. Abelev, YU.M. Osnovy proyektirovaniya i stroitel'stva na prosadochnykh makroporistykh gruntakh / YU.M.Abelev, M.YU. Abelev. - M.: Gosstroyizdat, 1968. - 430 s.
2. Krutov, V.I. Osnovaniya i fundamenty na prosadochnykh gruntakh./ V.I.Krutov. - Kiyev: Izd-vo "Budivelnik", 1982. - 222 s.
3. Ter – Martirosyan Z.G. Mekhanika gruntov: Uchebnoye posobiye./ Z.G. Ter – Martirosyan. – M.: Izd-vo ASV, 2005. – 488s.
4. Travush V.I. Vliyaniye lokal'nogo uvlazhneniya lessovykh gruntov na pereraspredeleniye reaktivnykh otporov pod fundamentami / V.I.Travush, A.V.Tsoy, A.T. Marufiy // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. – 2016. №2. S.2-4.
5. Abelev, M.YU. Metody stroitel'stva promyshlennykh i grazhdanskikh zdaniy na slabykh vodonasyschennykh gruntakh. / M.YU. Abelev. - M.: Stroyizdat, 1983. – 248 s.
6. Trufanov A.N. Metod relaksatsii napryazheniy. // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. - 2012. № 5. S. 7-11.
7. Denisov, N.YA .Stroitel'nyye svoystva lessa i lessovidnykh suglinkov. / N.YA.Denisov. - M.: Gostroyizdat, 1953. - 154 s.
8. Mustafayev, A.A. Osnovy mekhaniki prosadochnykh gruntov./A.A.Mustafayev.-M.: Stroyizdat, 1978.- 262 s.
9. SP 120.13330.2012. Svod pravil. Metropoliteny. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 32-02-2003

Travush V.I.

Academician of RAASN (Moscow)
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: travush@mail.ru

Marufiy A.T.

Osh Technological University, Osh, Kyrgyz Republic
Doctor of Technical Sciences, Professor
E-mail: oshtu-marufi@rambler.ru

Tsoi A.V.

Osh Technological University, Osh, Kyrgyz Republic
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
E-mail: aleksey.tsoi.v@gmail.com

УДК 694.143, 69.07

ТУРКОВСКИЙ С.Б., ПОГОРЕЛЬЦЕВ А.А., СТОЯНОВ В.О.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК С НАКЛОННО-ВКЛЕННЫМИ СВЯЗЯМИ СДВИГА ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ

В области проектирования деревянных конструкций частой является задача расчета и конструирования составных элементов. Данная потребность возникает как при реконструкции существующих зданий и сооружений, так и при проектировании новых. Часто применение традиционных стальных арматурных стержней в качестве связей сдвига является недопустимым, либо нежелательным из-за риска коррозии. В статье приводятся результаты численных и экспериментальных исследований составных балок с наклонно-вклеенными связями сдвига из стеклопластиковой арматуры. В ходе исследований проводился сравнительный анализ работы цельного и составного элементов, определялась эффективность работы полимерной композитной арматуры, ее влияние на жесткость конструкции.

Ключевые слова: древесина, трещина, связи сдвига, стеклопластиковая арматура, составная балка

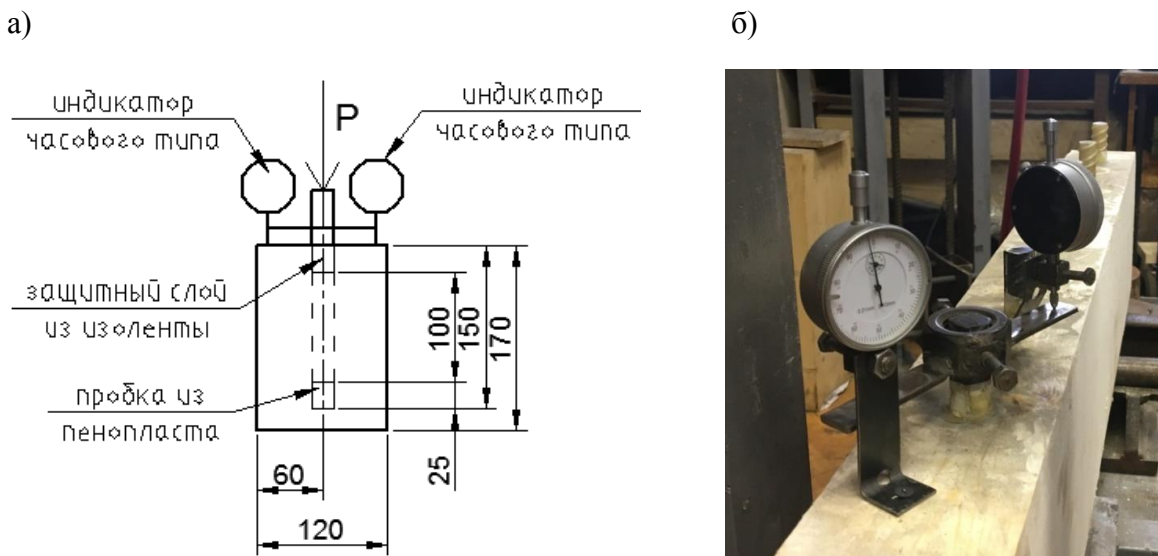
Актуальной задачей в области проектирования деревянных конструкций является расчет и конструирование балок составного сечения. При разработке проектов реконструкции здания такая задача возникает в случае необходимости устранения продольных трещин либо развития поперечного сечения имеющейся балки для существенного повышения ее прочности и снижения деформативности. В проектировании новых сооружений потребность в балках составного сечения может возникнуть при необходимости изготовления конструкций с сложным поперечным сечением, например, двутавровых балок, а также из-за особенностей технологического процесса завода-изготовителя деревянных конструкций, т.к. многие предприятия имеют ограничения по высоте сечения производимой балки (бруса).

Применение наклонно вклеенной металлической арматуры периодического профиля в качестве связей сдвига, разработанное в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, стало традиционным и зарекомендовало себя, как надежный способ сплавивания, который способен придавать составной балке прочность и деформативность, равноценную цельной конструкции таких же размеров [1,2]. В последнее время аналогичные варианты усиления применяются и за рубежом [12]. Однако у стальной арматуры есть ряд недостатков, главным из которых является коррозия в химически агрессивной среде, что накладывает ограничения в некоторых областях применения деревянных конструкций. Как известно, древесина является достаточно устойчивым материалом к воздействию химически агрессивных сред, что обуславливает ее применение в сооружениях для хранения минеральных удобрений, солей, различных руд. Наличие агрессивной среды и повышенной влажности делает приоритетным использование древесины в аквапарках, бассейнах, сооружениях на морском побережье. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что при нарушении клеевого шва в зоне контакта составных элементов, вклеенный металлический стержень будет подвергнут воздействию агрессивной внешней среды. В условиях эксплуатации деревянных конструкций, такой дефект может вызвать коррозию металла и как следствие, разрушение связи сдвига.

Для обеспечения коррозионной стойкости связей сдвига в условиях агрессивных сред целесообразным является применение арматуры периодического профиля из полимерных композитов. Наиболее экономичным вариантом для использования является стеклопластиковая арматура (АСК), выполненная по ГОСТ 31938-2012 [3], которая по пределу прочности не уступает стальной арматуре.

Равнопрочность клеевого шва в случае замены стальной арматуры на АСК проверялась серией испытаний на продавливание вклеенных стержней в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56710-2015 [4]. В три деревянных образца размерами 120×170×1000 мм было

вклеено по шесть стержней диаметром 20мм, три из которых – стальные, а три стеклопластиковые. Согласно пункту 8.34 СП 64.13330.2017 стержни, вклеенные под углом 20° и более к волокнам древесины, рассматриваются как вклеенные под углом, расчетное сопротивление древесины R^A выдергиванию или продавливанию для данных стержней остается постоянным вне зависимости от угла вклеивания [6]. Поэтому стержни были вклеены только поперек волокон в отверстия глубиной 150мм и диаметром 24мм. Моделирование работы стержня в массиве конструкции достигалось путем установки на дно стержня пробки из пенопласта высотой 25мм, а верхняя часть исключалась из работы путем устройства на стержне изолирующей прокладки. Это позволило обеспечить расчетную длину вклеивания 100мм или $5d$, при которых распределение касательных напряжений в клеевом шве по длине стержня близко к равномерному. На выпусках стержня было установлено по два индикатора часового типа ИЧ-10 (рисунок 1) [5].



а – схема испытания; б – общий вид испытания
Рисунок 1 – Испытание вклеенных стержней на продавливание

Нагрузка на стержни прикладывалась ступенями по 3кН до разрушения, которое во всех случаях происходило по границе клей-древесина из-за среза и скалывания древесины поперек волокон. Средняя нагрузка, при которой разрушались образцы со стальной арматурой составила ~62 кН, а со стеклопластиковой ~80 кН. Проведенные испытания свидетельствуют о том, что прочностные и деформационные свойства арматурных стержней из стеклопластика не уступают показателям стальной арматуры и их допускается использовать в качестве наклонно вклеенных связей при ремонте и усилении деревянных балок [5].

С целью проверки работы АСК в качестве связей сдвига в составных деревянных балках в Лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко было проведено испытание такой конструкции.

В качестве опытного образца была выбрана балка из клееной древесины размерами 100×350×3500мм. Нагрузка прикладывалась в виде двух сосредоточенных в третях пролета сил. В ходе эксперимента индикаторами часового типа ИЧ-50 и ИЧ-10 измерялись прогибы балки в середине пролета и деформации сдвига в шве сплачивания на торцах конструкции соответственно, относительные деформации древесины измерялись при помощи тензометрических датчиков, наклеенных в середине пролета конструкции. Схема испытания и общий вид установки приведены на рисунке 2 и 3 соответственно.

Испытания проводились в соответствии с методикой испытания деревянных конструкций [7,8]. Для того чтобы наиболее точно оценить эффективность работы наклонно вклеенных стержней из стеклопластика в качестве связей сдвига балка испытывалась в три этапа.

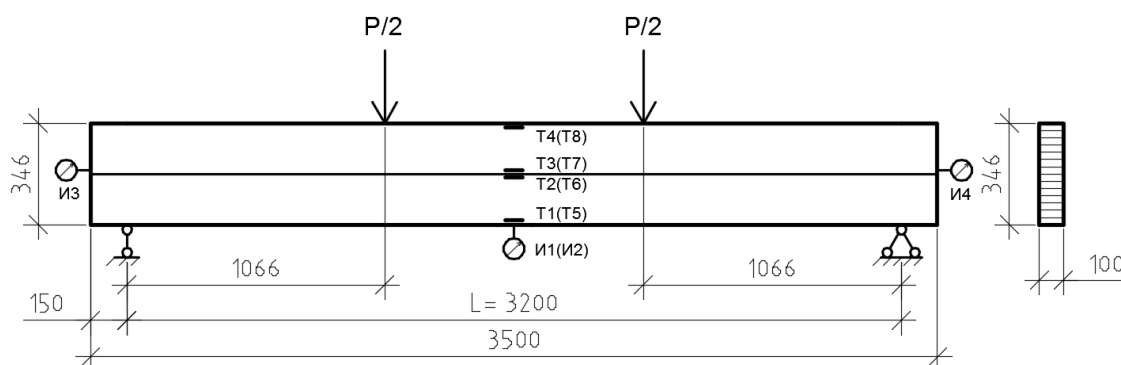


Рисунок 2 – Общая схема проведения испытаний



Рисунок 3 – Общий вид испытательной установки

Первый этап заключался в оценке деформативности цельной балки в пределах упругой работы и образец до разрушения не доводился. Конструкция нагружалась до нагрузки 40кН ступенями по 5кН, что составляло 0,1 от расчетной нагрузки (50,0 кН), на каждой ступени загрузки снимались показания приборов.

По завершению первого этапа опытная балка была распилена вдоль по всей длине на два равных элемента, таким образом, моделировалась сквозная продольная трещина в конструкции, размеры элементов составили 100×173×3500 мм. Задачей второго этапа испытаний ставилось исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) составной балки без связей. На каждый из элементов в зоне контакта была уложена полиэтиленовая пленка, а зона контакта была обработана антифрикционной смазкой, что позволило минимизировать влияние сил трения на работу конструкции.

При отсутствии связей в составной конструкции, каждая ее составляющая работает, как отдельный элемент, что приводит к снижению прочности конструкции. В данной схеме испытания, из-за продольного разреза в середине сечения конструкции, расчетная прочность балки снижалась в два раза, а жёсткость в 4 раза. Максимальная нагрузка, прикладываемая на балку, в ходе второго этапа составила 20кН, ступень нагружения – 2кН. Во время испытания отмечены значительные сдвиговые деформации на торце конструкции, порядка 3,5мм (рисунок 4).

После второго этапа эксперимента в балку были установлены наклонно клеенные связи сдвига. Деревянные элементы были стянуты струбцинами, для предотвращения смещения элементов друг относительно друга, и при помощи кондуктора под углом 45° в них были просверлены отверстия Ø25мм, после чего клеены стеклопластиковые стержни периодического профиля Ø20мм. Определение схемы расстановки и количества стержней, так же, как и работы по клеиванию производились согласно разработанной методике в соответствии с требованиями обновленного СП 64.13330.2017 «СНиП II-25-80 Деревянные конструкции» [4,6]. Несущая способность одного стержня определялась по формуле 1. Схема расстановки стержней в конструкции приведена на рисунке 5 и соответствует рекомендациям [9].



Рисунок 4 – Сдвиговые деформации на торце конструкции

$$T = R^A \pi d_1 l_p k_d k_c k_\sigma m_{дл} \prod m_i \cos \alpha \quad (1)$$

где R^A – нормативное сопротивление древесины выдергиванию либо продавливанию стержня, МПа;

d_1 – диаметр отверстия, м;

l_p – расчетная длина стержня в элементе, м;

k_d – коэффициент зависимости расчетного сопротивления от диаметра;

k_c – коэффициент неравномерности распределения напряжений сдвига;

k_σ – коэффициент зависящий от знака нормальных напряжений в зоне установки стержня;

$m_{дл}$ – коэффициент длительной прочности;

$\prod m_i$ – произведение коэффициентов условий работы;

α – угол наклона стержня.

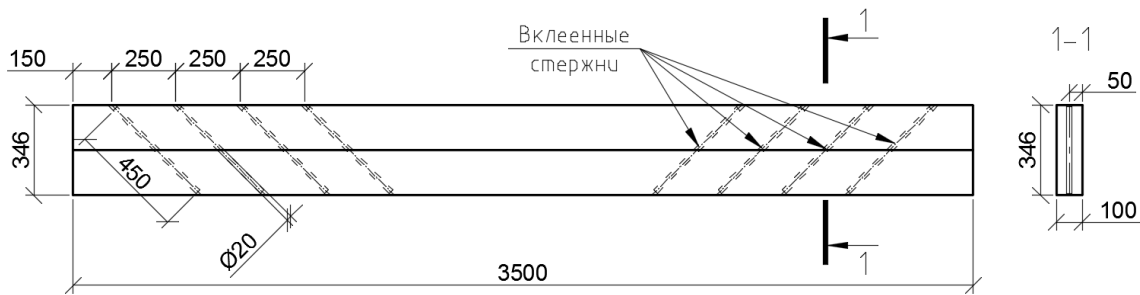


Рисунок 5 – Схема расположения вклеенных стержней в конструкции

На третьем этапе балка нагружалась ступенями по 10кН с целью доведения образца до разрушения. Расчетная нагрузка составляла 46,3 кН, разрушение балки наступило при нагрузке 101 кН в результате разрыва растянутых волокон древесины нижнего элемента, после чего последовало разрушение верхнего (рисунок 6). Клеевое соединение стержня с древесиной осталось без повреждений (рисунок 7).



Рисунок 6 – Разрушение образца из-за разрыва волокон древесины



Рисунок 7 – Клеевое соединение стержня и древесины после испытаний

По результатам испытаний построены графики зависимости прогибов от нагрузки на разных этапах эксперимента (рисунок 8). В составной балке без связей прогибы выше чем в цельной в 3,5 раза при одинаковых нагрузках. После установки связей прогибы в составной на 22% превышают прогибы в цельной, при теоретическом превышении 18 %. Сдвиговые деформации на торцах конструкции уменьшились более чем в 20 раз, график приведен на рисунке 9.

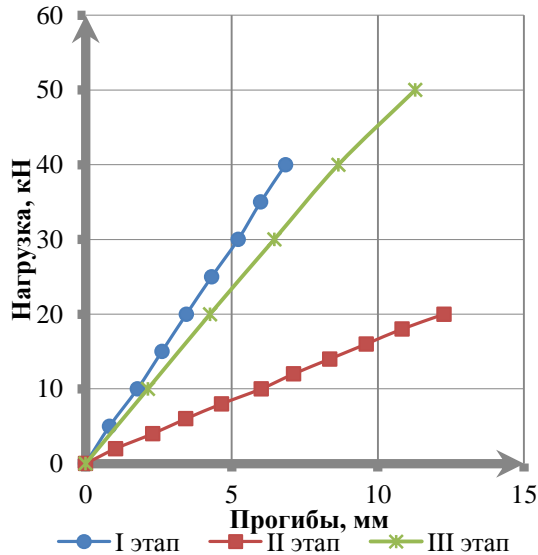


Рисунок 8 – Зависимость прогибов балки от прикладываемой нагрузки

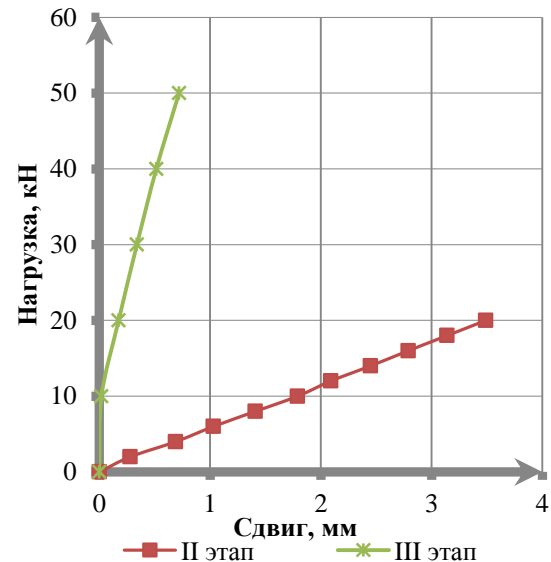


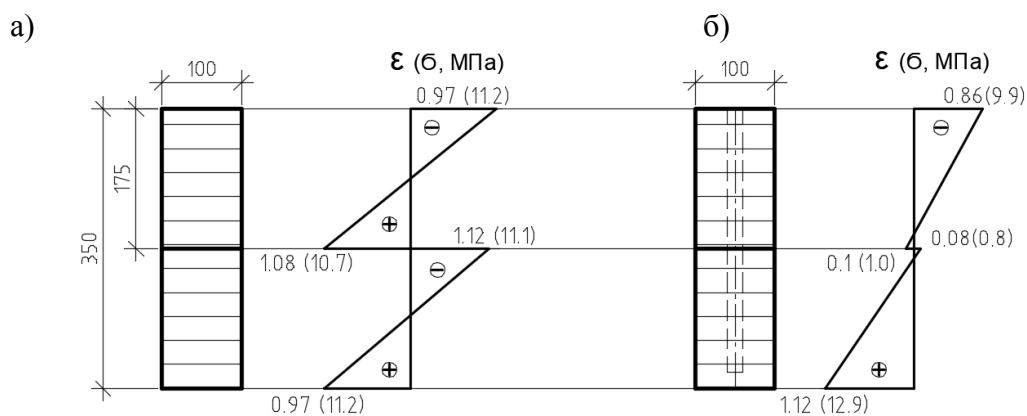
Рисунок 9 – Зависимость сдвиговых деформаций на торцах балки от прикладываемой нагрузки

По завершению основных этапов испытаний из опытной балки были выбраны стандартные образцы для определения модулей упругости древесины ламелей при изгибе согласно ГОСТ 16483.9-73 [10]. В ходе испытаний установлено, что модули упругости двух крайних ламелей в растянутой и сжатой зонах балки соответствуют показателям древесины I сорта ($E = 11,5$ ГПа), средние слои II-III сорта ($E = 9,9$ ГПа).

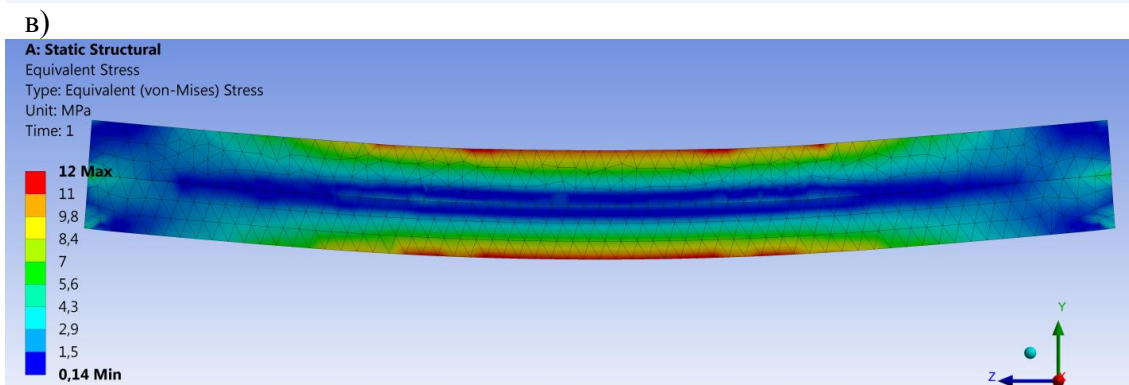
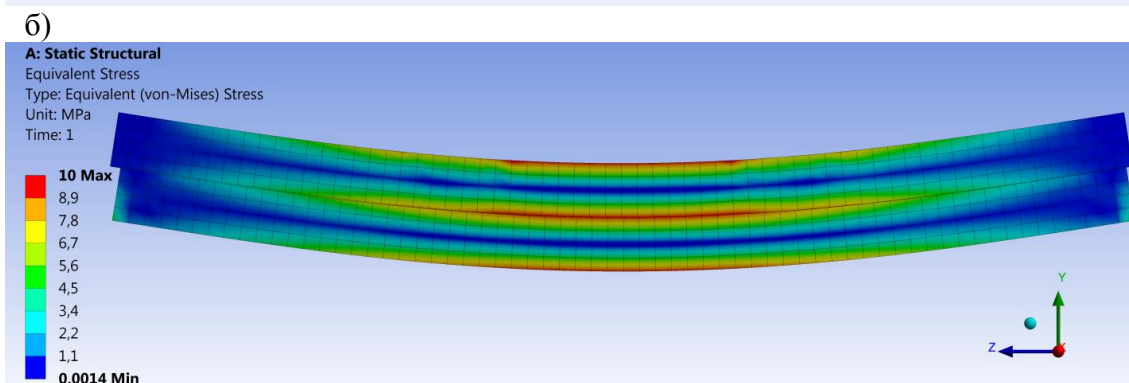
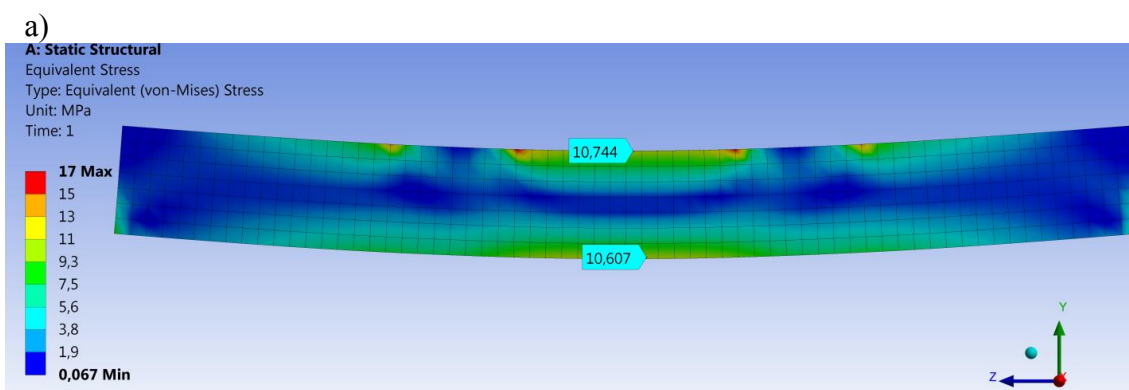
После обработки данных тензометрии были построены эпюры относительных деформаций и нормальных напряжений в зоне чистого изгиба балки без связей сдвига при нагрузке 20 кН (рисунок 10а) и со связями сдвига при нагрузке 40 кН (рисунок 10б). Как видно на рисунке 10б, в зоне нейтральной линии, нормальные напряжения приближены к нулевым значениям, что свидетельствует о работе конструкции, как цельного элемента.

Вместе с экспериментальными исследованиями составных деревянных элементов были также проведены и численные исследования конструкции в программном комплексе «Ansys». Геометрические размеры конструкции, схема нагружения и этапы численных исследований повторяют принятые при экспериментальных исследованиях. аналогичны экспериментальным. По результатам расчета получены изополя эквивалентных нормальных напряжений в конструкции для каждого из трех этапов исследования [11]. Эквивалентные нормальные напряжения позволяют определить местоположение нейтральной линии в конструкции. Как видно на рисунке 11б, в составной балке без связей элементы работают, как две отдельные балки, нейтральная линия проходит в середине каждого из элементов. После установки стержней из стеклопластика (рисунок 11в) балка начинает работать как цельная (рисунок 11а) – нейтральная линия смещается в середину сечения.

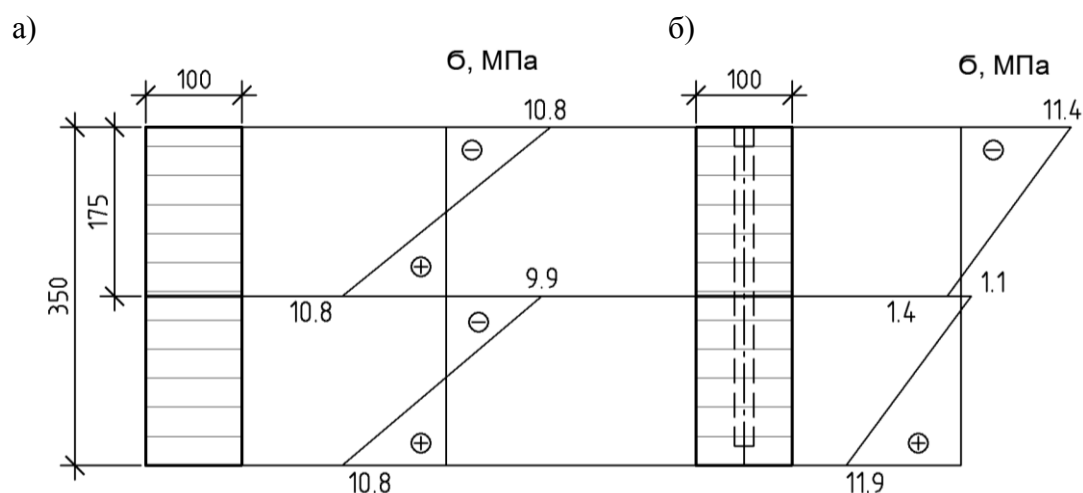
По результатам обработки данных расчета были также построены эпюры нормальных напряжений в зоне чистого изгиба для составной балки без связей при нагрузке 20кН (рисунок 12а) и балки со связями при нагрузке 40 кН (рисунок 12б).



а – в элементе без связей (нагрузка 20кН); б – в элементе со связями (нагрузка 40 кН)
 Рисунок 10 – Эпюры относительных деформаций и нормальных напряжений в образце по результатам эксперимента



а – I этап, нагрузка 40кН; б – II этап, нагрузка 20кН; в – III этап, нагрузка 40 кН
 Рисунок 11 – Изополя эквивалентных напряжений в балке по результатам численных исследований на различных этапах эксперимента



а – в элементе без связей (нагрузка 20кН); б – в элементе со связями (нагрузка 40 кН)
 Рисунок 12 – Эпюры нормальных напряжений в образце по результатам расчета

В дальнейших исследованиях составных балок на наклонных связях из полимерной арматуры одним из приоритетных направлений является определение коэффициента $k_{ж}$ при расчётах по второй группе предельных состояний, для корректного определения прогибов.

Анализируя полученные результаты исследований, можно сделать ряд выводов:

а) наклонно вклеенные стержни из стеклопластика эффективно включаются в работу в составных деревянных элементах;

б) деформативность составной балки со связями снижается более чем в 3 раза, по сравнению с балкой без связей и незначительно превышает деформативность цельной балки;

в) податливость наклонно вклеенных связей сдвига в составных элементах при расчете конструкции по второй группе предельных состояний необходимо учитывать коэффициентом $k_{ж}$.

Наклонно вклеенные стержни допускается применять для поперечного армирования приопорных зон балок в качестве аварийных связей. В случае возникновения продольных торцевых трещин, а так же трещин в зоне максимальных касательных напряжений, стеклопластиковые стержни будут эффективно включаться в работу, воспринимая сдвигающие усилия, тем самым сохраняя несущую способность либо предотвращая хрупкое разрушение конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громацкий В.А., Зотова И.М., Турковский С.Б. Составные клееные деревянные элементы с наклонно вклеенными металлическими связями. «Экспресс-информация. Строительство и архитектура». - М.:ВНИИС, 1983. Сер. 11, вып. 10.
2. Погорельцев А.А. Конструкции составного сечения и их изготовление //Совершенствование технологии изготовления деревянных конструкций. Сборник научных трудов / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. - М., 1991.
3. ГОСТ 31938-2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия
4. ГОСТ Р 56710-2015 Соединения на вклеенных стержнях для деревянных конструкций. Технические условия, Москва, 2016. –6с.
5. Погорельцев А.А. Усиление деревянных балок с трещинами наклонным армированием стеклопластиковой арматурой / А.А. Погорельцев, В.О. Стоянов // Строительная механика и расчет сооружений, 2018. №1(276). С. 60-65.
6. СП 64.13330.2017 «СНИП II-25-80 Деревянные конструкции», Москва, 2017. – 97с.
7. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций, ЦНИИСК, Москва Стройиздат, 1976
8. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций, ЦНИИСК, Москва Стройиздат, 1981

9. Погорельцев А.А. Практический метод усиления клеёных деревянных балок с трещинами наклонным армированием // Сборник научных трудов/Одесская государственная академия строительства и архитектуры. Современные строительные конструкции из металла и древесины, ч. 1. -2007. – С. 170 – 172.
10. ГОСТ 16483.9-73 Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе.
11. Огородникова О.М. Конструкционный анализ в среде Ansys, учебное пособие//ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ», Екатеринбург 2004
12. Shopski M. Glued-in steel rods subjected to combined axial and lateral loading/ Annual of the University of the architecture, civil engineering and geodesy Sofia, Volume 50, Issue 1, 2017

Турковский Станислав Борисович

Центральный научно-исследовательский институт им. В.А. Кучеренко, г. Москва
Доктор технических наук, заведующий сектором Лаборатории деревянных конструкций
Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 1
Тел.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: tsniiskldk@yandex.ru

Погорельцев Александр Алексеевич

Центральный научно-исследовательский институт им. В.А. Кучеренко, г. Москва
Кандидат технических наук, руководитель Лаборатории деревянных конструкций
Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 1
Тел.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: pogara@yandex.ru

Стоянов Владимир Олегович

Центральный научно-исследовательский институт им. В.А. Кучеренко, г. Москва
Магистр, аспирант Лаборатории деревянных конструкций
Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 1
Тел.: 8 (968) 943-23-53
E-mail: vovik1992@gmail.com

TURKOVSKY S.B., POGORELTSEV A.A., STOYANOV V.O.

**STUDY OF COMPOSITE WOODEN BEAMS WITH TILT-INCLUDED
RELATIONSHIP BONDS FROM FIBERGLASS FITTINGS**

In designing of wooden structures, the problem of calculating and constructing composite elements is frequent. This need arises both in the reconstruction of existing buildings and structures, and in the design of new ones. However, often the use of traditional steel rods as shear bonds is unacceptable or undesirable due to the risk of corrosion. The article presents the results of numerical and experimental studies of a composite beam with glued-in shear links of fiberglass reinforcement. In the course of the research, a comparative analysis of the operation of the integral element and the composite one is carried out, the efficiency of the polymer composite reinforcement and its effect on the rigidity of the structure is determined.

Key words: timber, crack, shear bonds, GRP, composite beam

REFERENCES

1. Gromatskiy V.A., Zotova I.M., Turkovskiy S.B. Sostavnyye kleynyye derevyannyye elementy s naklonno vkleyennymi metallicheskimi svyazyami. «Ekspress-informatsiya. Stroitel'stvo i arkhitektura». - M.:VNIIS, 1983. Ser. 11, vyp.10.
2. Pogorel'tsev A.A. Konstruktsii sostavnogo secheniya i ikh izgotovleniye //Sovershenstvovaniye tekhnologii izgotovleniya derevyannykh konstruktsiy. Sbornik nauchnykh trudov / TSNIISK im. V.A. Kucherenko. - M., 1991.
3. GOST 31938-2012 Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstruktsiy. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya
4. GOST R 56710-2015 Soyedineniya na vkleyennykh sterzhnyakh dlya derevyannykh konstruktsiy. Tekhnicheskiye usloviya, Moskva, 2016. –6s.

5. Pogorel'tsev A.A. Usileniye derevyannykh balok s treshchinami naklonnym armirovaniyem stekloplastiko-voy armaturoy / A.A. Pogorel'tsev, V.O. Stoyanov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 2018. №1(276). S. 60-65.
6. SP 64.13330.2017 «SNIP II-25-80 Derevyannyye konstruksii», Moskva, 2017. – 97s.
7. Rekomendatsii po ispytaniyu derevyannykh konstruksiy, TSNIISK, Moskva Stroyizdat, 1976
8. Rekomendatsii po ispytaniyu soyedineniy derevyannykh konstruksiy, TSNIISK, Moskva Stroyizdat, 1981
9. Pogorel'tsev A.A. Prakticheskiy metod usileniya kleyonykh derevyannykh balok s treshchinami naklonnym armirovaniyem // Sbornik nauchnykh trudov/Odesskaya gosudarstvennaya akademiya stroitel'stva i arkhitektury. Sovremennyye stroitel'nyye konstruksii iz metalla i drevesiny, ch. 1. -2007. – S. 170 – 172.
10. GOST 16483.9-73 Drevesina. Metody opredeleniya modulya uprugosti pri staticheskom izgibe.
11. Ogorodnikova O.M. Konstruksionnyy analiz v srede Ansys, uchebnoye posobiye//GOU VPO «Ural'skiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet - UPI», Yekaterinburg 2004
12. Shopski M. Glued-in steel rods subjected to combined axial and lateral loading/ Annual of the University of the architecture, civil engineering and geodesy Sofia, Volume 50, Issue 1, 2017

Turkovskii S.B.

JSC «Research center «Construction» (TSNIISK named after V.A. Kucherenko), Moscow, Russia
Doctor of technical Sciences, chief manager of the Sector in the Laboratory of wooden structures
Address: 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str. 6, b.1
Tel.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: tsniiskldk@yandex.ru

Pogoreltsev A.A.

JSC «Research center «Construction» (TSNIISK named after V.A. Kucherenko), Moscow, Russia
Candidate of technical Sciences, chief manager of the Laboratory of wooden structures
Address: 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str. 6, b.1
Tel.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: pogara@yandex.ru

Stoianov V.O.

JSC «Research center «Construction» (TSNIISK named after V.A. Kucherenko), Moscow, Russia
Master, postgraduate student in the Laboratory of wooden structures
Address: 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str. 6, b.1
Tel.: 8 (968) 943-23-53
E-mail: vovik1992@gmail.com

УДК 624.046.5

УТКИН В.С., СОЛОВЬЕВ С.А.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА ПО КРИТЕРИЮ ОСАДКИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИЯ С ВОЗРАСТАНИЕМ НАГРУЗКИ

В статье рассмотрены методы расчета надежности грунтового основания по критерию деформации (осадки) основания до реконструкции сооружения на стадии эксплуатации и после реконструкции при дополнительном значении деформации грунтового основания фундамента, устанавливаемого нормами (СП 22.13330.2011). Методы расчетов надежности грунтовых оснований фундаментов по критерию осадки основываются на теории возможностей (при крайне малом объеме статистической информации о контролируемых параметрах), а также на комбинированном (возможностно-вероятностном) методе расчета надежности при большем объеме статистической информации. Приведены примеры расчетов надежности при ограниченной статистической информации о контролируемых параметрах в математической модели предельного состояния. Статью можно рассматривать как руководство для выяснения возможности проектирования реконструкции сооружения при увеличении нагрузки на основание фундамента.

Ключевые слова: грунтовое основание, фундамент, реконструкция, осадка основания, усиление основания, ограниченная информация, теория возможностей

Примером реконструкции сооружения с возрастанием нагрузки может служить надстройка этажа или мансарды, замена технологического оборудования более тяжелым и т.д. Для принятия решения на проектирование реконструкции сооружения, предварительно рассчитывается надежность несущих элементов, в том числе оснований фундаментов, по критериям деформаций и несущей способности грунта существующего основания в соответствии с требованиями СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» (в дальнейшем СП). По результатам этих расчетов принимается решение о возможности реконструкции без усиления или с усилением основания фундамента. Метод расчета надежности основания по критерию несущей способности был рассмотрен в работе [1].

Предлагается рассмотреть расчет надежности основания фундамента при реконструкции сооружений (зданий) при возрастании на него нагрузки по критерию деформации в свете требований СП. Для принятия решения на проектирование реконструкции сооружения необходима информация о надежности основания фундамента по обоим критериям работоспособности основания, которая определяется [2] по теореме произведения вероятностей $P = P_1 \cdot P_2$ безотказной работы основания как условной последовательной механической системы в понятиях теории надежности, состоящей из двух условных элементов (деформации P_1 и несущей способности P_2). С учетом требований СП расчет надежности основания фундамента по деформациям при реконструкции следует проводить по условию (вероятности P_1) реализации события, представленного выражением (1) с учетом изменчивости контролируемых параметров, отмеченных в (1) волнистой линией над буквами:

$$\tilde{S} + S_{ad} \leq S_u + S_{ad,u}, \quad (1)$$

где \tilde{S} - деформация (осадка) основания фундамента до реконструкции сооружения;

S_{ad} - дополнительная осадка основания после реконструкции, если она сопровождается увеличением внешней нагрузки;

S_u - предельное значение деформации до реконструкции;

$S_{ad,u}$ - предельное значение дополнительной деформации (осадки) после реконструкции, значения которых приведены в СП, табл. Д.1 и Ж.1 и которые являются детерминированными величинами.

Примеры расчетов надежности оснований фундамента до реконструкции сооружения были рассмотрены в работах авторов [3-5], а также в работах зарубежных исследователей [6-9].

Рассмотрим расчет надежности основания фундамента по условию (1). При глубине котлована $H = H_c + d_n \leq 5M$ по СП:

$$\tilde{S} = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\tilde{\sigma}_{zp,i} - \tilde{\sigma}_{zy,i})}{\tilde{E}_i} h_i, \quad (2)$$

Параметры в (2) приведены на рис. 1.

Для расчета надежности основания фундамента используем расчетную схему основания в виде линейно-деформируемого полупространства, представленного на рис. 1.

Под надежностью будем понимать по терминологии ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» «способность строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации». В качестве показателя надежности по приведенному стандарту принята вероятность не превышения в объекте предельных состояний.

В данной работе для определения осадки основания при $H \leq 5M$ ограничимся условием (2). Эту же формулу расчета осадки основания используем при воздействии на основание фундамента дополнительной внешней нагрузки при реконструкции сооружения, которая приводит к увеличению напряжения до значения $\tilde{\sigma}_{zp,i} + \sigma_{z,ad,i}$, где $\tilde{\sigma}_{zp,i}$ - вертикальное напряжение в i -том слое грунта на расстоянии z от подошвы фундамента, определяемое по СП измерениями давления p под подошвой фундамента, например, с помощью датчика давления [10], поэтому $\tilde{\sigma}_{zp,i} = \tilde{p}\alpha_i$ является контролируемой случайной величиной; значения α_i приведены в СП; $\sigma_{z,ad,i}$ - дополнительное напряжение от нагрузки при реконструкции сооружения, определяемое на стадии проектирования реконструкции сбором нагрузок и принимается детерминированной величиной, как результат сбора дополнительной нагрузки, приводящей к дополнительному давлению p_{ad} под подошвой фундамента. В этом случае по СП для i -того слоя грунтового основания имеем $\tilde{\sigma}_{zp,i} + \sigma_{z,ad,i} = \alpha_i \tilde{p} + \alpha_i p_{ad}$. В (2) $\tilde{\sigma}_{zy,i}$ - напряжение в i -том слое грунта от собственного веса, выбранного при отрывке котлована грунта. По СП $\tilde{\sigma}_{zy,i} = \alpha_i \tilde{\sigma}_{zg1,0}$, где $\tilde{\sigma}_{zg1,0}$ - напряжение от собственного веса грунта на отметке подошвы фундамента, которое измеряется датчиком давления [10] и является случайной величиной.

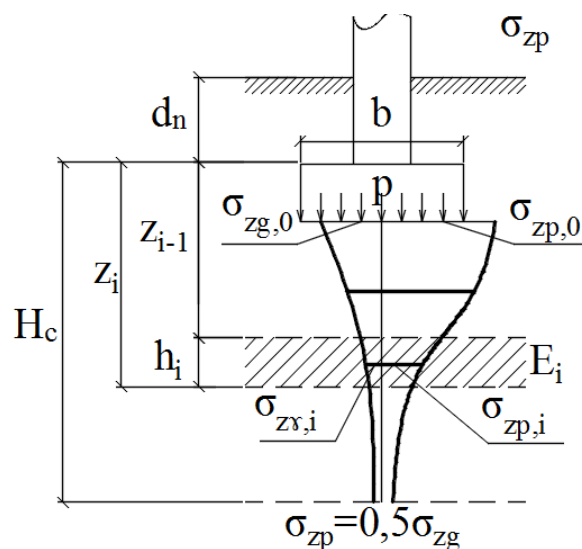


Рисунок 1 - Расчетная схема основания фундамента

Формулу (2) в условиях реконструкции сооружения представим в виде $\tilde{S} + S_{ad} = \beta \sum_{i=1}^n \frac{\tilde{\sigma}_{zp,i} + \sigma_{z,ad,i} - \tilde{\sigma}_{zy,i}}{E_i} h_i$, где по СП $\beta = 0,8$; n - число слоев грунта; h_i - высота i -того слоя грунта; E_i - модуль деформации грунта i -того слоя основания.

С учетом вышеописанных выражений деформаций и напряжений по СП условие (1) можно записать в виде:

$$\tilde{S} + S_{ad} = \beta(\tilde{p} + p_{ad} - \tilde{\sigma}_{zg,0}) \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i h_i}{\tilde{E}_i} \leq S_u + S_{ad,u}, \quad (3)$$

До реконструкции будем иметь:

$$\tilde{S} = \beta(\tilde{p} - \tilde{\sigma}_{zg,0}) \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i h_i}{\tilde{E}_i} \leq S_u, \quad (4)$$

Статистическая информация о \tilde{p} и $\tilde{\sigma}_{zg,0}$ как правило для индивидуального основания фундамента ограниченная, т.к. нельзя многократно нарушать грунт под подошвой фундамента при изменениях p и $\sigma_{zg,0}$, поэтому расчет надежности основания фундамента вероятностно-статистическим методом будет некорректным. В связи с этим описание случайных величин в (3) будем проводить методами теории возможностей [11] и называть нечеткими переменными. Модуль деформации E_i определяется испытаниями по ГОСТ 12248-2010 и также будет нечеткой переменной или, как принято по ГОСТ 20522-2012, модуль деформации грунта описывается нормальным (Гауссовским) законом распределения.

Для связи с [11] введем в (3) обозначения $\tilde{p} + p_{ad} = X$, $\tilde{\sigma}_{zg,0} = Y$, $\tilde{E} = Z$, $S_u + S_{ad,u} = S_{np}$ и (3) представим в виде:

$$(X - Y) \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i h_i}{Z_i \beta} \leq S_{np}, \quad (5)$$

При расчете надежности основания фундамента до реконструкции имеем: $X = \tilde{p}$, $S_{np} = S_u$.

Рассмотрим для сокращения текста статьи вариант расчета надежности основания фундамента из однородного грунта при $\tilde{E} = Z_E$ и при одинаковых значениях высоты слоев грунта $h_i = h$. В этом случае (5) представим в виде: $\frac{X - Y}{Z_E} \leq S_{np} (h \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta)$ или $\frac{X - Y}{Z_E} \leq K$, где

$K = S_{np} (h \beta \sum_{i=1}^n \alpha_i)$. Обозначим $K \cdot Z_E = Z$, которую примем нечеткой переменной и (5) примет вид:

$$X \leq Y + Z, \quad (6)$$

Для описания нечетких переменных X , Y и Z используем функцию распределения возможностей, получившую наибольшее применение в расчетах надежности [3, 4, 5 и др.], вида:

$$\pi_X(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где $a_x = 0,5(X_{\max} + X_{\min})$;

$$b_x = 0,5(X_{\max} - X_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}.$$

Значением α задаются $\alpha \in [0;1]$. Такими же функциями (7) будем описывать Y и Z с одинаковым значением α . На рис.2 представлен график функции (7). X_{\max}, X_{\min} - результаты измерений нечеткой переменной X ; x -значение из множества $\{X\}$.

Используем правило сложения [12] нечетких переменных $Y + Z$ в (6) с одинаковыми значениями α . В результате получим нечеткую переменную $T = Y + Z$ и функцию распределения возможностей $\pi_T(t)$ с параметрами $a_t = a_y + a_z$ и $b_t = b_y + b_z$. Форма $\pi_T(t)$ неизвестна, но она содержит a_t, b_t и T_{\max}, T_{\min} . На рис.3 изображена функция (7) и условно функция $\pi_T(t)$.

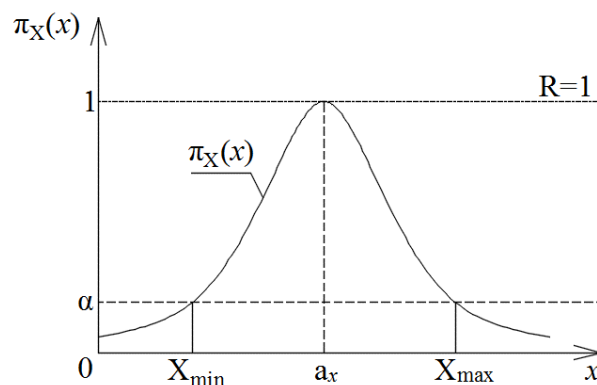


Рисунок 2 - Функция распределения возможностей $\pi_X(x)$ нечеткой переменной X

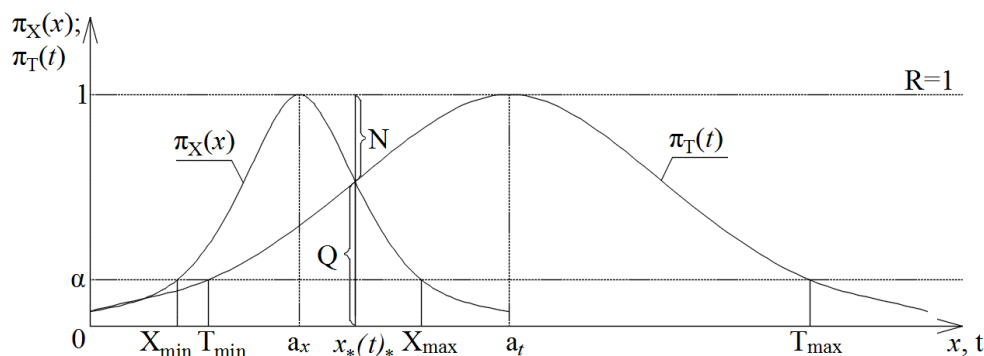


Рисунок 3 - Функция распределения возможностей $\pi_X(x)$ и $\pi_T(t)$,
 Q – возможность отказа, N – необходимость безотказной работы

Условие (6) представим в виде:

$$X \leq T, \tag{8}$$

По [3-5] при $a_x \leq a_t$ (см. рис. 3) возможность безотказной работы R основания фундамента принимается $R = 1$. Возможность отказа при этом (в понятиях теории надежности) Q , как показано на рис.3 находят из $\pi_X(x)$ или $\pi_T(t)$ при значениях аргументов x^* или t^* при соблюдении условия $a_x \leq x^* \leq a_t$. По теории возможностей для описания нечеткой переменной, в нашем случае для характеристики надежности, вводится еще одна мера-необходимость безотказной работы N , которая определяется из условия $N = 1 - Q$ (см. рис. 3). Таким образом, надежность основания фундамента по критерию осадки характеризуется интервалом $[N; R]$ или в вероятностных показателях $[\underline{P}; \bar{P}]$, где \underline{P}, \bar{P} - нижнее и верхнее значения вероятностей безотказной работы основания по деформациям. Истинное значение надежности (неизвестное) находится внутри интервала $[\underline{P}; \bar{P}]$. С учетом расчета надежности основания по де-

формациям и несущей способности возможным методом с интервалами надежности, общая надежность определяется интервалом $[N_{\min}; R_{\min}]$ по значениям $Q = Q_{\max}$ и $R = R_{\min}$.

Рассмотрим на примерах первоначальный расчет надежности основания фундамента до реконструкции на основании результатов измерений параметров в (4), а при выявлении достаточной его надежности рассмотрим расчет надежности основания фундамента после проектирования реконструкции сооружения.

Пример 1. Пусть, условно, в результате измерений известны следующие параметры грунтового основания до реконструкции: $X = \tilde{p} = \{0,2; 0,3; 0,4\}$ МПа; $Y = \tilde{\sigma}_{zg,0} = \{0,04; 0,05; 0,06\}$ МПа; $Z_E = \tilde{E} = \{8; 9; 10\}$ МПа; грунт однородный. $H = H_c + h_n = 4,8$ м; $S_u = 0,12$ м. Принимаем $h = 0,8$ м.

По СП $\sum_{i=1}^6 \alpha_i = 0,881 + 0,642 + 0,477 + 0,374 + 0,306 + 0,258 = 2,938$;
 $K = S_u / h\beta \sum_{i=1}^6 \alpha_i = 0,12 / 0,8 \cdot 0,8 \cdot 2,938 = 0,0638$;
 $Z = K \cdot Z_E = \{0,510; 0,574; 0,638\}$ МПа; уровень среза $\alpha = 0,2$. Найдем $a_x = 0,3$ МПа;
 $b_x = 0,079$ МПа; $a_y = 0,05$ МПа; $b_y = 79 \cdot 10^{-4}$ МПа; $a_z = 0,574$ МПа;
 $b_z = 0,0508$ МПа; $a_t = 0,624$ МПа; $b_t = 0,0587$ МПа.

Т.к. условие $a_x = 0,3$ МПа $<$ $a_t = 0,51$ МПа, то $R = 1$. Найдем x^* из уравнения $\left| \frac{x^* - 0,3}{0,079} \right| = \left| \frac{x^* - 0,624}{0,0508} \right|$. Отсюда $x^* = 0,495$ МПа. Условие $a_x \leq x^* \leq a_t$ выполняется.

Возможность отказа $Q = e^{-\left(\frac{0,495-0,3}{0,079}\right)^2} = e^{-2,467^2} = 0,00248$; необходимость безотказной работы $N = 1 - 0,00227 = 0,99773$.

Надежность основания фундамента характеризуется интервалом значений $[0,99773; 1]$. Если такая надежность основания фундамента (только по критерию деформации) позволяет без его усиления проектировать реконструкцию сооружения, то производим расчет надежности основания после реконструкции сооружения.

Если выявится, что нагрузка на основание по какой либо причине повысилась (до реконструкции сооружения) до значения $X = \tilde{p} = \{0,3; 0,4; 0,5\}$ МПа при $a_x = 0,4$ МПа; $b_x = 0,0788$ МПа; $x^* = 0,488$ МПа, то повысится возможность отказа до

$Q = e^{-\left(\frac{0,488-0,4}{0,0788}\right)^2} = e^{-1,117^2} = 0,2873$; $N = 1 - 0,2873 = 0,7127$. Надежность основания фундамента будет характеризоваться интервалом $[0,7127; 1]$, т.е. надежность значительно снизится. В этом случае принимается решение о необходимости усиления основания фундамента до реконструкции или проектирование реконструкции может оказаться нецелесообразным по экономическим соображениям.

Пример 2. Пусть, условно, по расчетам и измерениям известна дополнительная информация о значениях $S_{ad,u} = 0,03$ м (для многоэтажного кирпичного здания по СП), дополнительная нагрузка, полученная расчетом по способу сбора нагрузок (от надстройки) $P_{ad} = 0,02$ МПа. Расчет надежности проводим по математической модели (5). Значения X увеличатся на 0,05 МПа, тогда $a_x = 0,35$ МПа; $b_x = 0,071$ МПа; $S_u + S_{ad,u} = 12 + 3 = 15$ см;
 $K = 0,15 / 0,8 \cdot 0,8 \cdot 2,938 = 0,0798$; $a_z = 0,718$ МПа; $b_z = 0,0625$ МПа;
 $a_t = 0,718 + 0,05 = 0,768$ МПа; $b_t = 0,1135$ МПа.

Т.к. условие $a_x = 0,35 \text{ МПа} < a_t = 0,768 \text{ МПа}$, то $R = 1$. Найдем x^* из уравнения

$$\left| \frac{x^* - 0,35}{0,071} \right| = \left| \frac{x^* - 0,768}{0,1135} \right|. \text{ Отсюда } x^* = 0,51 \text{ МПа}. \text{ Условие } a_x \leq x^* \leq a_t \text{ выполняется.}$$

Возможность отказа основания фундамента по деформации

$$Q = e^{-\left(\frac{0,51-0,35}{0,071}\right)^2} = e^{-2,253^2} = 0,0062; \quad \text{необходимость безотказной работы}$$

$N = 1 - 0,0062 = 0,9938$, что достигнуто благодаря увеличению допустимой осадки основания фундамента до $S_u + S_{ad,u} = 15 \text{ см}$.

Надежность основания фундамента характеризуется интервалом значений $[0,9938; 1]$, т.е. после реконструкции (по первому варианту примера 1) надежность практически не изменилась благодаря допущению по СП дополнительной осадки основания $S_{ad,u} = 3 \text{ см}$. Отметим, что числовые значения приняты условно для демонстрации алгоритма расчетов надежности удобных для чтения. В действительности они существенно иные. Например, допустимая вероятность отказа основания по [13] $Q \leq 10^{-5}$.

Рассмотрим вариант расчета основания фундамента по условию (6), в котором $K \cdot Z_E = Z$ в соответствии с ГОСТ 20522-2012 изменяется по нормальному закону распределения вероятностей. В этом случае (6) запишем в виде $X - Y \leq Z$. По правилу вычитания нечетких переменных обозначим новую нечеткую переменную $X - Y = T$ и будем характеризовать T функцией распределения возможностей $\pi_T(t)$, где будем иметь по аналогии с (7) $a_t = a_x - a_y$; $b_t = b_x + b_y$. На рис.4 условно изображены функция $\pi_T(t)$ в виде верхней $\bar{F}_T(t) = \pi_T(t)$ при $t \leq a_t$ и нижней $\underline{F}_T(t) = 1 - \pi_T(t)$ функций распределения нечеткой переменной T , а также функция плотности вероятности случайной величины Z в виде:

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-m_z}{S_z}\right)^2}, \text{ где } m_z - \text{математическое ожидание; } S_z - \text{среднее квадратическое отклонение случайной величины } Z.$$

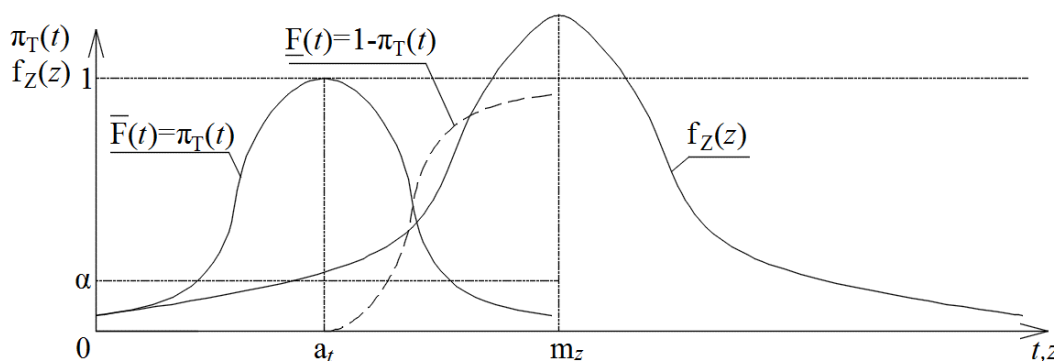


Рисунок 4 – Функция $\pi_T(t)$ и $f_Z(z)$. $\underline{F}(t), \bar{F}(t)$ – нижняя и верхняя функции распределения возможностей

Для рассматриваемого варианта расчета надежности основания по [3, 4, 12 и др.] расчет проводится (при обозначении $t = Z$) по формулам о значениях пределов интегрирования (см. рис.4):

$$\left. \begin{aligned} \underline{P} &= \int_0^{a_t} f_Z(z) \cdot 0 + \int_{a_t}^{\infty} f_Z(z) \cdot \pi_T(z) dz \\ \bar{P} &= \int_0^{a_t} f_Z(z) \cdot \pi_T(z) dz + \int_{a_t}^{\infty} f_Z(z) \cdot 1 dz \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

Подставляя выражения функции (7), но для нечеткой переменной T и функции $f_Z(z)$, получим расчетные формулы вероятностей \underline{P} и \bar{P} в развернутом виде:

$$\left. \begin{aligned} \underline{P} &= \int_{a_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-m_z}{S_z} \right)^2} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{z-a_t}{b_t} \right)^2} \right) dz \\ \bar{P} &= \int_0^{a_t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-m_z}{S_z} \right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{z-a_t}{b_t} \right)^2} dz + \int_{a_t}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot S_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z-m_z}{S_z} \right)^2} \cdot 1 dz \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

Пример 3. Пусть, условно, известны параметры (из примера 1) $a_t = a_x - a_y = 0,3 - 0,05 = 0,25$ МПа; $b_t = 0,0869$ МПа; $m_z = 0,574$ МПа; $S_z = 0,05$ МПа. По (10) найдем $\underline{P} = 0,9982$; $\bar{P} = 1$. Надежность основания фундамента характеризуется интервалом $[0,9982; 1]$. Аналогичное решение будет и по известным параметрам примера 2.

Выводы:

1. Сформулирована проблема для принятия решения о возможности реконструкции сооружения с дополнительной нагрузкой на грунтовое основание фундамента по показателю значения надежности основания до реконструкции на стадии эксплуатации сооружения и после его реконструкции.
2. Представлены методы расчета надежности грунтового основания фундамента по критерию осадки при дополнительной нагрузке на него при реконструкции сооружения для выявления возможности реконструкции сооружения без усиления или с усилением основания фундамента по показателю надежности основания при допущении по СП увеличения допустимой осадки.
3. Приведены примеры расчетов надежности грунтового основания в качестве алгоритмов расчетов надежности оснований фундаментов по осадке до и после реконструкции сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уткин, В.С. Расчет надежности грунтовых оснований зданий и сооружений при реконструкции / В.С. Уткин, С.А. Соловьев, А.А. Каберова // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. - 2016. - №3. - С. 100-109.
2. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций по надежности / М.: Стройиздат, 1978. 289с.
3. Уткин, В.С. Расчет основания фундамента, сложенного просадочными грунтами, по критерию деформации / В.С. Уткин, А.А. Каберова, С.А. Соловьев // Геотехника. - 2016. - №3. - С. 18-24.
4. Utkin, V.S. Reliability analysis of soil bases according to the deformation criterion / V.S. Utkin, A.A. Kaberova, S.A. Solovyev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - 2016. - Т. 12. - № 4. - С. 18-26.
5. Уткин, В.С. Расчет надежности грунтовых оснований фундаментов зданий и сооружений по критерию деформации при ограниченной информации о нагрузках и грунтах // Инженерно-строительный журнал, СПбГПУ. 2016. №1. С. 4-13.
6. Wang Y. LS-SVM and Monte Carlo methods based reliability analysis for settlement of soft clayey foundation / Wang Y., Zhao X., Wang B. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. - 2013. - Vol. 5. - No. 4. - Pp. 312-317.

7. Misra A. Reliability analysis of drilled shaft behavior using finite difference method and Monte Carlo simulation / Misra A., Roberts A.L., Levorson S.M. // Geotechnical and Geological Engineering. - 2007. - Vol. 25. - No. 1. - pp. 65–77.
8. Huh J. Realistic risk assessment of axially loaded pile soil system using a hybrid reliability method / Huh J., Haldar A., Kwak K. // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. - 2010. - Vol. 4. - No. 3. - Pp. 118.
9. Sato T. A Robust Control Approach for Decision Making and Reliability Design of Soil Structures. Geotechnical Predictions and Practice in Dealing with Geohazards / Sato T., Nagae T., Nishida H. // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. - 2013. - Vol 25. - Pp 337-352.
10. Тензо-М. Тензодатчики. Тензорезисторный извлекаемый датчик давления грунта ДДГЛ. Режим доступа: [URL <http://www.tenso-m.ru/pages/241/>]. Дата обращения: 26.08.2017.
11. Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике / Дюбуа Д., Прад А. - М.: Радио и связь, 1990. - 288 с.
12. Уткин В.С. Расчет надежности грунтовых оснований и фундаментов машин при ограниченной информации на стадии эксплуатации. Монография / В.С. Уткин, Л.В. Уткин. - Вологда: ВоГУ, 2013. - 124 с.
13. Козачек В.Г. Обследование и испытание зданий и сооружений: Учеб. пособие для вузов / Козачек В.Г., Нечаев Н.В., Нотенко С.Н., Римшин В.И., Ройтман А.Г.; под ред. В.И. Римшина. 3-е изд., стер. М.: Выс. шк., 2007. - 655 с.

Уткин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «ВоГУ», г. Вологда

профессор кафедры промышленного и гражданского строительства, д.т.н., заслуженный работник Высшей Школы РФ

E-mail: utkinvogtu@mail.ru

Соловьев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «ВоГУ», г. Вологда

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства

E-mail: ser6sol@yandex.ru

UTKIN V.S., SOLOVYEV S.A.

**SOIL BASE RELIABILITY ANALYSIS BY CRITERION
OF SETTLEMENT AT RECONSTRUCTION
OF THE STRUCTURE WITH LOAD INCREASE**

The article describes the methods of reliability analysis for the soil basis by criterion of deformation (settlement) of the foundation before the reconstruction of a structure at a stage of operation and after reconstruction with additional deformations of soil base by SP 22.13330.2011. Methods of reliability analysis of the soil bases by the settlement criterion is based on the possibility theory (in extremely small amount of statistical information on controlled parameters), and combined (possibility-probabilistic) method of reliability analysis with a larger amount of statistical information. Examples of reliability analysis in case of limited statistical information of controlled parameters in design mathematical model of limit state are given. Article can be considered as a manual for estimation of a possibility of reconstruction of a structure with increase in load on the soil base.

Keywords: soil base, reconstruction, soil settlement, soil base strengthening, limited information, theory of possibilities

REFERENCES

1. Utkin, V.S. Raschet nadezhnosti gruntovykh osnovaniy zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruktsii / V.S. Utkin, S.A. Solov'yev, A.A. Kaberova // Seysmicheskoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. - 2016. - №3. - S. 100-109.
2. Rzhnitsyn A.R. Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsiy po nadezhnosti / M.: Stroyizdat, 1978. 289s.
3. Utkin, V.S. Raschet osnovaniya fundamenta, slozhennogo prosadochnymi gruntami, po kriteriyu deformatsii / V.S. Utkin, A.A. Kaberova, S.A. Solov'yev // Geotekhnika. - 2016. - №3. - S. 18-24.

4. Utkin, V.S. Reliability analysis of soil bases according to the deformation criterion / V.S. Utkin, A.A. Kaberova, S.A. Solovyev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - 2016. - Т. 12. - № 4. - С. 18-26.
5. Utkin, V.S. Raschet nadezhnosti gruntovykh osnovaniy fundamentov zdaniy i sooruzheniy po kriteriyu deformatsii pri ogranichennoy informatsii o nagruzkakh i gruntakh // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal, SPbGPU. 2016. №1. S. 4-13.
6. Wang Y. LS-SVM and Monte Carlo methods based reliability analysis for settlement of soft clayey foundation / Wang Y., Zhao X., Wang B. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. - 2013. - Vol. 5. - No. 4. - Pp. 312-317.
7. Misra A. Reliability analysis of drilled shaft behavior using finite difference method and Monte Carlo simulation / Misra A., Roberts A.L., Levorson S.M. // Geotechnical and Geological Engineering. - 2007. - Vol. 25. - No. 1. - pp. 65-77.
8. Huh J. Realistic risk assessment of axially loaded pile soil system using a hybrid reliability method / Huh J., Haldar A., Kwak K. // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geo-hazards. - 2010. - Vol. 4. - No. 3. - Pp. 118.
9. Sato T. A Robust Control Approach for Decision Making and Reliability Design of Soil Structures. Geotechnical Predictions and Practice in Dealing with Geohazards / Sato T., Nagae T., Nishida H. // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. - 2013. - Vol 25. - Pp 337-352.
10. Tenzo-M. Tenzodatchiki. Tenzorezistornyy izvlekayemyy datchik davleniya grunta DDGL. Re-zhim dostupa: [URL <http://www.tenzo-m.ru/pages/241/>]. Data obrashcheniya: 26.08.2017.
11. Dyubua D. Teoriya vozmozhnostey. Prilozheniye k predstavleniyu znaniy v informatike / Dyubua D., Prad A. - M.: Radio i svyaz', 1990. - 288 s.
12. Utkin V.S. Raschet nadezhnosti gruntovykh osnovaniy i fundamentov mashin pri ogranichennoy informatsii na stadii ekspluatatsii. Monografiya / V.S. Utkin, L.V. Utkin. - Vologda: VoGTU, 2013. - 124 s.
13. Kozachek V.G. Obsledovaniye i ispytaniye zdaniy i sooruzheniy: Ucheb. posobiye dlya vuzov / Kozachek V.G., Nechayev N.V., Notenko S.N., Rimshin V.I., Roytman A.G.; pod red. V.I. Rimshina. 3-ye izd., ster. M.: Vys. shk., 2007. - 655 s.

Utkin V.S.

Vologda State University, Vologda

Doctor of technical science, professor of industrial and civil engineering department

E-mail: utkinvogtu@mail.ru

Solovyev S.A.

Vologda State University, Vologda

Post-graduate student of industrial and civil engineering department

E-mail: ser6sol@yandex.ru

УДК:711.4:712.4: 504.06

БАКАЕВА Н.В., ЧЕРНЯЕВА И.В.

ВОПРОСЫ ОЗЕЛЕНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ БИОСФЕРОСОВМЕСТИМОГО ГОРОДА

Раскрывается роль городских зеленых насаждений с позиции реализации функций биосферосовместимого города как одного из фундаментальных принципов создания благоприятной и комфортной городской среды. В статье анализируются основные проблемы, связанные с организацией зеленых зон в городской среде при реализации парных функций «Жизнеобеспечение» и «Связь с природой». Приводится градация систем озеленения в планировочной урбанизированной структуре на четырех градостроительных уровнях на примере г. Орла. Анализируются проблемы точечной застройки и предлагаются современные методы формирования зон экологического комфорта в городах с плотной застройкой. Результаты исследования могут служить основой для разработки предложений и рекомендаций по реконструкции городской застройки и реновации городской среды на основе симбиотических отношений биосферы и города и развития человека.

Ключевые слова: градостроительство, экологическая реконструкция, функции города, озеленение, мобильные системы озеленения

Введение

Современный город представляет собой сложный комплекс различных сооружений: дорог и площадей, зданий различной высотности и назначения, обслуживающих их коммуникаций, (тепловая сеть, водопровод, канализация, электро- и телефонная сеть и т. д.). Кроме того, это большие открытые пространства, занимаемые водоемами и зелеными насаждениями в условиях различного рельефа.

Для всех современных и непрерывно развивающихся городов, экологическая ситуация является предметом особого внимания. Она отражает уровень социально-экономического развития не только города, но и всей страны в целом. С ростом города, развитием его промышленности, инфраструктуры становится все более сложной проблема создания нормальных условий для жизнедеятельности человека. В последнее время отрицательное влияние антропогенного комплекса на окружающую среду усилилось. Проблема озеленения современных городов – одна из важнейших экологических градостроительных проблем.

Преодоление неблагоприятных тенденций и регрессионных процессов в жизнедеятельности городов, обеспечение развития человека и повышение человеческого потенциала, по мнению авторов [1], должно служить основной стратегической целью государственной политики градостроительства.

Российской академией архитектуры и строительных наук (РААСН) разработана концепция биосферной совместимости городов и поселений, основанная на симбиозе поселения и окружающей природной среды [2]. Один из принципов концепции биосферной совместимости отражает удовлетворение рациональных потребностей человека через выполнение городом определенных функций: жизнеобеспечение, развлечения и отдых, власть, милосердие, знания, творчество и связь с природой [3].

В последнее время, большое внимание стало уделяться роли благоустройства и озеленения городов, тем не менее, множество проблем жизнедеятельности остаются открытыми и требуют решения в комплексе мероприятий по планировке и застройке населенных мест.

Основная часть

В биосферосовместимом городе рациональные потребности населения реализуются через функции города: достойное жизнеобеспечение, рекреации, защита от произвола, страдание и милосердие, образование, творчество, связь с природой. Ранее в работах [2, 3 и др.] были выявлены попарные связи между функциями города. Так, функции «Жизнеобеспечение» и «Связь с природой» образуют взаимно увязанную пару. Природные условия обеспечивают базу, на которой строится жизнеобеспечение города. Плохо управляемый город в состоянии быстро уничтожить окружающую природную среду и посадить себя (город) на «голодный паек» природных ресурсов [2]. Помимо архитектурно-планировочной и эстетической роли, зеленые насаждения очищают воздух от выбросов газов транспорта и промышленных предприятий; снижают шум, улучшают микроклиматические условия, увеличивают влажность воздуха, уменьшают силу ветра, температуру воздуха летом и увеличивают ее зимой, выполняют санитарно-защитную роль [4], поддерживая, таким образом, жизнеобеспечение населения города. Кроме того, качество озеленения влияет на самочувствие и здоровье жителей города. В работах ученых [5, 6 и др.] показана взаимосвязь между снижением количества и качества зеленых насаждений и ухудшением здоровья населения города (наблюдается рост числа болезней органов дыхания, нервной системы и др.).

Современные тенденции в градостроительстве (рост и уплотнение застройки городского пространства) вытесняют места комфортного отдыха человека, тем самым пагубно сказываются на здоровье населения города (шум, пыль и агрессивная городская среда). Особенно это чувствуется в центральной части крупных городов. Точечная застройка увеличивает плотность населения и зачастую нормы по количеству озеленения на одного жителя там не соблюдаются. В этой уплотненной застройке, где размещены здания и обслуживающие их парковки, нет площадей для создания рекреационных зон [7].

Системы озеленения, которые регламентированы действующими нормами, в планировочной урбанизированной структуре реализуются на четырех градостроительных уровнях (рисунки 1, 2) [8, 9]:

Первый уровень: планировка городского округа, поселения, населенного пункта (рисунок 1, а).

К системам озеленения на данном уровне можно отнести городские парки и лесопарки. Планировка городских структур должна осуществляться с учетом сформировавшейся городской застройки, крупных городских пространств. Только применение комплексного градостроительного подхода может решить проблемы нехватки озеленения современных городов.

Второй уровень: планировка района, микрорайона (рисунок 1, б).

Если внимательно посмотреть на карту любого города, то видно, что селитебные, или жилые, микрорайоны формируются, как правило, вокруг парков или садов. Это связано с тем, что парки и сады – самые крупные объекты озеленения, которые являются основными зонами отдыха населения и где формируются самые комфортные условия для проживания людей.

Зеленые насаждения микрорайонов можно подразделить на:

- *микрорайонный сады, скверы и бульвары*, площадь которых проектируется из расчета 2 – 3 м² на 1 жителя [8];

- *зеленые насаждения жилой территории*, состоящие из озелененных дворов, озелененных площадок для игр детей и отдыха взрослого населения, вертикального озеленения оград, стен зданий, балконов, беседок и т.д. Общая площадь озелененных пространств должна быть не менее 40 – 45% жилой территории [9];

- *озелененную часть участков школ и детских дошкольных учреждений*, составляющую не менее 60% территории.

На этом уровне необходимо решать проблемы нехватки озеленения для определенного типа застройки, учитывать своеобразие местности и архитектуру зданий, придавать неповторимый индивидуальный образ озелененной городской среде.

Третий уровень: благоустройство территории (мини-скверы, зеленые зоны) (рисунок 1, в).

Роль мини-скверов значительно возрастает в районах, где отсутствуют парки и нет возможности их создать (исторический центр, рельеф, климатические условия и т.д.). В этих случаях система мини-скверов предоставляет населению возможность отдыха в природном окружении. Кроме того, благоустройство территории за счет мобильного озеленения позволяет разместить необходимое количество квадратных метров озеленения на небольших участках городского пространства, использовать поверхности и территории, ранее не задействованные для организации зеленых открытых пространств. Элементами благоустройства могут быть и мобильные передвижные системы озеленения. Как и малые архитектурные формы, они вносят разнообразие в городскую среду [7].

Четвертый уровень: озеленение домов (озеленение крыш зданий, применение вертикального озеленения фасадов) (рисунок 1, г).

Озеленение фасадов домов проводится целенаправленно для улучшения микроклимата города и защиты окружающей среды и для повышения качества жизни человека в целом.

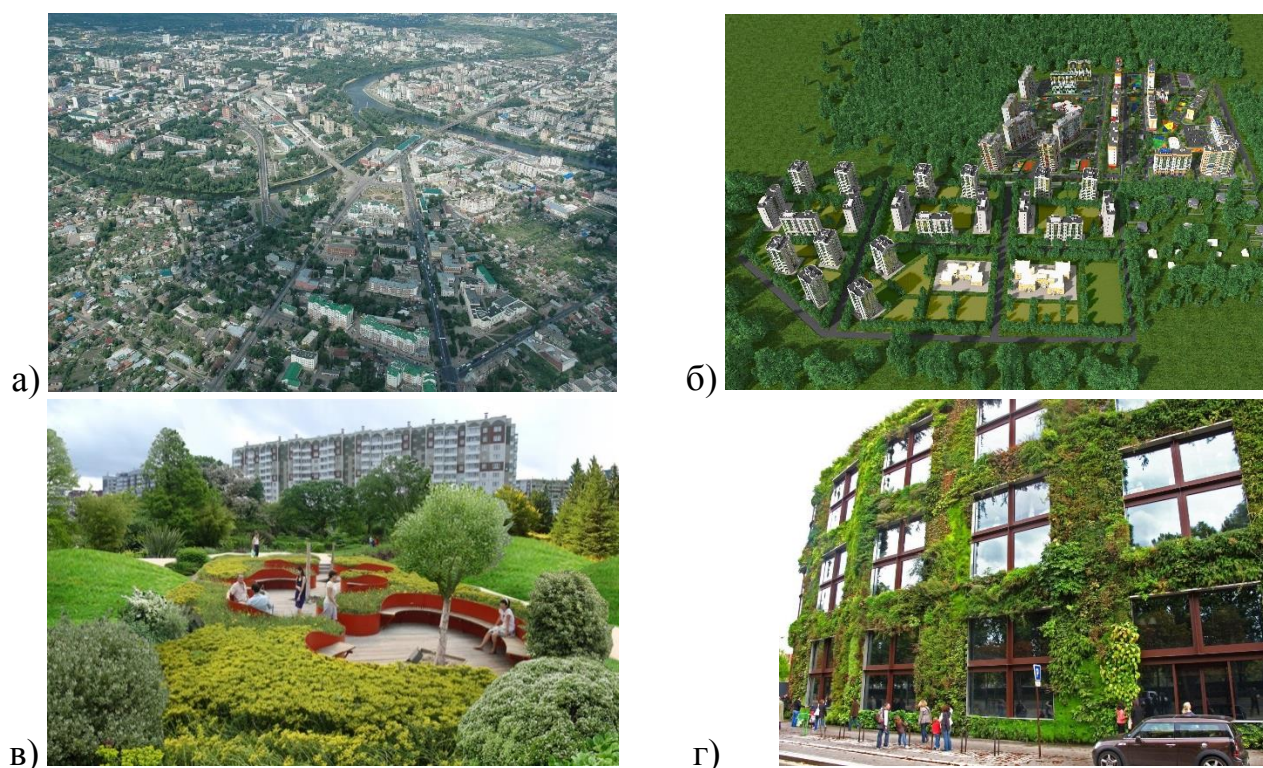
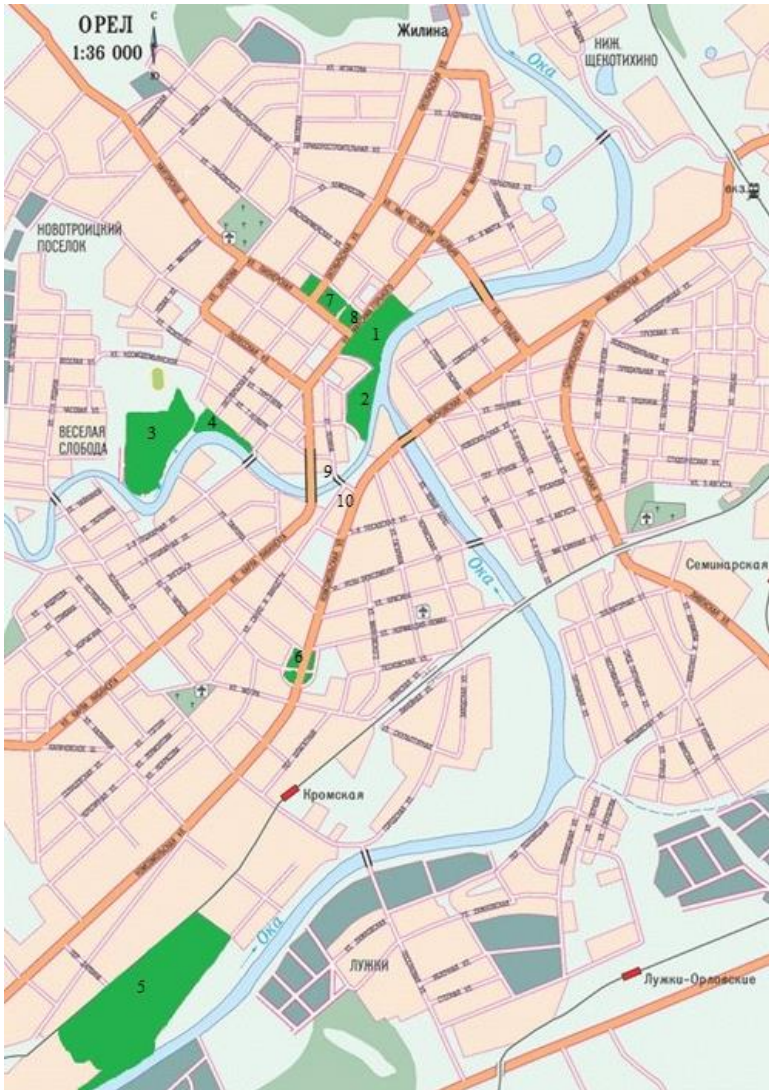


Рисунок 1 – Реализация систем озеленения городов на градостроительных уровнях:
а) первый уровень: планировка городского округа, поселения, населенного пункта;
б) второй уровень: планировка района, микрорайона;
в) третий уровень: благоустройство территории (мини-скверы, зеленые зоны);
г) четвертый уровень: озеленение домов (озеленение крыш зданий, применение вертикального озеленения фасадов)

В работе [10] была выполнена иерархия ландшафтно-рекреационного пространства в архитектурно-планировочной структуре городов на примере Воронежа. Такой системный подход к проблеме реконструкции общественных рекреационных пространств, как одного из основных элементов городской застройки, позволяет определить и научно обосновать место и значение данного специфического и недостаточно изученного вида деятельности по гармонизации взаимосвязи и взаимовлияния жизнедеятельности населения и рекреационной среды его обитания [10]. С позиции предложенной иерархии была разработана градация систем озеленения в архитектурно-планировочной структуре на примере города Орла (рисунок 2).



I уровень:

- 1 – Городской парк культуры и отдыха
- 2 – Детский парк
- 3 – Лесопарк Победы

II уровень:

- 4 – Ландшафтный парк «Дворянское гнездо»
- 5 – Парк «Ботаника»
- 6 – Комсомольский сквер
- 7 – Сквер имени Л.Н. Гуртьева

III уровень:

- 8 – Сквер библиотеки имени И. А. Бунина
- 9 – Сквер Артиллеристов
- 10 – Сквер имени А. П. Ермолова

Рисунок 2 – Градация систем озеленения в архитектурно-планировочной структуре города Орла

В градостроительной статистике используется показатель, имеющий прямое отношение к ландшафтной архитектуре - *обеспеченность населения насаждениями* так называемого общего пользования (парки, сады, скверы, бульвары). Несмотря на то, что город Орел носит негласное название «достаточно зеленого» города, общегородская обеспеченность жителей г. Орла зелеными насаждениями составляет 7,14 м²/чел, что не соответствует нормативному значению (10 м²/чел) [8]. В частности, озеленение Железнодорожного района г. Орла недостаточно, значение обеспеченности зелеными насаждениями в 5 раза меньше нормативного. Из проблем, с которыми столкнулись в настоящее время природоохранные организации и территориальные надзорные органы в сфере природопользования, отмечена проблема роста незаконной вырубке деревьев при строительстве зданий и в процессе благоустройства города.

В целом, основными проблемами в области организации зеленых зон в городской среде и реализации функции «Связь с природой», составляющей пару с функцией «Жизнеобеспечение», являются следующие:

- отсутствие долгосрочных стратегий развития озеленения городов;
- отсутствие доступной официальной информации о зеленых насаждениях, в том числе об их динамике и о выполнении нормативов;
- сокращение площадей зеленых насаждений;

- разрушение сложившихся исторических городских ландшафтов;
- ухудшение здоровья населения в результате снижения количества и качества зеленых насаждений;
- отсутствие четких законодательных норм, регламентирующих защиту прав горожан в области обеспечения надлежащего состояния зеленых территорий [11].

Рассмотрим некоторые проблемы взаимодействия названных функций на примере города Орла.

Центральная часть города Орла сложилась как выразительный архитектурно-планировочный ансамбль, сочетающий историческую планировочную структуру, имеющую ясный геометрический характер, исторические здания и сооружения и современные градостроительные комплексы и ансамбли.

Для центральной исторической зоны Орла (рисунок 3) актуальной задачей является охрана всех элементов исторического центра – планировочной структуры, архитектурных и исторических ансамблей, исторической застройки (как объектов культурного наследия, так и зданий, составляющих средовой фон), архитектурных высотных доминант, ландшафта, исторических парков и скверов [12].

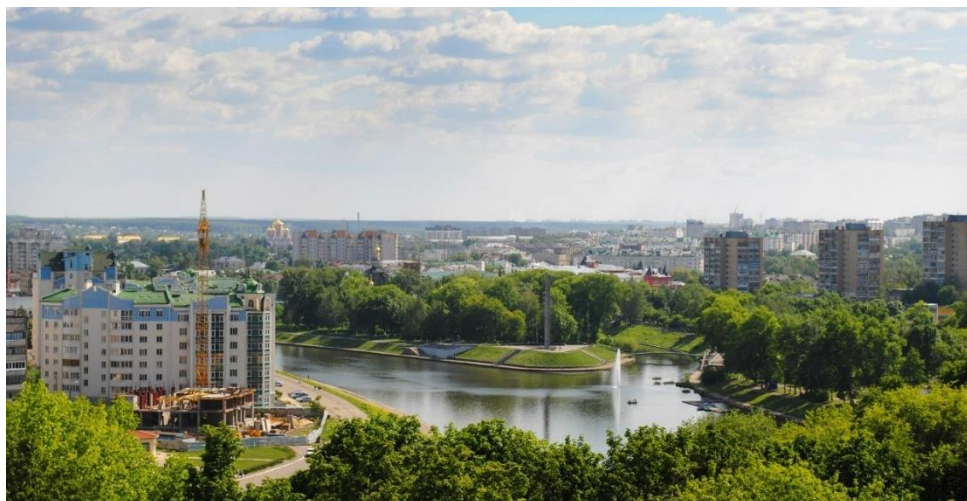


Рисунок 3 – Центральная историческая часть города Орла

В пределах зоны исторического центра и проектной зоне исторического ядра целесообразно ограничение нового строительства по этажности и стилистике, преимущественный тип градостроительной деятельности – это реконструкция и регенерация исторической среды, реставрация и воссоздание исторических объектов, благоустройство территории, максимальный вывод транзитного движения, развитие пешеходных зон и туристской инфраструктуры, благоустройство и озеленение [12].

Опираясь на полученные в работах [5, 6 и др.] закономерности, была предпринята попытка установить зависимости между состоянием здоровья населения и количества и качества зеленых насаждений на примере г. Орла. Так, в 2010 г. площадь зеленых массивов и насаждений общего пользования в городе Орле составляла 289 га (более 9,0 м² в расчете на 1 жителя), в 2017 г. этот показатель снизился до 196 га. К примеру, в марте 2015 г. в рамках подготовки к обустройству набережных была спилена аллея тополей вдоль берега Орлика, в декабре это же года пострадала часть деревьев в сквере на Комсомольской площади.

Статистика заболеваний городского населения за данный период следующая (таблица 1).

Таблица 1 - Заболеваемость на 1000 человек населения по классам болезней в Орловской области [13]

Класс болезни	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Болезни органов дыхания	341,7	354,3	374,6	386,0	395,1	417,8	422,3	430,9
Болезни нервной системы	14,1	15,8	16,4	14,8	15,5	16,8	17,4	18,1

Анализ статистической информации за период с 2010 по 2017 гг. показал у населения города рост заболеваний органов дыхания на 26 % и нервной системы на 28 % при снижении площади зеленых массивов и насаждений общего пользования на 32%.

С учетом сложившейся застройки в городе Орле, можно констатировать факт, что город, по сути, зажат в кольцо, его границы сдерживают перспективы градостроительного развития. Плотная застройка не позволяет создавать рекреационные зоны, поскольку основную часть пространства занимают жилые объекты и принадлежащие им парковки (рисунок 4). Таким образом, в рамках парной связи функций города «Жизнеобеспечение» и «Связь с природой» не предоставляется возможным их реализация в полной мере.



Рисунок 4 – Примеры плотной точечной застройки города Орла

Экологические проблемы, связанные с озеленением городов с плотной застройкой можно решать, не используя радикальные варианты изменения территорий. В настоящее время особое внимание уделяется разработке современных методов формирования зон экологического комфорта в городах с плотной застройкой. В рамках этого направления проводят следующие мероприятия: озеленяют крыши зданий; используют вертикальное озеленение фасадов; строят экопарковки; используют мобильные системы озеленения.

Мобильные системы озеленения – это озеленение города, реализуемое за счет конструктивных элементов, которые могут внедряться, перемещаться, а при необходимости убираться из городской среды [7]. Они необходимы в условиях уплотненной застройки центральной части города или при создании рекреации в сжатые сроки. Это легко монтируемые системы, имеющие мобильный, переносной характер, которые позволяют среде города регулярно изменяться, быть более разнообразной, неоднородной и интересной для жителей города (рисунок 5).



Рисунок 5 – Примеры мобильных систем озеленения

В разных функциональных зонах города применение мобильных систем озеленения имеет ряд особенностей, так, например:

- в жилых зонах города. Комфортное проживание в городской среде, как правило, не ограничивается только постройкой комфортабельного жилья, а включает в себя и организацию зон экологического комфорта. На сегодняшний день такие задачи в основном решаются посредством традиционных приемов, то есть созданием парков, скверов, бульваров, дворов, увеличением зеленых насаждений городских улиц и так далее [7]. Увеличение уровня автомобилизации привело к появлению ряда экологических проблем в жилой застройке: избыточный шум, вибрация, загазованность, пыль. Кроме того, под места хранения личного автотранспорта стали использовать газоны, детские площадки, скверы, места активного и пассивного отдыха в дворовых территориях. Для разгрузки существующей улично-дорожной сети возводятся магистральные улицы и дороги. Вместе с мероприятиями по шумозащите необходимо проводить и работы по благоустройству территории и обеспечению нормируемого озеленения. В случаях, когда традиционные приемы озеленения невозможны, за счет внедрения мобильных систем озеленения можно решить ряд проблем неблагоприятной экологической обстановки;

- в общественных зонах города. В наше время проблемы озеленения актуальны и для зон активного использования, таких как вокзалы, аэропорты, торговые центры, стадионы, выставки и другие. Именно там, в ожидании самолета или поезда, у человека появляется резерв времени и возникает потребность в кратковременном отдыхе. Для решения этой проблемы необходимо использовать прилегающие территории и крышу зданий. При проектировании благоустройства территории для краткосрочного отдыха, так же, как и в объемном проектировании здания, необходимо предусмотреть ее зонирование;

- в производственных зонах города. В производственных зонах необходимо учитывать нормируемое количество озеленение (3 м^2 на человека). Озеленение этих территорий может быть организовано и за счет систем мобильного озеленения. В организации санитарно-защитных зон от предприятий и коммунально-складских территорий необходимо внедрение систем мобильного озеленения.

Мобильные системы озеленения являются средством реализации доступности озелененных пространств для населения крупных городов. Грамотно размещенные мобильные системы озеленения способны выполнять утилитарную, эстетическую и санитарно-гигиеническую роли, а также разнообразить городскую среду, сделав ее индивидуальной и композиционно привлекательной.

Выводы и перспективы исследования. В рамках концепции биосферной совместимости для реализации парных функций города «Жизнеобеспечение» и «Связь с природой» инновационные решения в области озеленения городской среды предполагают разработку биосферосовместимых технологий, позволяющих при минимальном потреблении ресурсов максимально их восстанавливать и приумножать, создавать альтернативные варианты зеленых зон в условиях сложившейся застройки. Такой подход позволяет управлять развитием территорий, т.е. появляется возможность изменения эволюционного развития экосистемы города с созданием условий по ее восстановлению и улучшению городской среды за счет принятия научно обоснованных управляющих решений [14].

Учитывая проблемы современного градостроительства, полученные результаты исследований могут служить основой для разработки предложений и рекомендаций по реконструкции городской застройки и реновации городской среды на основе симбиотических отношений биосферы и города и развития человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев, В.А. Предложения к проекту доктрины градоустройства и расселения (стратегического планирования городов – city-planning) / В.А. Ильичев, А.М. Каримов, В.И. Колчунов, В.В. Алексашина, Н.В. Бакаева, С.А. Кобелева // *Жилищное строительство*, 2012. – № 1. – С. 2-11.
2. Ильичев, В.А. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека / Научная монография / В.А. Ильичев, С.Г. Емельянов, В.И. Колчунов, В.А. Гордон, Н.В. Бакаева. – М., Издательство АСВ, 2015. – 184 с.
3. Ильичев, В.А. Может ли город быть биосферосовместимым и развивать человека? // *Архитектура и строительство Москвы*, 2009. - № 2 (544). – С.8–13.
4. Горохов, В.А. Зеленая природа города: учеб. пособие для вузов. Издание 3-е, доп. и перераб. В 2-х томах. - М.: Архитектура-С, 2012. - 528 с.
5. Селиховкин, А.В. Анализ воздействия структуры зеленых насаждений на здоровье населения [Текст] / А.В. Селиховкин, Б.Г., Поповичев, И.А. Селиховкин. – СПб., 2004. - С. 213-215.
6. Ларионов, М.В. Зеленые насаждения как фактор экологической стабилизации антропогенной среды и сохранения здоровья населения / М.В. Ларионов, Н.В. Ларионов [Текст] // *Материалы Международной научно-практической конференции «Проблемы и мониторинг природных экосистем»*, 2014. - С. 85-88.
7. Булдакова, Е.А. Решение проблем экологии путем организации мобильных систем озеленения // *Архитектон: известия вузов*. - № 38, 2012.
8. СП 42.13330.2011. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений.
9. СП 82.13330.2016 Благоустройство территорий. Актуализированная редакция СНиП III-10-75.
10. Енин А.Е. Системный подход к реконструкции ландшафтно-рекреационных пространств / А.Е. Енин, Т.И. Грошева // *Строительство и реконструкция*. - №4 (72), 2017. - С. 101-109.

11. Резолюция VII научно-практической конференции «Инновации в ландшафтной архитектуре» (06.04.2011) / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижегородская организация ландшафтных архитекторов (ОЛА). – Нижний Новгород, 2011. – с. 5

12. Проект внесения изменений в Генеральный план муниципального образования городской округ «Город Орёл». Положение о территориальном планировании. – СПб.-Орел, 2017.

13. Егоренко С.Н., Бугакова Н.С., Гельвановский М.И. и др. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2017: Р32. Стат. сб. / Росстат. - М., 2017. - 1326 с.

14. Ильичев, В.А. Биосферная совместимость: Технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека [Текст]. – М.: ЛИБРОКОМ, 2011. – 240 с. ISBN 978-5-397-02154-8.

Бакаева Наталья Владимировна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Советник РААСН

доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство»

E-mail: natbak@mail.ru

Черняева Ирина Викторовна

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство автомобильных дорог»

E-mail: schunya87@yandex.ru

BAKAEVA N. V., CHERNYAEVA I.V.

**ISSUES OF GREENING THE URBAN ENVIRONMENT
IN THE IMPLEMENTATION OF THE FUNCTIONS
OF THE BIOSPHERE-COMPATIBLE CITY**

The role of urban green spaces is revealed from the position of realization of functions of biosphere-compatible city as one of the fundamental principles of creation of favorable and comfortable urban environment. The article analyzes the main problems associated with the organization of green areas in the urban environment in the implementation of paired functions "life Support" and "Connection with nature". Provides a gradation of systems of greenery in the planning of the urban structure on four levels of urban planning on the example of the city Orel. Problems of point building are analyzed and modern methods of formation of zones of ecological comfort in the cities with dense building are offered. The results of the study can serve as a basis for the development of proposals and recommendations for the reconstruction of urban development and renovation of the urban environment on the basis of the symbiotic relationship of the biosphere and the city and human development.

Keywords: urban development, environmental reconstruction, functions of the city, landscaping, mobile systems landscaping

REFERENCES

1. Il'ichev, V.A. Predlozheniya k proyektu doktriny gradoustroystva i rasseleniya (strategicheskogo planirovaniya gorodov – city-planning) / V.A. Il'ichev, A.M. Karimov, V.I. Kolchunov, V.V. Aleksashina, N.V. Bakayeva, S.A. Kobleva // Zhilishchnoye stroitel'stvo, 2012. – № 1. – S. 2-11.

2. Il'ichev, V.A. Printsipy preobrazovaniya goroda v biosfersovmestimyy i razvivayushchiy cheloveka / Nauchnaya monografiya / V.A. Il'ichev, S.G. Yemel'yanov, V.I. Kolchunov, V.A. Gordon, N.V. Bakayeva. – M., Izdatel'stvo ASV, 2015. – 184 s.

3. Il'ichev, V.A. Mozhet li gorod byt' biosfersovmestimym i razvivat' cheloveka? // Arkhitektura i stroitel'stvo Moskvy, 2009. - № 2 (544). – S.8–13.

4. Gorokhov, V.A. Zelenaya priroda goroda: ucheb. posobiye dlya vuzov. Izdaniye 3-ye, dop. i pererab. V 2-kh tomakh. - M.: Arkhitektura-S, 2012. - 528 s.

5. Selikhovkin, A.V. Analiz vozdeystviya struktury zelenykh nasazhdeniy na zdorov'ye naseleniya [Tekst] / A.V. Selikhovkin, B.G., Popovichev, I.A. Selikhovkin. – SPb., 2004. - S. 213-215.

6. Larionov, M.V. Zelenyye nasazhdeniya kak faktor ekologicheskoy stabilizatsii antropogennoy sredy i sokhraneniya zdorov'ya naseleniya / M.V. Larionov, N.V. Larionov [Tekst] // Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i monitoring prirodnykh ekosistem», 2014. - S. 85-88.
7. Buldakova, Ye.A. Resheniye problem ekologii putem organizatsii mobil'nykh sistem ozeleneniya // Arkhitekton: izvestiya vuzov. - № 38, 2012.
8. SP 42.13330.2011. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i sel'skikh poseleniy.
9. SP 82.13330.2016 Blagoustroystvo territoriy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP III-10-75.
10. Yenin A.Ye. Sistemnyy podkhod k rekonstruktsii landshaftno-rekreatsionnykh prostranstv / A.Ye. Yenin, T.I. Grosheva // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. - №4 (72), 2017. - S. 101-109.
11. Rezolyutsiya VII nauchno-prakticheskoy konferentsii «Innovatsii v landshaftnoy arkhitekture» (06.04.2011) / Nizhegorodskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet, Nizhegorodskaya organizatsiya landshaftnykh arkhitektorov (OLA). – Nizhniy Novgorod, 2011. – s. 5
12. Proyekt vneseniya izmeneniy v General'nyy plan munitsipal'nogo obrazovaniya gorodskoy okrug «Gorod Orol». Polozheniye o territorial'nom planirovanii. – SPb.-Orel, 2017.
13. Yegorenko S.N., Bugakova N.S., Gel'vanovskiy M.I. i dr. Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskiye pokazateli. 2017: R32. Stat. sb. / Rosstat. - M., 2017. - 1326 s.
14. Il'ichev, V.A. Biosfernaya sovmestimost': Tekhnologii vnedreniya innovatsiy. Goroda, razvivayushchiye cheloveka [Tekst]. – M.: LIBROKOM, 2011. – 240 s. ISBN 978-5-397-02154-8.

Bakaeva N.V.

South-West State University, Kursk

Doctor of technical Sciences, professor of department «Civil engineering»

E-mail: natbak@mail.ru

Chernyaeva I.V.

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel

Candidat of Technical Sciences, assistant professor of the Construction of Highways Department

E-mail: schunya87@yandex.ru

ЗВЯГИНЦЕВА А.В., ИВАЩУК О.А.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ РОССИИ

Выявление тенденций развития городов является актуальной задачей, так как позволяет анализировать градообразующие и градоформирующие процессы на определенных интервалах времени. Анализ тенденций связан с комплексной оценкой нескольких причинно-следственных событий, которые могут отражать в совокупности направленность процессов развития объекта. Данная работа посвящена событийным методам изучения городской среды на примере крупных городов России, исходя из анализа тенденций как сложных совместных событий, характеризующих изменения индикативных показателей. На основе статистических данных и непосредственного подсчета вероятностей наблюдения событий оценена взаимосвязь градостроительного и социально-экономического развития городов России. Показано, как на основе изучения событий и определения их вероятностей, может анализироваться групповое поведение социально-экономических объектов.

Ключевые слова: *событийная оценка, города России, тенденции развития, анализ группового поведения.*

Введение. Особенностью современного этапа развития многих городов является рост открытости их экономики и усиливающиеся процессы глобализации на фоне крайне неравномерного развития как регионов мира, так и самих городов в частности. Муниципальные образования сталкиваются с вызовами, которые связаны с быстро формирующейся новой социально-экономической средой. Кризисные явления в мире и разнообразные процессы в области демографического, социально-экономического и территориального развития регионов определяют градостроительные и инфраструктурные изменения в городах. Поэтому выявление тенденций развития городов является актуальной задачей, так как позволяет оценить перспективы в области градостроительной политики.

Обычно под тенденцией понимают возможность реализации тех или иных событий, отличающихся положительными или отрицательными изменениями свойств, признаков или отношений. Считается, что на основе выявленных тенденций можно прогнозировать развитие объектов и формировать представления о ходе процессов или делать выводы о возможных ситуациях в будущем. Чаще всего суть понятия тенденции связана с комплексной оценкой нескольких событий, которые могут отражать в совокупности процессы развития объекта или группы однородных объектов в определенном направлении.

В настоящее время имеется множество работ, связанных со стандартизацией показателей и индикаторов для комплексной оценки состояний и процессов развития городов [1 – 11]. Изменение некоторых из этих показателей формирует образ положительных тенденций, в свою очередь, другие показатели влияют на образование негативных тенденций. Например, рост удельного ВВП на душу населения в целом положительно сказывается на развитии города, а увеличение младенческой смертности – отрицательно.

Поэтому, если скомпоновать группу показателей, рост значений которых ведет к формированию, например, положительной тенденции развития, то на основе методов событийной оценки можно определять вероятности благоприятных изменений в состояниях городов. В этом случае увеличение вероятности состояния, оцененной по событиям наблюдения этих показателей, будет способствовать положительным изменениям объекта по отношению ко всей группе изучаемых объектов. Особенностью подхода является необходимость исследования группового поведения однородных объектов.

Целью статьи является изучение взаимосвязи различных аспектов развития городской среды на примере крупных городов России, исходя из анализа тенденций как сложных совместных событий, характеризующих изменения индикативных показателей.

В данном исследовании под событийной оценкой понимается анализ состояния и развития сложных систем на основе наблюдения, регистрации и изучения событий и их вероятностей.

Статистические данные для анализа. Анализ информации о состоянии и развитии городов России основывался на данных Федеральной службы государственной статистики [12]. Соответствующая база данных показателей, характеризующих состояние экономики, социальной, градостроительной и жилищно-коммунальной сфер, включает информацию для 154 городов с населением свыше 100 тысяч человек. Данные города входят в восемь федеральных округов: Дальневосточный (13 городов); Приволжский (27 городов); Северо-Западный (12 городов); Северо-Кавказский (14 городов); Сибирский (23 города); Уральский (18 городов); Центральный (31 город); Южный (16 городов). Москва и Санкт-Петербург были исключены из анализа в связи с аномальностью значений показателей (таблица 1).

Для каждого города использовались данные, которые были скомпонованы в 11 групп статистической информации:

- социально-экономическая сфера (10 показателей);
- демография (5 показателей);
- трудовые отношения (3 показателя);
- уровень жизни населения и социальная среда (17 показателей);
- основные фонды (4 показателя);
- предприятия и организации (1 показатель);
- добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды (5 показателей);
- строительство (8 показателей);
- городской пассажирский транспорт (4 показателя);
- торговля (4 показателя);
- инвестиции (2 показателя).

Имеющиеся данные относились к периоду времени с 2003 по 2015 годы, соответствующие таблицы «города – показатели» формировались с шагом один год. В результате выполненных работ был создан массив статистических данных, который включал 13 таблиц данных (2003 – 2015 годы), содержащих в каждой таблице информацию по 63 показателям для 154 городов. Статистические характеристики некоторых показателей для анализируемых городов России за 2015 год приведены в таблице 2. Анализ данных таблицы указывает на значительный разброс в значениях практически всех показателей. Методом нелинейной регрессии [13] в координатах пробит – логарифм показателя установлены одномерные эмпирические распределения вида $P_k = a + b \cdot \ln p_k$ (таблица 2). Большинство эмпирических распределений в указанных координатах представляются линейными зависимостями. Изучение одномерных распределений [13 – 15] показывает, что для показателей наблюдаются чаще всего зависимости, близкие к логарифмически-нормальным распределениям. Полученные эмпирические распределения использовались для определения вероятностей событий, характеризующих градостроительное и социально-экономическое развитие городов России.

Приведенные показатели объединялись в группы, представляющие определенные аспекты развития городов. Например, первая группа, охватывающая три показателя: объем товаров и услуг промышленного производства, инвестиции в основной капитал и оборот розничной торговли, отражала экономический потенциал развития городов. В свою очередь, показатели группы два – объем работ, выполненных в строительстве, общая площадь жилых помещений в среднем на одного жителя, ввод в действие жилых домов, отражали градостроительный аспект развития городов.

Формировались также и другие группы из двух – трех показателей для установления различных взаимосвязей величин и оценки тенденций развития городов.

Таблица 1 – Значения показателей для Москвы и Санкт-Петербурга за 2015 год

Номер показателя	Показатель p_k	Москва	Санкт-Петербург
1.	Численность населения, тыс. чел.	12330,1	5225,7
2.	Среднегодовая численность работников организаций, тыс. чел.	4662,1	2055,3
3.	Среднемесячная начисленная заработная плата, руб.	64310	44187
4.	Наличие основных фондов организаций (на конец года), млн. руб.	12243251	4102244
5.	Ввод в действие основных фондов, млн. руб.	15103366	376739
6.	Объем товаров и услуг промышленного производства, млн. руб.	4789573	1978634
7.	Объем работ, выполненных в строительстве, млн. руб.	821588	397229
8.	Оборот розничной торговли, млн. руб.	4310107	1144607
9.	Инвестиции в основной капитал, млн. руб.	1611512	521293
10.	Ввод в действие жилых домов, тыс. м ² общей площади	3920	3031
11.	Общая площадь жилых помещений в среднем на одного жителя, м ²	19,4	23,6

Таблица 2 – Показатели городов России с населением свыше 100 тысяч человек и их статистические характеристики

Номер показателя	Показатель p_k	Среднее значение	Минимум	Максимум	σ	Коэффициенты распределения $Pr = a + b \cdot \ln p_k$	
						a	b
1.	Численность населения, тыс. чел.	367,2	100,8	1584,1	310,1	-6,843	1,252
2.	Среднегодовая численность работников организаций, тыс. чел.	99,5	12,1	450,8	91,7	-4,587	1,104
3.	Среднемесячная начисленная заработная плата, руб.	34751	18914	78818	11353	-38,432	3,736
4.	Наличие основных фондов организаций (на конец года), млн. руб.	305556	4816,6	2609252	421562	-10,222	0,891
5.	Ввод в действие основных фондов, млн. руб.	42385,7	325,7	830926	104194	-8,423	0,909
6.	Объем товаров и услуг промышленного производства, млн. руб.	98081,8	266,0	1000000	13645,9	-10,721	1,071
7.	Объем работ, выполненных в строительстве, млн. руб.	7288,2	12,10	63567,8	9623,3	-7,367	0,890
8.	Оборот розничной торговли, млн. руб.	33326,3	753,4	211796	38527,7	-8,045	0,853
9.	Инвестиции в основной капитал, млн. руб.	24906,3	398,9	137252	29246,2	-8,483	0,903
10.	Ввод в действие жилых домов, тыс. м ² общей площади	258,9	1,4	2009,5	317,4	-4,722	0,974
11.	Общая площадь жилых помещений в среднем на одного жителя, м ²	23,9	14,40	41,8	3,29	-25,322	8,153

Примечание: σ – среднеквадратичное отклонение, Pr – инверсная функция нормального распределения со средним, равным нулю, и дисперсией, равной единице, $w = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$; w – статистическая вероятность наблюдения изучаемой величины.

Оценка состояния и развития городов на основе анализа событий. Комплексная оценка проводилась на основе выделения простых и сложных индикативных событий, характеризующих состояние городов. Особенностью работы является использование методов интеллектуального анализа информации, когда поиск связей осуществляется не между показателями объектов, а между вероятностями наблюдения различных событий, свойственных изучаемому массиву статистических данных. При этом состояние объекта в определенном аспекте рассматривается как совокупность наблюдаемых значений показателей, которые формируются под действием внутренних и внешних условий в конкретный момент времени [14 – 20].

Подход, основанный на событийной оценке, позволяет любое наблюдаемое изменение или развитие объекта рассматривать как некое событие. Поэтому будем считать, что информацию о состояниях объектов могут нести в себе как данные в виде значений показателей, так и различные факты в виде событий. Тогда каждое состояние может характеризоваться как вероятностью событий, которые свойственны этим состояниям, так и значениями показателей этих состояний. При этом под вероятностью состояния объекта в определенном аспекте рассматривалась вероятность совместного события наблюдения нескольких атрибутивных показателей, под которыми понимаем наиболее важные показатели (переменные состояния). Метод событийной оценки связан с изучением поведения объектов в многомерных пространствах состояний.

Таким образом, вероятности состояний при событийной оценке могут характеризоваться несколькими связанными между собой причинно-следственными событиями:

- простыми событиями (причинами) наблюдения значений каждого отдельного показателя объекта;
- совместными событиями (следствиями и в тоже время причинами) наблюдения значений нескольких показателей объекта, которые в совокупности характеризуют его состояние и приняты в качестве атрибутивных. Такие события будем считать индикативными;
- сложными событиями (следствиями) наблюдения определенных изменений в различных аспектах и особенностей поведения, которые могут быть связаны с индикативными событиями.

Имеющиеся массивы данных позволяют эмпирически оценить вероятности самых разных событий наблюдения показателей и установить взаимосвязи между их вероятностями. Соответствующие статистические вероятности для простых и сложных событий могут быть найдены с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений.

Оценим вероятности событий, которые могут иметь отношение к статистической информации о состоянии объектов, представленной в виде используемых массивов данных. Соответствующие массивы имеют структуру таблиц в виде «города-показатели», причем имеющаяся последовательность таблиц упорядочена во времени.

Применительно к такой информации можно выделить следующие основные события и привести способы определения их вероятностей.

1. В любой момент наблюдения каждого конкретного показателя реализуется событие, связанное с изменениями значений этого показателя, как характеристической величины данного события. Наблюдения осуществляются применительно к каждому объекту (относятся к одной таблице данных), и для каждого показателя реализуются события, связанные с наблюдением его значений для разных объектов. Все события наблюдения некоторого показателя для разных объектов в данном случае можно рассматривать как совместные, так как они привязываются к одному и тому же моменту времени – годам.

Соответствующие одномерные распределения вероятностей для одного показателя по данным для различных объектов (для одной таблицы базы данных) легко находятся с использованием программных продуктов статистического анализа данных. Накопленный объем данных позволяет получить эмпирические распределения хорошего качества (таблица 2).

2. В любой момент наблюдения за состоянием объектов может быть реализовано сложное совместное событие одновременного изменения значений нескольких показателей. Наблюдения осуществляются применительно к каждому объекту, и при реализации такого события может формироваться множество комбинаций совместного представления разных показателей. Все такие события относятся к одной и той же таблице данных и являются совместными. Подобная задача при событийной оценке возникает в случае выделения нескольких атрибутивных показателей (обычно от трех до пяти), относительно которых строится вероятностная модель для множества изучаемых объектов. Для двух показателей гистограммы совместных событий строятся с использованием программных продуктов статистического анализа данных (например, Statistica). Если количество показателей составляет более двух, то для оценки вероятностей совместных событий необходимо использовать вычислительные алгоритмы. Соответствующий алгоритм позволяет разбить всю наблюдаемую область переменных на многомерные параллелепипеды, исходя из заданного количества (обычно одинакового для всех показателей) интервалов группирования. После этого подсчитываются относительные частоты событий, которые равны отношению количества опытных точек, попадающих в заданные многомерные параллелепипеды, к общему числу всех наблюдаемых точек. Статистическая вероятность принимается в виде кумулятивных относительных частот изучаемых событий. В работах [11, с. 252–255; 16, с. 185–187] приведены алгоритмы непосредственного подсчета относительных частот событий для многомерных случаев.

3. Для одной таблицы данных могут быть получены вероятности различных событий, которые, в свою очередь, могут быть взаимосвязаны. Поэтому вероятности простых и сложных событий наблюдения значений различных показателей следует изучать на взаимосвязь между собой, используя корреляционный и регрессионный анализ.

На основе данного подхода может быть получено множество вероятностных зависимостей, которые будут характеризовать изучаемые объекты по самым разным аспектам. Если исследовать взаимосвязь двух простых событий, где каждое событие может быть представлено событием наблюдения одного показателя, то уравнение связи вероятностей будет иметь вид: $w_2 = F(w_1)$. Аналогичным образом можно изучать взаимосвязь двух сложных событий, где каждое событие может быть представлено совместным событием наблюдения нескольких показателей.

Анализ событий, связанных с развитием городов. Событийный подход позволяет искать связи и закономерности между вероятностями наблюдения различных событий, свойственных изучаемым городам. Например, на рисунке 1, а представлена связь между вероятностями совместных событий наблюдения показателей первой группы в 2003 и 2015 годах, при этом уравнение связи имеет вид: $w_{1, 2015} = -0,010 + 0,978 \cdot w_{1, 2003}$ ($w_{1, 2015}$, $w_{1, 2003}$ – вероятности совместных событий наблюдения показателей первой группы в 2015 и 2003 годах соответственно), а коэффициент корреляции зависимости является значимым и составляет 0,96. В свою очередь, на рисунке 1, в представлена связь между вероятностями совместных событий наблюдения показателей группы 2 в 2003 и 2015 годах с уравнением связи $w_{2, 2015} = -0,021 + 1,170 \cdot w_{2, 2003}$ ($w_{2, 2015}$, $w_{2, 2003}$ – вероятности совместных событий наблюдения показателей второй группы в 2015 и 2003 годах соответственно) при коэффициенте корреляции 0,90. Из полученных уравнений видно, что если тенденция роста показателей первой группы, отражающих экономический потенциал развития городов, практически не изменилась, то для второй группы показателей, отражающих градостроительный аспект развития городов, наблюдается положительная тенденция роста с коэффициентом 1,17.

Взаимосвязь градостроительного и социально-экономического развития городов России в 2015 году характеризуется зависимостью вероятностей соответствующих совместных событий, как это видно из рисунка 1, б. Уравнение связи вероятностей имеет вид $w_{2, 2015} = -0,007 + 0,592 \cdot w_{1, 2015}$ ($w_{2, 2015}$, $w_{1, 2015}$ – вероятности совместных событий наблю-

дения в 2015 году показателей второй и первой группы соответственно), коэффициент корреляции составляет 0,83.

Связи между вероятностями совместных событий наблюдения показателей (для различных групп) с вероятностями простых событий наблюдения отдельных показателей (например, рис. 1, г) носят преимущественно нелинейный характер. Соответствующие значимые связи были установлены почти для 40 показателей из 57 изучаемых показателей, не входящих в перечень атрибутивных переменных, состоящий из показателей первой и второй групп.

Вероятностные распределения совместных событий в зависимости от показателей находились в виде уравнений:

$$w = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \quad \text{Pr} = c_0 + s; \quad s = \sum c_k \cdot \ln \frac{p_k}{p_{k_0}}, \quad (1)$$

где w – статистическая вероятность совместного события наблюдения нескольких показателей p_k ; Pr – инверсная функция нормального распределения со средним, равным нулю, и дисперсией, равной единице; c_k – эмпирические константы; s – энтропия состояния объектов; p_{k_0} – минимальные значения показателей p_k в группе городов, наблюдаемые в 2003 году.

На основе выбранных показателей, входящих в группы 1 и 2, формировалось трехмерное пространство состояний, для которого эмпирически получены следующие уравнения:

- для группы показателей (*группа 1*), отражающих экономический потенциал развития городов, соответственно в 2003 и 2015 годах:

$$\text{Pr} = -3,903 + 0,384 \cdot \ln \frac{p_6}{p_{6_0}} + 0,361 \cdot \ln \frac{p_8}{p_{8_0}} + 0,124 \cdot \ln \frac{p_9}{p_{9_0}}; \quad (2)$$

$$\text{Pr} = -4,845 + 0,264 \cdot \ln \frac{p_6}{p_{6_0}} + 0,364 \cdot \ln \frac{p_8}{p_{8_0}} + 0,216 \cdot \ln \frac{p_9}{p_{9_0}}, \quad (3)$$

где индекс показатель p_k соответствует порядковому номеру показателя в таблице 2;

- для группы показателей (*группа 2*), отражающих градостроительный аспект развития городов, соответственно в 2003 и 2015 годах:

$$\text{Pr} = -5,945 + 0,176 \cdot \ln \frac{p_7}{p_{7_0}} + 0,299 \cdot \ln \frac{p_{10}}{p_{10_0}} + 4,558 \cdot \ln \frac{p_{11}}{p_{11_0}}; \quad (4)$$

$$\text{Pr} = -6,400 + 0,211 \cdot \ln \frac{p_7}{p_{7_0}} + 0,297 \cdot \ln \frac{p_{10}}{p_{10_0}} + 3,982 \cdot \ln \frac{p_{11}}{p_{11_0}}, \quad (5)$$

где индекс показатель p_k также соответствует порядковому номеру показателя в таблице 2.

Результаты обработки данных для 2015 года приведены на рисунке 2, коэффициенты множественной корреляции зависимостей (2) – (5) составили от 0,91 до 0,98 соответственно.

Приведенные уравнения позволяют анализировать тенденции развития отдельных объектов на определенных интервалах времени. Например, для группы показателей (*группа 1*), отражающих экономический потенциал развития городов, вероятность соответствующего совместного события для города Брянска возросла с 0,408 в 2003 году до 0,476 в 2015 году, а для города Воронежа снизилась соответственно с 0,776 до 0,755. Таким образом, в первом случае наблюдается положительная тенденция в развитии по совокупности показателей группы 1, а во втором случае – отрицательная.

Наиболее выраженные положительные тенденции для второй группы показателей, отражающих в совокупности градостроительный аспект развития, наблюдались в городах Одинцово, Мытищи, Калининград, Ростов, Калуга, Липецк, Ставрополь, Орел, Магнитогорск, Екатеринбург, Краснодар и Самара.

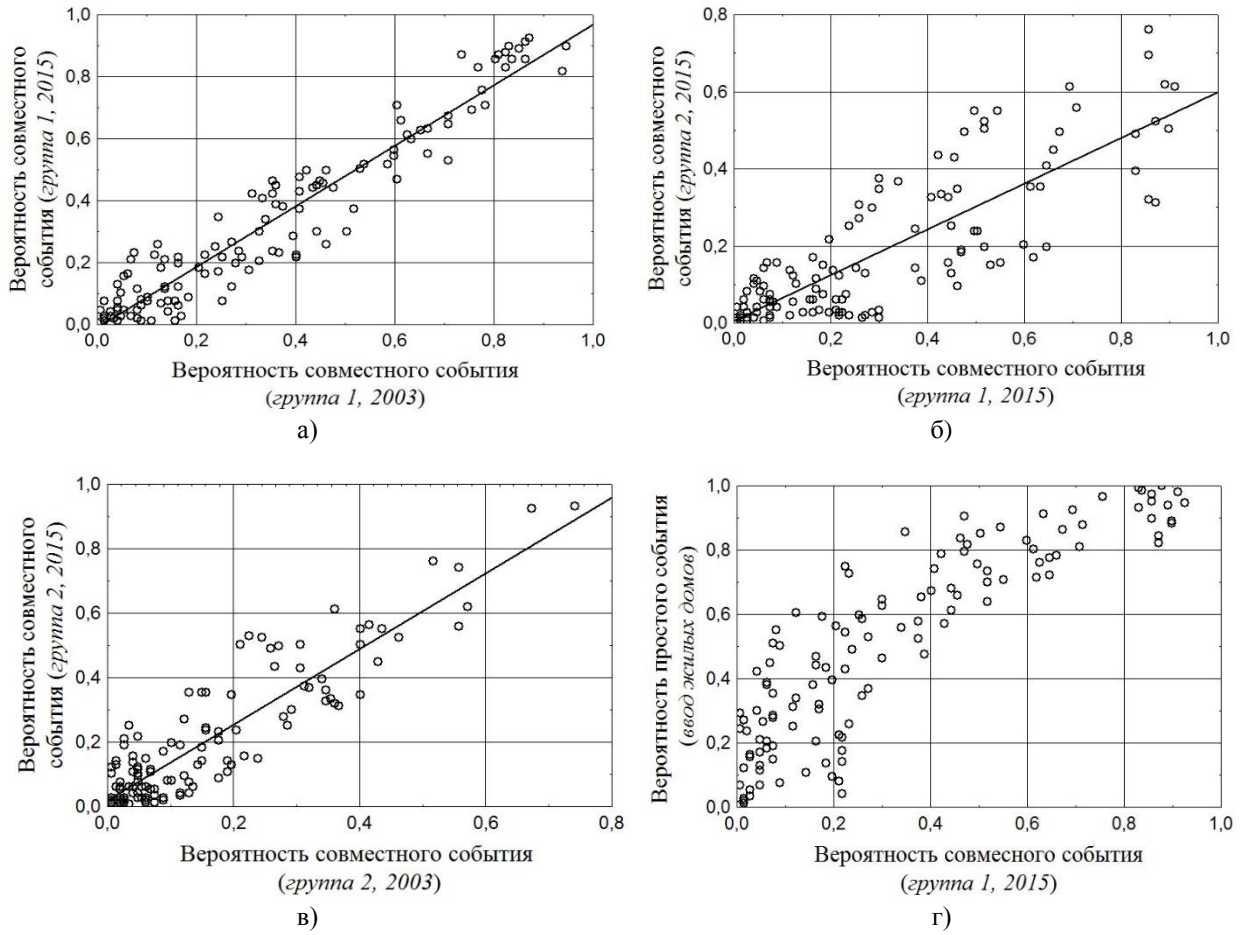


Рисунок 1 – Взаимосвязь вероятностей различных событий наблюдения показателей, характеризующих состояния городов

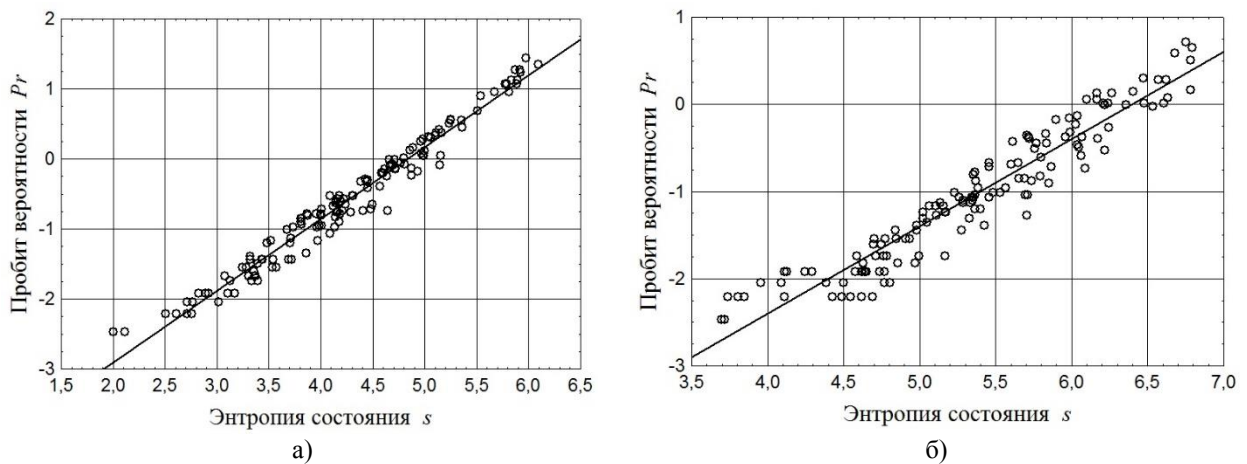


Рисунок 2 – Распределение вероятностей совместных событий наблюдения показателей, характеризующих состояния городов в 2015 году: а) группа 1; б) группа 2

Анализ данных показывает, что в 2015 году для 75% городов России площадь жилых помещений, приходящаяся в среднем на 1 жителя, составляла менее $26,0 \text{ м}^2$, что существенно ниже среднеевропейских норм: $35 - 45 \text{ м}^2$ на 1 жителя. Темпы роста данного показателя явно недостаточны. За 12 лет для городов России средняя величина площади жилых помещений

возросла всего с 19,3 до 23,9 м² на 1 жителя, минимальное значение – с 9,7 до 14,4, а максимальное значение этого показателя – с 31,7 до 41,8 м²/чел. Это связано с невысокими темпами жилищного строительства в целом по стране – для 80% городов России в год вводится всего от 0,2 до 1,1 м² жилья на 1 жителя.

Относительно высокие темпы жилищного строительства по показателю ввода жилых домов наблюдаются в Уссурийске, Махачкале, Петропавловск-Камчатске, Новосибирске, Иркутске, Магнитогорске, Каменск-Уральске, Сызрани, Ульяновске, Кирове, Рыбинске и некоторых городах Московской области (темпы ввода жилых домов возросли более чем в 3,5 раза по сравнению с 2003 годом). Значительные средства вкладываются в строительство также в городах с развитой нефтегазовой и нефтехимической промышленностью. При этом для многих городов не наблюдается явной связи между увеличением темпов жилищного строительства и ростом количества населения.

В целом, исходя из статистических данных, установлено, что существуют явные событийные связи между градостроительным и социально-экономическим развитием городов России на фоне выраженных региональных особенностей.

Выводы

Из приведенных результатов видно, что при описании состояния и развития городов может быть построено множество моделей в виде уравнений, определяющих взаимосвязь вероятностей различных простых и сложных событий. Модели могут использоваться для анализа градообразующих и градоформирующих процессов в различных аспектах (демографическом, социальном, экономическом, строительном и т.д.). На основе методов событийной оценки может анализироваться групповое поведение социально-экономических объектов. Это позволяет выявить тенденции развития городов и оценить перспективы в области градостроительной политики, а также установить влияние экономических факторов на градообразующие процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние городов России / Т.Д. Белкина и др. – М.: ВИНТИ, 2010. – 141 с.
2. Компаниец В.С. Социально-экономическое состояние «типичных» муниципальных образований. Методика комплексной оценки / В.С. Компаниец, М.А. Боровская, А.Ю. Казанская. – Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 280 с.
3. Better understanding our cities. The role of urban indicators. Lawrence R.J. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development, 1997, 94 p.
4. Urban Indicators Guidelines. Monitoring Habitat Agenda and Millennium Development Goals. United Nations Human Settlements Programme. Kenya, 2004, 68 p. Available at: <https://unhabitat.org/urban-indicators-guidelines-monitoring-the-habitat-agenda-and-the-millennium-development-goals/> (accessed November 5, 2017).
5. World Development Indicators (issued annually). World Bank. Available at: <http://data.worldbank.org/products/wdi> (accessed November 5, 2017).
6. Международные рекомендации по городскому и территориальному планированию. Программа ООН по населенным пунктам (ООН-Хабитат). Найроби. 2015. – 40 с. Элект. pec. – URL: http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Brochure_IG-UTP_Russian_small.pdf (15.11.17).
7. Региональный доклад региона содружества независимых государств «Города СНГ: путь в устойчивое будущее» к конференции ООН по жилью и устойчивому городскому развитию (Хабитат III). Программа ООН-Хабитат в Российской Федерации. Европейская экономическая комиссия ООН. 2016. – 34 с. Элект. pec. – URL: [http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Habitat_CIS_cities_Rus_smallweb.\(1\).pdf](http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Habitat_CIS_cities_Rus_smallweb.(1).pdf) (15.11.17)
8. Городское планирование для руководителей городов. Справочник. 2-е изд. / Пабло Ваджионе и др. 2013. – 331 с. Элект. pec. – URL: <http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Hab2015.pdf> (16.11.17).
9. The dynamics of complex urban systems. An interdisciplinary approach / S. Albeverio, et al. (eds.). Berlin, Springer, 2007, 504 p.
10. Яйли Е.А. Научные и прикладные аспекты управления урбанизированными территориями на основе инструмента риска и новых показателей качества окружающей среды. СПб.: РГМУ, ВВМ, 2006. – 448 с.
11. Звягинцева А.В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.В. Аверина. М.: Спектр, 2016. – 257 с.

12. База данных Федеральной службы государственной статистики. Основные показатели городов. Элект. рес. – URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138631758656 (30.10.17).
13. Bliss C. The Method of Probits // Science. 1934. V. 79 no. 2037, pp. 38–39. DOI: 10.1126/science.79.2037.38.
14. Звягинцева А.В. Событийная оценка состояния городов России по комплексу социально-экономических показателей // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Экономика. Информатика, №9(258), вып. 42, 2017. – С. 122 – 132.
15. Звягинцева А.В. Методика событийной оценки и результаты ранжирования городов России по комплексу показателей // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, № 1(10)–2(11), 2016. – С. 157 – 185.
16. Аверин Г.В. Системодинамика. Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с.
17. Звягинцева А.В. Комплексная оценка природно-антропогенных систем: предложения по развитию методологии // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, №1(4)–2(5), 2013. – С. 62 – 74.
18. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Ivashchuk O.A. 2015. Data Intellectual Analysis Means Use for Condition Indicators Assessment of the Territorial and State Formations. Research Journal of Applied Sciences, 10(8): 411 – 414.
19. Звягинцева А.В., Аверин Г.В., Хоруженко А.С. Комплексная оценка состояния и развития городов на основе определения вероятностей характерных событий // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, №3 (15), 2016. – С. 18 – 29.
20. Звягинцева А.В. О вероятностном анализе данных наблюдений о состоянии природно-антропогенных систем в многомерных пространствах // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Экономика. Информатика, №2(223), вып. 37, 2016. – С. 93 – 100.

Звягинцева Анна Викторовна

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладного системного анализа и информационных технологий
E-mail: zviagintseva@bsu.edu.ru, anna_zv@ukr.net

Иващук Ольга Александровна

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород
Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Информационные системы»
E-mail: ivashchuk@bsu.edu.ru, olga.ivashchuk@mail.ru

ZVIAGINTSEVA A.V., IVASCHUK O.A.

**THE TOWN-BUILDING AND SOCIAL-ECONOMIC DEVELOPMENT
RELATIONSHIP IN RUSSIAN CITIES**

The urban development trends identification is an urgent task, since it allows analyzing city-forming and hail-forming processes at certain time intervals. The trends analysis is related to a several cause-and-effect events comprehensive assessment, which may reflect, in the aggregate, the object development direction. This paper is devoted to event-based methods of studying the urban environment by the large Russian cities example, based on the trends analysis as complex joint events that characterize changes in indicative indicators. On the statistical data basis and direct calculation of the observing events probabilities the relationship between Russian cities urban development and socio-economic development is assessed. It is shown how, on the basis of studying events and determining their probabilities, socio-economic objects group behavior can be analyzed.

Keywords: event evaluation, Russian cities, development trends, group behavior analysis.

REFERENCES

1. Sostoyaniye gorodov Rossii / T.D. Belkina i dr. – М.: VINITI, 2010. – 141 s.
2. Kompaniyets V.S. Sotsial'no-ekonomicheskoye sostoyaniye «tipichnykh» munitsipal'nykh obrazovaniy. Metodika kompleksnoy otsenki / V.S. Kompaniyets, M.A. Borovskaya, A.YU. Kazanskaya. – Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 280 s.

3. Better understanding our cities. The role of urban indicators. Lawrence R.J. Paris: Organization for Economic Co-Operation and Development, 1997, 94 p.
4. Urban Indicators Guidelines. Monitoring Habitat Agenda and Millennium Development Goals. United Nations Human Settlements Programme. Kenya, 2004, 68 p. Available at: <https://unhabitat.org/urban-indicators-guidelines-monitoring-the-habitat-agenda-and-the-millennium-development-goals/> (accessed November 5, 2017).
5. World Development Indicators (issued annually). World Bank. Available at: <http://data.worldbank.org/products/wdi> (accessed November 5, 2017).
6. Mezhdunarodnyye rekomendatsii po gorodskomu i territorial'nomu planirovaniyu. Programma OON po nase-lennym punktam (OON-Khabitat). Nayrobi. 2015. – 40 c. Elekt. res. – URL: http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Brochure_IG-UTP_Russian_small.pdf (15.11.17).
7. Regional'nyy doklad regiona sodruzhestva nezavisimyykh gosudarstv «Goroda SNG: put' v ustoychivoye bu-dushcheye» k konferentsii OON po zhil'yu i ustoychivomu gorodskomu razvitiyu (Khabitat III). Programma OON-Khabitat v Rossiyskoy Federatsii. Yevropeyskaya ekonomicheskaya komissiya OON. 2016. – 34 s. Elekt. res. – URL: [http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Habitat_CIS_cities_Rus_smallweb.\(1\).pdf](http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Habitat_CIS_cities_Rus_smallweb.(1).pdf) (15.11.17)
8. Gorodskoye planirovaniye dlya rukovoditeley gorodov. Spravochnik. 2-ye izd. / Pablo Vadzhione i dr. 2013. – 331 s. Elekt. res. – URL: <http://unhabitat.ru/assets/files/publication/Hab2015.pdf> (16.11.17).
9. The dynamics of complex urban systems. An interdisciplinary approach / S. Albeverio, et al. (eds.). Berlin, Springer, 2007, 504 p.
10. Yayli Ye.A. Nauchnyye i prikladnyye aspekty upravleniya urbanizirovannymi territoriyami na osnove in-strumenta riska i novyykh pokazateley kachestva okruzhayushchey sredy. SPb.: RGGMU, VVM, 2006. – 448 s.
11. Zvyagintseva A.V. Veroyatnostnyye metody kompleksnoy otsenki prirodno-antropogennykh sistem / Pod nauch. red. d.t.n., prof. G.V. Averina. M.: Spektr, 2016. – 257 c.
12. Baza dannykh Federal'noy sluzhby gosstatistiki. Osnovnyye pokazateli gorodov. Elekt. res. – URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138631758656 (30.10.17).
13. Bliss C. The Method of Probits // Science. 1934. V. 79 no. 2037, rr. 38–39. DOI: 10.1126/science.79.2037.38.
14. Zvyagintseva A.V. Sobytiynaya otsenka sostoyaniya gorodov Rossii po kompleksu sotsial'no-ekonomicheskikh pokazateley // Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomika. Informatika, №9(258), vyp. 42, 2017. – S. 122 – 132.
15. Zvyagintseva A.V. Metodika sobyitiynoy otsenki i rezul'taty ranzhirovaniya gorodov Rossii po kompleksu pokazateley // Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii v naukach o prirode i obshchestve, № 1(10)–2(11), 2016. – S. 157 – 185.
16. Averin G.V. Sistemodinamika. Donetsk: Donbass, 2014. – 405 s.
17. Zvyagintseva A.V. Kompleksnaya otsenka prirodno-antropogennykh sistem: predlozheniya po razvitiyu metodologii // Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii v naukach o prirode i obshchestve, №1(4)–2(5), 2013. – S. 62 – 74.
18. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Ivashchuk O.A. 2015. Data Intellectual Analysis Means Use for Condition Indicators Assessment of the Territorial and State Formations. Research Journal of Applied Sciences, 10(8): 411 – 414.
19. Zvyagintseva A.V., Averin G.V., Khoruzhenko A.S. Kompleksnaya otsenka sostoyaniya i razvitiya gorodov na osnove opredeleniya veroyatnostey kharakternykh sobytiy // Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii, №3 (15), 2016. – S. 18 – 29.
20. Zvyagintseva A.V. O veroyatnostnom analize dannykh nablyudeniya o sostoyanii prirodno-antropogennykh sistem v mnogomernyykh prostranstvakh // Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Ekonomika. Informatika, №2(223), vyp. 37, 2016. – С. 93 – 100.

Zviagintseva A.V.

Belgorod State National Research University, Belgorod

Candidate of technical science, docent, Senior Researcher, Research Laboratory for Applied Systems Analysis and Information Technology

Email: zviagintseva@bsu.edu.ru, anna_zv@ukr.net

Ivashchuk O.A.

Belgorod State National Research University, Belgorod

Doctor of technical science, docent, professor of Information Systems Department

Email: ivashchuk@bsu.edu.ru

СЫСОЕВА Е.В., ГЕЛЬМАНОВА М.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕЛеной КРОВЛИ В ПОКРЫТИЯХ ЗДАНИЙ ОБЩЕСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Статья посвящена решению задач повышения энергоэффективности, безопасности и экологичности селитебной территории при помощи устройства «зеленой кровли» на покрытиях зданий общественного назначения. В условиях сильной загазованности городов и загрязненности окружающей среды, проблем эффективного использования энергетических ресурсов возникает необходимость в применении экологических и технологических систем как метода решения названных выше задач. Коротко представлена история развития эксплуатируемых зеленых кровель и ее эволюция за последние три десятилетия. Представлены результаты и сравнение теплотехнического расчета зданий общественного назначения в двух возможных вариантах: неэксплуатируемой утепленной кровли и эксплуатируемой «зеленой кровли» для двух реализованных проектов зданий в Москве. Показана целесообразность применения технологии «зеленой кровли» в городах для сохранения климата города, здоровья и длительной трудоспособности горожан.

Ключевые слова: зеленая кровля, энергоэффективность, покрытие зданий, эксплуатируемая кровля.

1. История применения зеленых эксплуатируемых кровель для зданий общественного назначения

Последние три десятилетия наблюдается стремительное нарастание темпов технологического развития и, как следствие, увеличение загрязненности городской среды и вредного воздействия на человека. В связи с этим появилась необходимость в строительстве, нацеленном на принципах экологической устойчивости, безопасности и энергоэффективности, которые лежат в основе устойчивого развития. Это понятие впервые возникло на конференции ООН в Стокгольме в 1972 году, по итогам которой была создана Международная комиссия по окружающей среде и развитию (МКОСР). Введенное комиссией понятие базируется на обеспечении удовлетворения потребностей современного поколения без нанесения вреда последующим поколениям.

Нахождение альтернативных способов получения природных ресурсов и экономия существующих являются глобальными проблемами современного мира.

В России устойчивость определяется запасом природных ресурсов, которые являются ограниченными и возобновляются гораздо медленнее развития технологий, их рациональным использованием и обеспечением достойного качества жизни людей [1].

Как следствие, с 2009 года вопрос рационального энергопотребления становится одним из приоритетных для России. С этого момента появляются федеральные законы [2,3], которые направлены на создание необходимых условий для снижения энергетических расходов к 2020 году на 40%.

Проблема высокого энергетического потребления при эксплуатации зданий и сооружений привела к развитию и совершенствованию энергосберегающих технологий. Одним из возможных путей решения является устройство зеленой кровли в покрытиях зданий общественного назначения [4].

Одним из важных условий создания комфортной городской среды в крупных мегаполисах является восстановление озелененных территорий. За последние 15 лет Москва потеряла 750 га растительности, что приводит к нарушению экологического баланса города и ухудшению качества жизни местного населения.

Обеспеченность зелеными насаждениями селитебной территории для Москвы недостаточна. Причем распределение ее неравномерно — в периферийных районах этот показатель

достигает 50 м/чел., а в центре города всего 1,5-2 м/чел. При общей площади зеленых насаждений в Москве 27,5 тыс. га четвертая их часть сосредоточена в ВАО (25,7 %), а наименьшая - в ЦАО (3,2 %) [5].

Таким образом, задачей современных инженеров и архитекторов является не только проектирование зданий с такими характеристиками, которые позволят сэкономить энергопотребление, но и сохранить потерянные зеленые насаждения на территории строительства или реконструкции для повышения уровня комфортного проживания человека в мегаполисах.

В центральных частях крупных городов процент зданий общественного назначения может достигать 90% и более. Площадь общественных зон примерно составляет 212,19 км² из 1070 км² (общей площади Москвы до расширения территории в 2011г.). При учете транспортных связей, на долю которых приходится около 3% территории (6,37 км²), общая площадь общественных функциональных зон города Москвы снизится до 205,82 км², что составляет 19,24%.

При этом в центральных частях Москвы в пределах Садового кольца площадь, занимаемая общественными зонами, примерно равна 18,2 км² из 18,5 км², а при учете транспортных связей – 17,65 км². Как следствие, концентрация общественных функциональных зон центральной части Москвы достигает 95,40 %, что существенно уменьшает возможность расположения парковых зон.

Интуитивное понимание человека в необходимости сохранения энергетических ресурсов строящихся городов привело к использованию кровель с покрытием из земляного покрова, травы, кустарников и даже деревьев еще в I веке до н.э. Сады Семирамиды, построенные примерно в 600 году до н.э., послужили ярким примером применения растительности на кровле. Еще одним примером использования зеленой кровли был Мавзолей Августа в Риме (28 г. до н.э.), вокруг которого располагалась терраса с выходом на крышу с вечно зелеными кипарисами.

Зеленые крыши стали появляться и в других уголках цивилизации. Например, в Норвегии и в Дании на Фарерских островах еще с древних пор начинают строить крыши, покрытые дерном и цветами (рисунок 1, рисунок 2).



Рисунок 1 - Применение дерновой крыши в конструкции дома, Норвегия

(Источник:

<http://masterok.livejournal.com/1021339.html>)



Рисунок 2 - Применение дерновой крыши в конструкции дома, Дания

(Источник: samonrye.com)

Осознанное использование зеленых кровель началось после введения понятия устойчивого развития и началом работы над нормативной документацией.

В 90-х годах XX столетия были созданы международные системы сертификации энергоэффективных зданий: BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) – метод оценки экологической эффективности зданий, разработанный в 1990 году британской компанией BRE Global и LEED (The Leadership in Energy & Environmental Design) – рейтинговая система оценки объектов зеленого строительства, разработанная Советом по архитектуре и строительству зеленых зданий в США (Green Building Council (USGBC) с 1993 года. Для внедрения экологических систем в строительную отрасль на международный рынок

в 2002г. был создан Всемирный совет по экологическому строительству (World Green Building Council), в который с 2009г. вошёл Российский совет по экологическому строительству (RuGBC).

Примеры с применением технологического решения «зеленая кровля» встречаются во всем мире. Самая большая зеленая кровля в мире площадью более 1 га, засаженная почти 2млн. растений, находится на уникальном здании Калифорнийской Академии наук, построенном к 2008 году (рисунок 3). Кровля имеет множество полезных функций: термо- и звукоизоляцию, сбор дождевой воды и т. д. Уникальность зеленой части этой крыши состоит в особой конструкции покрытия, в которой находится дренажно-накопительный элемент Флорадрейн FD 40, регулирующий отток воды и накапливающий необходимое для растений количество влаги. За свою уникальность и соответствие принципам устойчивого развития зданию Калифорнийской Академии наук присвоили платиновый сертификат «экологической устойчивости» LEED.



а) Главный вид



б) Вид сверху

Рисунок 3 - Зеленая кровля в здании Калифорнийской Академии наук, США, 2008г. (Источник: <http://alt-energy.org.ua/kalifornijskaya-akademiya-nauk-san-francisko-shtat-kaliforniya/>)

Зданием с нулевым потреблением энергии и углеродной нейтральностью является построенный в 2011 году в канадском Ванкувере Посетительский центр ботанического сада VanDusen. Данный центр является образцом использования собственных возобновляемых источников энергии (рисунок 4).



Рисунок 4 - Зеленая кровля Посетительского центра ботанического сада VanDusen, Канада, 2011г. (Источник: <https://archi.ru/projects/world/10316/posetitelskii-centr-botanicheskogo-sada-vandusen>)



Рисунок 5 - Зеленая кровля общественного центра Таюаньцзюй в Чунцине, Китай, 2015г. (Источник: <https://archi.ru/world/66404/arkhitektura-kotoroi-net>)

Еще одним примером использования теплоизоляционных свойств зеленых крыш является здание общественного центра Таюаньцзюй в Чунцине в Китае. Зеленая кровля располагается по периметру всего здания и объединяет друг с другом три объема, отличающиеся между собой разными функциональными характеристиками. Таким образом, помимо энер-

гоэффективности здания создается эстетически и экологически комфортная среда, в которой данная композиция мимикрирует с окружающим пространством (рисунок 5).

2. Теоретические исследования при расчете зеленых кровель зданий общественного назначения

Для сравнительного расчета взяты два типа кровли: интенсивная и экстенсивная (таблица 1) [7].

Таблица 1 - Основные сравнительные характеристики неэксплуатируемых и эксплуатируемых кровель

Сравнительные характеристики	Интенсивная кровля (эксплуатируемая)	Экстенсивная кровля (неэксплуатируемая)
1. Толщина слоя почвы	0,2...0,6 м	0,07...0,15 м
2. Растительность	Растения, деревья, кустарники, корневая система которых должна находиться в пределах заданной по проекту высоты субстрата	Только растения с горизонтальной корневой системой (обусловлено небольшой высотой субстрата)
3. Использование	Предполагается частое пребывание людей на крыше	Предполагается очень редкое пребывание людей на крыше
4. Оградительные конструкции	Парапет высотой не менее 1,2 м	Оградительные конструкции не обязательны
5. Эксплуатация	Высокий уровень обслуживания и ухода	Простота обслуживания и ухода
6. Устройство	Разрабатывается на этапе проектирования здания (требуется расчет по нагрузкам)	Может разрабатываться как на этапе проектирования здания, так и после во время эксплуатации

2.1. Теоретические исследования при расчете «зеленой кровли» здания многофункционального центра по адресу: г. Москва, пересечение Новоясеневского проспекта и Профсоюзной улицы

Используемая в здании многослойная система покрытия №1 представлена слоями: профнастил, пароизоляция Техноколь, минераловатный утеплитель ТЕХНОРУФ Н30 ($\delta=50\text{мм}$), уклонообразующий слой ТЕХНОРУФ Н30 КЛИН ($\delta=40\text{мм}$), плиты теплоизоляционные PIR с типом покрытия фольга ($\delta=50\text{мм}$), полимерная мембрана LOGICROOFV-RP.

После изменения покрытия №1 в многослойную систему покрытия №2 состав слоев будет иметь вид: профнастил, пароизоляция Техноколь, минераловатный утеплитель ТЕХНОРУФ Н30 ($\delta=50\text{мм}$), уклонообразующий слой ТЕХНОРУФ Н30 КЛИН ($\delta=40\text{мм}$), плиты теплоизоляционные PIR с типом покрытия фольга ($\delta=50\text{мм}$), техноэласт ФИКС, техноэласт ГРИН, полиэтиленовая пленка, PLANTER-life, почвенный субстрат ($\delta=300\text{мм}$), растительность.

По результатам сравнительного теплотехнического расчета неэксплуатируемого покрытия №1 и того же покрытия, реорганизованного в неэксплуатируемую «зеленую кровлю» с добавлением новых необходимых слоев и изменением (демонтажом) прежних (покрытие №2) [6], значение приведённого сопротивления теплопередаче покрытия соответствует нормативным требованиям теплозащиты ограждающих конструкций (больше $R_{0,кр}^{mp} = 3,34 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ}{\text{Вт}}$) и с учетом неоднородности слоев и сопротивлений тепловосприятия и теплоотдачи составляет для покрытия №1: $R_{w1}^r = 4,12 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ}{\text{Вт}}$, для покрытия №2 $R_{w2}^r = 4,35 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ}{\text{Вт}}$, что больше величины приведённого сопротивления теплопередаче покрытия №1 [7, 8,]. Следовательно, применение слоя почвенного субстрата с коэффициентом теплопроводности $\lambda_B = 1,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{C}^\circ}$ по технологии

«зеленая кровля» в многослойной системе покрытия привело не только к увеличению приведенного сопротивления на $0,23 \frac{m^2 \cdot C^{\circ}}{Bm}$, но и увеличению энергоэффективности здания на 5,6%.

2.2. Теоретические исследования при расчете «зеленой кровли» здания центра подготовки специалистов по адресу: г. Тула, Щегловская засека, 59

Крыша в здании запроектирована плоская, перекрывается балочными и ферменными металлическими конструкциями.

Покрытие кровли №3 состоит из слоев: балочные (ферменные) металлоконструкции покрытия с уклоном, монолитная ж/б плита из бетона класса В25 по профнастилу Н75-750-0,8 ($\delta=150$ мм), пароизоляция из полиэтиленовой пленки, минераловатный утеплитель Rockwool ($\delta=200$ мм), пароизоляция из армированной полиэтиленовой пленки, армированная цементно-песчаная стяжка по уклону ($\delta=50$ мм), слой гидроизоляции «Унифлекс».

После реорганизации покрытия №3 покрытие №4 будет состоять из следующих слоев: балочные (ферменные) металлоконструкции покрытия с уклоном, монолитная ж/б плита из бетона класса В25 по профнастилу Н75-750-0,8 ($\delta=150$ мм), пароизоляция из полиэтиленовой пленки, минераловатный утеплитель Rockwool ($\delta=200$ мм), техноэласт ФИКС, техноэласт ГРИН, полиэтиленовая пленка, PLANTER-life, почвенный субстрат ($\delta=200$ мм), растительность.

Коэффициент теплопроводности слоя λ для г. Тулы принимался исходя из условий эксплуатации ограждающих конструкций по типу Б (нормальная зона влажности и нормальный влажностный режим помещений).

Исходя из результатов сравнительного теплотехнического расчета неэксплуатируемого покрытия №3 и того же покрытия, реорганизованного в неэксплуатируемую «зеленую кровлю» (покрытие №4), видно, что приведенное сопротивление теплопередаче (с учетом неоднородности слоев и сопротивлений тепловосприятия и теплоотдачи) покрытия №4 больше, чем в покрытии №3 $R_{w4}^r = 4,29 \frac{m^2 \cdot C^{\circ}}{Bm} > R_{w3}^r = 4,07 \frac{m^2 \cdot C^{\circ}}{Bm}$, т.е. увеличение приведенного сопротивления теплопередаче составляет $0,22 \frac{m^2 \cdot C^{\circ}}{Bm}$, что соответствует 5,4%. Это говорит об эффективности применения технологии "зеленая кровля" для покрытия зданий общественного назначения.

Таким образом, можно выявить определенную зависимость в покрытиях зданий при устройстве «зеленой кровли»: при увеличении толщины почвенного слоя наблюдается увеличение численного значения приведённого сопротивления теплопередаче, т.е. увеличивается теплозащита здания. Следовательно, при рассмотрении эксплуатируемой зеленой кровли значение приведенного сопротивления теплопередаче будет гораздо выше, чем в неэксплуатируемой зеленой кровле из-за требуемой большей толщины субстрата ($0,2-0,6$ м $>$ $0,07-0,15$ м). При использовании зеленой кровли возможно снижение экономических затрат в случае уменьшения толщины утеплителя.

Сравнив результаты расчетов для покрытий на двух описанных выше примерах, можно сделать вывод, что реорганизация многослойной конструкции покрытия в «зеленую кровлю» позволяет увеличить сопротивление теплопередаче более, чем на 5 % в зависимости от состава и теплотехнических свойств первоначальных слоев покрытия зданий общественного назначения, что приводит к увеличению энергоэффективности здания и снижению экономических затрат благодаря уменьшению толщины утеплителя.

Выводы

Использование зеленых кровель позволяет:

1. Увеличить энергоэффективность здания, что приведет к уменьшению затрат на отопление здания благодаря дополнительному утеплению кровель и стен.

Власти Чикаго подсчитали, что «если озеленить все крыши в городе, где позволяет конструкция зданий, то это приносило бы в городской бюджет около 100 млн. долларов в год благодаря экономии электроэнергии в размере около 720 млн. В».

2. Увеличить возможную площадь для эксплуатации покрытий зданий, т.е. увеличить процент возможного использования площади покрытий для Москвы по общественным зданиям (плоские кровли – как эксплуатируемые, остальные – зеленые неэксплуатируемые).

3. Увеличить пространство с зелеными насаждениями, что сохранит экологическое состояние (абсорбирование вредных веществ, восстановление баланса влажности атмосферы) и кислородный баланс города (поглощение углекислого газа, выделение кислорода).

4. Даже при холодном климате Москвы и Санкт-Петербурга возможно применение устойчивых к холодам многолетних растений (почво-покровные, рулонные газоны и летники, низкорослые кустарники и даже низкорослые деревья).

5. Увеличить пространство для пребывания на открытом воздухе во время посещения торговых, досуговых и многофункциональных центров.

6. Численность птиц может увеличиться благодаря восстановленному зеленому покрову с достаточной площадью, что приведет к возвращению птиц в города. Пример: численность черной горихвостки (редкий вид птиц) восстановлена благодаря созданию зеленых крыш в Лондоне конце 1970-х годов [10].

7. Уменьшить температуру воздуха на поверхности кровли [9].

8. Создать акустический барьер от транспортного шума.

9. Улучшить психологическое состояние населения мегаполиса [10].

10. Улучшить здоровье человека в крупных городах, что приведет к увеличению продолжительности жизни и увеличит трудоспособный возраст горожан [11].

По итогам приведенного анализа можно сделать вывод об эффективности и целесообразности применения технологии «зеленая кровля» в покрытиях зданий общественного назначения в мегаполисах [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека / В.А. Ильичев, С.Г., Емельянов, В.И. Колчунов, В.А. Гордон, Н.В. Бакаева. - М.: АСВ, 2015. – 184 с.
2. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261-ФЗ.
3. Федеральный закон "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" от 30.12.2009 N 384-ФЗ.
4. Копылова А.И. Энергетическая эффективность здания с применением технологии «зеленая кровля» / Копылова А.И., Богомолова А.К., Немова Д.В. // «Строительство уникальных зданий и сооружений».- 2016.-10 (49).- с. 20-34.
5. Анализ динамики сокращения зеленых насаждений в г. Москва на основе данных дистанционного зондирования. М.: Greenpace, 2014. – 8 с.
6. Руководство по проектированию и устройству эксплуатируемых кровель с зелеными насаждениями с применением материала с усиленной защитой от прорастания корневых систем растений Техноэласт ГРИН производства Компании ТехноНИКОЛЬ разработано ООО ТехноНИКОЛЬ.М., 2004, http://www.infosait.ru/norma_doc/54/54681/
7. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная версия. СНиП 23-01-99*. М., 2012. с. 184.
8. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М., 2013. с. 100.
9. Karachaliou P., Santamouris M., Pangalou H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. «Energy and Buildings», 2016. - Vol.114. Pp. 256-264.
10. Российская академия наук. Изменение окружающей среды и климата: Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Главный редактор, академик Н.П. Лавёров. Москва, ИГЕМ РАН, 2007.

11. Ильичев В.А. Может ли город быть биосферосовместимым и развивать человека? «Архитектура и строительство Москвы». – 2009.-№ 2. с.8-13.
12. <http://greenevolution.ru/2014/10/01/vertikalnye-zelenye-sady-v-avstralii/>

Сысоева Елена Владимировна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ)
Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений
E-mail: sev4279@yandex.ru

Гельманова Маргарита Олеговна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ)
магистрант 2 года обучения, кафедра проектирования зданий и сооружений,
E-mail: margo.gelmanova@yandex.ru

SYSOEVA E.V., GELMANOVA M.O.

**PRINCIPLES OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT WHEN DESIGNING
«GREEN ROOF» ON PUBLIC BUILDINGS ROOFS**

The article is devoted to solve problems of energy efficiency, ecological safety with the using of green roof on the surface of public buildings. In conditions of strong pollution in cities and environmental pollution, problems of efficient use of energy resources there is great necessity of an application of environmental and technological systems arises as a method of solving these problems. Briefly the history of exploited green roofs and its evolution over the last three decades is presented. The results and comparison of thermal analysis of buildings for public use in two options: cold-insulated roof and operated "green roofs" for two completed projects of buildings in Moscow are presented. The article presents a comparative thermal computation of community building roofs in two options: an insulated unexploited roof and an exploited green roof. The expediency of application of "green roofs" technology in cities for preserving stability climate of the city for health and long-term employability of citizens is shown..

Keywords: green roof, energy efficiency, community building roof, operated roof.

REFERENCES

1. Principi preobrazovaniya goroda v biosferosovmestimii i razvivayuschii cheloveka/ V. A. Il'ichev, S. G. Emelyanov, V.I. Kolchunov, V. A. Gordon, N. V. Bakaeva. –M.: ASV, 2015, s. 192.
2. Federal'nyj zakon "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii" ot 23.11.2009 N 261-FZ.
3. Federal'nyj zakon "Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij" ot 30.12.2009 N 384-FZ.
4. Kopylova A.I. Energeticheskaya effektivnost' zdaniya s primeneniem tekhnologii «zelenaya krovlya»/ Kopylova A.I. Bogomolova A.K., Nemova D.V. // «Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij». - 2016.-10 (49), s. 20-34.
5. Analiz dinamiki sokrashcheniya zelenyh nasazhdenij v g. Moskva na osnove dannyh distancionnogo zondirovaniya. M.: Greenpace, 2014. – 8 s.
6. Rukovodstvo po proektirovaniyu i ustrojstvu ekspluatiruemyh krovel' s zelenymi nasazhdeniyami s primeneniem materiala s usilennoj zashchitoy ot prorastaniya kornevyh sistem rastenij Tekhnoehlast GRIN proizvodstva Kompanii TekhnoNIKOL' razrabotano OOO TekhnoNIKOL', 2004. Internet-resurs: http://www.infosait.ru/norma_doc/54/54681/
7. SP 131.13330.2012 Stroitel'naya klimatologiya. Aktualizirovannay redaktsiy. SNiP 23-01-99*. M., 2012. s. 184.
8. SP 50.13330.2012 Teplovaya zashchita zdaniy. . Aktualizirovannay redaktsiy. SNiP 23-02-2003. M., 2013. s. 100.
9. Karachaliou P., Santamouris M., Pangalou H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. «Energy and Buildings», 2016. - Vol.114. Pp. 256-264.

10. Rossiiskaya akademiya nauk. Izmenenie okrujayuschei sredi i klimata: Prirodnie i svyazannie s nimi tehnoennie katastrofi. Glavnii redactor, akademik N.P. Laverov. Moskva_ IGEM RAN, 2007.
11. Il'ichev V.A. Mozhet li gorod byt' biosferosovmestimym i razvivat' cheloveka? «Arhitektura i stroitel'stvo Moskvy». – 2009.-№ 2. с.8-13.
12. <http://greenevolution.ru/2014/10/01/vertikalnye-zelenye-sady-v-avstralii/>

Sysoeva E.V.

Federal state budget educational institution of higher education «Moscow State University of civil engineering (National Research University)" (NIU MGSU)
Ph.D, Associate Professor of Department of civil and structural design,
E-mail: sev4279@yandex.ru

Gelmanova M.O.

Federal state budget educational institution of higher education «Moscow State University of civil engineering (National Research University)" (NIUMGSU)
master student of the 2d year of training, Department of civil and structural design,
E-mail: margo.gelmanova@yandex.ru

УДК 666.635.017

АБДРАХИМОВА Е.С., РОЩУПКИНА И.Ю., АБДРАХИМОВ В.З.,
КАЙРАКБАЕВ А.К., КОЛПАКОВ А.В.

ВЛИЯНИЕ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НА СТРУКТУРУ ПОРИСТОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Интерес к теплоизоляционным материалам, теплопроводность которых не более 0,25 Вт/(м·°С), в первую очередь связан с изменением нормативов по теплотехническим параметрам к ограждающим конструкциям. Производство и потребление таких теплоизоляционных материалов в России гораздо меньше, чем в странах Европы и Северной Америке, не смотря на то, что там во многих странах климат гораздо мягче. Теплоизоляционные материалы должны обладать повышенной пористостью.

Наличие пор изометрической формы и овальной закрытой пористости в теплоизоляционных материалах придают им механическую прочность, а наличие щелевидных пор предполагают неполное завершение процессов спекания. Разработаны инновационные предложения по использованию отходов углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов, новизна которых подтверждена 4 Патентами РФ.

Ключевые слова: пористость, теплоизоляционный материал, отходы топливно-энергетического комплекса.

Введение

Пористость. Структура керамических материалов определяется взаимоотношением твердой части и пор. Изучению пористости посвящено значительное число исследований в различных областях науки и промышленного производства. Однако вопросы формирования пористости и её конечной структуры в изделиях строительной керамики изучены недостаточно [1, 2].

На международной конференции по керамике в Оксфорде в 1961 г. предложено количественное соотношение зерен (кристаллитов) и пор, степень и характер их распределения в керамике назвать текстурой.

Керамические материалы и изделия класса пористой керамики должны обладать повышенной пористостью (обычно более 30%), которую, как правило, создают преднамеренно [3]. Поры могут занимать от нуля до 90% общего объема изделий. Из всего многообразия характеристик структуры материала одним из наиболее важных являются количественные значения показателей, характеризующих поровую структуру материала [4].

Из всего многообразия характеристик структуры материала одним из наиболее важных являются количественные значения показателей, характеризующих поровую структуру материала. Для характеристики порового пространства керамики были введены и наиболее часто применяют следующие понятия: общая пористость, открытая и закрытая пористость, капиллярная и проницаемая пористость, эффективная и канальная пористость, фактор лабиринта и фактор структуры, величина пор и их распределение по размерам, средний размер пор, удельная поверхность, газопроницаемость, водопроницаемость. Из указанных характеристик важнейшими являются пористость, форма и размер пор. Размер пор в керамических материалах изменяется в широких пределах от долей нанометров до нескольких миллиметров. Форма пор сложна и весьма разнообразна: закрытые, открытые проницаемые, открытые тупиковые. В керамике различного назначения роль строения неодинаковы.

На основе исследования пористости керамических материалов разработаны различные классификации пор и пористости, основанные на различных признаках и свойствах пористых структур. Создание единой классификации пор и пористости для различных пористых материалов и сред связано со значительными трудностями, поэтому общепризнанной классификации до настоящего времени нет.

Отходы топливно-энергетического комплекса. Топливо-электроэнергетический комплекс является одним из основных «загрязнителей» окружающей природной среды [5-7]. Это выбросы в атмосферу (48% всех выбросов в атмосферу), сбросы сточных вод (36% всех сбросов), а также образование твердых отходов (30% всех твердых загрязнителей). Ухудшение экологической обстановки небезосновательно связано с загрязнением атмосферы.

Длительное хранение отходов теплоэнергетики в золоотвалах способствуют вредным веществам и ионам тяжелых металлов попаданию в воду и почву. Антропогенная составляющая формирования качества поверхности вод уже соизмерима с природной составляющей, что представляет угрозу устойчивому водопользованию. Совершенно очевидно, что нужно снижать антропогенную нагрузку посредством внедрения региональных нормативов, изменения платы за загрязнения водных объектов и использование отходов энергетики в производстве строительных материалов.

В отходах топливно-энергетического комплекса ТЭС содержатся значительное количество металлов и их соединений. При пересчете на смертельные дозы в годовых выбросах, например, ТЭС мощностью 1 млн. кВт содержится алюминия и его соединений свыше 100 млн. доз, железа — 400 млн. доз, магния — 1,5 млн. доз. Летальный эффект этих загрязнителей не проявляется только потому, что они попадают в организмы в незначительных количествах. Это, однако, не исключает их отрицательного влияния через воду, почвы и другие звенья экосистем.

Одним из наиболее перспективных направлений по использованию отходов топливно-энергетического комплекса является — вовлечение их во вторичный оборот в качестве вторичных материальных или энергетических ресурсов [7-10]. За счет вовлечения промышленных отходов, возможно, кардинально изменить параметры сырьевой базы России. Использование техногенного сырья в производстве теплоизоляционных материалов способствует также снижению экологической напряженности в регионах.

Теплоизоляционные материалы. Интерес к теплоизоляционным материалам, теплопроводность которых не более $0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, в первую очередь связан с изменением нормативов по теплотехническим параметрам к ограждающим конструкциям. Производство и потребление таких теплоизоляционных материалов в России гораздо меньше, чем в странах Европы и Северной Америке, не смотря на то, что там во многих странах климат гораздо мягче.

Кроме того, использование теплоизоляционных материалов способствует сокращению потерь тепла в отапливаемых зданиях значительно уменьшает расход топлива, что особенно актуально в настоящее время.

В настоящее время в теплоснабжении России около третьей части составляют потери. В России на отопление жилой площади расходуется в 2–3 раза больше энергии, чем в странах Европы. Так, на индивидуальные дома в России расходуется от 600 до 800 кВт/(м²·год), в Германии – 250 кВт/(м²·год), в Швеции – 139 кВт/(м²·год).

Цели работы: а) получение теплоизоляционных материалов на основе отходов топливно-энергетического комплекса без применения природных традиционных материалов; б) исследование структуры пористости изделий.

Экспериментальная часть

Сырьевые материалы. Для получения теплоизоляционных материалов в качестве глинистого компонента использовалась межсланцевая глина (МГ). МГ - является отходом горючих сланцев, и образуется при добыче горючих сланцев на сланцеперерабатывающих заводах

(на шахтах). Химический состав МГ представлен в табл. 1, фракционный состав в табл. 2, а технологические свойства в табл. 3.

Таблица 1 - Химический состав компонентов

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	П.п.п.
1. МГ	45-47	13-14	5-6	11-13	2-3	3-4	9-20
2. К1	53-54	18-19	6-7	1-2	0.3-0.7	4-5	16-17
3. К2	35-36	14-15	5-6	1-2	1-1,5	1-1,5	33-34
4. К3	54-55	16-17	3-4	5-6	1.5-2	3-4	19-20
5. К4	43-44	17-18.5	5-6	3-4	2-3	2-3	13-14
Примечание: п.п.п. – потери при прокаливании; R ₂ O=Na ₂ O+K ₂ O							

В качестве отощителей и выгорающих добавок для производства теплоизоляционных материалов использовались отходы углеобогащения: К1 – отходы флотации углеобогащения фабрики (ГОФ, Кемеровская область) «Томусинская»; К2 – угольные шламы флотационного углеобогащения (ЦОВ, Ростовская область) «Обуховская»; К3 – отходы углеобогащения (ЦОФ, Новокузнецк) «Абашевская»; К4 – отходы углеобогащения (ЦОФ, Челябинская область) «Коркинский разрез». Химические составы исследуемых отощителей и выгорающих добавок представлены в табл. 1, фракционные составы в табл. 2, а технологические свойства в табл. 3.

Таблица 2 – Фракционный состав компонентов

Компонент	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0.063	0.063-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.0001
1. МГ	5	7	12	14	62
2. К1	35	27.1	6.7	12.8	18.4
3. К2	37.8	24.2	7.1	13.2	17.7
4. К3	52.1	9.8	8.5	12.8	16.8
5. К4	38.8	27.1	8.2	11.3	14.6

Таблица 3 – Технологические показатели компонентов

Компонент	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °С		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1. МГ	1100	1260	1290	1320
2. К1	2700	1220	1260	1300
3. К2	2800	1250	1300	1350
4. К3	2500	1260	1300	1320
5. К4	1800	1230	1270	1300

Разработаны инновационные предложения по использованию отходов углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов, новизна которых подтверждена 4 Патентами РФ [11-14].

Отходы топливно-энергетического комплекса с повышенной теплотворной способностью (>1500 ккал/кг, табл. 3) целесообразно использовать в качестве выгорающих добавок в производстве теплоизоляционных материалов. К группе выгорающих добавок относятся раз-

личные виды твердого топлива, в частности антрацит, коксовая мелочь и др. Их вводят в состав шихты до 3-5% по объему, т.е. до 60-80% от общей потребности топлива на обжиг изделий.

Получение теплоизоляционных материалов. Керамическую массу готовили пластическим способом при влажности 18-22 %, из которой формовали кирпичи размером 250x120x65 мм. Высушенные кирпичи до остаточной влажности не более 5 % обжигались в интервале температуре 1000-1050°C. При содержании в отходах топливно-энергетического комплекса органики 20-30% положительный эффект достигается добавкой в шихту не более 30% отходов углеобогащения. В этих случаях исследуемые отходы способны заменить вводимый в шихту уголь, создавать восстановительную среду в толще обжигаемого материала и при достаточном количестве в компонентах оксидов железа (> 3% Fe₂O₃) перевести оксиды в закисные соединения, что способствует интенсификации процесса обжига. В табл. 4 приведены составы керамических масс, а в табл. 5 — физико-механические свойства теплоизоляционных материалов при температуре обжига – 1000°C.

Таблица 4 - Составы керамических масс

Компонент	Содержание компонентов, мас. %			
	1	2	3	4
1. МГ	70	70	70	70
2. К1	30	--	--	---
3. К2	--	30	--	--
4. К3	--	--	30	--
5.К4	--	--	--	30

Таблица 5 - Физико-механические показатели ККТМ

Показатели	Составы			
	1	2	3	4
1. Предел прочности при сжатии, МПа	11,8	11,4	12,6	13,2
2. Предел прочности при изгибе, МПа	2,7	2,6	2,9	3,1
3. Пористость %				
а) открытая	42,4	45,7	40,8	38,4
б) закрытая	4,8	5,2	4,2	3,3
в) общая	47,2	50,9	45	41,7
4. Морозостойкость, циклы	28	27	31	34
5. Усадка, %	7,3	7,4	7,5	7,3
6. Термостойкость, теплосмены	2	3	2	2
7. Плотность, кг/см ³	1140	1130	1180	1250
8. Теплопроводность, Вт/(м·°C)	0,19	0,18	0,20	0,23

Теплоизоляционный материал подразделяют в зависимости от плотности на три класса: А — от 700 до 1000 кг/м³; Б — от 1000 до 1300 кг/м³; В от 1300 до 1450 кг/м³. Как видно из табл. 5 все составы теплоизоляционного материала относятся к классу Б.

Согласно ГОСТа 530-2007 «Кирпич и камень керамические. Общие условия» теплотехнические характеристики изделий оцениваются по коэффициенту теплопроводности в сухом состоянии λ Вт/(м °C): до 0,20 — группа высокой эффективности; свыше 0,20 до 0,24 — группа повышенной эффективности; свыше 0,24 до 0,36 — группа эффективные; свыше 0,36 до 0,46 — группа условно-эффективные; свыше 0,46 — группа малоэффективные (обычные). Как видно из табл. 5, полученные ККТМ составов 1-4 по теплотехническим характеристикам относятся к

различным группам: составы: 1 и 2 — к группе высокой эффективности, 3 и 4 — к группе повышенной эффективности.

Основной показатель теплоизоляционных материалов — это теплопроводность [15-17]. **Теплопроводность** — это перенос тепла за счет движения молекул. Теплоизоляционные материалы замедляют движение молекул. Но остановить это движение совсем невозможно. Наилучший коэффициент теплопроводности — это теплопроводность сухого воздуха (неподвижного) составляет 0,023 Вт/(м•С), другими словами молекулы медленнее всего движутся в сухом воздухе. Поэтому, при производстве строительных материалов используют основной принцип — удержание воздуха в порах или ячейках материала. И, следовательно, чем ниже коэффициент теплопроводности — тем лучше теплоизоляция. Так что, как правило, теплоизоляционные материалы - это правильно упакованный воздух. Если взять какое-либо высокопористое тело с мелкими и замкнутыми порами и детально рассмотреть его структуру под микроскопом, то мы увидим множество воздушных мешочков, отгороженных друг от друга тонкой вещественной стеночкой. Совокупность таких мешочков, содержащих малотеплопроводный воздух, создает преграду на пути следования тепла или холода и делает весь материал в целом малотеплопроводным. Для лучших изоляционных свойств материала желательно, чтобы на пути теплового потока через материал в нем имелось как можно больше таких воздушных мешочков, а тонкие ограничивающие их стенки располагались сотообразно. Крупнопористое, раковинистое строение материала с вытянутыми порами создает условия для возникновения конвекционных потоков воздуха, что вызывает усиление передачи тепла через материал. Чем меньше объем воздуха, заключенного в порах, тем меньше его подвижность и тем лучшими изолирующими свойствами он обладает.

Для исследования структуры пористости образцов был использован метод растровой микроскопии. На сканирующем микроскопе JEOL-6390A, который применяется для наблюдения и фотографирования микрорельефа поверхности в режиме вторичных электронов. Микроструктура образцов, обожженных при температуре 1000°C представлена на рисунке 1.

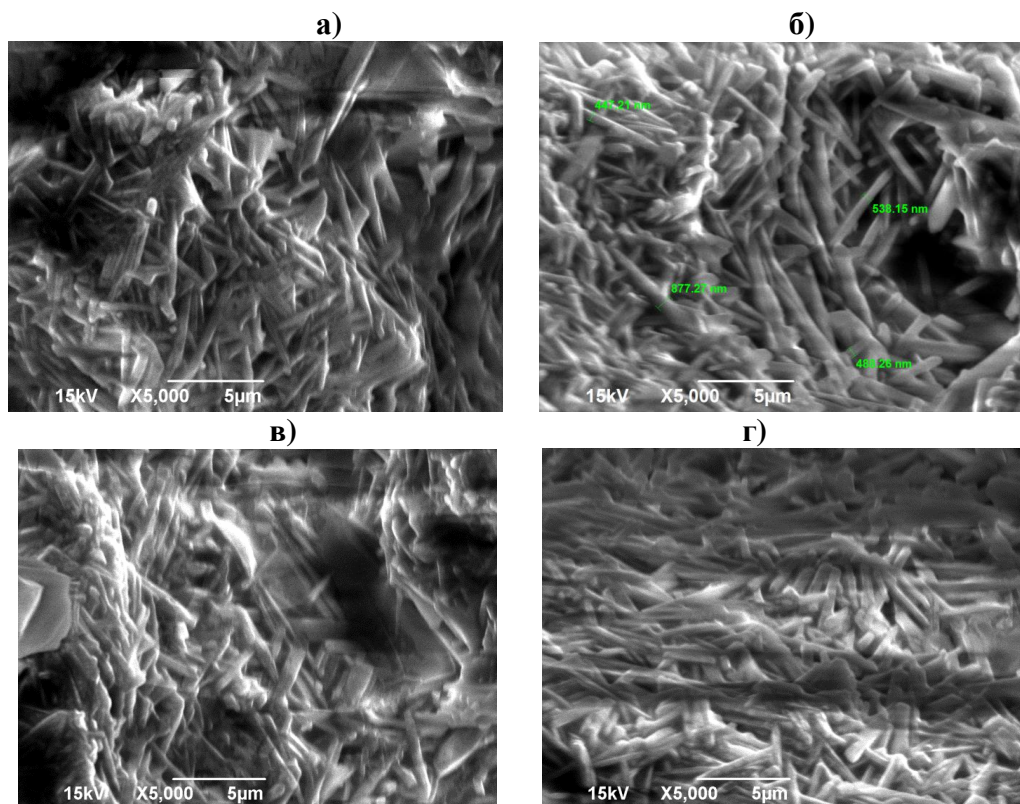


Рисунок 1 – Микроструктура образцов составов: 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г); а, б, в, г x5000

Как видно из рисунка 1, сам материал (стенки ячеек или волокна) занимает минимум места, главная их задача «задержать» воздух. В исследуемых образцах, как и во многих керамических материалах, чаще все встречаются поры трех типов: щелевидные, изометрические и поры, используя терминологию автора работы [18], причудливой формы. Кроме того, в образцах состава №2 (см. рис. б) присутствуют сравнительно крупные поры (до 40 мкм) овальной формы и изометричные поры типа «каналов». Именно эти поры, как считает профессор В.Ф. Павлов [18] определяют водопоглощение керамических материалов. Состав №2 считается оптимальным (табл. 5) по физико-механическим показателям теплоизоляционного материала.

В образцах состава №4 имеют место - изолированные изометрические иногда овальные поры размером 3-10 мкм (см. рисунок 1, д). Узкие щелевидные поры и группы соединяющих пор весьма причудливой формы встречаются также в образцах состава №3 (см. рисунок 1, в). Наличие пор изометричной формы и овальной закрытой пористости в керамических материалах придают им механическую прочность.

Изометрические закрытые поры присутствуют в образцах составов №1-4, но их значение в общей пористости структуры сравнительно невелико. Щелевидные поры, как правило, узкие (2-5 мкм), обычно изогнутые, серповидные, но иногда прямолинейные чаще встречаются в составе №3 (см. рисунок 1, в). Наличие пор и, следовательно, неоднородности материала, неблагоприятно сказываются на свойствах керамических изделий, причем вредное влияние на механическую прочность вытянутых (щелевидных) пор оценивается приблизительно в 5 раз больше, чем округлых [18]. Кроме этого, наличие щелевидных пор предполагает неполное завершение процессов спекания.

При выгорании добавок в межпоровых перегородках образуются микротрещины, которые играют роль компенсаторов напряжений, возникающих при циклическом нагревании охлаждении материалов во время их службы в конструкции, в результате чего несколько увеличивается термическая стойкость изделий. Основным недостатком способа выгорающих добавок является ограничение верхнего предела пористости 65%. Это объясняется тем, что традиционные выгорающие добавки (древесные опилки, антрацит и др.) образуют после выгорания поры неправильной формы, создающие в материале, при его нагружении, высокие напряжения. Поэтому прочность изделий падает при увеличении количества добавок и не обеспечивает заданных механических характеристик материала.

ВЫВОДЫ

Таким образом, исследуемые отходы топливно-энергетического комплекса имеют повышенную теплотворную способность, поэтому их целесообразно использовать не только в качестве отощителей, но и в качестве выгорающих добавок, что позволит исключить использование в составах керамических масс антрацит, коксовую мелочь и др.

На основе исследования пористости керамических материалов разработаны различные классификации пор и пористости, основанные на различных признаках и свойствах пористых структур. Создание единой классификации пор и пористости для различных пористых материалов и сред связано со значительными трудностями, поэтому общепризнанной классификации до настоящего времени нет.

Наличие пор и, следовательно, неоднородности материала, неблагоприятно сказываются на свойствах керамических изделий, причем вредное влияние на механическую прочность вытянутых (щелевидных) пор оценивается приблизительно в 5 раз больше, чем округлых. Кроме этого, наличие щелевидных пор предполагает неполное завершение процессов спекания.

Полученные в образцах поры изометрической формы и овальной закрытой пористости не снижают им механическую прочность, а наличие щелевидных пор предполагает неполное завершение процессов спекания. На разработанные составы по использованию отходов углеобогащения в производстве теплоизоляционных материалов получены 4 Патентами РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахимов, В.З. Взаимосвязь пористо-капиллярной структуры и морозостойкости керамических материалов / В.З. Абдрахимов, Е.С. Абдрахимова, М.П. Зелинг // *Материаловедение*. -2005. -№6. – С 19-24.
2. Абдрахимова, Е.С. Влияние усадочных напряжений при формировании водонепроницаемой структуры кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // *Огнеупоры и техническая керамика*. - 2004. -№10. –С. 29-31.
3. Гузман И.Я. Химическая технология керамики. / И.Я. Гузман. - М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. - 496 с.
4. Сенина, М.О. Пористый керамический материал со слоистой структурой / М.О. Сенина, А.И. Захарова // *Успехи в химии и химической технологии*. - 2014. - Т. 23. - №8. - С. 80-82.
5. Сайбулатов, С.Ж. Золокерамические стеновые материалы / С.Ж. Сайбулатов, С.Т. Сулейменов, А.В. Ралко. - Алма-Ата: Наука. 1982. 292 с.
6. Сулейменов С.Т. Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалов и минеральных отходов промышленности. - М: Моноскрипт, 1996. - 298 с.
7. Сайбулатов С.Ж. Исследование влияния состава зол на фазовые превращения в золокерамики / С.Ж. Сайбулатов // *Комплексное использование минерального сырья*. - 1985. - №11. - С 78-81.
8. Самусева М.Н. Золошлаковые материалы – альтернатива природным материалам / М.Н. Самусева, Т.И. Шишелова // *Современные проблемы науки и образования*. - 2009. - № 2. - С. 24-28.
9. Мальчик А.Г. Изучение золошлаковых отходов для использования в качестве вторичных ресурсов / А.Г. Мальчик, С.В. Литовкин // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. - 2015. - № 9-1. - С. 23-27.
10. Путилин Е.И. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков // *Автомобильные дороги и мосты: Обзорная информация*. -2003. - Вып. 5. - С. 1-60.
11. Денисов Д.Ю., Ковков И.В., Абдрахимов В.З., Журавель Л.В. Композиция для производства пористого заполнителя: Пат. 2362749. С1 С04В 14/24. заявл. 13.12.2007. // Оpubл. 27.07.2009. Бюл. №21.
12. Абдрахимов В.З., Семенычев В.К., Куликов В.А., Абдрахимова Е.С. Способ получения пористого заполнителя. Пат. 2426710. С1 С04В 38/06, 33/132. заявл. 27.04.2010. // Оpubл. 20.08.2011. Бюл. №23.
13. Абдрахимова Е.С., Рощупкина И.Ю., Абдрахимов В.З., Куликова В.А. Композиция для производства пористого заполнителя. Пат. 2440312. С1 С04В 14/24. заявл. 31.05.2010. // Оpubл. 20.01.2012. Бюл. №2.
14. Абдрахимов В.З., Семенычев В.К., Куликов В.А., Абдрахимова Е.С., Вдовина Е.В. Способ получения водостойкого пористого заполнителя. Пат. 2476394. С1 С04В 14/24. заявл. 29.06.2011. // Оpubл. 27.02.2013. Бюл. №6.
15. Августиник А.И. Керамика / А.И. Августиник. Л.: Лениздат. 1975. 591 с.
16. Будников П.П. Химическая технология керамики и огнеупоров / П.П. Будников, Д.Н. Полубоярнов. - М.: Стройиздат. - 1972. - 551 с.
17. Закиров Т.Р. О кислотном воздействии на пористую среду / Т.Р. Закиров, А.И. Никифоров // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. - 2014. - № 9 - С. 45-49;
18. Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. / В.Ф. Павлов М.: Стройиздат. -1977. - 240 с.

Абдрахимова Елена Сергеевна

Самарский национальный исследовательский университет, г. Самара
Доцент, кандидат технических наук, доцент.
E-mail: 3375892@mail.ru

Рощупкина Ирина Юрьевна

Самарский национальный исследовательский университет, г. Самара
Доцент, кандидат химических наук.

Абдрахимов Владимир Закирович

Самарский государственный экономический университет, г. Самара
Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение»
E-mail: 3375892@mail.ru

Кайракбаев Аят Крымович

Актюбинский университет им. С. Баишева, г. Актюбе, Казахстан
Профессор, кандидат физико-математических наук.
E-mail: kairak@mail.ru

Колпаков Александр Викторович

Самарский государственный экономический университет, г. Самара
старший преподаватель

ABDRAKHIMOVA E. S., ROSHCHUPKINA I. YU., ABDRAKHIMOV V. Z.,
KAYRAKBAEV A. K., KOLPAKOV A. V.

THE IMPACT OF FUEL CONTAINING WASTES ON THE STRUCTURE AND POROSITY OF THE INSULATING MATERIAL

Interest in insulation materials with heat conductivity not more than 0.25 W/(m°C), primarily associated with changes in the standards for thermo-technical parameters for walling. Production and consumption of such thermal insulation materials in Russia is much less than in Europe and North America, despite the fact that in many countries the climate is much milder. Heat-insulating materials should have high porosity.

The presence of pores isometric and oval shape of the closed porosity in the insulation materials give them mechanical strength, and the presence of slit-like pores involves the incomplete completion of the sintering process. Innovative proposals on the use of carbon-rich waste in the production of heat-insulating materials, the novelty of which is confirmed by 4 Patents of the Russian Federation, have been developed.

Key words: porosity, heat-insulating material, waste of fuel and energy complex.

REFERENCES

1. Abdrakhimov, V.Z. Vzaimosvyaz' poristo-kapillyarnoy struktury i morozostoykosti keramicheskikh materialov / V.Z. Abdrakhimov, Ye.S. Abdrakhimova, M.P. Zeling // Materialovedeniye. -2005. -№6. – S 19-24.
2. Abdrakhimova, Ye.S. Vliyaniye usadochnykh napryazheniy pri formirovaniy vodonepronitsayemoy struktury kislotouporov / Ye.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Ogneupory i tekhnicheskaya keramika. - 2004. -№10. –S. 29-31.
3. Guzman I.YA. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki. / I.YA. Guzman. - M.: OOO RIF «Stroymaterialy», 2003. - 496 s.
4. Senina, M.O. Poristy keramicheskiy material so sloistoy strukturoy / M.O. Senina, A.I. Zakharova // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. - 2014. - T. 23. - №8. - S. 80-82.
5. Saybulatov, S.ZH. Zolokeramicheskiye stenovyye materialy / S.ZH. Saybulatov, S.T. Suleymenov, A.V. Ralko. - Alma-Ata: Nauka. 1982. 292 s.
6. Suleymenov S.T. Fiziko-khimicheskiye protsessy strukturoobrazovaniya v stroitel'nykh materialov i mineral'nykh otkhodov promyshlennosti. - M: Monuskript, 1996. - 298 s.
7. Saybulatov S.ZH. Issledovaniye vliyaniya sostava zol na fazovyye prevrashcheniya v zolokeramiki / S.ZH. Saybulatov // Kompleksnoye ispol'zovaniye mineral'nogo syr'ya. - 1985. - №11. - S 78-81.
8. Samuseva M.N. Zoloshlakovyye materialy – al'ternativa prirodnykh materialam / M.N. Samuseyeva, T.I. Shishelova // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. - 2009. - № 2. - S. 24-28.
9. Mal'chik A.G. Izucheniye zoloshlakovykh otkhodov dlya ispol'zovaniya v kachestve vtorykhnykh resursov / A.G. Mal'chik, S.V Litovkin // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. - 2015. - № 9-1. - S. 23-27.
10. Putilin Ye.I. Primeneniye zol unosa i zoloshlakovykh smesey pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog / Ye.I. Putilin, V.S. Tsvetkov // Avtomobil'nyye dorogi i mosty: Obzornaya informatsiya. -2003. - Vyp. 5. - S. 1-60.
- 11 Denisov D.YU., Kovkov I.V., Abdrakhimov V.Z., Zhuravel' L.V. Kompozitsiya dlya proizvodstva poristogo zapolnitelya: Pat. 2362749. S1 S04V 14/24. zayavl. 13.12.2007. // Opubl. 27.07.2009. Byul. №21.
- 12 Abdrakhimov V.Z., Semenychev V.K., Kulikov V.A., Abdrakhimova Ye.S. Sposob polucheniya poristogo zapolnitelya. Pat. 2426710. S1 S04V 38/06, 33/132. zayavl. 27.04.2010. // Opubl. 20.08.2011. Byul. №23.
13. Abdrakhimova Ye.S., Roshchupkina I.YU., Abdrakhimov V.Z., Kulikova V.A. Kompozitsiya dlya proizvodstva poristogo zapolnitelya. Pat. 2440312. S1 S04V 14/24. zayavl. 31.05.2010. // Opubl. 20.01.2012. Byul. №2.
14. Abdrakhimov V.Z., Semenychev V.K., Kulikov V.A., Abdrakhimova Ye.S., Vdovina Ye.V. Sposob polucheniya vodostoykogo poristogo zapolnitelya. Pat. 2476394. S1 S04V 14/24. zayavl. 29.06.2011. // Opubl. 27.02.2013. Byul. №6.
15. Avgustinik A.I. Keramika / A.I. Avgustinik. L.: Lenizdat. 1975. 591 s.

16. Budnikov P.P. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki i ogneporov / P.P. Budnikov, D.N. Poluboyarnov. - M.: Stroyizdat. - 1972. - 551 s.

17. Zakirov T.R. O kislotnom vozdeystvii na poristuyu sredy / T.R. Zakirov, A.I. Nikiforov// Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. - 2014. - № 9 - S. 45-49.

18. Pavlov V.F. Fiziko-khimicheskiye osnovy obzhiga izdeliy stroitel'noy keramiki. / V.F. Pavlov M.: Stroyizdat. -1977. - 240 s.

Abdrakhimova E. S.

Samara National Research University, Samara

Associate Professor, candidate of technical Sciences, associate Professor.

E-mail: 3375892@mail.ru

Roshchupkina I. Yu.

Samara National Research University, Samara

Associate Professor, candidate of chemical Sciences.

Abdrakhimov V. Z.

Samara State University of Economics, Samara

Professor, doctor of technical Sciences, professor of the department of Materials Science

E-mail: 3375892@mail.ru

Kayrakbaev A. K.

Aktobe University. After S. Baishev, Aktobe, Kazakhstan

Professor, candidate of physical and mathematical Sciences.

E-mail: kairak@mail.ru

Kolpakov A. V.

Samara State University of Economics, Samara

Senior lecturer

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЩЕБНЯ НА ПОТЕНЦИАЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОНОВ РАЗРУШЕНИЮ*

Рассматривается вопрос влияния размера и геометрии зерен щебня на формирование конгломератной структуры цементного бетона и, соответственно, на потенциал его сопротивления разрушению по показателям модуля деформативности, предельной сжимаемости, энергии разрушения, предела прочности при сжатии. Аналитически показано, что размер зерен заполнителя и их форма определяют не только плотность упаковки и пустотность жесткого пространственного каркаса бетона, но также тип контактного взаимодействия зерен, показатель анизотропии и кластеризации структуры, площадь поверхности межкомпонентной границы раздела в системе «матрица-включение», тип цементации структуры и величину межзернового зазора. Механизм влияния обсуждается в соотношении с варьируемой макроструктурой бетона, определяющей процессы и характеристики аккумуляции, диссипации, локализации и концентрации напряжений в силовых его структурных связях. В экспериментах, проведенных по методике, обеспечивающей получение данных о зависимости конструктивных свойств бетона от параметров формируемой структуры при варьировании размера зерен в интервале от 2,5 до 40 мм, установлены эмпирические соотношения. Дан анализ эмпирических соотношений и вытекающие из них практические рекомендации.

Ключевые слова: цементный бетон, рецептурно-технологические факторы структурообразования, размер зерен заполнителя, потенциал сопротивления разрушению.

Предисловие. В числе рецептурно-технологических факторов получения бетонов важное место при прочих равных условиях, как известно [1-7], занимают размерно-геометрические параметры зерен крупного заполнителя – размер и форма (геометрия) зерен. Эти параметры закономерно влияют на формирование макроструктуры бетона и критерии его однородности/неоднородности [8-12]. С ними непосредственно связана конгруэнтность системы сложения зерен, то есть соответствие характеристическим размерам строительной конструкции [13]. И в этом заключена проблема оптимизации макроструктуры материала в мегаструктуре конструкции.

Размер зерен заполнителя и их форма определяют не только плотность упаковки и пустотность жесткого пространственного каркаса бетона, но также тип контактного взаимодействия зерен, показатель анизотропии и кластеризации структуры, площадь поверхности межкомпонентной границы раздела в системе «матрица-включение», тип цементации структуры и величину межзернового зазора, объем приповерхностной (по отношению к заполнителю) и межзерновой (внутренней) частей матрицы и др.

Как видно, только один этот рецептурно-технологический фактор – фактор размера и формы зерен заполнителя «способен» оказывать многоплановое влияние на формируемую структуру бетона, которая непосредственно определяет его конструкционный потенциал, являющийся следствием процессов аккумуляции энергии внешнего воздействия в композите при его работе в конструкции, локализации напряжений в композите, концентрации локальных напряжений в системе структурных связей композита, а в целом, параметров поля напряжений в полимасштабной структуре материала [14].

* Исследования выполнены в 2017 г. по теме 7.2.5 «Управление критериями однородности (неоднородности) конгломератных строительных композитов в задачах конструирования их оптимальных структур» Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН в области архитектуры, градостроительства и строительных наук

Размерно-геометрический параметр заполнителя непосредственно участвует [15-19] в формировании потенциала сопротивления композита разрушению (рис. 1).

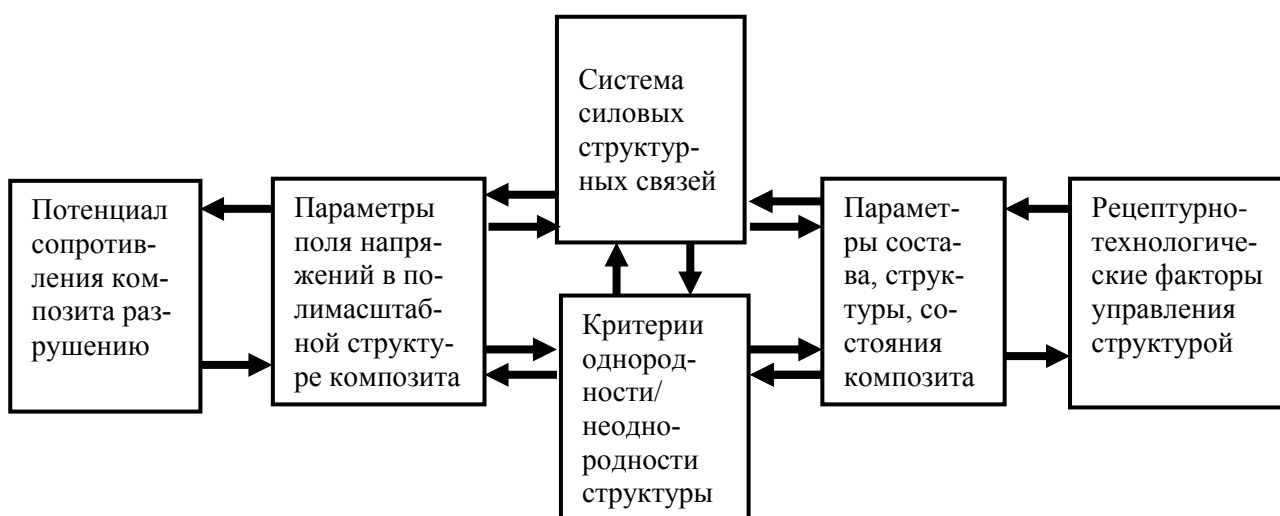


Рисунок 1 - Структурно-логическая схема причинно-следственных связей и соотношений в разрабатываемой проблеме

В такой трактовке рассматриваемой проблемы очевидна актуальность проведенного нами специального изучения влияния размерного параметра зерен щебня с учетом их формы на совокупность структурных характеристик бетона и его конструктивных свойств.

Методика исследований. При обосновании методики и постановке экспериментальных исследований исходили из следующих положений и данных.

В рамках обсуждаемой конкретной работы речь идет о модельных экспериментах на макромасштабном уровне структуры бетона. В качестве крупного заполнителя, играющего роль включений в двухкомпонентной системе «матрица-включение», рассматривается гранитный щебень. В экспериментах в целях получения данных на модельных макроструктурах бетона предусматривались опыты с монофракционным составом включений из гранита (таблица 1) со следующей дифференциацией его зерен по размеру: свыше 20 до 40 мм, свыше 10 до 20 мм, свыше 5 до 10 мм; отметим, что в моделях с монофракциями использовались также зерна гранита с размером 2,5 - 5 мм, официально относимые к мелкой фракции заполнителя. В крупных фракциях идентифицируются зерна щебня с числом граней в них от 3 до 6-9 (рис. 2а). Соответственно этому, можно говорить о зернах в форме многогранников с числом граней преимущественно 6-7 и иногда более, о лещадной форме зерен с числом граней 3 (см. рис. 2б), о тетраэдрической форме с числом граней 4 и о форме усеченного тетраэдра с числом граней 5 (см. рис. 2в).

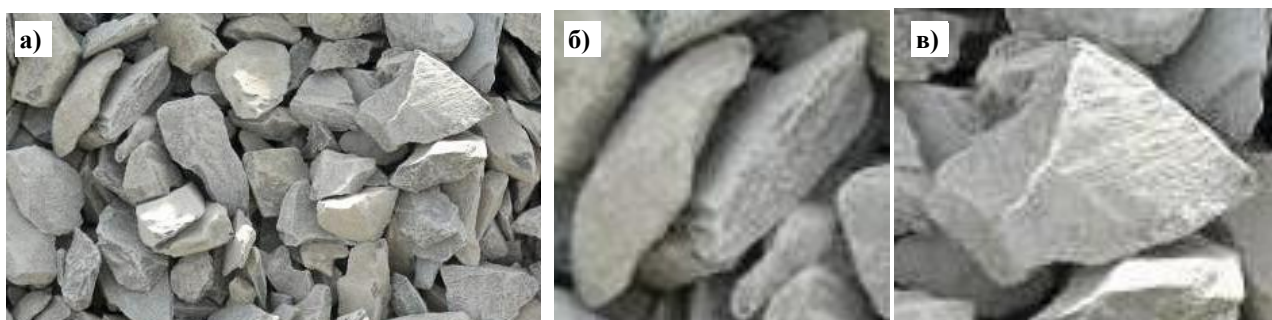


Рисунок 2 – Разновидности формы зерен гранитного щебня

В опытах использовался заполнитель, полученный из гранита (гранитоида) Шкурлатовского месторождения Воронежской области. Данный гранит в его монолите, по имеющимся оценкам, отличается следующими характеристиками: плотность $2,68 \text{ г/см}^3$; предел прочности при сжатии до 250 МПа; гранит относится к высшей степени крепким породам с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протождяконова - $f = 18...20$. В кусковой породе в связи с возникающей при взрывных воздействиях трещиноватости прочность оценивается величиной до 140 МПа. При варьировании размера фракции щебня прочность по марке по дробимости (по ГОСТ 8267-93) изменяется (таблица 1) в пределах 600 – 1400 кгс/см²: зерна большего размера отличаются более высокой маркой по дробимости 1200 и 1400, а меньшего размера – более низкой маркой 600-800. В целом же, в совокупности фракций от 5 до 40 мм из всех исследованных [20] проб 82 % имеют марку 800 и выше, в т.ч. 78 % проб – марку 800-1000.

Таблица 1 - Характеристика фракций гранитного щебня Шкурлатовского месторождения по показателю их марки по дробимости (по статистическим данным испытаний проб [20])

Фракционный состав щебня	Доля проб с маркой по дробимости, %					
	1400	1200	1000	800	600	<600
5-10 мм	0	0	7	54	28	11
10-20 мм	0	0	19	64	16	1
20-40 мм	2	8	33	56	1	0
5-40 мм	1	3	20	58	15	3

Таким образом, есть основания отметить явное изменение характеристик субстанционального состояния материала зерен по мере изменения их размера. Используя данные о дробимости, нами по предложенной методике оценена прочность зерен гранитного щебня разного размера и показано, что прочность материала фракции 5-10 мм составляет приблизительно 70, фракции 10-20 мм – 80, фракции 20-40 мм – 90 МПа. Следует ожидать, что такое изменение будет влиять на показатели сопротивления бетона разрушению, поскольку градиент разнородности субстанции матрицы и субстанции включений будет переменным в формирующейся макроструктуре бетона.

Размерные параметры и технологические характеристики фракций зерен заполнителя в экспериментах, а именно – средний эквивалентный размер зерен d_{cp} , плотность системы сложения ρ_n , межзерновая пустотность $\Pi_{мз}$, удельная площадь поверхности $S_{уд}$ и также мера переупаковки системы сложения зерен $K_{уп}$, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Размерный параметр и технологические характеристики фракций зерен заполнителя в экспериментах

Размерный параметр фракции зерен заполнителя	d_{cp} , мм*	ρ_n , кг/м ³ , в состоянии		$\Pi_{мз}$, м ³ /м ³ , в состоянии		$K_{уп}$, отн. ед.	$S_{уд}$, м ² /м ³ , в состоянии	
		рыхлом	виброуплотненном	рыхлом	виброуплотненном		рыхлом	виброуплотненном
Свыше 20 до 40 мм	$\frac{26,7}{26,8}$	1265	1490	0,53	0,44	1,18-1,20	104	120
Свыше 10 до 20 мм	$\frac{13,3}{13,9}$	1410	1580	0,47	0,41	1,12-1,15	245	272
Свыше 5 до 10 мм	$\frac{6,7}{6,9}$	1345	1515	0,50	0,43	1,13-1,16	429	489
Свыше 2,5 до 5 мм	$\frac{3,3}{3,5}$	1295	1450	0,52	0,46	1,12-1,13	960	1080

Примеч.: * d_{cp} - над чертой по формуле И.Н. Ахвердова [21], под чертой - по формуле С. Weymouth [22]

Состав бетонной смеси по расходу основных компонентов (таблица 3) назначался по методу абсолютных объемов, для чего применительно к характеристикам плотности и пустотности разнофракционного заполнителя в виброуплотненном его состоянии проводились соответствующие расчеты. Специально отметим, что при определении состава бетонной смеси выполнялось следующее условие: для всех случаев применения исследуемых фракций заполнителя коэффициент избытка растворной части принимался соответствующим величине $K_{изб} = 1,15$. Это позволяло получать бетон с близким к оптимальному по прочности типом цементации структуры, которая была неизменной для всех экспериментальных вариантов получения образцов бетона.

Таблица 3 - Расход компонентов бетонной смеси (для характеристик заполнителя в виброуплотненном состоянии)

Фракция	Расход основных компонентов расчетный, кг/м ³				Плотность смеси, кг/м ³	Расход основных компонентов фактический, кг/м ³			
	Ц	Щ	П	В		Ц	Щ	П	В
Св. 20 до 40 мм	400	1350	800	140	2500	372	1255	744	130
« 10 « 20 «	360	1420	720	126	2456	337	1328	673	118
« 5 « 10 «	378	1345	720	132	2410	354	1258	674	124
« 2,5 « 5 «	405	1265	810	142	2340	361	1129	723	127

С учетом рекомендаций ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» в экспериментах формовались серии образцов в форме кубов с размером 10; 15 и 20 см в количестве шести штук в каждой серии; дополнительно к этому формовались также образцы-кубы с размером ребра 5 и 7,07 см.

При получении цементно-песчаного раствора состава 1:2 для бетонной смеси принимали меры по снижению величины В/Ц-отношения (по редуцированию В/Ц). Для этого в состав бетонной смеси вводили добавку - суперпластификатор Sika ViscoCrete® 5-600 N PL. Дозировка жидкой добавки составляла 1,0 % от массы цемента, что обеспечивало при принятой величине $В/Ц = 0,35$ получение практически постоянной величины подвижности бетонной смеси - 1...2 см по осадке конуса.

Цементно-песчаный камень, выполняющий функцию матрицы в модельных составах бетона, отвечал требованиям нормативных рекомендаций [23].

Бетонные смеси указанных в таблице 3 составов получали в лабораторном смесителе принудительного действия ЛС-ЦБ-10 (объем замеса составлял 10 л; продолжительность перемешивания принималась равной 60 с, что оказывалось достаточным для обеспечения равномерного распределения сырьевых компонентов по объему замеса).

Бетонную смесь уплотняли на лабораторной виброплощадке с вертикально направленными колебаниями частотой 3000 мин⁻¹ и амплитудой 0,5 мм; уплотнение вели до появления на поверхности формуемой смеси цементного «молочка». Формы герметично закрывали полиэтиленовой пленкой, через 24 часа распалубливали и полученные образцы бетона устанавливали в камеру естественного твердения с температурой 18...22 °С и относительной влажностью воздуха 95...98 %.

По истечении 28 суток твердения в нормальных условиях контрольные образцы модельного композита испытывали на сжатие при скорости нагружения 0,4 МПа/с до разрушения в универсальной четырехколонной напольной гидравлической системе 1500HDX фирмы США INSTRON. Данная система (Центр коллективного пользования ВГТУ им. проф. Ю.М. Борисова) обеспечивает автоматическое определение характеристик прочности и деформируемости испытываемых образцов; нагрузка в системе фиксируется с помощью трех датчиков силы по 50 тс с погрешностью 0,5 % от измеряемой величины; перемещения измеряются с

помощью датчика положения траверсы с погрешностью 0,02 мм. Испытательная система снабжена русифицированным программным комплексом Bluehill3, который управляет процессом испытаний с отображением графика нагружения в режиме реального времени и выдачей статистически обработанных результатов испытаний для каждого отдельного образца серии в виде графиков деформирования и сводной таблицы данных для серии. Экспериментальные кривые деформирования каждого испытанного образца обрабатывались с помощью табличного процессора MS Excel с условием «отсечения» части кривой, относящейся к нагрузке менее 2 % от максимальной. По результатам обобщения этих данных может быть получена диаграмма деформирования для каждой из серий, входящих в программу экспериментальных исследований (рис. 3).

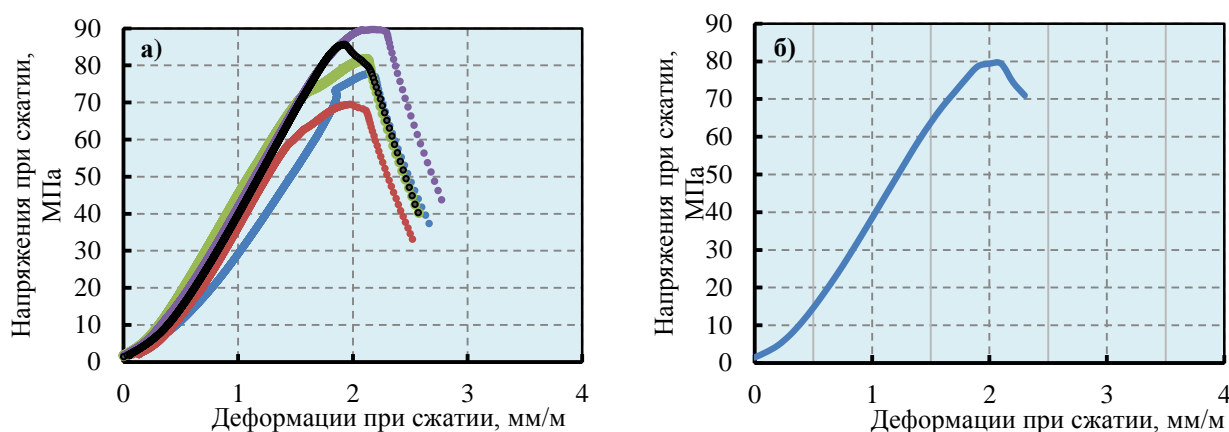


Рисунок 3 – Пример диаграмм деформирования бетона для каждого (а) и в целом для серии (б) образцов-кубов длиной ребра 10 см и с размером зерен монофракционного заполнителя свыше 10 до 20 мм в бетоне

По обработанным диаграммам деформирования (см. рис. 3) для каждой серии испытанных образцов определяли показатели предельной сжимаемости ϵ_r , мм/м, предела прочности при сжатии R_m , МПа, модуля упругости E , МПа; далее по работе разрушения, полученной по диаграмме деформирования, расчетом находили показатели удельной энергии разрушения $\mathcal{E}_{уд}$, кДж/м³. Вычислялись также значения относительной прочности бетона $R_m^{омн}$, МПа, откорректированной с учетом полученной средней его плотности.

С целью проверки соответственности выборочных данных генеральной совокупности результаты испытаний отдельных образцов серии проверялись по критерию Н.В. Смирнова. Для данных, прошедших статистическую проверку на их достоверность, рассчитывались оценки математического ожидания (выборочное среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации) и доверительные интервалы (с доверительной вероятностью $P = 0,9$).

Обсуждение результатов. Обсуждение результатов исследований велось в рамках методологического подхода «состав-структура-состояние-свойства». Поэтому первая часть раздела касалась идентификации и оценок полученной структуры бетона как функции размерно-геометрических параметров щебня. В связи с этим были рассмотрены и охарактеризованы (таблица 4) следующие структурные параметры бетона:

- плотность ρ_m ;
- объемное соотношение зерен щебня и цементно-песчаного раствора в макроструктуре V_M/V_B ,
- эквивалентное число частиц в единице объема $N_{зи}$;
- координационное число упаковки зерен щебня $\varphi_{зи}$;
- эквивалентное число контактов зернистых включений в единице объема $N_{кз}$;
- эквивалентная удельная площадь поверхности границы раздела «матрица – включения» $F_{Sуд}$;

- эквивалентная толщина межзернового слоя матричного материала δ_m ,
- показатель размерной конгруэнтности макроструктуры N_k .

Из всего массива проведенных экспериментов, в которых варьировали не только размерный параметр заполнителя, но и размерные характеристики формуемых образцов (от 5 до 20 см), в данной публикации рассмотрены и анализируются результаты, полученные на образцах с длиной ребра 10 см.

Касаясь плотности бетона ρ_m как структурного параметра, представим, основываясь на данных таблицы 2, графические зависимости плотности и межзерновой пустотности моно фракционного заполнителя от среднего эквивалентного размера зерен в насыпном и виброуплотненном состоянии системы их сложения (рис. 4). Обратим внимание на возможность переупаковки системы сложения зерен и, соответственно, на показатель степени переупаковки $K_{уп}$ (см. таблицу 2) в соотношении его с размерными параметрами фракций зерен. Так, для самой крупной фракции он оказывается равным величине 1,18-1,20, что свидетельствует о возможности изменения плотности и пустотности в системе сложения практически на 20 %. Для самой мелкой фракции показатель переупаковки составляет 1,12-1,13, а возможные изменения плотности и пустотности не более 12-13 %.

Таблица 4 - Характеристика исследованных образцов бетона по основным параметрам их макроструктуры

Характеристики щебня				Характеристики структуры бетона								
размерные		субстанциональные										
фракция, мм	$d_{ср}$, мм	Марка по дробимости	$R_{сж}$, МПа	ρ_m , кг/м ³	V_M/V_B , м ³ /м ³	$N_{зц}$, дм ⁻³	$\Phi_{зц}$, шт	$N_{кз}$, дм ⁻³	$F_{S_{y0}}$, м ² /м ³	δ_m , мм	N_k	
20 - 40	$\frac{26,7}{26,8}$	800-1200	90,8	2450	$\frac{0,53}{0,47}$	45-50	7,3	330-360	100	1,3-1,5	$\frac{3,7}{3,75}$	
10 - 20	$\frac{13,3}{13,9}$	600-1000	80,2	2500	$\frac{0,50}{0,50}$	380-420	8,3	3150-3450	230	0,7-0,8	$\frac{7,2}{7,5}$	
5 - 10	$\frac{6,7}{6,9}$	600-800	68,4	2460	$\frac{0,53}{0,47}$	2900-3100	7,7	$(22,3-23,9) \cdot 10^3$	410	0,3-0,35	$\frac{14,5}{15}$	
2,5 - 5	$\frac{3,3}{3,5}$	-	-	2450	$\frac{0,58}{0,42}$	$(21-23) \cdot 10^3$	6,6	$(13,9-15,2) \cdot 10^4$	840	0,15-0,2	$\frac{28,5}{30,5}$	

Таким образом, выявляется связь плотности и пустотности упаковки зерен щебня с его фракцией. Фактором такой связи, очевидно, следует считать, прежде всего, не номинальный размер фракции, а внутрифракционное распределение зерен по размерам и изменение формы зерен при их измельчении и переходе от фракции к фракции, так сказать, «по номиналу». Кажется бы, имеет место не столь уж значимое различие величины переупаковки систем сложения зерен разных фракций. На самом деле, если иметь в виду степенную зависимость прочности бетона от его пористости, то наблюдаемое различие может оказаться существенно значимым по критерию потенциала сопротивления бетона разрушению.

Обсуждаемые показатели плотности упаковки и пустотности (см. рис. 4) являются определяющими при назначении расхода растворной части бетона, когда выполняется требование проектирования и получения материала с фиксированной величиной коэффициента избытка раствора, то есть с фиксированной раздвижкой зерен в конгломератной структуре материала. Раздвижка зерен цементно-песчаным раствором предопределяет толщину межзернового слоя матричного материала δ_m , которая при неизменной величине коэффициента избытка матрицы (принималось постоянной $K_{изб} = 1,15$) оказывалась в диапазоне значений 1,3-1,5 до 0,15-0,2 мм (изменялась практически в 10 раз) при использовании зерен щебня разных фракций.

Продолжая обсуждение результатов экспериментальных исследований, отнесем читателя к вступительной части статьи, в которой излагается понимание возможной многоплано-

вой роли размерно-геометрического параметра заполнителя в структурообразовании бетона. В связи с этим дополнительно отметим то влияние, которое может оказать фактор формы зерен (см. рис. 2) при получении конгломератной структуры бетона. Так, зерна лещадной формы могут способствовать появлению определенной анизотропности в структуре; зерна тетраэдрической или близкой к ней формы могут способствовать явлениям кластеризации структуры, поскольку вероятным оказывается примыкание к граням тетраэдров зерен другой формы и появление на этой основе ассоциатов зерен (их «гроздей» - кластеров) в структуре. В итоге можно говорить о дифференциации общего объема системы сложения зерен как на объемы с определенной анизотропией, так и на объемы с определенной кластеризацией. В этом видится влияние формы зерен щебня на однородность/неоднородность формируемой структуры бетона, и, разумеется, на процессы и характеристики аккумуляции, диссипации, локализации и концентрации напряжений в поле напряжений в материале.

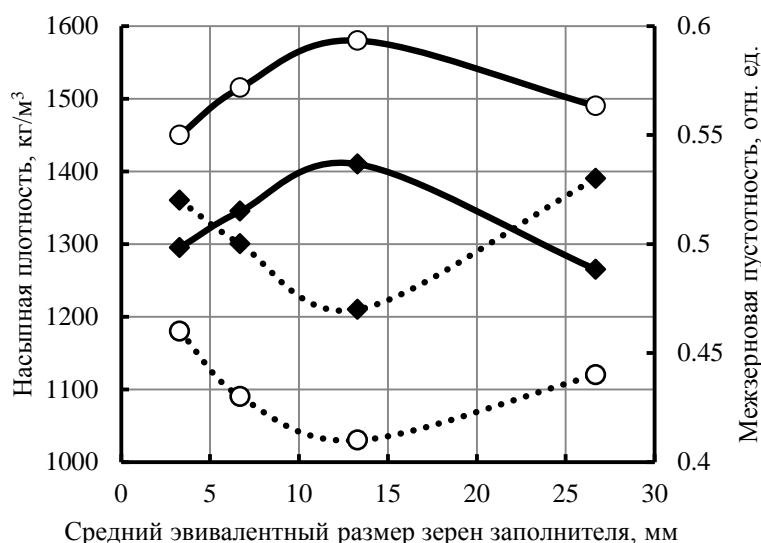


Рисунок 4 – Плотность и межзерновая пустотность монофракционного заполнителя с различным средним эквивалентным размером зерен в насыпном и виброуплотненном состоянии
 (◆—◆, ◆····◆ - плотность и межзерновая пустотность соответственно в насыпном состоянии;
 ○—○, ○····○ - плотность и межзерновая пустотность соответственно в виброуплотненном состоянии)

Идентификация и оценка полученной структуры бетона как функции размерно-геометрических параметров щебня, представленная в таблице 4, нуждается в ряде пояснений. Во-первых, важно обратить внимание на изменение числа зерен щебня в единичном объеме $N_{зщ}$, которое может отличаться в 500 раз в макроструктуре бетона, полученного на щебне с разными его фракциями. На эту же величину кратности будет отличаться число контактов зерен в системе их сложения $N_{кз}$. Стоит здесь указать, что число контактов $\varphi_{зщ}$ единичного зерна, согласно нашим расчетам по моделям Г. Дересевича, отвечает величине $\varphi_{зщ} = 6,5-8,5$, и это соответствует типу упаковки зерен щебня практически от кубического ($\varphi = 6$) в сторону объемно-центрированного ($\varphi = 8$). Примечательно, что для зерен кварцевого песка реальным является $\varphi \leq 9$ (Г. Дересевич, И.И. Кандауров и др.).

Не забудем также указать на изменение удельной площади поверхности границы раздела $F_{S_{гд}}$ в системе «матрица – включение»: при переходе от фракции 20-40 к фракции 2,5-5 мм различие величины площади границы раздела оказывается не менее восьмикратного.

Остановим наше внимание на учете той роли, которую может оказать изменение субстанционального состояния материала зерен по показателю его дробимости по мере варьирования фракционного состава. По экспериментальным данным, коэффициент разнородности включений и матрицы по соотношению их прочности может находиться в пределах от 1 до 1,5.

Наконец, обратимся к показателю размерной конгруэнтности N_k макроструктуры, который является критерием неоднородности или квазиоднородности бетона. Вычисленные значения N_k для диапазона размера зерен щебня и характеристического размера форм ($L = 10$ см) находятся в диапазоне от 3,7-3,75 до 28,5-30,5. С учетом этого, квазиоднородной можно принять структуру бетона, когда используется щебень с размером, близким к 10 мм, например, фракции не крупнее 10-20 мм.

Представленный в таблице 4 массив идентификационных и оценочных данных свидетельствует о действительно многоплановом влиянии размерно-геометрических параметров щебня на формирование макроструктуры бетона.

Перейдем к рассмотрению и анализу конструкционных характеристик бетона в их связи с размерно-геометрическими характеристиками щебня (таблица 5).

Значения средней плотности полученного бетона для всех размеров зерен заполнителя по их крупности находятся в пределах от 2450 до 2500 кг/м³. Эти данные свидетельствуют о корректности назначения состава исходной смеси, что позволило практически исключить влияние возможных погрешностей фактора плотности бетона на показатели его сопротивления разрушению в поставленных экспериментах.

Таблица 5 – Статистическая оценка механических свойств бетона по испытаниям образцов-кубов с длиной ребра 10 см при варьировании крупности фракции зерен заполнителя

Оценка	ρ_m , кг/м ³	ε_r , мм/м	R_m , МПа	E , МПа	\mathcal{E}_p , Дж	$\mathcal{E}_{уд}$, Дж/см ³	$R_m^{отн}$, МПа
Заполнитель фракции св. 20 до 40 мм ($d_{cp} = 27$ мм)							
Выборочное среднее	2449	2,4	80,6	50391	887,7	0,9	76,7
Стандартное отклонение	18	0,3	2,0	5271	131,5	0,1	1,9
Доверительный интервал	13	0,2	1,4	3540	88,3	0,1	1,3
Коэффициент вариации	0,7	11,7	2,5	10,5	14,8	15,7	2,5
Заполнитель фракции св. 10 до 20 мм ($d_{cp} = 13$ мм)							
Выборочное среднее	2501	2,1	80,8	49899	842,1	0,9	74,5
Стандартное отклонение	28	0,1	7,8	4786	136,7	0,1	7,7
Доверительный интервал	20	0,1	5,7	3520	100,6	0,1	5,7
Коэффициент вариации	1,1	5,5	9,6	9,6	16,2	15,9	10,4
Заполнитель фракции св. 5 до 10 мм ($d_{cp} = 7$ мм)							
Выборочное среднее	2461	2	65,9	48553	617,2	0,6	62,6
Стандартное отклонение	49	0,5	8,3	2711	147,4	0,2	8,0
Доверительный интервал	33	0,3	5,6	1821	99,0	0,1	5,4
Коэффициент вариации	2,0	23,7	12,6	5,6	23,9	24,0	12,7
Заполнитель фракции св. 2,5 до 5 мм ($d_{cp} = 3$ мм)							
Выборочное среднее	2453	1,9	62,8	46012	597,9	0,6	60,1
Стандартное отклонение	26	0,2	9,5	4612	150,0	0,15	9,6
Доверительный интервал	17	0,1	6,4	3100	100,7	0,1	6,4
Коэффициент вариации	1,1	8,2	15,1	10,0	25,1	25,2	15,9

Обнаружено, что с изменением размера включений в матрице бетона зависимость его прочности от размерного фактора заполнителя представляется функцией с двумя участками (рис. 5). В левой части общей зависимости с повышением среднего эквивалентного размера зерен щебня с 3,3 до 13,7 мм предел прочности бетона при сжатии возрастает в диапазоне значений от 62-63 до 80-81 МПа; в правой части, то есть при размере зерен щебня сверх 13,7 до 23,3 мм, достигнутые до того показатели прочности остаются на уровне значений 80-81 МПа. По нашим данным, размерная граница зерен включений между левой и правой частями общей зависимости для прочности близка к 10 мм; эта размерная граница отвечает отличию прочности в 1,30...1,35 раза (см. рис. 5). Показательно, что полученные экспериментальные данные

хорошо согласуются с общепринятым делением плотных бетонов на разновидности мелко- и крупнозернистых.

В отличие от прочности бетона, изменение средних выборочных значений модуля упругости экспериментальных образцов не столь явно отвечает выявленному эффекту: значения модуля упругости при «укрупнении» зерен заполнителя в изученном диапазоне возрастают всего в 1,1 раза - с 46000 до 50000 МПа (см. рис. 5). При учете доверительных интервалов оценок математического ожидания величины модуля упругости в серии (см. таблицу 5) оказывается, что влияние размерного фактора заполнителя лежит в границах погрешности эксперимента: во всем диапазоне значений среднего эквивалентного размера зерна заполнителя величина модуля упругости в эксперименте составляет 47000...49000 МПа с доверительной вероятностью 90 %.

Получение относительно высоких (на 30 %) показателей прочности бетона при увеличении крупности заполнителя может быть объяснено отмеченным ранее фактом более высокой марки по дробимости крупных его фракций в сравнении с мелкими. По мере изменения «кусковатости» (горнорудный термин) получаемых зерен гранита минеральная его структура приобретает признаки блочности, насыщается микротрещинами, дислокациями, даже претерпевает вторичную минерализацию. Известно [24], что это связано с явлением повышенной дефектности «переизмельченных» частиц исходной горной породы вследствие взрывных и ударных воздействий при проведении горных выработок.

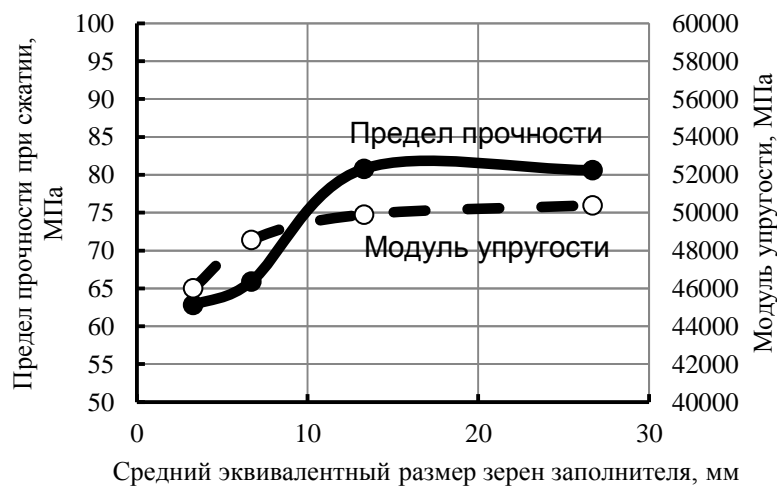


Рисунок 5 – Зависимость предела прочности и модуля упругости бетона от среднего эквивалентного размера зерен монофракционного заполнителя (пример для размера образца-куба «10»)

Подтверждением высказанному может служить сопоставление (рис. 6) прочности экспериментальных образцов бетона и, как уже отмечалось, показателей прочности зерен разного размера по дробимости (см. таблицу 4). Такое сопоставление показывает полное соответствие величин прочности бетона величинам прочности зерен фракций, использованных для его получения.

Заключение. Остановимся на некоторых практически значимых следствиях результатов проведенных экспериментов, отметив при этом, что в статье представлен только фрагмент более широко поставленных исследований.

Первый из результатов состоит в том, что размерно-геометрические параметры щебня как самостоятельного рецептурно-технологического фактора получения бетона по его проявлениям в формировании структуры и свойств материала оказывается многоплановым и неоднозначным.

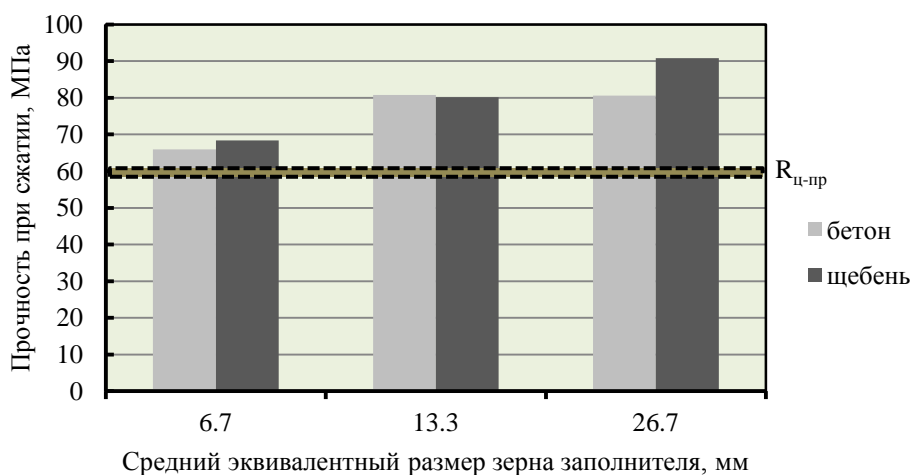


Рисунок 6 – Диаграмма соответствия прочности при сжатии бетона и прочности зерен гранитного щебня разного среднего эквивалентного размера ($R_{ц-пр}$ - прочность цементно-песчаного раствора)

Обнаруженные в ходе экспериментов закономерности влияния размерно-геометрических параметров на прочность бетона связаны преимущественно и скорее всего с изменением прочности заполнителя при варьировании размера его зерен. Чем крупнее зерно заполнителя, тем выше его прочность (за счет меньшей дефектности). Соответственно этому, выше прочность получаемого на его основе бетона. Влияние других причин в условиях оптимальности структуры бетона по типу цементации его структуры оказывается завуалированным. В контексте рассмотрения вопросов конструирования и синтеза оптимальных структур бетонов требуются дополнительные исследования по проблеме.

Из частных следствий результатов исследований (рис. 7) укажем на то, что класс по прочности на сжатие полученного крупнозернистого бетона, оцененный в соответствии с ГОСТ 25192-82 и ГОСТ 10180-90 с учетом коэффициента вариации и нижней границы доверительного интервала, составил В75 для фракции 20-40 мм и В70 для фракции 10-20 мм (см. таблицу 5).

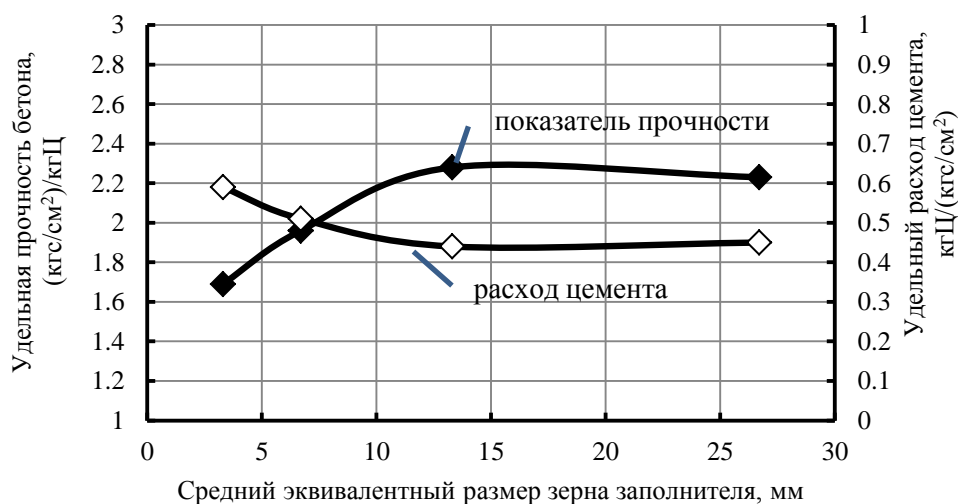


Рисунок 7 – Зависимость удельной прочности бетона (в расчете на 1 кг цемента) и удельного расхода цемента (в расчете на 1 кгс/см² прочности при сжатии) от среднего эквивалентного размера зерен монофракционного заполнителя

Это существенно эффективнее регламентаций, предусматриваемых в СНиП 82-02-95 «Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций» для бетонов с расходами цемента и реологией бе-

тонной смеси, аналогичным принятым в проведенном нами эксперименте. Показано, что расход цемента на единицу измерения синтезируемой прочности бетона исследованных составов может быть понижен до 0,45 кг на 1 кгс/см².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников // Научное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
2. Бабков В.В. и др. О некоторых закономерностях связи структуры и прочности бетона // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1983. - № 2. – С. 16 – 20.
3. Белов, В.В. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Строительные материалы. – 2009. №9. – С. 88-90.
4. Грызлов В.С., Демидов С.В. Информационные аспекты моделирования макроструктуры легкого бетона // Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы пятых академических чтений РААСН / Воронеж. гос. арх.-строит. академия. – Воронеж, 1999. – С. 109 – 111.
5. Ицкович С.М. Заполнители для бетона. – М.: Высш. шк., 1983. – 214 с.
6. Миронов В.А. Методы оптимизации составов сыпучих систем / В.А. Миронов, А.И. Голубев, Тверь: ТГТУ, 2003. – С.76.
7. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. – М.: Высш. шк., 2002. - 701 с.
8. Бабкин Л.И. Влияние однородности зернового состава крупными заполнителями на прочность бетона // Бетон и железобетон, 1987. - № 1. – С. 32 – 33.
9. Будештский Р.И. Элементы теории прочности зернистых композиционных материалов. – Тбилиси: Мецниереба, 1972. – 82 с.
10. Гордон С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. М.: Стройиздат, 1969. – 150 с.
11. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. М.: Стройиздат, 1993. 182 с.
12. Королев Л.В., Лупанов А.П., Придатко Ю.М. Анализ упаковки полидисперсных частиц в композитных строительных материалах // Современные проблемы науки и образования, 2007. №6. С. 105-108.
13. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
14. Чернышов Е.М., Дьяченко Е.И., Макеев А.И. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории. Воронеж, 2012. 98 с.
15. Десов А.Е. К макроструктурной теории прочности бетона при одноосном сжатии // Технология и повышение долговечности железобетонных конструкций: VII Всесоюзная конференция по бетону и железобетону. – М.: Стройиздат, 1972. – С. 4 – 17.
16. Комохов П.Г. Физико-механические аспекты разрушения бетона и принципы снижения его трещинообразования // Совершенствование технологии строительного производства: Межвуз. тематич. сб. – Томск, 1981. – С. 145 – 151.
17. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Структура и прочность конструктивных цементных композитов. Саранск, 2015. – 360 с.
18. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Оптимизация гранулометрического состава наполнителей для бетонов // Будівелні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний зб., вип. 50. – Київ: НДІБК, 1999. – С. 372 – 377
19. Белов В.В., Куляев П.В. Теоретическое обоснование оптимальных зерновых составов композиционных материалов с минеральными наполнителями // Строительство и реконструкция, 2017. №5. С. 94-101
20. Оценка минеральных ресурсов и запасов участка «Дон-Гранит» // Итоговый отчет для компании ОАО «ВБ-Девелопмент Черноземье» / International Economic and Energy Consulting Limited. 2010. 111 с. URL:: <http://docplayer.ru/49171035-Oценка-mineralnyh-resursov-i-zapasov-uchastka-don-granit.html> (дата обращения – 09.03.2018)
21. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
22. Weymouth C. A study of fine aggregate in a freshly mixed mortar and concretes. ASTM. 38, 1932. № 2
23. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов: Методическое пособие // Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». М., 2016. 100 с.
24. Виноградов Ю.И., Хохлов С.В. Определение выхода отсева при производстве щебня в зависимости от основных параметров буровзрывных работ // Взрывное дело. 2015. № 113-70. С. 126-132.

Макеев Алексей Иванович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж,
кандидат технических наук, доцент каф. технологии строительных материалов, изделий и конструкций
E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru

Чернышов Евгений Михайлович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж,
академик РААСН, доктор технических наук, профессор, директор академического центра «Архстройнаука»
E-mail: chem@vgasu.vrn.ru

MAKEEV A.I., CHERNYSHOV E.M.

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE REGULARITIES
OF INFLUENCE OF DIMENSIONAL-GEOMETRIC
PARAMETERS OF THE CRUSHER AND THE POTENTIAL
OF CONCRETE RESISTANCE TO DESTRUCTION**

The issue of the influence of the size and geometry of the grains of crushed stone on the formation of the conglomerate structure of cement concrete and, accordingly, the potential for its resistance to fracture in terms of the deformation modulus, limiting compressibility, fracture strength, compressive strength. It is analytically shown that the size of aggregate grains and their shape predetermine not only the packing density and the voidness of the rigid spatial framework of concrete, but also the type of contact interaction of grains, the anisotropy and clusterization index of the structure, the surface area of the intercomponent interface in the matrix-inclusion system, the type of carburizing structure and size of the intergranular gap. The mechanism of influence is discussed in relation to the variable macrostructure of concrete, which determines the processes and characteristics of accumulation, dissipation, localization and concentration of stresses in its structural connections. In the experiments carried out by the method providing data on the dependence of the structural properties of concrete on the parameters of the structure being formed when the grain size is varied in the interval from 2.5 to 40 mm, empirical relationships are established. The analysis of empirical relations and the practical recommendations that follow from them are given.

Key words: cement concrete, prescription and technological factors of structure formation, grain size of aggregate, potential for resistance to destruction.

REFERENCES

1. Bazhenov, YU.M. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony / YU.M. Bazhenov, V.S. Dem'yanova, V.I. Kalashnikov // Nauchnoye izdaniye. – M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2006. – 368 s.
2. Babkov V.V. i dr. O nekotorykh zakonomernostyakh svyazi struktury i prochnosti betona // Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arkhitektura, 1983. - № 2. – S. 16 – 20.
3. Belov, V.V. Formirovaniye optimal'noy makrostruktury stroitel'noy smesi / V.V. Belov, M.A. Smirnov // Stroitel'nyye materialy. – 2009. №9. – S. 88-90.
4. Gryzlov V.S., Demidov S.V. Informatsionnyye aspekty modelirovaniya makrostruktury legkogo be- тона // Sovremennyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya: Materialy pyatykh akademicheskikh chteniy RAASN / Voronezh. gos. arkh.-stroit. akademiya. – Voronezh, 1999. – S. 109 – 111.
5. Itskovich S.M. Zapolniteli dlya betona. – M.: Vyssh. shk., 1983. – 214 s.
6. Mironov V.A. Metody optimizatsii sostavov sypuchikh sistem / V.A. Mironov, A.I. Golubev, Tver': TGTU, 2003. – S.76.
7. Ryb'yev I.A. Stroitel'noye materialovedeniye. – M.: Vyssh. shk., 2002. - 701 s.
8. Babkin L.I. Vliyaniye odnorodnosti zernovogo sostava krupnykh zapolniteley na prochnost' betona // Beton i zhelezobeton, 1987. - № 1. – S. 32 – 33.
9. Budeshtskiy R.I. Elementy teorii prochnosti zernistykh kompozitsionnykh materialov. – Tbilisi: Metsniyereba, 1972. – 82 s.
10. Gordon S.S. Struktura i svoystva tyazhelykh betonov na razlichnykh zapolnitelyakh. M.: Stroyizdat, 1969. – 150 s.
11. Ivanov I.A. Legkiye betony na iskusstvennykh poristykh zapolnitelyakh. M.: Stroyizdat, 1993. 182 s.

12. Korolev L.V., Lupanov A.P., Pridatko YU.M. Analiz upakovki polidispersnykh chastits v kompozitnykh stroitel'nykh materialakh // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2007. №6. S. 105-108.
13. Karpenko N.I. *Obschiye modeli mekhaniki betona*. – M.: Stroyizdat, 1996. – 416 s.
14. Chernyshov Ye.M., D'yachenko Ye.I., Makeyev A.I. Neodnorodnost' struktury i soprotivleniye razrushe-niyu konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov: voprosy materialovedcheskogo obobshcheniya i razvitiya teorii. Voronezh, 2012. 98 s.
15. Desov A.Ye. K makrostrukturnoy teorii prochnosti betona pri odnoosnom szhatii // *Tekhnologiya i povysheniye dolgovечnosti zhelezobetonnykh konstruksiy: VII Vsesoyuznaya konferentsiya po betonu i zhelezobetonu*. – M.: Stroyizdat, 1972. – S. 4 – 17.
16. Komokhov P.G. Fiziko-mekhanicheskiye aspekty razrusheniya betona i printsipy snizheniya yego treshchinnobrazovaniya // *Sovershenstvovaniye tekhnologii stroitel'nogo proizvodstva: Mezhvuz. tematich. sb.* – Tomsk, 1981. – S. 145 – 151.
17. Maksimova I.N., Makridin N.I., Yerofeyev V.T., Skachkov YU.P. Struktura i prochnost' konstruksionnykh tsementnykh kompozitov. Saransk, 2015. – 360 s.
18. Solomatov V.I., Yerofeyev V.T., Mitina Ye.A. Optimizatsiya granulometricheskogo sostava napolniteley dlya betonov // *Budivelni konstruksii: Mizhvidomchiy naukovo-tekhnichnyy zb., vip. 50*. – Kii: NDIBK, 1999. – S. 372 – 377
19. Belov V.V., Kulyayev P.V. Teoreticheskoye obosnovaniye optimal'nykh zernovykh sostavov kompozitsionnykh materialov s mineral'nymi napolnitelyami // *Stroitel'stvo i rekonstruksiya*, 2017. №5. S. 94-101
20. Otsenka mineral'nykh resursov i zapasov uchastka «Don-Granit» // *Itogovyy otchet dlya kompanii OAO «VB-Development Chernozem'ye» / International Economic and Energy Consulting Limited*. 2010. 111 s. URL.: <http://docplayer.ru/49171035-Ocenka-mineralnyh-resursov-i-zapasov-uchastka-don-granit.html> (data obrashcheniya – 09.03.2018)
21. Akhverdov I.N. *Osnovy fiziki betona*. M.: Stroyizdat, 1981. 464 s.
22. Weymouth C. A study of fine aggregate in a freshly mixed mortar and concretes. ASTM. 38, 1932. № 2
23. Rekomendatsii po podboru sostavov betonnykh smesey dlya tyazhelykh i melkozernistykh betonov: Metodicheskoye posobiye // *Federal'noye avtonomnoye uchrezhdeniye «Federal'nyy tsentr normirovaniya, standartizatsii i otsenki sootvetstviya v stroitel'stve»*. M., 2016. 100 s.
24. Vinogradov YU.I., Khokhlov S.V. Opredeleniye vykhoda otseva pri proizvodstve shchebnya v zavisimosti ot osnovnykh parametrov burovzryvnykh rabot // *Vzryvnoye delo*. 2015. № 113-70. S. 126-132.

Makeev A. I.

Voronezh State Technical University, Voronezh,
candidate of technical sciences, associate professor. technology of building materials, products and structures
E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru

Chernyshov E. M.

Voronezh State Technical University, Voronezh,
Academician of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Academic Center "Arkhstroynauka"
E-mail: chem@vgasu.vrn.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый объем – не менее 100 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте www.build.oreluniver.ru

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 777-318

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.
+7 (4862) 73-43-49

www.oreluniver.ru/science/journal/sir/
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор С.Ю. Савин
Компьютерная верстка С.Ю. Савин

Подписано в печать 22.03.2018 г.
Дата выхода в свет 29.03.2018 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 8,5.
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической
базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.