

№1 (21)
2025

Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

СОДЕРЖАНИЕ

РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ А.Е. Донцова, О.Н. Столяров	3-11
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ВИНТОВЫХ СВАЙ НА ВЫДЕРГИВАНИЕ ПРИ НЕДРЕНИРОВАННОМ ПОВЕДЕНИИ ОСНОВАНИЯ А.В. Яваров, А.А. Астахов, М.В. Федоров, В.А. Маликова	12-22
МЕТОДЫ РАСЧЁТА ВАНТОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ А.С. Суббота, Ф.С. Школяр	23-33
ЛЕГКИЕ СТАЛЬНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ КЫРГЫЗСТАН В.С. Семенов, А.К. Акматов, В.А. Рыбаков, С.М. Амеличев	34-44
СИСТЕМА СБОРА МОРСКИХ ОТХОДОВ: ТЕХНОЛОГИИ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ Н.Т. Фам	45-54

CONTENTS

TEXTILE-REINFORCED CONCRETE BEAMS DESIGN APPROACHES A.E. Dontsova, O.N. Stolyarov	3-11
PULLOUT BEARING CAPACITY OF SCREW PILES UNDER UNDRAINED BEHAVIOUR OF SUBSOIL A.V. Yavarov, A.A. Astahov, M.V. Fedorov, V.A. Malikova	12-22
METHODS OF VISUAL PROGRAMMING BASED STEEL WIRE CABLE SYSTEM STRUCTURAL ANALYSIS A.S. Subbota, F.S. Shkoliar	23-33
LIGHTWEIGHT THIN-WALLED STEEL STRUCTURES IN THE REPUBLIC OF KYRGYZSTAN V.S. Semenov, A.K. Akmatov, V.A. Rybakov, S.M. Amelichev	34-44
REVIEW OF OCEAN WASTE COLLECTION SYSTEMS: TECHNOLOGIES, EFFECTIVENESS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT DIRECTIONS N. T. Pham	45-54

УДК 624.074.421

РАСЧЕТ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА ПО ПРОЧНОСТИ

А.Е. Донцова, О.Н. Столяров

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В данном исследовании рассматриваются два базовых подхода к расчету изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона. Расчет ведется исходя из того, что действующий изгибающий момент в сечении балки не должен превышать предельно допустимого изгибающего момента. Первый подход основан на расчете по прочности армирующих волокон на растяжение. Второй подход основан на расчете по аналогии с железобетонными изгибаемыми элементами. Расчеты проведены на примере образцов балок из текстильно-армированного бетона, армированных щелочестойкими стеклянными и углеродными ровингами. Образцы балок были испытаны на изгиб для сопоставления экспериментальных данных с аналитическими. Было выявлено, что расчетные моменты закономерно соответствуют экспериментальным данным, однако необходимо введение понижающих коэффициентов: 0,20 для первого подхода, и 0,25 для второго подхода. Существует множество факторов, которые могут учитывать в себе данные понижающие коэффициенты. Самыми очевидными являются неидеальность сцепления армирующих ровингов с бетоном, внутренние напряжения и проскальзывания между филаментами внутри ровинга, иной характер трещинообразования по сравнению с классическим железобетоном. Учет сложностей работы конструкций из текстильно-армированного бетона может быть произведен посредством введения более сложных расчетных моделей, что и планируется выполнить в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон, композитная арматура, текстильное армирование, изгиб, прочность на изгиб, расчет конструкций.

Ссылка для цитирования: Донцова А.Е., Столяров О.Н. Расчет изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона по прочности // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 3-11. EDN: HYOHRO

TEXTILE-REINFORCED CONCRETE BEAMS DESIGN APPROACHES

A.E. Dontsova, O.N. Stolyarov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. Two basic design approaches for beams made of textile-reinforced concrete are considered in this study. The global approach is that the bending moment in the beam section should not exceed the ultimate bending moment. The first approach is based on the calculation of the tensile strength of reinforcing fibers. The second approach is based on the steel-reinforced concrete design. The beam samples of concrete reinforced with alkali-resistant glass and carbon rovings were manufactured. The beam samples have been tested for three-point bending. The experimental data has been compared to the results of analytical design. The calculated ultimate moments correspond to the experimental data, but it was necessary to introduce the reduction factors: 0.20 for the first approach and 0.25 for the second approach. The reduction factors may consider a wide list of factors. The most obvious are the imperfection of the bond between the reinforcement and the concrete matrix, internal stresses and slippage between the filaments of the rovings, and a different nature of crack formation compared to traditional steel-reinforced concrete. These complexities of textile-reinforced concrete structures can be taken into account by introducing more complex calculation models.

Keywords: textile-reinforced concrete, textile reinforcement, non-metallic reinforcement, flexural strength, design approach, structural design.

For citation: Dontsova A.E., Stolyarov O.N. Textile-reinforced concrete beams design approaches // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 3-11. EDN: HYOHRO

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что текстильно-армированный бетон (ТАБ) появился еще в 1990-х годах, и его конструктивные свойства активно исследуются в последние два десятилетия, применение текстильных материалов для армирования бетонных матриц все еще считается новаторским подходом. До сих пор отсутствуют нормативно-технические документы, регламентирующие проектирование и расчет конструкций из текстильно-армированного бетона, а научные исследования, в основном, фокусируются на базовых механических свойствах материала: прочности на изгиб и на разрыв. В целом, возможно применение нормативов, разработанных для железобетона. Целевые параметры результирующей конструкции сохраняются неизменными для любых бетонных конструкций: прочность, надежность, функциональность, экономичность. При этом, в расчете должен быть произведен учет особенностей сцепления текстильных сеток с бетонной матрицей. Следует также ввести коррективы ввиду различий в характеристиках текучести неметаллического армирования по сравнению со стальным.

Бетон является хрупким материалом, и его прочность на растяжение как правило на порядок ниже, чем прочность на сжатие. Чтобы компенсировать его низкую способность к растяжению, в бетонные элементы добавляют армирующие стержни, которые воспринимают растягивающие нагрузки, и предотвращают разрушение конструкции. Основное правило проектирования строительных конструкций заключается в том, что приложенная нагрузка не должна превышать максимальную неразрушающую нагрузку. Большинство строительных норм и правил так или иначе основаны на этом принципе. Так, в СП 63.13330.2018 этот принцип сформулирован следующим образом: усилие от внешних нагрузок и воздействий в сечении при расчете по прочности не должно превышать предельного усилия, которое может быть воспринято элементом в этом сечении ($F \leq F_{ult}$). Аналогичен ему и принцип для расчета изгибаемых элементов: изгибающий момент от внешней нагрузки не должен превышать предельного изгибающего момента, который способно воспринять сечение элемента ($M \leq M_{ult}$). Аналогичным образом регламентируется расчет конструкций и в американском стандарте ACI 318-14, и в прочих широко применяемых по всему миру стандартах по проектированию бетонных и железобетонных конструкций. Предельный изгибающий момент для рассматриваемого сечения может быть определен через геометрические параметры балки и прочностные свойства используемого бетона и армирования. Расчет и проектирования значительно облегчаются при использовании рассмотренного принципа совместно с рядом упрощений: гипотезой плоских сечений, идеальным сцеплением между бетоном и армированием, невосприятием бетоном растягивающих нагрузок в растягивающей зоне, прямой взаимосвязью между напряжениями и деформациями.

Рассмотренный принцип является универсальным, и может быть применен для проектирования изгибаемых элементов из текстильно-армированного бетона, однако следует модифицировать упрощения в соответствии с механическими свойствами текстильно-армированного бетона. Наиболее важным является учет наличия проскальзывания текстильных армирующих ровингов в бетонной матрице под растягивающей нагрузкой. В контексте композитных материалов ровингами называют жгуты или пучки из параллельно направленных не переплетённых волокон. Композитные ровинги в текстильно-армированном бетоне являются аналогами стальных стержней в армоцементе. При достижении нагрузки, достаточной для появления трещин, идеальная связь между армированием и бетонной матрицей нарушается, и в областях трещин возникает перепад напряжения в бетоне и армирующих ровингах. При этом бетон воспринимает часть растягивающей нагрузки, хотя в рамках упрощений считается, что всё растяжение претерпевает арматура.

Исследования, описывающие испытания образцов балок из текстильно-армированного бетона на изгиб, представлены в [1–9]. В [1] исследуется влияние расположения армирующей сетки и её густоты на конечную прочность ТАБ на изгиб. Влияние плетения полотна на прочность композита было изучено в [8, 10]. В [11] представлены результаты статического и циклического испытаний текстильно-армированных бетонных балок на изгиб, при армировании ШС-стеклянными и углеродной сетками. Общий вид диаграммы растяжения образца текстильно-армированного бетона представлен на рис. 1. Можно разделить элементы диаграммы на условные области, включающие в себя: плато трещинообразования, область развития трещин, точку пиковой нагрузки, и точку разрушения образца [12].

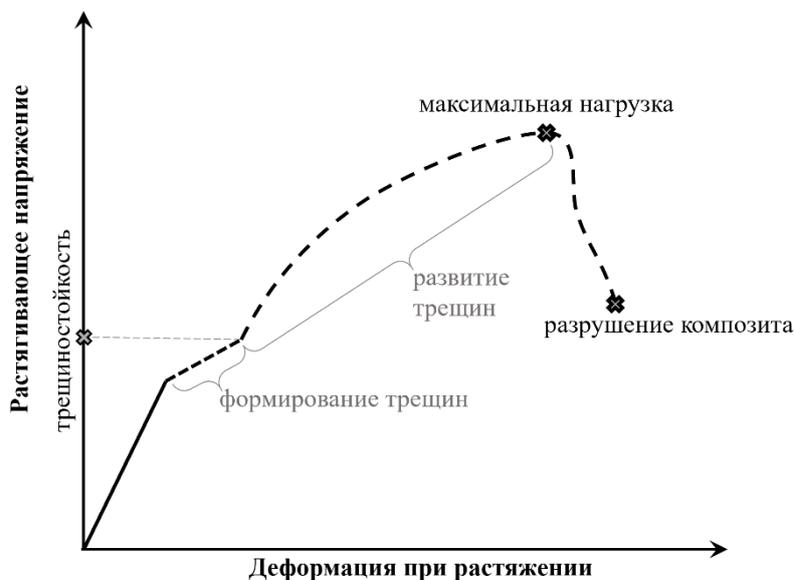


Рис. 1. Диаграмма растяжения образцов текстильно-армированного бетона
Fig. 1. Stress-strain curve for TRC under tension

Различают несколько сценариев разрушения элементов ТАБ: разрушение при расслоении [9], сдвиговое разрушение [9], телескопическое разрушение [13], хрупкое разрушение. Сопутствующими факторами, влияющими на прочность текстильно-армированного бетона на изгиб, являются прочностные свойства самих армирующих сеток и сцепление армирующих нитей с бетонной матрицей [3, 14–16]. Определяющими характеристиками при подборе армирующего текстиля являются поведение ровингов при растяжении, их стойкость к щелочной среде, и поведение ТАБ-элементов, армированных этими ровингами, при растяжении [16, 17]. Влияние наличия пропиток на сцепление армирующих ровингов с бетоном рассмотрено в [2, 4, 18, 19]. В [20, 21] рассмотрено влияние повышенных температур на сцепление текстиля с бетоном.

С накоплением базы экспериментальных данных по поведению текстильно-армированного бетона под нагрузкой и характере разрушения элементов из ТАБ, стало возможным создание аналитических моделей, описывающих поведение материала. Конечно-элементное моделирование поведения элементов из текстильно-армированного бетона под нагрузкой выполнено в работах [3, 14, 22–25]. Модель, учитывающая сцепление армирующих ровингов с бетонной матрицей разрабатывается в [23]. Метод конечных разностей использовался в [26] для прогнозирования трещинообразования при разрушении на растяжение. В работах [27–30] разрабатываются возможные расчетные схемы для проектирования строительных конструкций из текстильно-армированного бетона.

Целью данной работы является рассмотрение базовых подходов к расчету конструкций из армированного бетона. Для достижения поставленной цели в рамках исследования были изготовлены и испытаны на трехточечный изгиб образцы балок из текстильно-армированного бетона. Образцы были армированы щелочестойкими (ЩС) стеклянными и углеродными ровингами. Для моделей изготовленных образцов проводится расчет предельных изгибающих моментов в сечении по двум расчетным методикам. Первый подход фокусируется на предельной прочности армирующих ровингов на разрыв. Второй подход является аналогом расчета железобетонной балки на изгиб. Полученные численные и экспериментальные данные сравниваются для выявления соответствий и закономерностей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления образцов элементов из ТАБ были использованы основовязанные текстильные сетки из щелочестойких (ЩС) стеклянных и углеродных ровингов. Механические свойства армирующих ровингов, использованных для армирования образцов, представлены в табл. 1. Механические свойства были определены экспериментально в [31, 32].

Таблица 1. Механические свойства армирующих ровингов
Table 1. Mechanical properties of reinforcing rovings

Характеристика	Тип ровингов	
	ЩС стеклянные	Углеродные
Прочность на растяжение (МПа)	1042	2090
Линейная плотность (текс)	2400	1600
Поверхностная плотность (г/м ²)	620	510
Число ровингов в сечении (на 1 метр ширины, шт.)	80	70
Удельная плотность (кг/м ³)	2680	1820
Площадь сечения ровинга (мм ²)	0,896	0,879
Удельная площадь волокон (мм ² /м)	71,642	61,538
Модуль упругости (ГПа)	66,5	173

Для бетонирования образцов использовалась мелкозернистая бетонная смесь. Состав бетонной смеси представлен в табл.2.

Таблица 2. Состав мелкозернистого бетона для изготовления образцов
Table 2. Fine-grain concrete mix proportion

Составляющее	Цемент М400	Песок	Пластификатор	Вода
Масса, г	665	1213г	7	245

В качестве экспериментальных образцов были изготовлены балки с габаритами 15x50x200 мм и 40x40x160 мм. Образцы были забетонированы и хранились во влажной среде не протяжении 28 дней для набора прочности бетоном. Контрольные образцы изготовленного бетона, испытанные на сжатие, показали прочность на сжатие $R_b = 24$ МПа.

Образцы балок были испытаны на изгиб на электромеханической испытательной машине Instron 5965. Испытания проводились в следующих условиях: расстояние между опорами составляло 150 мм или 130 мм для образцов длиной 200 мм или 160 мм, соответственно. Нагружение производилось с постоянной скоростью в 1 мм/мин. Схема нагружения приведена на рис. 2.

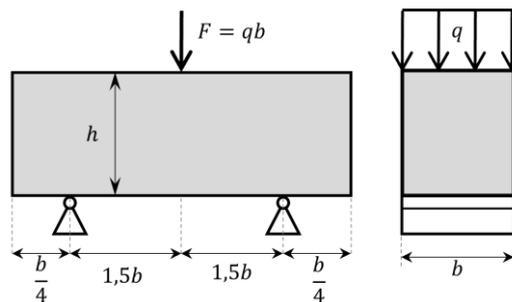


Рис. 2. Схема нагружения балок при трехточечном изгибе
Fig. 2. Schematic view of a sample beam under three-point bending

Предел прочности на изгиб был рассчитан по формуле (1).

$$\sigma = M_{max} / W_z; \tag{1}$$

где максимальный изгибающий момент M_{max} вычислялся по формуле (2).

$$M_{max} = \frac{F_{max}}{2} \cdot \frac{l}{2}. \tag{2}$$

где F_{max} – максимальная сила;

l – пролет между опорами.

В расчетах W_z – это момент инерции балки, вычисляемый по формуле (3).

$$W_z = \frac{bh^2}{6}, \tag{3}$$

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТЕКСТИЛЬНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА

Можно выделить два основных подхода к проектированию бетонных конструкций, которые можно распространить и на текстильно-армированный бетон: использование прочности армирования на растяжение в качестве основного критерия надежности и расчет сечения из уравнений равновесия внутренних и внешних сил, действующих в сечении в его предельном состоянии.

ПОДХОД 1: ПРОЧНОСТЬ АРМИРОВАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ КАК ОСНОВНОЙ КРИТЕРИЙ

При проектировании по прочности армирования на растяжение используется формула (4).

$$M_u = R_s \cdot A_s \cdot h_0, \quad (4)$$

где M_u – максимально допустимый изгибающий момент, Н·м;

R_s – прочность текстильного волокна на разрыв, Н/мм²;

A_s – площадь армирующих волокон в сечении, мм²;

h_0 – полезная высота сечения, м. Зависит от расположения армирующих стержней в растянутой зоне.

Схема поперечного сечения образца и геометрические параметры сечения изображены на рисунке 3.

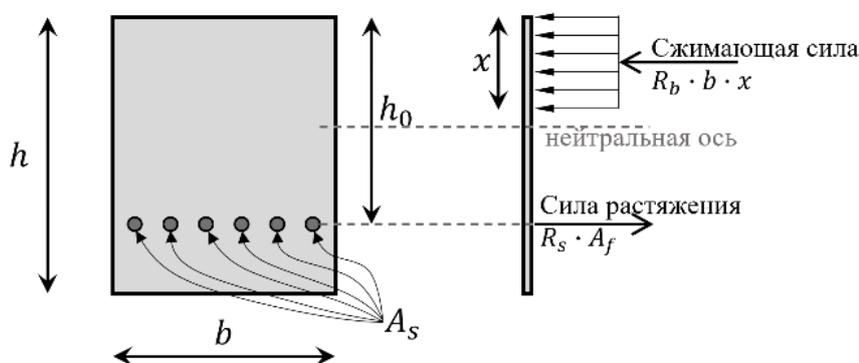


Рис. 3. Геометрические параметры сечения и схема внутренних усилий
Fig. 3. Beam section parameters and internal forces distribution under flexural load

При проектировании из уравнений равновесия сил, действующих в сечении, используется формула (5).

$$M_u = R_s \cdot A_s \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right), \quad (5)$$

где x – высота сжатой зоны, м, которая может быть рассчитана по формуле (6):

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b}, \quad (6)$$

Так как в рассматриваемых элементах отсутствует армирование в сжатой зоне, то слагаемое $R_{sc} \cdot A'_s$ в формуле (6), учитывающее наличие арматуры в сжатой зоне, равняется нулю. Из-за этого, формулы (4) и (5) отличаются незначительно, поэтому данный подход к проектированию может быть обобщен единой формулой (5), учитывающей высоту сжатой зоны, и дающей меньший результат.

ПОДХОД 2: ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА НА СЖАТИЕ КАК ОСНОВНОЙ КРИТЕРИЙ

При проектировании железобетонных балок используется формула (7).

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a'). \quad (7)$$

Поскольку рассматриваемые элементы из текстильно-армированного бетона армированы одним слоем текстильной сетки, второе слагаемое, учитывающее сопротивление стального армирования по верхней грани балки, равно нулю. Формула приобретает вид (8).

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right). \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходные данные для расчета выбираются на основании изготовленных экспериментальных образцов. Результаты экспериментальных данных по испытаниям образцов на изгиб сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Результаты испытаний балок на изгиб
Table 3. Three-point bending test results

№	Тип армирования	Размеры, мм	F_{max} , Н	δ , МПа
1	Стекланные	15,6x200,0x50,0	198,54	3,67
2	Стекланные	19,4x200,0x50,0	224,15	3,67
3	Стекланные	36,6x160,0x41,7	978,58	3,42
4	Углеродные	12,4x200,0x50,0	155,09	4,54
5	Углеродные	13,8x200,0x50,0	180,22	4,26
6	Углеродные	32,2x160,0x41,4	985,50	4,27

Результаты расчета рассматриваемых балок аналитическими способами сведены в таблицу 4. При этом полезная высота сечения h_0 рассчитывалась как $0,6h$, в соответствии с расположением армирующих ровингов в сечении при бетонировании.

Таблица 4. Экспериментальные и расчетные данные по прочности балок
Table 4. Experimental and calculated ultimate bending moments

№	Тип армирования	Параметры сечения				Эксперимент		Подход 1		Подход 2	
		b , м	h , м	l , м	x , м	F_{max} , Н	M_{max} , Н·м	M_u , Н·м	$\frac{M_{max}}{M_u}$	M_{ult} , Н·м	$\frac{M_{max}}{M_{ult}}$
1	Стекланные	0,05	0,0156	0,2	0,00536	199	9,93	60,2	0,165	43,0	0,231
2	Стекланные	0,05	0,0194	0,2	0,00536	224	11,21	74,9	0,150	57,6	0,194
3	Стекланные	0,0417	0,0366	0,1	0,00536	979	24,46	117,8	0,208	103,4	0,237
4	Углеродные	0,05	0,0124	0,2	0,00536	155	7,75	47,8	0,162	30,6	0,253
5	Углеродные	0,05	0,0138	0,2	0,00536	180	9,01	53,2	0,169	36,0	0,250
6	Углеродные	0,0414	0,0322	0,1	0,00536	986	24,64	102,9	0,239	88,6	0,278

При первичном расчете расчетные значения максимально допустимых моментов оказываются значительно выше фактически полученных экспериментальных значений. В среднем, теоретически полученные моменты превосходили экспериментально полученные в 4 раза. При этом, можно отметить, что полученные моменты закономерно соответствовали экспериментальным данным. При введении в теоретические расчеты понижающего коэффициента, равного 0,2 для M_u и 0,25 для M_{ult} , можно достичь близких значений теоретических и экспериментальных данных. Сводные данные с учетом коэффициента 0,25 представлены в табл.5.

Таблица 5. Сводные данные испытаний и расчетов балок из ТАБ
Table 5. Ultimate bending moments considering reduction factors for calculated data

№	Тип армирования	M , Н·м	$0,2 * M_n$, Н·м	$0,25 * M_{ult}$, Н·м
1	стекланные	9,9	12,0	10,7
2	стекланные	11,2	15,0	14,4
3	стекланные	24,5	23,6	25,9
4	углеродные	7,8	9,6	7,7
5	углеродные	9,0	10,6	9,0
6	углеродные	24,6	20,6	22,2

Графическое представление полученных экспериментальных и расчетных данных представлено на рис.4.

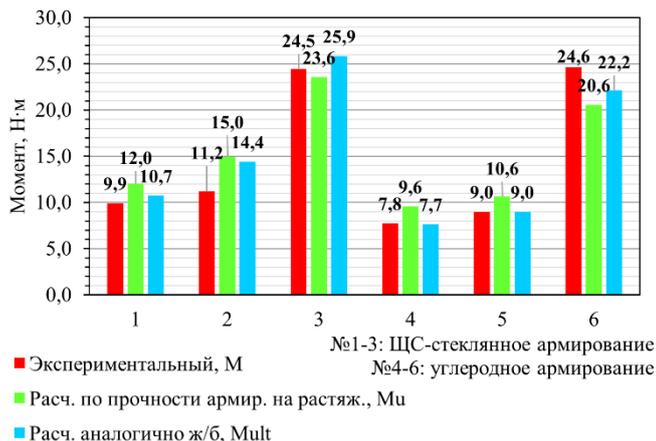


Рис. 4. Предельные изгибающие моменты для балок из текстильно-армированного бетона
Fig. 4. Ultimate banding moments for TRC beams considering reduction factors for calculated data

ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения расчетных напряжений при разрушении образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб составили $\sigma_{срур} = 4,19$ МПа для армированных углеродными ровингами образцов и $\sigma_{сршс} = 3,25$ МПа для армированных ШС-стеклянными ровингами образцов. Такое соотношение результатов эксперимента совпадает с ожиданиями, поскольку прочность углеродных ровингов выше прочности ШС-стеклянных. Полученные в рамках экспериментов данные и общее поведение элементов из ТАБ при изгибе согласовываются с результатами аналогичных испытаний, представленных в исследовании [33].

Сравнение результатов экспериментальных и расчетных данных проводилось по изгибающим моментам в сечениях балки. При расчете элементов по прочности текстильного армирования на растяжение результаты расчетов близятся к экспериментальным данным при использовании понижающего коэффициента, равного 0,25. При расчете элементов из текстильно-армированного бетона как изгибаемых балок из железобетона результаты расчетов близятся к экспериментальным данным при использовании понижающего коэффициента, равного 0,20. Как уже было упомянуто в рамках обзора литературных источников, существует ряд значительных отличий текстильного армирования от стального. Различия в сцеплении армирующих стержней с бетонной матрицей, анизотропность и немонолитность армирующего материала, сплетённого из большого числа филаментов, внутреннее проскальзывание филаментов друг относительно друга – все эти факторы могут быть заложены в выявленном понижающем коэффициенте. Также необходимо отметить геометрические отличия сечения элемента из текстильно-армированного бетона, которое является скорее плоским, и сечения балок из традиционного железобетона, которое является более вытянутым в высоту. Более сложные подходы к расчету элементов из текстильно-армированного бетона были предложены в работах [22–24, 34]. Подходы, учитывающие проскальзывание армирующих ровингов, возникновение трещин в сечении, усложненную диаграмму растяжения ТАБ по сравнению с железобетоном, упрочнение при растяжении и другие факторы, являются более трудоемкими по сравнению с базовыми расчетными подходами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс проектирования строительных конструкций из текстильного армированного бетона требует учета уникальных свойств текстильного армирования. Принципы проектирования балок из ТАБ обычно совпадают с принципами проектирования балок из железобетона, однако присутствуют и отличия, связанные со сцеплением арматуры с бетонной матрицей и диаграммами растяжения армирующих материалов. Базовые предложения для расчета элементов из ТАБ основаны на тех же упрощениях, на которых функционируют классические расчеты железобетонных элементов. В данной работе были рассмотрены простейшие подходы, доступные для расчета изгибаемых балок из текстильно-армированного бетона. Результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными. В результате можно сделать следующие выводы по работе:

1. Средние значения расчетных напряжений при разрушении образцов из текстильно-армированного бетона на изгиб составили $\sigma_{срур} = 4,19$ МПа для армированных углеродными ровингами образцов и $\sigma_{сршс} = 3,25$ МПа для армированных ШС-стеклянными ровингами образцов.

2. Результаты расчета предельно допустимых моментов по прочности армирующих волокон на растяжение оказались сопоставимыми с результатами, полученными по подходу, учитывающему прочность бетона на сжатие.

3. Расчетные моменты закономерно соотносились с полученными экспериментальными изгибающими моментами с постоянным превышением экспериментальных моментов в 5 раз для расчета по прочности армирующих волокон на растяжение и в 4 раза для расчета по аналогии с железобетонными элементами. Поэтому для расчетных данных были введены понижающие коэффициенты 0,20 и 0,25 соответственно.

4. В дальнейших исследованиях планируется исследовать природу полученных понижающих коэффициентов и факторы, на них влияющие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Colombo I.G. et al. Erratum to: Textile Reinforced Concrete: experimental investigation on design parameters // *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46, No. 11. Pp. 1953–1971. doi.org/10.1617/s11527-013-0023-7.
2. Mansur de Castro Silva R., de Andrade Silva F. Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis // *Materials and Structures*. 2020. Vol. 53, No. 1. Pp. 17. doi.org/10.1617/s11527-020-1448-4.
3. Williams Portal N., Nyholm Thrane L., Lundgren K. Flexural behaviour of textile reinforced concrete composites: experimental and numerical evaluation // *Materials and Structures*. 2017. Vol. 50, No. 1. Pp. 4. doi.org/10.1617/s11527-016-0882-9.
4. Yin S., Xu S., Li H. Improved mechanical properties of textile reinforced concrete thin plate // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2013. Vol. 28, No. 1. Pp. 92–98. doi.org/10.1007/s11595-013-0647-z.
5. Häußler-Combe U., Hartig J. Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading // *Cement and Concrete Composites*. 2007. Vol. 29, No. 4. Pp. 279–289. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.012.
6. Volkova A. et al. Flexural Behavior of Textile-Reinforced Concrete // *MATEC Web of Conferences* / под ред. Murgul V. 2016. Vol. 53. Pp. 01016. doi.org/10.1051/mateconf/20165301016.
7. Halvaei M. et al. Experimental investigation and modelling of flexural properties of carbon textile reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. Pp. 120877. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120877.
8. Kurban M., Babaarslan O., Çağatay İ.H. Investigation of the flexural behavior of textile reinforced concrete with braiding yarn structure // *Construction and Building Materials*. Elsevier, 2022. Vol. 334. Pp. 127434. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127434.
9. Du Y. et al. Flexural Behaviour of Carbon Textile-Reinforced Concrete with Prestress and Steel Fibres // *Polymers*. 2018. Vol. 10, No. 1. Pp. 98. doi.org/10.3390/polym10010098.
10. Lee M., Mata-Falcón J., Kaufmann W. Load-deformation behaviour of weft-knitted textile reinforced concrete in uniaxial tension // *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. Springer Science and Business Media B.V., 2021. Vol. 54, No. 6. Pp. 1–27. doi.org/10.1617/S11527-021-01797-5/FIGURES/15.
11. Hegger J., Voss S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete // *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30, No. 7. Pp. 2050–2056. doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.006.
12. Peled A., Mobasher B., Bentur A. *Textile Reinforced Concrete*. CRC Press, 2017. doi.org/10.1201/9781315119151.
13. Alexandre V.J.F., Boshoff W.P., Combrinck R. Damage evaluation and mechanisms of textile reinforced concrete during telescopic failure // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 403. Pp. 133055. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133055.
14. Hegger J. et al. Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39, No. 8. Pp. 765–776. doi.org/10.1617/s11527-005-9039-y.
15. Preinstorfer P. et al. Cracking behaviour of textile-reinforced concrete with varying concrete cover and textile surface finish // *Composite Structures*. Elsevier, 2023. Vol. 312. Pp. 116859. doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116859.
16. Banholzer B., Brockmann T., Brameshuber W. Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements // *Materials and Structures*. 2006. Vol. 39, No. 8. Pp. 749–763. doi.org/10.1617/s11527-006-9140-x.
17. Scheurer M., Gries T. Comparative evaluation of textiles for use in textile reinforced concrete // *Materials Today: Proceedings*. Elsevier, 2023. doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.477.
18. Valeri P., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Tensile response of textile reinforced concrete // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258. Pp. 119517. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119517.
19. Kulas C. Actual applications and potential of textile-reinforced concrete // *GRC*. 2015. Vol. 1247, No. C. Pp. 1–11.
20. Silva R.M. de C. et al. Bond behavior of polymer- and mineral-impregnated carbon fiber yarns towards concrete matrices at elevated temperature levels // *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 133. Pp. 104685. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104685.
21. Silva F. de A. et al. Effects of elevated temperatures on the interface properties of carbon textile-reinforced

- concrete // Cement and Concrete Composites. 2014. Vol. 48. C. 26–34. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.01.007.
22. Portal N. et al. Numerical modelling of textile reinforced concrete // Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013. 2013. C. 886–897.
23. Holler S. et al. Computational model of textile-reinforced concrete structures // Computers & Structures. 2004. Vol. 82, No. 23–26. C. 1971–1979. doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.03.076.
24. Valeri P., Ruiz M.F., Muttoni A. Modelling of Textile Reinforced Concrete in bending and shear with Elastic-Cracked Stress Fields // Engineering Structures. 2020. Vol. 215. C. 110664. doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110664.
25. Tran M.T., Vu X.H., Ferrier E. Mesoscale numerical modeling and characterization of the effect of reinforcement textile on the elevated temperature and tensile behaviour of carbon textile-reinforced concrete composite // Fire Safety Journal. 2020. Vol. 116. Pp. 103186. doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103186.
26. Yao Y. et al. Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads // Cement and Concrete Composites. 2015. Vol. 64. Pp. 49–61. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.009.
27. Raupach M. et al. Textile-reinforced concrete // Textile Fibre Composites in Civil Engineering. Elsevier, 2016. Pp. 275–299. doi.org/10.1016/B978-1-78242-446-8.00013-6.
28. Rempel S., Ricker M., Hegger J. Safety Concept for Textile-Reinforced Concrete Structures with Bending Load // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, No. 20. Pp. 7328. doi.org/10.3390/app10207328.
29. Lepenies I.G., Richter M., Zastrau B.W. A Multi-Scale Analysis of Textile Reinforced Concrete Structures // PAMM. 2008. Vol. 8, No. 1. Pp. 10553–10554. doi.org/10.1002/pamm.200810553.
30. Yu Q. et al. A consistent safety format and design approach for brittle systems and application to textile reinforced concrete structures // Engineering Structures. 2021. Vol. 249. Pp. 113306. doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113306.
31. Kirsanov A.I., Stolyarov O.N. Mechanical properties of synthetic fibers applied to concrete reinforcement // Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University, 2018. Vol. 80, No. 4. Pp. 15–23. doi.org/10.18720/MCE.80.2.
32. Quadflieg T., Stolyarov O., Gries T. Influence of the fabric construction parameters and roving type on the tensile property retention of high-performance rovings in warp-knitted reinforced fabrics and cement-based composites // Journal of Industrial Textiles. 2017. Vol. 47, No. 4. Pp. 453–471. doi.org/10.1177/1528083716652831.
33. Volkova A.A. et al. Structure and properties of textile reinforced concrete // Magazine of Civil Engineering. St-Petersburg State Polytechnical University, 2015. Vol. 59, No. 7. Pp. 50–56. doi.org/10.5862/MCE.59.5.
34. Alrshoudi F.A.S. Textile Reinforced Concrete: Design Methodology and Novel Reinforcement. The University of Leeds, 2015. 246 p.

ОБ АВТОРАХ

Анна Евгеньевна Донцова (SPIN: 2947-9339) – ассистент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: anne.dontsoova@ya.ru

Олег Николаевич Столяров (SPIN: 7594-5118) – доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: stolyarov_on@spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Anna E. Dontsova – assistant at the School of hydrotechnical and power engineering, Institute of Civil Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: anne.dontsoova@ya.ru

Oleg N. Stolyarov – associate professor at the School of hydrotechnical and power engineering, Institute of Civil Engineering. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: stolyarov_on@spbstu.ru

УДК 624.154.1

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ВИНТОВЫХ СВАЙ НА ВЫДЕРГИВАНИЕ ПРИ НЕДРЕНИРОВАННОМ ПОВЕДЕНИИ ОСНОВАНИЯ

А.В. Яваров^{1,2}, А.А. Астахов¹, М.В. Федоров¹, В.А. Маликова³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

² Центр гидроэкологических исследований, г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

³ Морнефтегазпроект, г. Тюмень (Российская Федерация)

Аннотация. В представляемой публикации с помощью теории предельного равновесия получены выражения для расчета несущей способности винтовых свай на выдергивание при недренированном поведении основания. Вклад лопастей учтен путем применения аналитических решений К.М. Мартина, М.Ф. Рэндольфа и Р.С. Мерифилда. По результатам численных решений методом предельного анализа в программном комплексе OptumG2 установлена зависимость несущей способности лопасти от размеров ствола сваи. Для оценки трения по контакту ствола сваи и массива грунта учтен переход грунта в нарушенное состояние в околосвайной зоне, вызывающий снижение несущей способности сваи по боковой поверхности. Приведенные формулы использованы при расчете несущих способностей винтовых свай на двух площадках. Рассчитанные и измеренные силы выдергивания близки друг к другу. Разница составляет менее 10%. При этом для проведения расчетов достаточно только величин недренированной прочности грунта. Предложенные формулы рекомендованы для дальнейшей апробации при различных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: теория предельного равновесия грунтов, несущая способность винтовых свай на выдергивание, метод предельного анализа, метод конечных элементов, осесимметричные задачи, круглая плита.

Ссылка для цитирования: Яваров А.В., Астахов А.А., Федоров М.В., Маликова В.А. Несущая способность винтовых свай на выдергивание при недренированном поведении основания // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 12-22. EDN: QBKJRD

PULLOUT BEARING CAPACITY OF SCREW PILES UNDER UNDRAINED BEHAVIOUR OF SUBSOIL

A.V. Yavarov^{1,2}, A.A. Astahov¹, M.V. Fedorov¹, V.A. Malikova³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg (Russian Federation)

² Center for Hydroecological Research, Saint Petersburg (Russian Federation)

³ Morneftegazproyekt, Tyumen (Russian Federation)

Abstract. In the present paper, expressions for calculating pullout bearing capacity of screw piles under undrained subsoil behaviour are derived using the theory of limit equilibrium. The bearing capacity contribution of screw flights is factored in by means of the analytical solutions of C.M. Martin, M.F. Randolph and R.S. Merrifield. Based on the results of numerical solutions obtained using the method of limit analysis in OptumG2 software, values of dependency of the flight bearing capacity on the pile shaft dimensions are established. In evaluating skin friction, transition of adjacent soil into a disturbed state leading to a decrease in the lateral bearing capacity of the pile is taken into account. The formulae contained in the paper were used to calculate bearing capacity of screw piles at two sites. The calculated and measured in situ pull-out forces were closely aligned, given that the only soil parameter necessary for this calculation is the undrained strength. Consequently, it is recommended to further test the derived formulae under various geotechnical conditions.

Keywords: theory of limit equilibrium of soils, pullout bearing capacity of screw piles, limit analysis method, finite element method, axisymmetric problems, circular plate.

For citation: Yavarov A.V., Astahov A.A., Fedorov M.V., Malikova V.A. Pullout bearing capacity of screw piles under undrained behaviour of subsoil // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 12-22. EDN: QBKJRD

ВВЕДЕНИЕ

Для определения несущей способности винтовых свай могут использоваться принципиально разные подходы физического [1-7] и математического моделирования [7-12]. Даже при рассмотрении указанной задачи в качестве частной проблемы теории предельного равновесия [13-17] для ее решения применяется целая серия аналитических и численных методов [7, 8, 10-12]. Их совместное использование в исследованиях и нормах является следствием невозможности получения общего аналитического решения из-за многообразия конструкций винтовых свай и грунтовых условий. В тоже время, для наиболее распространенных ситуаций требуются решения, позволяющие оценить с достаточной точностью несущую способность винтовых свай.

Цель представляемой работы заключалась в предложении формулы для расчета несущей способности винтовой сваи на выдергивание при недренированном поведении массива грунта. В действующем СП 24.13330.2021 описанные геотехнические условия не рассмотрены.

Задачи исследования состояли в следующем:

1. Построение расчетной модели;
2. Оценка границ применимости аналитического решения К.М. Мартина и М.Ф. Рэндольфа;
3. Учет влияния ствола винтовой сваи на несущую способность лопасти;
4. Учет трения по боковой поверхности сваи;
5. Представление формул для расчетов винтовых свай с учетом возможного наличия нескольких лопастей;
6. Апробация результатов работы.

Для получения выражения несущей способности лопастей винтовых свай использованы аналитические решения теории предельного равновесия и результаты предельного анализа в программном комплексе OptumG2. При оценке несущей способности винтовых свай по боковой поверхности ствола применен подход, изложенный в СП 24.1330.2021, но сила трения стали по грунту определена с помощью редуцированного коэффициента адгезии.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

По результатам испытаний анкеров и якорей установлено, что при шаге лопасти в пределах до 0,6 ее диаметра, анкерную часть можно ввести в расчетную модель, как плоскую плиту [7]. Следовательно, рассматриваемую задачу допустимо решать в осесимметричной постановке. Ствол сваи тогда представляется в виде ферменного стержня или цилиндрической оболочки вращения.

Массив грунта при недренированном поведении задается, как идеально-связанное полупространство (угол внутреннего трения φ равен 0). В качестве сцепления среды c назначается недренированная прочность грунта c_u .

При анализе несущей способности лопасти контактная поверхность принимается гладкой.

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ К.М. МАРТИНА И М.Ф. РЭНДОЛЬФА

При выдергивании из идеально-связанного полупространства однолопастного грунтового анкера критическая сила по [11-12] есть:

$$Q = \pi (D/2)^2 c_u N_c, \quad (1)$$

где Q – выдергивающая сила, D – диаметр анкера, c_u – недренированная прочность, N_c – коэффициент несущей способности. Анкер и грунт считаются невесомыми. Поверхность плиты гладкая.

Изменение коэффициента N_c при увеличении глубины заложения лопасти проиллюстрировано в [11]. Для этого использован метод предельного анализа в виде модифицированного метода конечных элементов, заложенный в программном комплексе (далее – ПК) OptumG2 [18-20].

В осесимметричной постановке задачи грунтовой анкер задан круглой плитой, ствол – ферменным стержнем, грунт – объемным телом конечных размеров (рис.1). Область вовлекаемого в расчет массива грунта назначена таким образом, чтобы при дальнейшем увеличении модели результаты численных экспериментов не изменялись.

На боковой грани введен запрет перемещений по нормали к поверхности массива грунта, по нижней грани – запрет перемещений.

В качестве модели грунта использована идеальная упруго-пластическая модель с критерием прочности Треска-Сен-Венана.

Для передачи нагрузки добавлена вспомогательная плита. Плиты и стержень введены, как жесткие тела. Получение верхних и нижних оценок критической силы выполнено с разбиением расчётной модели на 10 000 элементов и 3 шагами адаптации сетки (рис.2) [11].

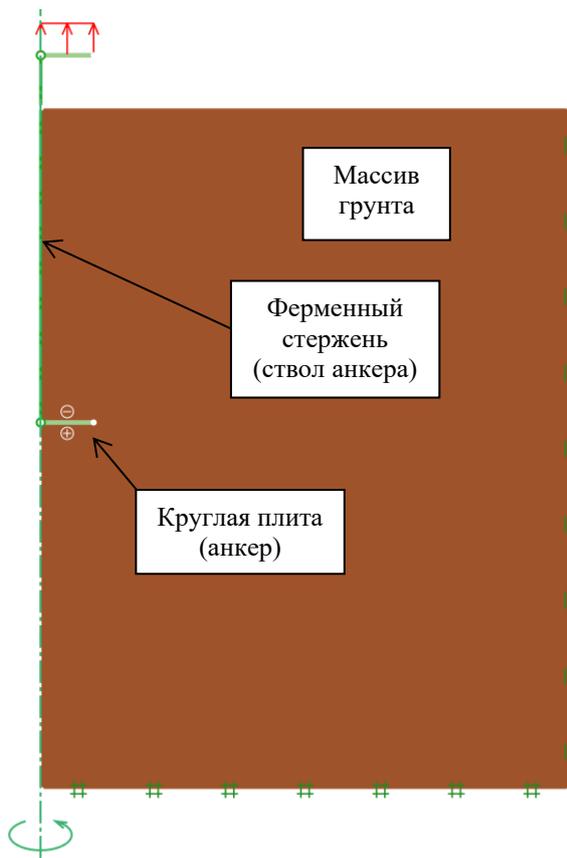


Рис. 1. Расчетная модель к осесимметричной задаче о выдергивании грунтового анкера
Fig. 1. Computational model for an axisymmetric problem of ground anchor pullout

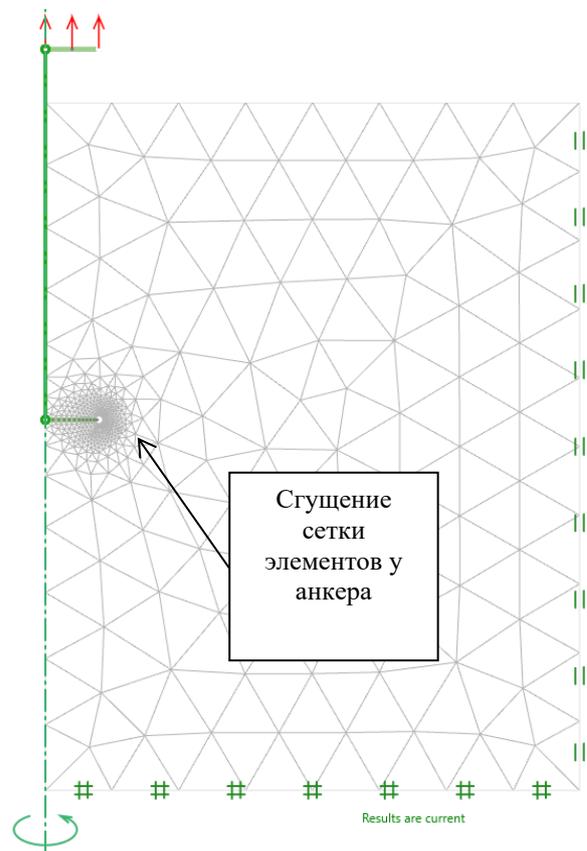


Рис. 2. Сеть конечных элементов со сгущением у анкера (лопасти)
Fig. 2. Finite element mesh with densification around the anchor (flight)

По результатам расчетов выделено три характерных сценария разрушения основания (рис.3): поверхностный, глубинный и переходный. Полученные результаты подтверждены экспериментальными работами, включая [1].

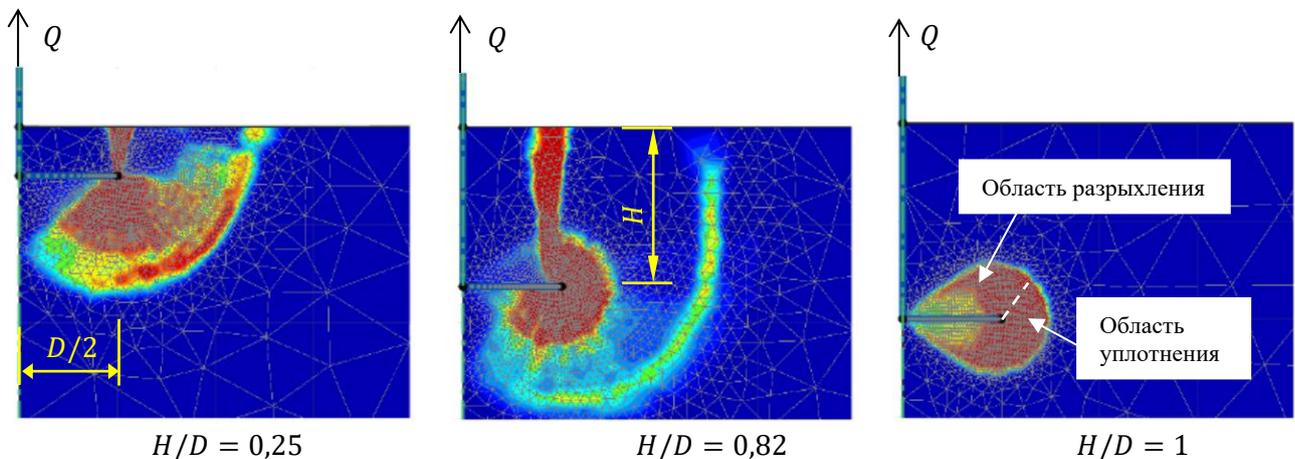


Рис. 3. Переход от общего (поверхностного) к локальному (глубокому) механизму разрушения. Осесимметричные задачи [11]
Fig. 3. Transition from general (surface) to local (deep) failure mechanism. Axisymmetric problems [11]

В большинстве случаев реализация локального механизма разрушения при выдергивании винтовой сваи обеспечивается требованиями СП 24.13330.2021 к глубине заложения лопасти.

При этом в зону сдвига попадает как разрыхлённый, так и уплотнённый при ввинчивании сваи грунт (рис.3). Соотношение описанных областей нарушенного состояния массива в каждой конкретной ситуации будет определять, среди прочего, отклонение вычисленных величин от результатов экспериментов. Также при глубинной схеме разрушения в формулу расчета анкера на выдергивание необходимо подставлять значение недренированной прочности грунта в области заложения лопасти, а не средневзвешенное значение для массива в целом.

На рис.4 продемонстрировано изменение N_c при возрастании отношения H/D . Соответственно, приведенные из [11] результаты находятся в отличном соотношении с аналитическим решением С.М. Мартина и М.Ф. Рэндольфа [10], по которому:

$$N_c = 3 + 3\pi \approx 12,42.$$

Следовательно, Q может вычислено по формуле [10-12]:

$$Q = \pi (D/2)^2 c_u N_c \approx \pi (D/2)^2 c_u 12,42. \quad (2)$$

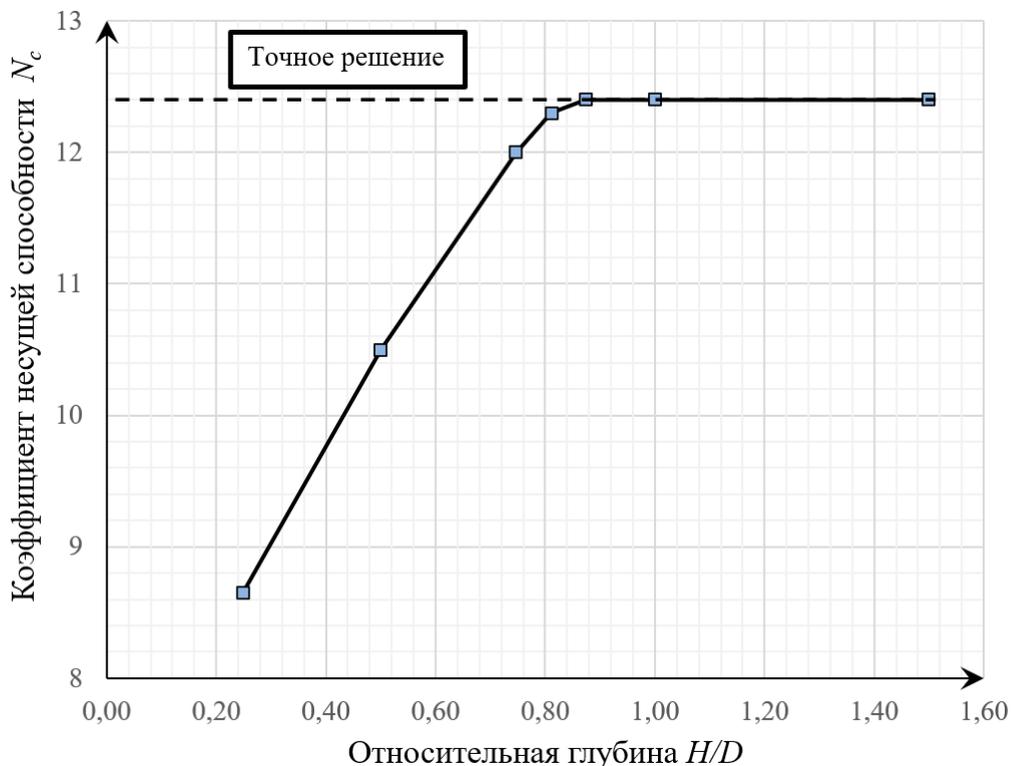


Рис. 4. Изменение коэффициента несущей способности N_c при увеличении относительной глубины H/D [11]

Fig. 4. Variation of the bearing capacity coefficient N_c with increasing relative depth H/D [11]

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СТВОЛА ВИНТОВОЙ СВАИ НА ЕЕ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ И НАЛИЧИЯ НЕСКОЛЬКИХ ЛОПАСТЕЙ

Рассмотренные выше решения подходят при расчете грунтовых анкеров, для конструкций которых характерна незначительная толщина ствола анкера. В случае винтовых свай такой подход может привести к существенным погрешностям.

Этот факт учтен в SFEM [21] понижением коэффициента N_c (табл. 1), однако приводится только зависимость от габаритов лопасти, то есть нет возможности учесть конкретные соотношения диаметров лопасти и ствола сваи.

Таблица 1. Приближенный метод учета толщины ствола винтовой сваи [21]
Table 1. Approximation method to factor in the thickness of a screw pile shaft

Диаметр лопасти сваи D	Коэффициент несущей способности N_c
Меньше чем 0,5 м	9
От 0,5 м до 1,0 м	7
Больше чем 1,0 м	6

В работе Р.С. Мери菲尔да [12] понижающий N_c коэффициент, обозначим его k_{sh} , предложено вычислять по формуле:

$$k_{sh} = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2,$$

где d – диаметр ствола сваи.

Однако, проведенные численные эксперименты в [12] показывают некоторую степень отступление от указанного выражения. Для уточнения влияния ствола сваи на несущую способность выполнено дополнительное численное моделирование в ПК OptumG2.

Нахождение верхней и нижней оценок выдергивающей силы Q потребовало построения ряда осесимметричных моделей системы свая-грунт. Они отличались между собой отношением диаметров ствола сваи к ее лопасти (рис.5).

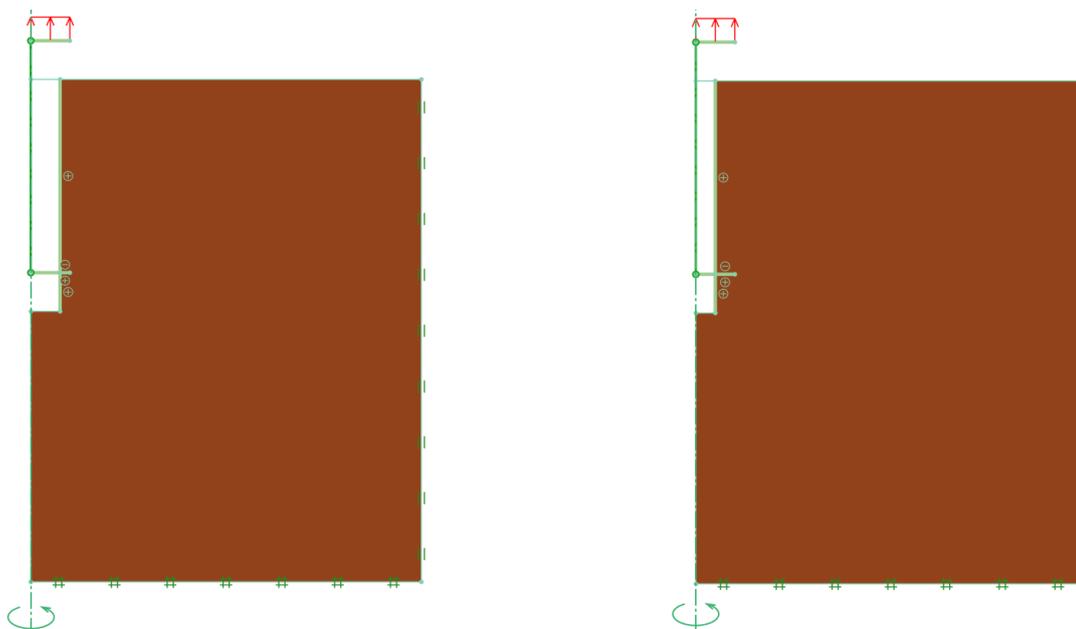


Рис. 5. Примеры расчетных моделей. Слева ствол сваи составляет 0,75 от диаметра лопасти, справа диаметр ствола равен половине диаметра лопасти

Fig. 5. Examples of computational models. On the left the pile shaft is 0,75 of the flight diameter, on the right the shaft diameter is half of the flight diameter

Расчетные схемы построены по аналогии с ранее рассмотренным случаем из [11]. При этом диаметр лопасти D принят равным 1 м, диаметр ствола d варьировался. Исходные данные назначены таким образом, чтобы выдергивающая сила Q оказывалась равной коэффициенту N_c (табл.2).

Вычисленные верхние и нижние оценки выдергивающей силы (табл. 3) демонстрируют уменьшение N_c в разы по мере увеличения относительного диаметра лопасти k_d (рис.6). Уменьшение относительного диаметра лопасти k_d вызывает редуцирование объема среды, вовлекающей в сопротивление выдергиванию анкера. Параллельно с этим, при отношении $k_{sh} = 0,5$ сохраняется 73% несущей способности лопасти (рис.7). Далее по мере сокращения ширины реборды зафиксировано быстрое уменьшение удерживающих сил. Учетывание данного фактора позволяет находить скрытые запасы прочности при разработке новых конструкций винтовых свай.

Таблица 2. Исходные данные для задачи по определению N_c
Table 2. The input data for the bearing capacity factor N_c problem

Относительный диаметр лопасти $k_d = 1 - \frac{d}{D}$	Глубина завинчивания сваи H , м	Сцепление грунта c , кПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Пригрузка основания со свободной поверхности q , кПа	Вес грунта ниже подошвы фундамента γ , кН/м ³	Вес грунта выше подошвы фундамента γ' , кН/м ³
1	6	1	Не задается, как параметр модели Треска	0	0	0
0,9						
0,75						
0,5						
0,25						
0						

При анализе полученных результатов применены стандартные процедуры метода наименьших квадратов. В результате получена аппроксимирующая функция:

$$k_{sh} = -0,9102 k_d^2 + 1,9139 k_d, \quad (3)$$

а в формулу (1) добавлен поправочный коэффициент k_{sh} :

$$Q = \pi (D/2)^2 c_u k_{sh} N_c, \quad (4)$$

где c_u – недренированная прочность.

Таблица 3. Значения коэффициента k_{sh}
Table 3. Values of coefficient k_{sh}

Относительный диаметр лопасти $k_d = 1 - \frac{d}{D}$	Предельный анализ в OptumG2			Аналитическое решение [10]	Коэффициент остаточной несущей способности основания k_{sh}		
	Нижняя оценка N_u	Верхняя оценка N_u	Среднее значение N_u		OptumG2	По выражению (3)	По [23] $k_{sh} = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2$
0	0	0	0	-	0,00	0,00	0,00
0,1	2,167	2,225	2,196	-	0,18	0,18	0,19
0,25	5,091	5,201	5,146	-	0,42	0,42	0,44
0,5	8,968	9,12	9,044	-	0,73	0,73	0,75
0,75	11,43	11,6	11,515	-	0,93	0,92	0,94
1	12,3	12,46	12,38	12,48	1,00	1,00	1,00

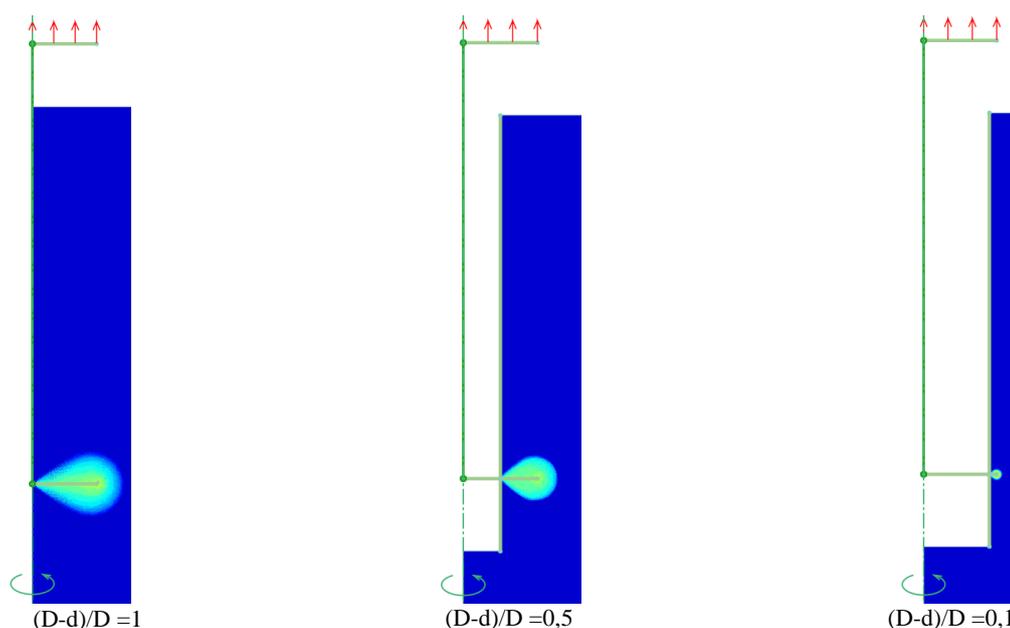


Рис. 6. Уменьшение зоны деформаций грунтов по мере относительного увеличения диаметра ствола сваи к диаметру ее лопасти

Fig. 6. Reduction of the soil deformation zone as the pile shaft diameter increases relative to the pile flight diameter

Количественно (табл.3) результаты моделирования практически подтверждают предположение из [23] и указывают на возможность получения аналитического решения взамен представленным численным экспериментам (рис.7).

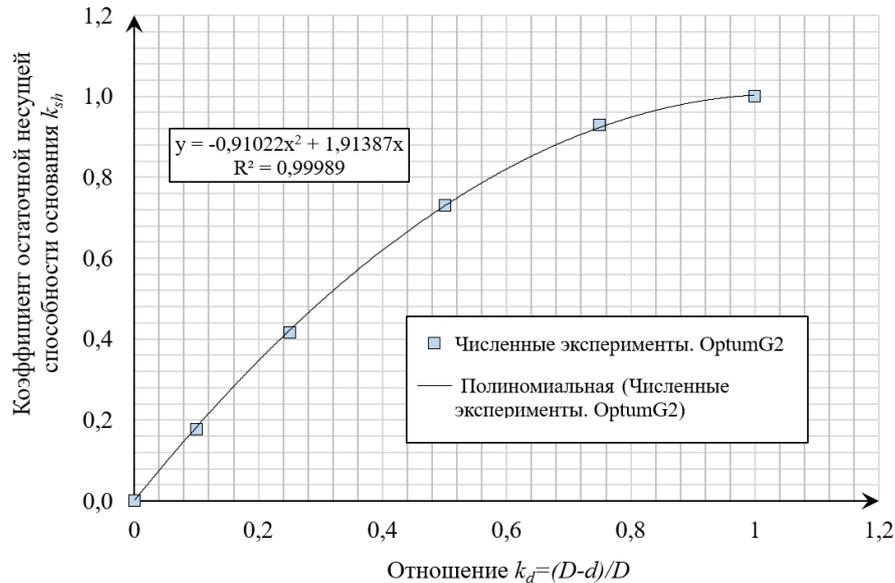


Рис. 7. Изменение коэффициента понижения несущей способности k_{sh} при изменении отношения диаметров ствола и лопасти сваи $k_d = (D - d)/D$

Fig. 7. Variation of bearing capacity reduction coefficient k_{sh} when changing the ratio of pile shaft and pile flight diameters $k_d = (D - d)/D$

УЧЕТ ТРЕНИЯ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВИНТОВОЙ СВАИ

Локализация зон сдвиговых деформаций у лопастей (рис.6) указывает на возможность отдельного рассмотрения несущей способности свай за счет лопастей и трения ствола сваи по грунту. Вместе с тем, необходимо учитывать следующие два фактора:

1. При ввинчивании сваи происходит разрушение и расструктурирование грунта в околосвайной зоне.
2. Винтовые сваи, как правило, металлические, покрывают антикоррозионными или лакокрасочными покрытиями, снижающими силы трения.

При недренерованном поведении основания удельные силы трения на контакте ствола сваи и массива грунта по [8, 12, 22, 23] определяются по:

$$T_{frict.p-s} = \alpha_a C_u$$

где α_a – коэффициент адгезии.

С целью недопущения искусственного завышения несущей способности были скорректированы известные зависимости коэффициента адгезии α_a от недренерованной прочности C_u М.Д. Томплинсона [22, 8] и В.А. Сова [23]. Адгезия понижена на 40%, то есть значения α_a умножены на k_{red} , принятый равным 0,6 по [8, 24] (табл.4, рис.8). При необходимости более точной оценки α_a может быть определен путем срезных испытаний по контакту нарушенный грунт-материал сваи с покрытием. В СП 24.13330.2021 описанный фактор учитывается введением коэффициента условий работы сваи.

Таблица 4. Учет расструктурирования при ввинчивании лопасти
Table 4. Factoring in remoulding during pile flight advancement in soil

Недренерованная прочность C_u , кПа	12	18	36	72	144	246
Соответствующая недренерованной прочности консистенция грунта I_L , д.е.	1	0,875	0,625	0,375	0,125	0
Коэффициент адгезии по М.Д.Томплинсону [22] α_a	1,00	0,94	0,78	0,48	0,25	0,16
Коэффициент адгезии с учетом расструктурирования грунта при ввинчивании сваи α_{ar}	0,60	0,57	0,47	0,29	0,15	0,09

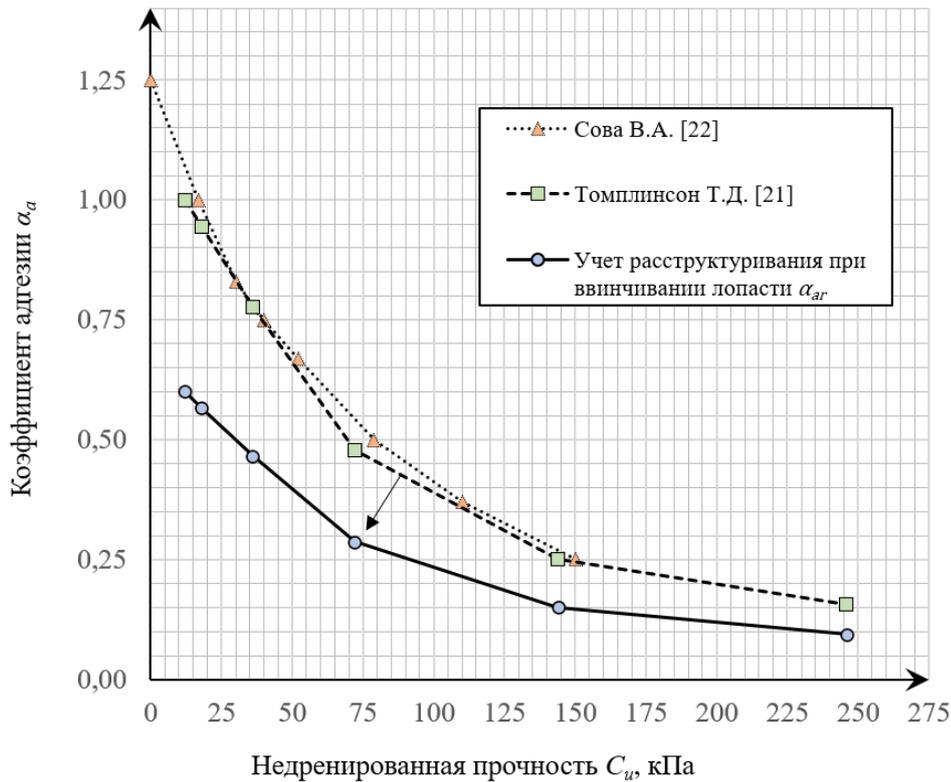


Рис. 8. Зависимость коэффициента адгезии α_a от недренированной прочности c_u
Fig. 8. Dependency of adhesion coefficient α_a on undrained strength c_u

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТОВОЙ СВАИ НА ВЫДЕРГИВАНИЕ ПРИ НЕДРЕНИРОВАННОМ ПОВЕДЕНИИ ОСНОВАНИЯ

На основании изложенного для однолопастной сваи выдергивающая сила Q выражается следующим образом:

$$Q = \pi (D/2)^2 c_u k_{sh} N_c + \sum_{j=1}^m \alpha_{ar,j} c_{u,j} A_{s,j} + W_p, \quad (5)$$

где $N_c = 12,42$ – коэффициент несущей способности, k_{sh} – коэффициент влияния ствола сваи на несущую способность лопасти (по выражению (3) или рис.7), c_u – недренированная прочность грунта у лопасти, $\alpha_{ar,j}$ – коэффициент адгезии в j -м слое по рис.8 (табл.4) или определенный экспериментально, $c_{u,j}$ – недренированная прочность j -го слоя грунта, $A_{s,j}$ – площадь боковой поверхности ствола сваи в j -м слое, m – число слоев, W_p – вес сваи.

Первый член формулы соответствует несущей способности лопасти, второй – трению по боковой поверхности.

В случае многолопастной сваи при одинаковом диаметре лопастей следует воспользоваться исследованием Р.С. Мерифилда [11, 12]. При отношении расстояния между лопастями S к их диаметру D равному $S/D > 1,58$, лопасти работают независимо друг от друга по схеме глубокого сдвига:

$$Q = \sum_{i=1}^n \pi (D/2)^2 c_{u,i} k_{sh} N_c + \sum_{j=1}^m \alpha_{ar,j} c_{u,j} A_{s,j} + W_p, \quad (6)$$

где n – число лопастей, $c_{u,i}$ – недренированная прочность грунта у i -й лопасти, k_{sh} – понижающий коэффициент, D – диаметр лопастей.

Вес грунта не влияет на результаты расчета выдергивающей силы, исходя из постановки задачи. Вес грунта выше лопасти увеличивает несущую способность при вдавливании сваи.

С целью расширения области применения выражений (5) и (6) на расчет свай с параметром лопастей $S/D < 1,58$ следует получить k_{sh} аналитическим методом и обобщить решение Р.С. Мерифилда [11, 12].

Дополнительной интерес представляет также проблема о нахождении критерия независимой работы лопастей разного диаметра.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ФОРМУЛ РАСЧЕТА ВИНТОВЫХ СВАЙ

С целью апробации выражений (5), (6) использованы данные испытаний грунтов и винтовых свай на выдергивание в Эдмонтоне, Канада из [8, 25]. У рассмотренных двухлопастных свай отношение S/D соответствует требованию $S/D > 1,58$. Полученные результаты (табл.5) показывают высокую степень совпадения с измеренными величинами (рис.9). Разница составляет не более 10%, хотя из характеристик массива грунта для расчета требуются только значения его недренированной прочности.

Таблица 5. Данные испытаний винтовых свай на выдергивание
Table 5. Results of screw pile pullout tests

Маркировка свай	Длина свай, м	Число лопастей n , шт	Диаметр ствола d см	Диаметр лопасти D , см	Шаг лопастей S/D	Недренированная прочность c_u , кПа	Измеренная выдергивающая сила Q_u , кН	Q по формулам (5) или (6), кН (погрешность)
Т3	5	2	21,9	35,6	3	до 1 м	210	204 (3 %)
						50 кПа		
Т7	5,9	1	27,3	76,2	-	до 2,2 м	800	808 (1%)
						100 кПа		
Т8	6	2	27,3	76,2	3	до 2,2 м	1325	1415 (7%)
						100 кПа		

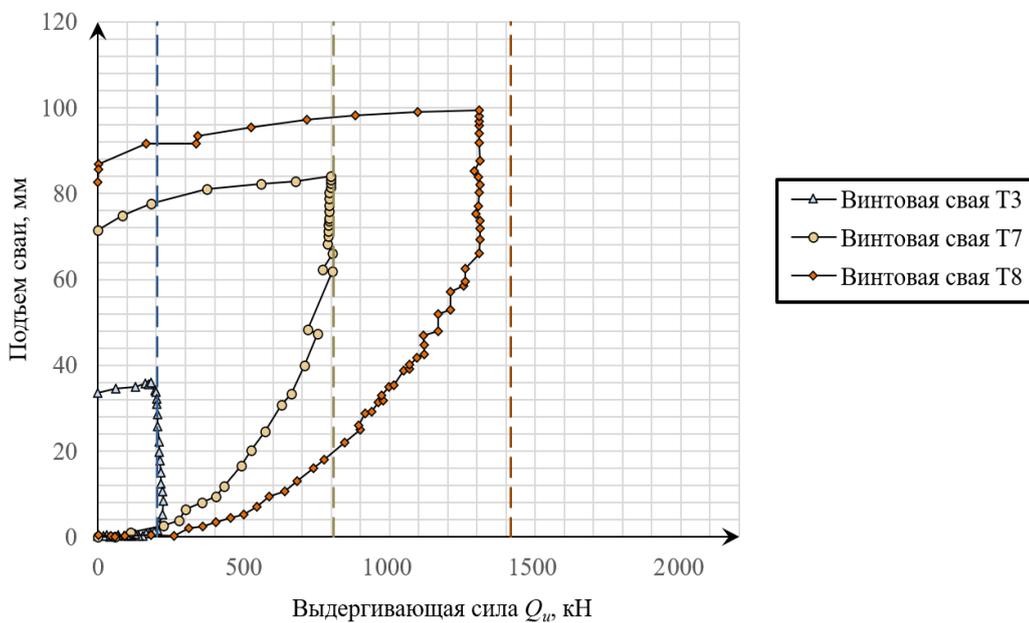


Рис. 9. Результаты испытания свай Т3, Т7 и Т8. Пунктиром обозначены результаты соответствующих расчетов по формулам (5) и (6)

Fig. 9. Test results for piles T3, T7 and T8. The dotted lines indicate the results of the corresponding calculations using formulas (5) and (6)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании предложены формулы (5) и (6) для вычисления несущих способностей винтовых свай на выдергивание при недренированном поведении основания. Границы их применимости описаны в тексте публикации.

Указанные выражения учитывают влияние ствола сваи на ее несущую способность, а также наличие одной или нескольких лопастей. Оценка несущей способности сваи по боковой поверхности ствола производится с учетом расструктурирования грунта и покрытий материала свай, снижающих силы адгезии.

Результаты работы апробированы при расчете несущих способностей винтовых свай на двух площадках. Разница между вычисленными и измеренными величинами составляет менее 10%.

Предложенные формулы далее рекомендуется проверить при различных инженерно-геологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsuha C.H.C. Physical modelling of the behaviour of helical anchors // Conference: 3rd European conference on physical modelling in geotechnics (EUROFUGE 2016). June 2016. P.1-19.
2. Аксёнов В.И., Геворкян С.Г., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Шмелёв И.В. Работа винтовых свай в мёрзлых грунтах // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 11. № 1. С. 20.
3. Verumandy K., Arulrajah A., Mirzababaei M. et al. Static load testing of instrumented screw piles in soft soil deposits // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2024. No.10, P.10. <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00519-x>
4. Железков В.Н. Винтовые сваи в энергетической и других отраслях строительства. - СПб: Прагма, 2004. 124 с.
5. Полищук А.И., Максимов Ф.А. Обоснование конструктивного решения винтовых свай для фундаментов быстровозводимых временных зданий в глинистых грунтах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2015. №4. С. 62-74. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.05.
6. Алексеев А.Г., Безволев С.Г. Определение несущей способности винтовой сваи по моменту закручивания с учетом геометрии ствола // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2023. №3. С. 2-9.
7. Пенчук В.А. Винтовые сваи и анкеры для опор. - Киев: Будівельник, 1985. 94 с.
8. Zhang D.J.Y. Predicting capacity of helical screw piles in Alberta soils. University of Alberta. Master of science. 1999. 304 p.
9. Трофименков Ю. Г., Мариупольский Л. Г. Винтовые сваи в качестве фундаментов мачт и башен линий передач // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1964. № 4. С. 15-19.
10. Martin C.M., Randolph M.F. Applications of the lower and upper bound theorems of plasticity to collapse of circular foundations // In Proc. 10th IACMAG. Tucson. 2001. vol. 2, p. 1539-1549.
11. Manual OptumG2, Examples. Krabbenhoft K. (editor). Optum Computational Engineering. 2019. 274 p.
12. Merifield R. S. Ultimate uplift capacity of multiplate helical type anchors in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2010. 137(7). P. 704-716.
13. Голушкевич С.С. Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды. - Ленинград; Москва: Гостехиздат, 1948. 148 с.
14. Березанцев В.Г. Расчет прочности оснований сооружений. - Ленинград; Москва: Госстройиздат, 1960. 138 с.
15. Королев К.В. Несущая способность оснований в стабилизированном и нестабилизированном состоянии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.23.02. / Королев К.В. Новосибирск. 2014. 326 С. EDN: ZPODYD.
16. Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Решение задач предельного равновесия с использованием метода конечных элементов // Жилищное строительство. 2014. №4. С. 47-50. EDN: QIACAD.
17. Яваров А.В., Шаповалова С.Н. Нахождение коэффициента глубины заложения фундамента, определяемого наличием сцепления грунта, для расчета несущей способности основания // Инженерные исследования. 2024. №2(17). С. 28-35. EDN: KWDZBM.
18. Lyamin A.V., Sloan S.W. Lower bound limit analysis using nonlinear programming // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2002. 55 (5). P. 573-611. DOI:10.1002/nme.511.
19. Lyamin A.V., Sloan S.W. Upper bound limit analysis using linear finite elements and nonlinear programming. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2002. No.26. P.181-216.
20. Hjjaj M., Lyamin A.V., Sloan S.W. Numerical limit analysis solutions for the bearing capacity factor N_γ // International Journal of Solids and Structures. 2004. 42 (5). P.1681-1704. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2004.08.002.
21. CFEM. Canadian Foundation Engineering Manual. 3rd Edition. Canadian Geotechnical Society, Technical Committee on Foundations, BiTech Publishers Ltd., Richmond, BC. 1992. 521 p.
22. Tomlinson M. J. The adhesion of piles driven in clay soils. Proceedings of 5th International Conference, ISSMFE. London. 1957. Vol. 2. P. 66-71.
23. Sowa V. A. Pulling capacity of concrete cast in situ bored piles. Canadian Geotechnical Journal. 1970 7(4). P. 482-493. <https://doi.org/10.1139/t70-060>.
24. Bhanot K. L. Behavior of scaled and full-length cast-in-place concrete piles; Doctor of Philosophy Thesis, Department of Civil Engineering. University of Alberta. Edmonton Canada 1968.
25. Tappenden K.M. Predicting the axial capacity of screw piles installed in western Canadian soils. University of Alberta. Master of science. 2007. 193 p.

ОБ АВТОРАХ

Александр Валерьевич Яваров (ORCID: 0000-0002-8944-1544; SPIN: 5571-2025; Scopus ID: 57213065263) – доцент, ведущий научный сотрудник, к.т.н. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, E-mail: yavarov_av@spbstu.ru. Главный специалист-геотехник ООО «Центр гидроэкологических исследований», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация), ул. Наличная, 16а.

Андрей Александрович Астахов – инженер. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: andrewastakhov2001@mail.ru.

Михаил Вячеславович Федоров – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: komstat@bk.ru.

Валерия Александровна Маликова – руководитель направления ООО «Морнефтегазпроект».

ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Yavarov - Associate Professor, Leading Researcher, Ph.D., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. Senior Geotechnical Specialist, LLC “Hydroecological Research Centre”, St. Petersburg (Russian Federation), 16a, Nalichnaya St, E-mail: yavarov_av@spbstu.ru.

Andrey A. Astakhov - Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: andrewastakhov2001@mail.ru.

Mikhail V. Fedorov - Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 29, Polytechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: komstat@bk.ru.

Valeria A. Malikova - Head of Direction, LLC “Morneftegazproekt”.

УДК 69.07

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ВАНТОВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СРЕДЫ ВИЗУАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

А.С. Суббота, Ф.С. Школяр

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос верификации расчётной схемы вантовой системы, геометрия которой построена с помощью среды визуального программирования Grasshopper в программном комплексе Rhino 8 и экспортирована в расчётные программные комплексы, в данном случае, Лира САПР. В работе исследуются ванты, геометрические параметры которых дают возможность рассчитывать их как пологую нить согласно теории расчёта гибких нитей. В ходе работы с помощью разработанного ранее алгоритма в среде визуального программирования Grasshopper были построены расчётные схемы для вант с различными геометрическими параметрами, проведён расчёт в программном комплексе Лира САПР и по актуальной методике расчёта гибких нитей, выполнен анализ напряжённо-деформированного состояния вант в различных конфигурациях. На основе сопоставления результатов расчёта в Лира САПР и инженерного расчёта дана оценка метода моделирования расчётных схем вантовых систем и описаны границы применимости.

Ключевые слова: вантовые конструкции, гибкие нити, Grasshopper, экспорт расчётных схем, Лира САПР, Rhino 8, цепная линия, двоякая кривизна

Ссылка для цитирования: Суббота А.С., Школяр Ф.С. Методы расчёта вантовых систем на основе среды визуального программирования // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 23-33. EDN: OFNLOA

METHODS OF VISUAL PROGRAMMING BASED STEEL WIRE CABLE SYSTEM STRUCTURAL ANALYSIS

A.S. Subbota, F.S. Shkoliar

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article addresses the issue of steel wire ropes system design scheme verification. Design scheme was created using visual programming environment Grasshopper inside Rhino 8 app and exported to Lira SAPR. This work deals with steel wire cables that can be calculated as a flat string using flexible string calculation theory. Using earlier developed Grasshopper algorithm, a number of design schemes with different geometric parameters were created. VAT calculation for created design schemes was carried out using Lira SAPR and using relevant method of calculation. Applicability of used modelling method was evaluated based on the convergence of results between Lira SAPR VAT calculation results and manual calculation results, limits of applicability were set.

Keywords: cable-stayed constructions, flexible strings, Grasshopper, design scheme export, Lira SAPR, Rhino 8, catenary, double curvature

For citation: Subbota A.S., Shkoliar F.S. Methods of visual programming based steel wire cable system structural analysis // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 23-33. EDN: OFNLOA

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием программных комплексов, позволяющих моделировать математически сложные поверхности и линии и строить на их основе геометрию конструкций, в современной архитектуре возник тренд на нестандартные и сложные архитектурные формы в общественных и жилых зданиях. Ключевой тенденцией в проектировании таких зданий и сооружений является параметризация [1, 2].

Актуальность исследования: параметризация подразумевает динамическое изменение геометрии конструкций в зависимости от ее параметров, которые определены идеями проектировщика. В связи с этим нередко возникает необходимость полного перестроения геометрии несущих конструкций уже после анализа напряжённо-деформированного состояния (далее, НДС) и проведение повторного анализа, что в случае с конструкциями сложной формы является очень трудоёмким процессом. Следовательно, на сегодняшний день актуальным является вопрос верификации методов параметрического построения аналитических конструктивных схем сложной архитектурной формы [3, 4]. Одной из таких форм, например, покрытий большепролётных сооружений может являться двоякая гауссова кривизна, выполненная с помощью вантовой сети [5, 6]. Для параметрического построения и дальнейшего экспорта расчётных схем таких вантовых сетей был разработан алгоритм в среде визуального программирования Grasshopper программы Rhino 8 [7].

Цель исследования: верификация расчётной схемы вантовой сети, построенной с помощью среды визуального программирования Grasshopper, в программном комплексе Лира САПР.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать методики ручного расчёта гибких нитей;
- построить с помощью разработанного алгоритма геометрию рассматриваемых вант;
- выполнить анализ НДС рассматриваемых вант после ручного расчёта и расчёта в ПК Лира САПР;
- сравнить результаты расчётов, дать оценку применимости выбранного метода моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для ручного расчёта отдельных стальных канатов, несущих поперечную нагрузку, используются методики расчёта гибких нитей, разработанные учёными В.К. Качуриным, Р.Н. Мецелинским, Н.С. Москалёвым и Г.С. Ведениковым [8, 9] и описанные в п. 6.3 и п. 6.4 СП 524.1325800.2023 «Висячие покрытия. Правила проектирования». Данные методики применимы для пологих нитей, то есть для нитей со стрелой провиса в диапазоне от $\frac{1}{25}$ пролёта до $\frac{1}{5}$ и не позволяют определить в точной мере НДС нитей со стрелами провиса $> \frac{1}{5}$ пролёта, поскольку для настолько больших стрел провиса действительная кривая провисания будет иметь значительные отличия от параболы, которая получена предположением о равномерном распределении нагрузки не по длине нити, а по её пролёту [10, 11]. Таким образом, для проведения эксперимента необходимо рассматривать такие формы покрытий, при которых соотношение стрелы провиса к ширине пролёта, т.е. f/l (рис. 1) находится внутри указанного выше диапазона.

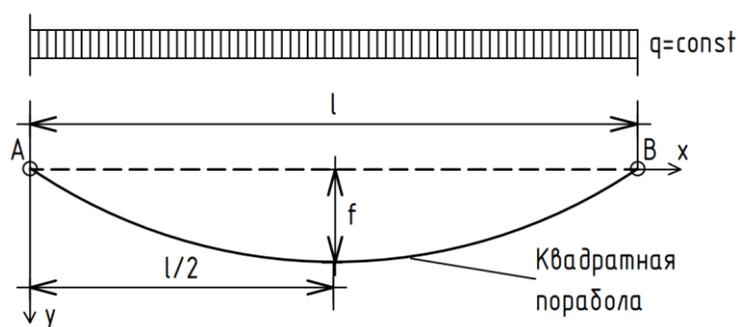


Рис. 1. Схема приложения нагрузки на нить
Fig. 1. Cable load application scheme

Гибкая нить – это геометрически изменяемая система с бесконечно большим числом степеней свободы, которая работает только на растяжение, но может воспринимать нагрузку при надлежащем закреплении концов [12, 13]. Пологая нить является частным случаем гибкой нити. Для нахождения НДС нити в случае, когда она нагружена вертикальной равномерно-распределённой нагрузкой (рис. 1) и опоры её концов

находятся на одной высоте, необходимо вычислить величину распора с учётом упругих деформаций. Величина распора определяется кубическим уравнением:

$$H^3 + \frac{8 \cdot \omega}{3 \cdot n^2 \cdot m^3} H^2 = \frac{D \cdot \omega}{2 \cdot l \cdot m^3}, \quad (1)$$

где:

H – величина распора, кН;

$\omega = E \cdot A$ – жёсткость поперечного сечения, кН;

l – величина пролёта, м;

D – характеристика нагрузки, кН²*м, определяются интегрированием:

$$D = \int_0^l M \, p \, dx = \int_0^l Q \, dx. \quad (2)$$

В случае с равномерно-распределённой нагрузкой по всей длине нити:

$$D = \frac{q^2 \cdot l^3}{12}, \quad (3)$$

где:

q – суммарная равномерно распределённая нагрузка, кН/м.

$$n = \frac{l}{f}, \quad (4)$$

$$m = \frac{s}{l}, \quad (5)$$

где:

s – длина заготовки, м, вычисляется по формуле 6.

$$s = \sqrt{l^2 + \frac{16}{3} \cdot f^2}, \quad (6)$$

При этом величины n и m вычисляются в исходном состоянии, без учёта упругих деформаций.

Усилие в нити, кН, определяется с учётом распора H (формула 7).

$$N = \sqrt{H^2 + Q^2}, \quad (7)$$

где:

Q – поперечная сила от вертикальной нагрузки, вычисленная для эквивалентной балки, кН. В данном случае:

$$Q = \frac{q \cdot l}{2}. \quad (8)$$

Вертикальная координата середины пролёта нити, м, после приложения нагрузки вычисляется по формуле:

$$y_c = \frac{M_{c6}}{H}, \quad (9)$$

где:

M_{c6} – изгибающий момент, вычисленный в эквивалентной балке, кН*м. В данном случае:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8}. \quad (10)$$

Таким образом, дополнительное провисание каната (прогиб), м, будет равно:

$$\Delta f = y_c - f. \quad (11)$$

Разработанный алгоритм [6] позволяет изменять параметры покрытия и динамически перестраивать вантовую сеть. Для проведения эксперимента необходимо построить и экспортировать несколько схем, изменяя величину пролёта, провиса несущих вант, а также отношение f/l .

Из каждой экспортируемой схемы выбирается канат с самым большим значением пролёта и провиса, остальные элементы вантовой сети не участвуют в расчёте, таким образом в ПК Лира САПР проводится расчёт плоской задачи. Помимо экспортированной из ПК Rhino 8 в Лира САПР выполняются построение

полностью идентичной по геометрическим характеристикам ванты с помощью инструмента «Цепная линия» с целью сравнения характера работы импортированной геометрии.

В качестве поперечного сечения вант выбран канат ЛК-РО конструкции 6х36 диаметром 30 мм по ГОСТ 7669-80. Характеристики выбранного сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики выбранного сечения каната

Table 1. Chosen cable cross-section properties

№	Характеристика, единицы измерения	Значение
1	Диаметр, мм	30
2	Площадь поперечного сечения, А, см ²	4,268
3	Модуль упругости, Е, МПа	147000
4	Жёсткость поперечного сечения, ω, кН	62733,63
5	Погонная нагрузка от собственного веса, q _{св} , кН/м	0,03812

В качестве равномерно-распределённой нагрузки выступает нагрузка от собственного веса стального каната, а также условная нагрузка, равная 4,903 кН/м (0,5 т/м), тогда:

$$q = q_{св} + q_{усл}, \quad (12)$$

$$q = 0,03812 + 4,903 = 4,94112 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

Для проведения расчёта были построены и экспортированы 9 расчётных схем с различными параметрами (табл. 2). Экспортированная геометрия вант представляет собой набор стержней (конечный элемент 10), разбитых на отрезки определённой длины. С помощью инструмента «Смена типа конечного элемента (далее, КЭ)» стержни преобразуются в КЭ 310 «геометрически нелинейный пространственный стержневой КЭ (нить)». Концы нити закрепляются в соответствии с методикой расчёта. Расчёт ведётся с учётом нелинейности шаговым методом с автоматическим выбором шага для геометрически и физически нелинейных задач.

Таблица 2. Параметры принятых для расчёта вант

Table 2. Properties of calculated cables

№ схемы	Величина провиса, м	Величина пролёта, м	f/l
1	2,83	30	1/10,6
2	2,83	51	1/18
3	2,83	71	1/25
4	4,2	30	1/7,1
5	4,2	51	1/12,1
6	4,2	71	1/16,9
7	5,65	30	1/5,3
8	5,65	51	1/9
9	5,65	71	1/12,6

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для всех экспортированных схем был проведён расчёт согласно инженерной методике, изложенной выше, а также расчёт в ПК Лира САПР.

В ходе расчёта получены следующие результаты (табл. 3-4, рис. 4-9):

1. Расхождение результатов вычисления продольного усилия N в канате для экспортированной геометрии не превышает 6% для всех расчётных схем, используемых для расчёта, и не превышает 2,25% для значений $f/l < 0,11$ ($\frac{1}{9}$)

2. Расхождение результатов вычисления максимального провисания каната Δf колеблется в диапазоне от 0,2% до 10,4% при $f/l < 0,11$ ($\frac{1}{9}$), в то время, как при $f/l > 0,11$ значение расхождения существенно растёт с увеличением f/l .

3. Значения расхождений результатов вычисления как продольного усилия N , так и провисания каната Δf геометрии, полученной экспортом из ПК Rhino 8 для $f/l < 0,11$, схожи со значениями, полученными для цепной нити, построенной с нуля в ПК Лира САПР.

4. Характер деформаций вант для геометрии, экспортированной из ПК Rhino 8, для значений $f/l > 0,08$ носит некорректный характер (рис. 6): канат прогибается неравномерно, точки максимального прогиба не соответствуют точке максимального момента (середине равномерно-нагруженной ванта). Для $f/l < 0,08$ деформированная схема выглядит корректно (рис. 7), однако расхождение результатов достигает 9,64%.

Ниже приведён расчёт продольных усилий и дополнительного провисания каната для расчётных схем № 4 и № 9.

Расчётная схема №4 ($q = 4,94112 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$; $l = 30 \text{ м}$; $f = 4,2 \text{ м}$.)

По формуле 3:

$$D = \frac{4,94112^2 \cdot 30^3}{12} = 54944,77 \text{ кН}^2 \cdot \text{м}.$$

По формуле 6:

$$s = \sqrt{30^2 + \frac{16}{3} \cdot 4,2^2} = 31,529 \text{ м}.$$

Согласно формулам 4 и 5:

$$n = \frac{30}{4,2} = 7,14,$$
$$m = \frac{31,529}{30} = 1,051.$$

Имея найденные выше данные, находится величина распора (формула 1):

$$H^3 + \frac{8 \cdot 62733,63}{3 \cdot 7,14^2 \cdot 1,051^3} \cdot H^2 = \frac{54944,77 \cdot 62733,63}{2 \cdot 30 \cdot 1,051^3},$$
$$H = 129,433 \text{ кН}.$$

Согласно формулам 8 и 10:

$$Q = \frac{4,94112 \cdot 30}{2} = 74,125 \text{ кН},$$
$$M_{\max} = \frac{4,94112 \cdot 30^2}{8} = 555,935 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тогда усилие в нити будет равно, согласно формуле 7:

$$N = \sqrt{129,433^2 \cdot 74,125^2} = 149,156 \text{ кН}.$$

Вертикальная координата середины нити и величина дополнительного провисания нити, согласно формулам 9 и 11:

$$y_c = \frac{555,936}{129,433} = 4,295 \text{ м},$$
$$\Delta f = 4,295 - 4,2 = 0,095 \text{ м}.$$

Расчётная схема №9 ($q = 4,94112 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$; $l = 71 \text{ м}$; $f = 5,65 \text{ м}$.)

По формуле 3:

$$D = \frac{4,94112^2 \cdot 71^3}{12} = 728345,8 \text{ кН}^2 \cdot \text{м}.$$

По формуле 6:

$$s = \sqrt{71^2 + \frac{16}{3} \cdot 5,65^2} = 72,189 \text{ м.}$$

Согласно формулам 4 и 5:

$$n = \frac{71}{5,65} = 12,566,$$

$$m = \frac{72,189}{71} = 1,017.$$

Имея найденные выше данные, находится величина распора (формула 1):

$$H^3 + \frac{8 \cdot 62733,63}{3 \cdot 12,566^2 \cdot 1,017^3} \cdot H^2 = \frac{728345,8 \cdot 62733,63}{2 \cdot 30 \cdot 1,017^3},$$

$$H = 457,127 \text{ кН.}$$

Согласно формулам 8 и 10:

$$Q = \frac{4,94112 \cdot 71}{2} = 175,429 \text{ кН},$$

$$M_{\max} = \frac{4,94112 \cdot 71^2}{8} = 3113,857 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Тогда усилие в нити будет равно, согласно формуле 7:

$$N = \sqrt{457,128^2 \cdot 175,429^2} = 489,633 \text{ кН}.$$

Вертикальная координата середины нити и величина дополнительного провисания нити, согласно формулам 9 и 11:

$$y_c = \frac{3113,857}{457,128} = 6,812 \text{ м},$$

$$\Delta f = 6,812 - 5,65 = 1,162 \text{ м}.$$

Результаты расчёта в ПК Лира САПР приведены в таблице 3, значение расхождений результатов для всех расчётных схем представлено в таблице 4.

Таблица 3. Результаты расчёта
Table 3. Calculation results

№ схемы	N, кН – ручной расчёт	N, кН – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	N, кН – построение в Лира САПР	Δf , м – ручной расчёт	Δf , м – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	Δf , м – построение в Лира САПР
1	198,886	202,024	196,140	0,182	0,196	0,197
2	426,997	437,392	419,740	0,948	0,950	0,957
3	630,100	616,860	610,976	2,315	2,270	2,310
4	149,156	156,912	153,969	0,095	0,194	0,099
5	357,073	363,840	357,956	0,608	0,545	0,621
6	560,960	558,999	552,134	1,644	1,550	1,650
7	121,607	129,452	126,510	0,059	0,219	0,069
8	294,406	301,075	292,249	0,389	0,419	0,416
9	489,633	496,234	482,504	1,162	1,05	1,19

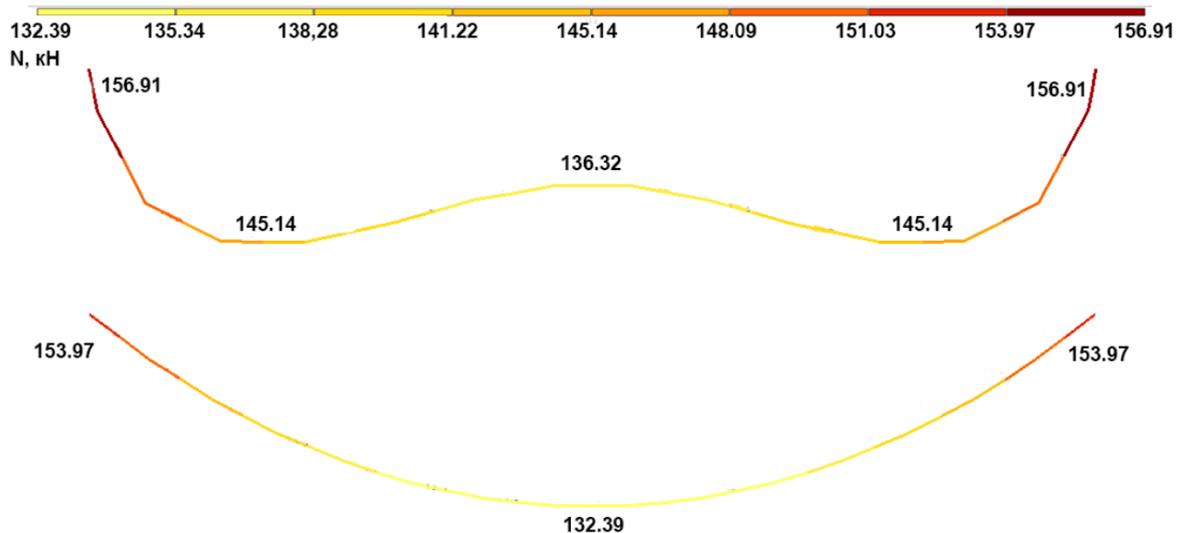


Рис. 4. Продольные усилия в вантах – схема 4 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)
Fig. 4. Axial force in cables – scheme #4 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

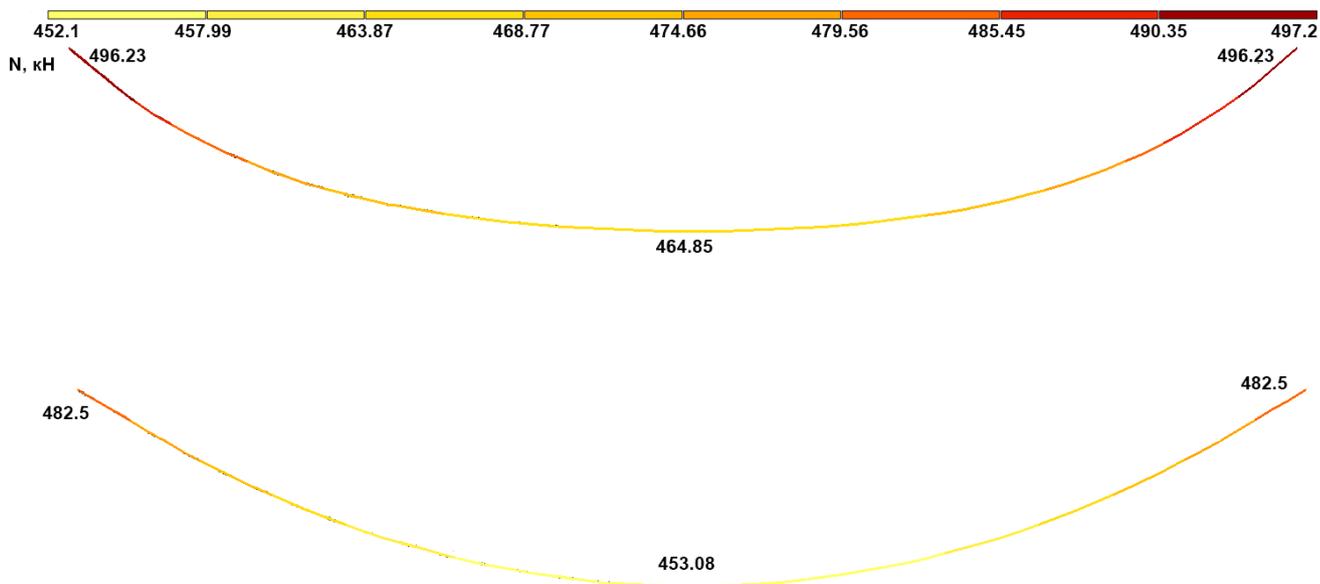


Рис. 5. Продольные усилия в вантах – схема 9 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)
Fig. 5. Axial force in cables – scheme #9 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

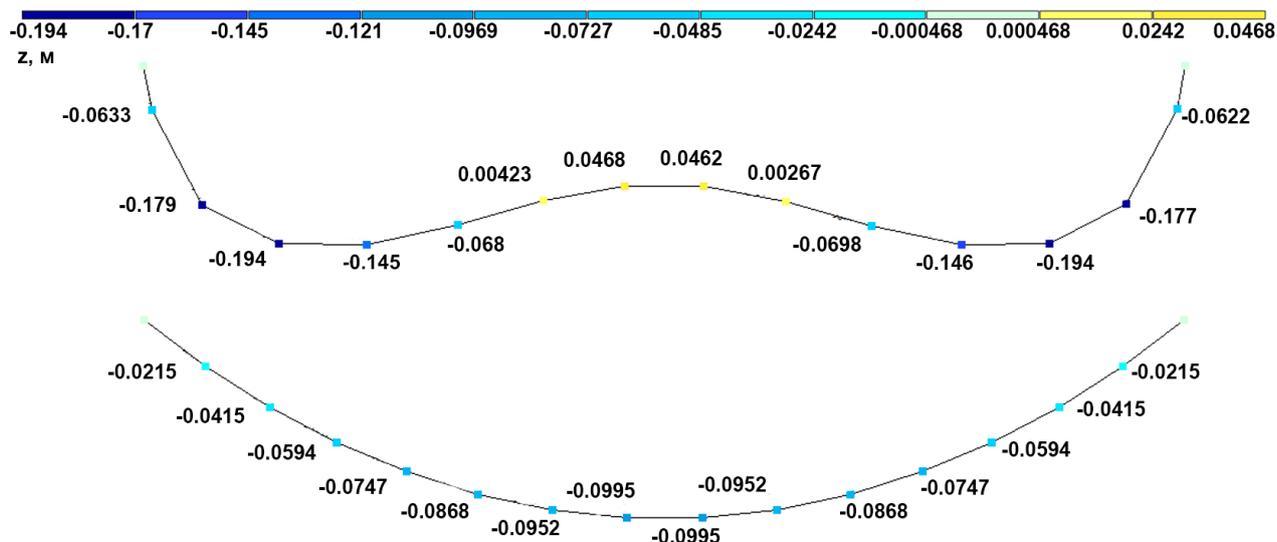


Рис. 6. Деформирование состояние ванты – схема 4 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)

Fig. 6. Cable deformed state – scheme #4 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

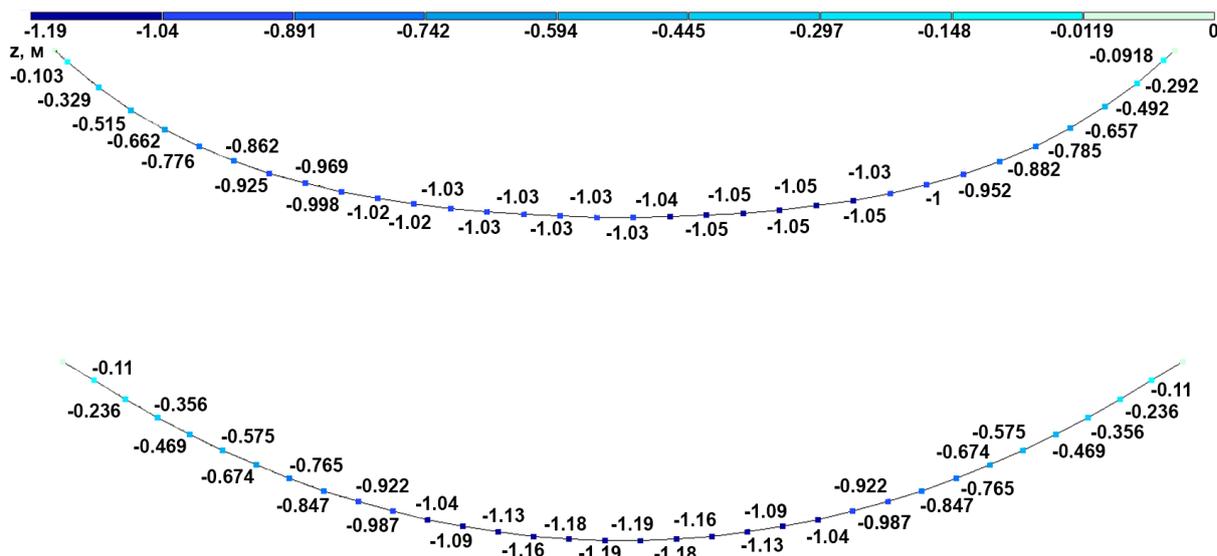


Рис. 7. Деформирование состояние ванты – схема 9 (экспорт из Rhino 8 – сверху, построение в Лира САПР – снизу)

Fig. 7. Cable deformed state – scheme #9 (Rhino 8 exported – top, built in Lira SAPR - bottom)

Таблица 4. Сводная таблица расхождения результатов расчёта

Table 4. The divergence between the results

№ схемы	f/l	Расхождение результатов по N – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	Расхождение результатов по N – построение в Лира САПР	Расхождение результатов по Δf – экспорт из Grasshopper (Rhino 8)	Расхождение результатов по Δf – построение в Лира САПР
1	1/10,6	1,58%	1,38%	7,58%	8,13%
2	1/18	2,43%	1,70%	0,20%	0,94%
3	1/25	2,10%	3,03%	1,96%	0,24%
4	1/7,1	5,20%	3,23%	103,89%	4,05%
5	1/12,1	1,88%	0,24%	10,40%	2,09%
6	1/16,9	0,36%	1,58%	5,7%	0,39%
7	1/5,3	5,79%	3,38%	266,26%	15,39%
8	1/9	2,25%	0,73%	7,71%	6,94%
9	1/12,6	1,34%	1,46%	9,64%	2,41%

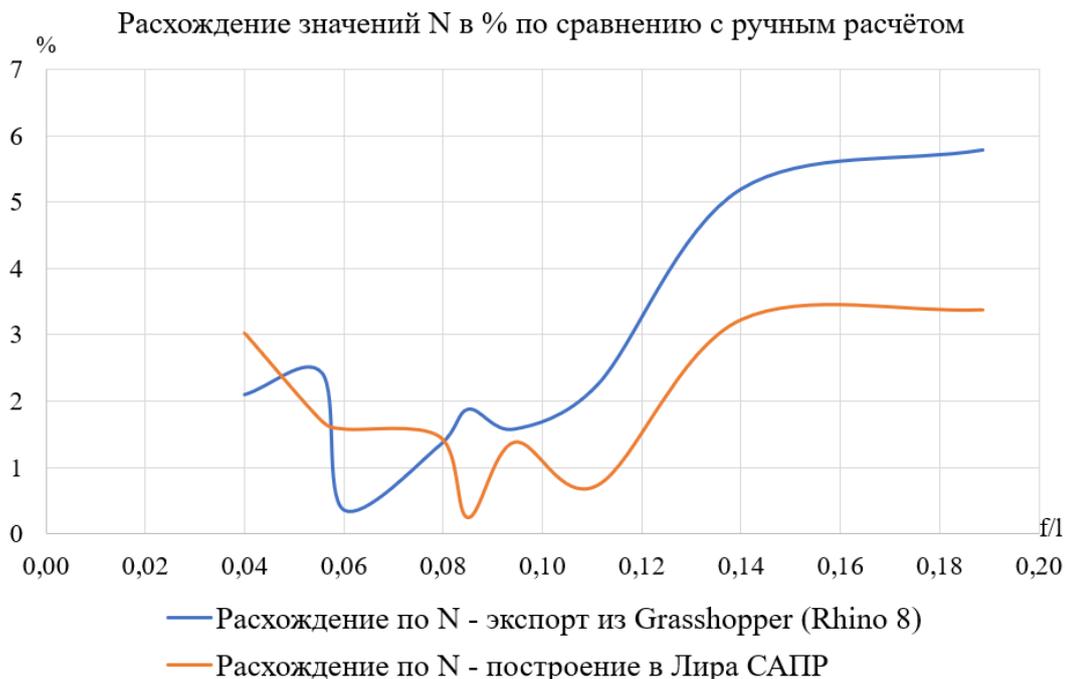


Рис. 8. График расхождения результатов расчёта N в зависимости от f/l
Fig. 8. Discrepancy in results (N) according to f/l

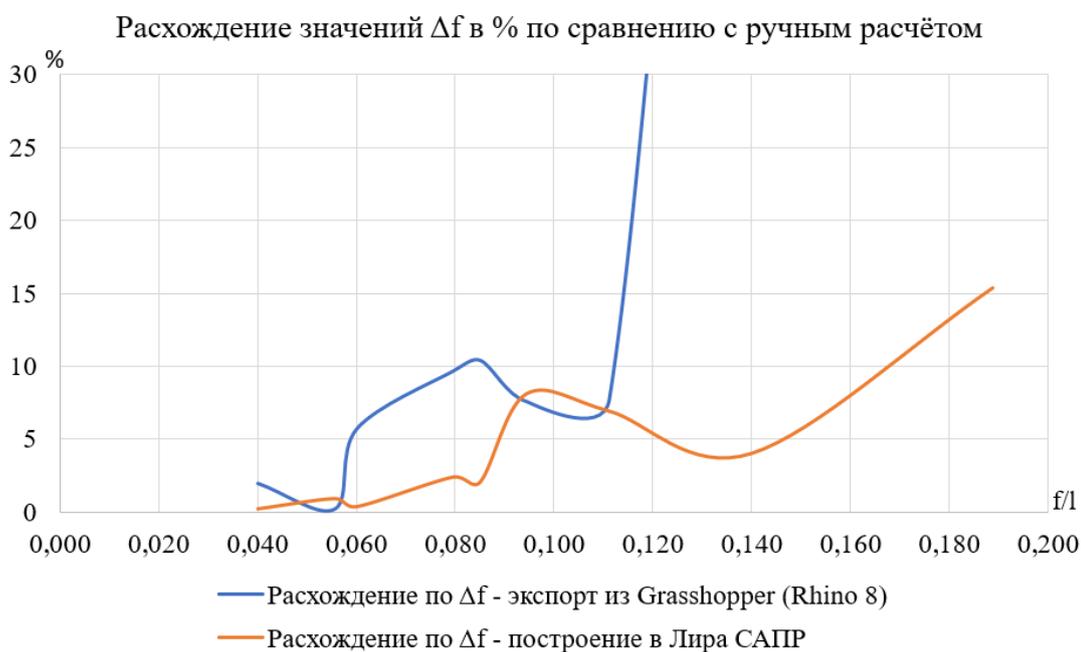


Рис. 9. График расхождения результатов расчёта Δf в зависимости от f/l
Fig. 9. Discrepancy in results (Δf) according to f/l

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы был выполнен ручной расчёт выбранных конфигураций вант по актуальным методикам, проведен конечно-элементный расчёт в ПК Лира САПР для вант, построенных с помощью экспорта геометрии из ПК Rhino 8 (с использованием Grasshopper), и для построенных в программе цепных линий. Согласно полученным значениям расхождения результатов КЭ расчёта с расчётом, выполненным по утверждённой методике, можно сделать следующие выводы:

1. Сопоставление результатов инженерных расчётов и различных аналитических схем вантовой системы, построенных с помощью экспорта геометрии из ПК Rhino 8 позволило оценить точность расчета аналитических моделей в различных диапазонах f/l :

• $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{10} \dots \frac{1}{25}$ при оценке значения продольного усилия N в канате;

• $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{13} \dots \frac{1}{25}$ при оценке значения провисания нити Δf ;

2. Расхождение результатов продольного усилия N при $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{10} \dots \frac{1}{25}$ не превышает 2,25%, что позволяет использовать данный метод построения и экспорта геометрии при расчёте вантовых систем, геометрические параметры вант которых вписываются в указанный диапазон.

3. Расхождение результатов Δf при $\frac{f}{l} \approx \frac{1}{13} \dots \frac{1}{25}$ нестабильно и колеблется от 0,2% до 9,64%, что позволяет использовать данный метод построения геометрии лишь для первичной оценки перемещений. Более точные расчёты необходимо проводить по утверждённым методикам.

4. Характер деформированной схемы вант при $\frac{f}{l} > \frac{1}{13}$ показал слишком большие расхождения результатов по сравнению с эталонной схемой, что говорит об ошибке при переносе геометрии и восприятии её программным комплексом. Использование данного метода построения геометрии и расчёта вантовых систем, геометрические параметры вант которых соответствуют неравенству $\frac{f}{l} > \frac{1}{13}$ не рекомендуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stavric M., Marina O. Parametric modeling for advanced architecture // International Journal of Applied Mathematics and Informatics. 2011. Vol. 5. Issue 1. Pp. 9-16.
2. Дагаев В.А. Построение конечно-элементной схемы вантового покрытия двойкой кривизны с помощью Grasshopper / В.А. Дагаев, Ф.С. Школяр // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции. Часть 2. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – С. 322–325.
3. Дагаев В.А., Пурвин Г.М., Школяр Ф.С. Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двойкой кривизны. Вестник МГСУ. 2023;18(11):1713-1730.
4. Lai M., Eugster S.R., Reccia E., Spagnuolo M., Cazzani A. Corrugated shells: An algorithm for generating double-curvature geometric surfaces for structural analysis // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 173. P. 109019.
5. Timchenko R., Popov S., Krishko D., Rajeshwar G., Aniskin A. Cable-stayed coverings for large-span public buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 280. P. 07008.
6. El-Dardiry E., Hamdy G., Fayed N., Konswoah M.R. Optimum design of wide span cable-stayed roof structures // International Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 9. Issue 5.
7. Суббота, А. С. Построение вантовой сети покрытия двойкой кривизны в среде визуального программирования grasshopper / А. С. Суббота, Ф. С. Школяр // Неделя науки ИСИ : Сборник материалов всероссийской конференции, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 01–04 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – С. 40-43.
8. Kim N.-I., Thai S., Lee J. Nonlinear elasto-plastic analysis of slack and taut cable structures // Engineering with Computers. 2016. Vol. 32. Issue 4. Pp. 615-627.
9. Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 95-110.
10. Кужахметова Э. Расчет вант с учетом геометрической и физической нелинейности // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 252-266.
11. Джамбулатов Р. Г. Напряженно-деформированное состояние двухпоясной висячей системы покрытия (на примере дворца спорта «Юбилейный») – Диссертаций магистра техники и технологии строительства, Санкт-Петербург: ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2015 – С. 82
12. Тарасов Д. А., Коновалов В. В., Зайцев В. Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния стальных канатов – Вестник СГТУ № 4 (73), 2013. – С. 215-221
13. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.— 240 с.

ОБ АВТОРАХ

Александр Сергеевич Суббота (ORCID: 0009-0005-0670-4468) – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: aleksandr.subbota.02@mail.ru

Филипп Сергеевич Школяр (ORCID: 0000-0003-2872-0723; SPIN: 6980-8774) – доцент ВШПГиДС, к.т.н. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: shkolyar.fs@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr S. Subbota - graduate student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: aleksandr.subbota.02@mail.ru

Filipp S. Shkolyar – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: shkolyar.fs@gmail.com

УДК 624.94.014.2

ЛЕГКИЕ СТАЛЬНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ В РЕСПУБЛИКЕ КЫРГЫЗСТАН

В.С. Семенов¹, А.К. Акматов¹, В.А. Рыбаков², С.М. Амеличев²

¹ *Кыргызско-Российский славянский университет имени Б.Н. Ельцина, г. Бишкек (Республика Кыргызстан)*

² *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. На основании опубликованных нормативных документов, статей и проектных решений выполнен анализ современного состояния технологии легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) в Республике Кыргызстан, дана оценка перспективам её развития. В последние годы эта технология (объединяет производство, проектирование и монтаж) находит все более широкое применение в архитектуре и строительстве многих стран мира. С использованием ЛСТК строятся как жилые дома, так и здания и сооружения промышленного назначения. Сегодня эти конструкции используются не только в малоэтажном строительстве, но и при возведении многоэтажных зданий (устройстве перекрытий, фасадов и пр.), а также при реконструкции. В Республике Кыргызстан эта технология также находит всё большее распространение. Производство тонколистовых гнутых профилей, проектирование объектов и монтаж зданий из ЛСТК освоено уже несколькими проектно-строительными фирмами. Кыргызстан - горная страна, территория которой находится в зоне высокой сейсмической активности, а населенные пункты на достаточно большом расстоянии от основных производственных баз. В этих условиях применение технологии ЛСТК обеспечивает, во-первых, сейсмобезопасность строящихся объектов; во-вторых, возможность монтажа конструкций в отдаленных и труднодоступных районах без грузоподъемных механизмов и, в-третьих, сокращение до минимума транспортных расходов на доставку конструкций в отдаленные и труднодоступные районы.

Ключевые слова: легкие стальные тонкостенные конструкции; Кыргызстан; производство; проектирование; сейсмостойкость; исследования; перспективы

Ссылка для цитирования: Семенов В.С., Акматов А.К., Рыбаков В.А., Амеличев С.М. Легкие стальные тонкостенные конструкции в Республике Кыргызстан // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 34-44. EDN: KGGKWG

LIGHTWEIGHT THIN-WALLED STEEL STRUCTURES IN THE REPUBLIC OF KYRGYZSTAN

V.S. Semenov¹, A.K. Akmatov¹, V.A. Rybakov², S.M. Amelichev²

¹ *Kyrgyz-Russian Slavic University named after B.N. Yeltsin, Bishkek (Republic of Kyrgyzstan)*

² *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

Abstract. On the basis of published normative documents, articles and design solutions the current state of technology of light steel thin-walled structures (LSTK) in the Republic of Kyrgyzstan is analyzed, the prospects of its development are assessed. In recent years, this technology (combines production, design and installation) is more and more widely used in architecture and construction in many countries of the world. Both residential houses and industrial buildings and structures are built with the use of LSTK. Today, these structures are used not only in low-rise construction, but also in the construction of multi-storey buildings (slabs, facades, etc.), as well as in reconstruction. In the Republic of Kyrgyzstan this technology is also becoming more and more widespread. Production of thin sheet bent profiles, design of objects and installation of buildings from LSTK has already been mastered by several design and construction firms. Kyrgyzstan is a mountainous country, the territory of which is located in a zone of high seismic activity, and the settlements are at a fairly large distance from the main production bases. In these conditions, the use of LSTK technology provides, firstly, seismic safety of the objects under construction; secondly, the possibility of installation of structures in remote and inaccessible areas without lifting mechanisms and, thirdly, minimizing transportation costs for delivery of structures to remote and inaccessible areas.

Keywords: light steel thin-walled structures; Kyrgyzstan; production; design; earthquake resistance; research; future trends.

For citation: Semenov V.S., Akmatov A.K., Rybakov V.A., Amelichev S.M. Lightweight thin-walled steel structures in the Republic of Kyrgyzstan // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 34-44. EDN: KGGKWG

ВВЕДЕНИЕ

Современная история легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК, в английской транскрипции – Cold-formed Thin-walled Members or Cold-Formed Steel Structures) начинается с середины прошлого века, хотя из литературных источников известно, что первые дома с каркасом из гофрированных стальных профилей были построены в Соединенных Штатах и Великобритании ещё в 1850-х годах XIX века^{1 2 3 4}. Сегодня холодноформованные (холодногнутые) стальные элементы широко используются за рубежом при строительстве отапливаемых и неотапливаемых зданий, мостов, сельскохозяйственных построек, складов, АЗС, СТО и других объектов [1-3]. По данным на 2006 год, объем применения ЛСТК в США и Великобритании составлял порядка 6 и 3,5 млн тонн в год, в то время как в России этот показатель был, примерно 900 тыс. тонн в год⁵. К сожалению, найти в опубликованных источниках аналогичных данных по объемам применения ЛСТК в строительстве на текущий год не удалось.

Анализ зарубежных источников показывает большой интерес специалистов как к теоретическим вопросам проектирования и расчета зданий и сооружений из ЛСТК [4, 5], так и к экспериментальным исследованиям действительной работы ЛСТК и их узловых соединений при статических и динамических (в том числе сейсмических) нагрузках. В [6, 7] изучена работа тонкостенных профилей открытого сечения при сжатии с эксцентриситетом; в [8, 9] – работа панели из тонкостенных профилей при сейсмическом воздействии; в [10, 11] анализируется напряженно-деформированное состояние 6-ти этажного здания при динамическом нагружении. В последние годы опубликованы результаты исследований работы несущих комбинированных сталежелезобетонных и сталедеревянных конструкций, а также комбинированных ограждающих конструкций на основе тонколистового профиля и эффективных теплоизоляционных материалов [12, 13].

Опыт применения технологии ЛСТК (объединяет производство, проектирование и монтаж) в России насчитывает немногим более 50 лет. Началом можно считать конец 60-х годов XX века, когда металлургическая промышленность СССР освоила выпуск гнутых стальных профилей [14]. Позже, в 1987 году (в соавторстве с инженером А.В. Рожковым), была опубликована одна из первых работ ученого и практика, будущего заведующего лабораторией легких конструкций ЦНИИПСК им. Мельникова Эдуарда Леоновича Айрумяна [15]. В этой книге подробно описывались все преимущества применения холодногнутого стального профиля для несущих и ограждающих конструкций зданий. В своих следующих публикациях Э.Л. Айрумян вместе с коллегами разрабатывает основные направления использования ЛСТК в малоэтажном строительстве [16, 17].

В современной России одним из инициаторов внедрения технологии ЛСТК можно считать ООО «Талдом-Профиль» (основано в 1999 году). За прошедшее время компанией совместно с ОАО ЦНИИПромзданий и ЦНИИПСК им. Мельникова разработана целая система строительства зданий различного назначения с использованием для несущих и ограждающих конструкций тонкостенных стальных гнутых профилей торговой марки «Талдом»⁶.

Начиная с 90-х годов XX века было проведено большое количество научных исследований ЛСТК. Особым уважением пользуется научная школа Санкт-Петербургского Политехнического университета. Она представлена такими учеными как Лалин В.В. [18], Дьяков С.Ф. [19, 20], Назмеева Т.В. [21], Советников Д.О. [22]. Значительный вклад в развитие теории ЛСТК внесли Рыбаков В.А. [23], Туснин А.Р. [24], Лагун Ю.И. [25], Юрченко В.В. [26], Петров К.В. [27], Бильк С.И. [28], Коротких А.В. [29], Енджиевский В. [30], Семко В.А. [31]. Работы [18-20] посвящены вопросам строительной механики ЛСТК; работы [23, 24] – численному расчету ЛСТК; работы [25, 28] – экспериментальным исследованиям ЛСТК; работа [27] – вопросам применения ЛСТК при реконструкции зданий; работы [21, 29] – узловым

¹ A History of Cold-Formed Steel [Электронный ресурс]. - URL: <https://buildsteel.org/why-steel/cold-formed-steel-101/a-history-of-cold-formed-steel/> (дата обращения: 15.02.2025)

² HISTORY [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.cfsei.org/history> (дата обращения: 09.11.2024)

³ История ЛСТК / Double wall system [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.2karkasa.ru/istoriya/> (дата обращения: 23.11.2024)

⁴ История ЛСТК – как развивалась технология [Электронный ресурс]. - URL: <https://optimumhouse.ru/construction/istoriya-lstk-kak-razvivalas-tekhnologiya.html> (дата обращения: 20.12.2024).

⁵ Технология ЛСТК в мире и РФ [Электронный ресурс]. - URL: <http://lstk-group.com/ru/> (дата обращения: 07.10.2024)

⁶ Талдом-Профиль Комплект. 12 лет применения легких стальных тонкостенных конструкций в малоэтажном строительстве [Электронный ресурс]. - URL: http://www.taldom-profil.ru/netcat_files/userfiles/info/LSTK.pdf (дата обращения: 10.10.2024)

соединениям ЛСТК; работы [23, 30, 31] – общим вопросам проектирования и расчета несущих и ограждающих конструкций из тонкостенных профилей.

Благодаря большому количеству научных исследований, разработке нормативной базы (СП 260.1325800.2016 и СП 260.1325800.2023. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. – Москва: ФГБУ «РСТ», 2024. – 114 с. и др.), а также накопленному опыту, сегодня ЛСТК получили широкое распространение практически во всех регионах России.

Конструкции из ЛСТК используются не только в малоэтажном строительстве, но и при возведении многоэтажных зданий (устройстве перекрытий, фасадов и пр.) [22], а также при реконструкции⁷ [27]. Интересным аспектом исследований ЛСТК в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого является изучение не только общих вопросов этой технологии [23], но также исследования совместной работы тонколистового гнутого профиля с конструкционными и теплоизоляционными материалами [32-34].

В России, ряде европейских стран и США проводятся исследования сейсмостойкости как отдельных конструктивных элементов из тонкостенных гнутых профилей, так и зданий из ЛСТК. В частности, в Центре исследований сейсмостойкости сооружений (ЦИСС) ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко проведены экспериментальные исследования навесных фасадных панелей, изготовленных из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с обшивками из гипсокартонных листов толщиной 12,5 мм и цементно-стружечных плит толщиной 12 мм [35]. Крепление наружной обшивки к стальному каркасу осуществлялось с помощью самонарезающихся винтов. Результаты испытаний показали механическую безопасность, конструктивную целостность и эксплуатационную пригодность системы «каркас – обшивка».

Важным этапом дальнейшего развития рассматриваемой технологии в России можно считать выход в свет (публикацию) двух изданий: «Пособие по проектированию строительных конструкций малоэтажных зданий из стальных холодногнутых оцинкованных профилей (ЛСТК) / [АРСС, Ассоциация развития стального строительства]; под редакцией Назмеевой Т. В. – Санкт-Петербург: Первый ИПХ, 2021. – 238 с. и учебного пособия «Легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК). Проектирование, изготовление, монтаж / Астахов И. В., Гудков А. Н., Жидков К. Е. и др.; под общей ред. Зверева В. В. – М.: Издательство «Перо», 2023. – 412 с. В этих изданиях в полной мере отражены все тонкости этой инновационной технологии.

Поскольку применение лёгких стальных конструкций из гнутых профилей имеет ряд несомненных преимуществ по сравнению как со стальными конструкциями из прокатных профилей, так и с конструкциями из других материалов, их дальнейшее внедрение в практику строительства Кыргызстана является актуальным и экономически обоснованным, однако требующим проведения специальных исследований и разработки нормативных документов, учитывающих специфику региона.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛСТК В КЫРГЫЗСТАНЕ

Пионерами внедрения этой технологии в Кыргызстане являются ОАО “Завод модульных металлических конструкций” (“ЗММК”) и фирма “Монтажник” [36, 37]. В 2007 году ОсОО «Монтажник» первым в республике приобрело оборудование и на своем заводе кровельных материалов в пригороде Бишкека освоило выпуск тонкостенных холодногнутых профилей из оцинкованной стали толщиной от 0,8 до 1,2 мм. Одним из объектов, построенных по технологии ЛСТК из профилей завода «Монтажник», была школа в селе Нура Баткенской области. В 2008 году здание школы прошло экспериментальную проверку сильным землетрясением, а результаты обследования показали его высокую сейсмостойкость. Это обстоятельство послужило основанием для принятия руководством республики программы строительства во всех регионах школьных зданий с каркасом из ЛСТК. В настоящее время многопрофильная компания «Монтажник» продолжает производство тонкостенных гнутых профилей толщиной 0,7–1,2 мм для устройства фасадов, панелей и несущих элементов каркаса (рис. 1).

⁷ Талдом Профиль. Опыт применения легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) при реконструкции зданий [Электронный ресурс]. - URL: http://www.taldom-profil.ru/netcat_files/userfiles/info/LSTKreconstruction.pdf (дата обращения: 20.09.2024).



Рис. 1. Продукция компании «Монтажник»: гнутые профили для фасадных систем и каркас жилого дома
Fig. 1. Products of the “Montazhnik” company: curved profiles for facade systems and the frame of an apartment building

Примерно с 2013 года строительско-инжиниринговой компанией DSKA Engineering⁸ освоено полный цикл строительства зданий из ЛСТК, включающий закупку тонколистовой прокатной стали, высокотехнологичное производство холодногнутых профилей, проектные работы и монтаж конструкций. На собственной производственной базе в г. Бишкеке компания выпускает «U» и «С» образные профили из оцинкованной стали толщиной от 0,7 до 2 мм, которые применяются при устройстве каркасов, перегородок, стропильных систем мансард, крыш и др. (рис. 2) [38].

Самые большие объемы работ по строительству зданий из ЛСТК в Кыргызской Республике приходится на группу компаний ОсОО «Seido Systems» и ОсОО «Alto Group», которые больше 10 лет занимаются внедрением этой технологии под торговой маркой «Karkas.kg»⁹. На строительном рынке компании взаимосвязаны, поскольку компания «Seido Systems» занимается непосредственно производством и реализацией металлоконструкций, а «Alto Group» является чисто строительной компанией, которая специализируется на малоэтажном строительстве объектов «под ключ» из легких тонкостенных стальных конструкций, выпускаемых «Seido Systems» (рис. 3).



Рис. 2. Один из объектов компании DSKA Engineering – здание обувной фабрики Imperial Shoes в процессе строительства⁹

Fig. 2. One of the objects of the DSKA Engineering company is the building of the Imperial Shoes shoe factory under construction⁹

⁸ DSKA Engineering Co [Электронный ресурс]. - URL: <https://dska.kg/> (дата обращения: 04.10.2024).

⁹ Karkas.kg [Электронный ресурс]. - URL: <https://karkas.kg/> (дата обращения: 25.09.2024).

Особенности профилей «Karkas.kg»: сталь S550GD и алюмоцинковое покрытие марки AZ150, обеспечивающее долговечность изготовленных из них конструкций. Соединение стальных элементов каркаса – на заклепках.



Рис. 3. Объекты компании «Karkas.kg» в процессе строительства – складской комплекс и двухэтажный жилой дом¹⁰

Fig. 3. Company facilities "Karkas.kg" a warehouse complex and a two-storey apartment building are under construction¹⁰

В 2019 году конструкции «Karkas.kg» прошли экспериментальную проверку на сейсмостойкость¹⁰. Натурные вибродинамические испытания фрагмента двухэтажного дома из ЛСТК провели Международная ассоциация экспертов по сейсмостойкому строительству (МАЭСС) и Казахский научно-исследовательский институт строительства и архитектуры (АО КазНИИСА). Испытуемый фрагмент представлял собой систему связанных между собой и дисками перекрытий несущих стеновых панелей из тонкостенных стальных гнутых профилей, установленную на специальной платформе (рис. 4). Габариты объекта: прямоугольная форма в плане с размерами в осях 5,4 × 6,0 м и высотой в коньке 7,3 м; высота этажа 3,1 м.

Испытания проводились с помощью вибрационной машины инерционного действия типа В-3 в два этапа. На первом изучалась работа здания без наружной обшивки. На втором этапе к несущему каркасу крепилась обшивка из древесно-стружечных плит типа OSB (ОСП) толщиной 15 мм. Для крепления обшивки к элементам каркаса использовались самонарезающие винты, а соединения стальных элементов между собой осуществлялись при помощи нержавеющей вытяжных заклёпок из оцинкованной стали фирмы «НАКРООМ» и стальных самонарезающих винтов с пресс шайбой фирмы «РАТТА».



Рис. 4 – Фрагмент здания «Karkas.kg» в процессе вибродинамических испытаний¹⁰
Fig. 4 – Fragment of the building "Karkas.kg" in the process of vibrodynamic tests¹⁰

¹⁰ Karkas.kg [Электронный ресурс]. - URL: <https://karkas.kg/> (дата обращения: 25.09.2024).

Результаты испытаний подтвердили надежность и сейсмостойкость здания из ЛСТК (уровень горизонтальной инерционной нагрузки превышал расчетную сейсмическую нагрузку, соответствующую землетрясению силой 9 баллов), что позволило специалистам республики рекомендовать систему «Karkas.kg» высотой до 3-х этажей для возведения на площадках сейсмичностью 7–9 баллов¹¹.

Результаты испытаний также могут послужить основой для дальнейшего совершенствования строительных норм республики Кыргызстан, регламентирующих строительство в сейсмоопасных районах. В данный момент в СН КР 20-02:2024 «Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования» нет рекомендаций по учету пластических деформаций зданий из ЛСТК при сейсмическом воздействии. В таблице 7.8 СН КР 20-02:2024, в которой приводятся коэффициенты поведения регулярных по высоте зданий, отвечающие за неупругую работу конструкций, отсутствует значение данного коэффициента для зданий из ЛСТК. В практике проектирования для данного типа конструкций, как правило, используется коэффициент поведения для каркасных зданий, равный 4 или 3.3, что соответствует значению 0.25 и 0.3 коэффициента допускаемых повреждений, регламентируемого нормами РФ. Изменение 4 норм Российской Федерации СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» регламентирует значение понижающего коэффициента допускаемых повреждений K_1 , аналогичного по смыслу коэффициенту поведения в нормах Кыргызстана, для зданий из холодногнутых профилей. Данное значение варьируется от 0.35 до 0.5 в зависимости от конструктивных особенностей зданий, что выше, чем используемые в настоящее время в Кыргызстане коэффициенты 0,25 и 0,3. Применение коэффициента, учитывающего неупругие деформации специализированно для ЛСТК, позволяет принимать более обоснованные решения при проектировании данного вида конструкций. Как видим, нормативная база Кыргызстана несколько запаздывает и для повсеместного введения ЛСТК требуется ее доработка.

Ещё одним лидером внедрения высокотехнологичных решений в области строительства в республике, является компания NTEK. За сравнительно небольшой срок (компания основана в 2010 году), она, в содружестве с российской компанией «Фабрика каркасов» и американской химической компанией Huntsman Building Solutions, освоила технологию «ЛСТК + пенобетон» (напыляемый пенополиуретан SPF)¹².

Важные особенности данной технологии: применение профиля 3-го поколения С-образной формы с дополнительными ребрами жесткости и увеличенной высотой полки (47 мм) (рис. 5); использование для крепления элементов между собой вытяжной заклёпки с цуклевкой под неё, что даёт возможность делать соединение при необходимости разборным и, наконец, свойства терморены, которая обладает (по сравнению с другими изоляционными материалами) более низким уровнем теплопроводности и высоким уровнем герметичности.



Рис. 5 – Продукция компании NTEK: тонкостенный гнутый профиль 3-го поколения и двухэтажный жилой дом¹³
Fig. 5 – NTEK products: thin-walled curved profile of the 3rd generation and a two-storey residential building¹³

¹¹ Наши конструкции из ЛСТК выдерживают землетрясения в 9 и более баллов [Электронный ресурс]. - URL: <https://karkas.kg/ispytanie-konstruktsij-lstk/> (дата обращения: 10.09.2024).

¹² Профиль ЛСТК от Фабрики Каркасов [Электронный ресурс]. - URL: <https://фабрика-каркасов.рф/profil-lstk-ot-fabriki-karkasov/> (дата обращения: 02.09.2024)

¹³ О ЛСК. Новый этап в развитии строительства! [Электронный ресурс]. - URL: <https://ideametal.bg/za-lsk> (дата обращения: 10.09.2024)

Сравнительно недавно на строительном рынке Кыргызстана появилась компания «Nomad Engineering», специализирующаяся на возведении объектов различного назначения по собственной технологии ПСПК – Перекрестно-Стержневые Пространственные Конструкции (рис. 6 – рис. 8)¹⁴.

Инновационная технология ПСПК предусматривает изготовление на собственной производственной базе инновационных тонкостенных стальных дважды гнутых С-образных профилей и одноболтовое узловое соединение элементов (рис.6). Эти решения позволяют не только снизить расход стали, но и в несколько раз сократить сроки возведения объектов. В настоящее время продолжается совершенствование этой технологии: проводятся испытания элементов и узлов конструкции, разрабатываются специальные технические условия и другая нормативно-техническая документация, которые должны обеспечить условия дальнейшего применения технологии ПСПК в строительстве не только Кыргызстана, но и других стран СНГ.



Рис.6. Тонкостенный стальной дважды гнутый профиль и узел соединения стержней такого профиля
Fig.6. Thin-walled double-bent steel profile and the junction of the rods of such a profile



Рис. 7. Пространственный арочный каркас «Nomading» в процессе строительства¹⁵
Fig. 7. Spatial frameworks of "Nomading" in the construction process¹⁵

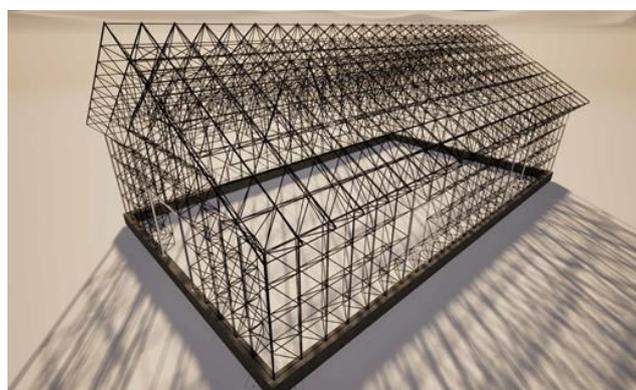


Рис. 8. 3D-модель одного из проектируемых объектов компании «Nomading»¹⁵
Fig. 8. 3D model of one of the projected facilities of the Nomading company¹⁵

¹⁴ Nomad Engineering [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.nomading.technology/> (дата обращения: 20.10.2024).

¹⁵ Представители ИСИ на производстве ЛСТК «Nomading» в г. Бишкек [Электронный ресурс]. - URL: https://ice.spbstu.ru/news/predstaviteli_isi_na_proizvodstve_nomading_v_g_bishkek/(дата обращения: 10.02.2025)

ИССЛЕДОВАНИЯ

Первые попытки теоретических и экспериментальных исследований узловых соединений легких стальных тонкостенных конструкций были осуществлены в Кыргызско-Российском славянском университете (КРСУ) еще в 2012–2015 годах.

Помимо уже описанных выше вибродинамических испытаний фрагмента здания «Каркас.кг», в ГИССИП Госстроя КР в 2018–2023 годах проводились исследования работы узловых соединений стержней из тонкостенных гнутых профилей на самонарезающихся винтах при статических нагрузках. Экспериментально теоретические исследования подтвердили возможность применения таких узловых соединений в конструкциях малоэтажных зданий, а опыт экспериментального строительства позволил разработать проект СТО «Руководство на проектирование зданий из легких стальных тонкостенных конструкций, располагаемых в районах сейсмичностью 9 баллов».

В настоящее время в институте проводятся исследования работы перекрестно-стержневых пространственных систем компании «Nomading» и разрабатываются нормативные документы для расширения объемов применения этих конструкций за счет выхода на строительный рынок стран ЕАЭС.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Предваряя обсуждение перспектив применения ЛСТК в Кыргызской Республике, приведём список основных нормативных документов, которые обеспечивают не только успешное применение этой технологии сегодня, но служат основанием и для её будущего. Документы разработаны Государственным институтом сейсмостойкого строительства и инженерного проектирования (ГИССИП) Государственного агентства архитектуры, строительства и жилищно-коммунального хозяйства при Кабинете Министров Кыргызской Республики и находятся в открытом доступе. <http://giss.kg/index.php/ru/>

1. Технический регламент «О безопасности строительства зданий различного назначения из быстровозводимых конструкций и материалов». Утвержден постановлением Правительства Кыргызской Республики от 2 августа 2010 года N 143.

2. СП КР 31–108:2023 «Быстровозводимые здания из легких конструкций. Расчет легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК)».

3. СН КР 20–02:2024 (СН КР 20-02:2018). «Сейсмостойкое строительство Нормы проектирования».

4. СТО 28974873-002-2024 (проект). Актуализированная редакция СТО 28084525-08-2021 «Профили стальные тонкостенные гнутые».

Как уже было отмечено выше, нормативная база Кыргызстана несколько «запаздывает» и для повсеместного введения ЛСТК требуется ее доработка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кыргызстан горная страна, территория которой находится в зоне высокой сейсмической активности, а населенные пункты на достаточно большом расстоянии от основных производственных баз. В этих условиях применение технологии ЛСТК обеспечивает (за счет небольшой собственной массы и проверенных экспериментом узловых соединений и конструкций), во-первых, сейсмобезопасность строящихся объектов; во-вторых, возможность монтажа конструкций в отдаленных и труднодоступных районах без использования грузоподъемных механизмов и сварочных работ, в-третьих, сокращение до минимума транспортных расходов на доставку конструкций в отдаленные и труднодоступные районы.

Стальные прокатные профили экспортируются в республику из стран СНГ и Китая, что определяет их высокую стоимость. Поэтому изготовление на собственном технологическом оборудовании гнутых профилей из недорогого тонколистового проката позволяет, в определенных случаях, заменить дорогостоящие прокатные профили и, во взаимосвязи с другими преимуществами ЛСТК, снизить стоимость строительства.

Важный аспект применения ЛСТК в Кыргызской Республике в перспективе – при реконструкции зданий существующей застройки, а также при восстановлении поврежденных зданий после землетрясений. И, конечно же, необходимым фактором перспектив этой инновационной технологии в Кыргызстане является продолжение исследований работы как самих стержневых элементов из тонкостенных профилей в условиях сложного напряженного состояния при статических и динамических нагрузках, так и их узловых соединений, обеспечивающих надежность зданий, возведенных по технологии ЛСТК.

При подготовке статьи частично были использованы материалы компаний «Монтажник», «DSKA Engineering», «Karkas.kg», «Nomading» и ГИССИП Госстроя КР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghersi A., Landolfo R., Mazzolani F.M. Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members. London. Spon Press. 2002. 198 p.
2. Wei-Wen Yu, Roger A., La Boube, Chen H. Cold-Formed Steel Design, Fifth Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2020. 528 p.
3. Don A. History of Cold-formed steel // Structure magazine. 2006. № 11. Pp. 28 -32.
4. Țăranu G., Toma I-O. FEM analysis of a floor structural system made of thin-walled cold-formed steel profiles// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.2021. Vol. 1141. Art. No. 012033. 27th-29th May 2021, Iasi, Romania. DOI:10.1088/1757-899X/1141/1/012033.
5. Kishino V.H., Kishino R.T., Coda H.B. A sequential investigation of the residual stresses and strains influence on the buckling of cold- formed thin-walled members//Thin-Walled Structures. 2022. Volume 180. Art. No. 109814.
6. Kotelko M., Grudziecki J., Ungureanu V., Dan D. Ultimate and post-ultimate behaviour of thin-walled cold-formed steel open-section members under eccentric compression. Part I: Collapse mechanisms database (theoretical study)//Thin-Walled Structures. 2021. Volume 169. Art. No. 108366. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108366.
7. Borkowski L., Grudziecki J., Kotelko M., Ungureanu V., Dubina D. Ultimate and post-ultimate behaviour of thin-walled cold-formed steel open-section members under eccentric compression. Part II: Experimental study// Thin-Walled Structures. 2022. Volume 171. Art. No. 108802. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108802.
8. Xiang Y., Zhou X., Shi Y., Zhou J. Ke. K., Deng F. Study on the seismic performance of cold-formed thin-walled steel frame with K-shaped braced shear panel//Thin-Walled Structures. 2023. Volume 184. Art. No. 110449. DOI: /10.1016/j.tws.2022.110449.
9. Xiang Y., Zhou X., Ke K., Shi Y., Xu L. Experimental research on seismic performance of cold-formed thin-walled steel frames with braced shear panel//Thin-Walled Structures. 2023. Vol.182. Part A. Art. No. 110210. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110210.
10. Wu F., Li Y. Large-scale shaking table tests of a six-story floor-by-floor assembled CFS frame-framing shear wall structure //Engineering Structures. 2023. Volume 293. Art. No. 116608. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.116608.
11. Zhou X., Yao X., Xu L., Shi Y., Ke K., Liu L. Shake table tests on a full-scale six-storey cold-formed thin-walled steel-steel plate shear wall structure panel//Thin-Walled Structures. 2022. Volume 181. Art. No. 110009. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110009.
12. Pan F., Wang Y., Huang Ch. Design and bearing capacity analysis of cold-formed thin-walled steel-timber composite members// E3S Web of Conferences.2021. 248. Art. No. 03047.DOI: 10.1051/e3sconf/202124803047.
13. Loss. C., Davison, B. Innovative composite steel-timber floors with prefabricated modular components// Engineering Structures. 2017. Volume 132. Pp. 695-713. DOI:10.1016/j.engstruct.2016.11.062.
14. Тришевский И. С., Лемпинский В.В., Воронцов Н.М., Донец Г.В. Гнутые профили проката: справочнику М.: Металлургия, 1967. 379 с.
15. Айрумян Э.Л., Рожков А. В. Легкие стальные конструкции зданий с применением гнутых профилей. М.: ВНИИИС, 1987. 78 с.
16. Павлов А.Б., Айрумян Э.Л., Камынин С.В. Каменщиков Н.И. Быстровозводимые малоэтажные жилые здания с применением легких стальных тонкостенных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 51–53. EDN HVVZXX.
17. Айрумян Э. Л., Беляев В.Ф., Каганов А.А., Румянцева И.А. Легкие стальные каркасы из оцинкованных гнутых профилей для одноэтажных зданий массового применения // Промышленное и гражданское строительство. 2003. №6. С. 23–24. EDN QIZAPP.
18. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 1 (27). С. 53–73. EDN: ORDEDD.
19. Дьяков С. Ф., Лалин В.В. Построение и анализ конечных элементов тонкостенного стержня открытого профиля с учетом деформаций сдвига при кручении // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 130-140. EDN OILLEL.
20. Дьяков С. Ф., Лалин В.В. Построение и анализ конечного элемента тонкостенного стержня с учетом деформаций сдвига для решения задач динамики // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 5(18). С. 93. – EDN RXOHTX.
21. Куражова В. Г., Назмеева Т. В. Виды узловых соединений в легких стальных тонкостенных конструкциях // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3(21). С. 47–52. EDN: NTLXR.
22. Советников Д.О., Виденков Н.В., Трубина Д.А. Легкие стальные тонкостенные конструкции в многоэтажном строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2015, № 3 (30). С. 152–162. EDN: TUHVXJ.
23. Альхименко А. И., Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК). СПб.: Изд-во СПбОДЗПП, 2008. 26 с.
24. Гуснин А.Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: монография. М.: Издательство АСВ, 2009. 144 с.

25. Лагун Ю.И., Лешкевич О.Н., Новиков В.Е., Чубрик А. Экспериментальные исследования поведения тонкостенных холодногнутых профилей под нагрузкой // Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство): сб. науч. тр. Междунар. симпоз., г. Брест, 5–18 июня 2009 г. – Брест: ОАО «Брестская типография», 2009. С. 148–153.
26. Юрченко В. В., Проек В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 010. –№8(18). С. 38–46. EDN: NBGCJN.
27. Петров К.В., Золотарева Е. А., Володин В. В., Ватин Н.И., Жмарин Е.Н. Реконструкция крыш Санкт-Петербурга на основе легких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы// Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2. С. 59–64. EDN: MZJDAP.
28. Билык С. И., Белов И.Д., Глитин А.Б. Экспериментальное исследование конструкций, выполненных из гнутых тонкостенных профилей// Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре: сб. ст. междунар. конф. Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 6–10.
29. Коротких А. В., Кретинин А.Н., Крылов И.И. Особенности работы одно- и многоболтовых фрикционных сдвигостойчивых соединений тонкостенных профилей // Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве и архитектуре: сб. ст. междунар. конф. – Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 48–52.
30. Енджиевский В., Крылов И.И., Кретинин А.Н., Терешкова.А.В. Ограждающие и несущие строительные конструкции из стальных тонкостенных профилей: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2010. 281 с.
31. Семко В.А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3. Киев: ООО «НПП «Интерсервис», 2015. 143 с.
32. Rybakov, V. Condition Load Effect Factor of Profile Steel in Lightweight Steel Concrete Wall Panels// Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. 106. Art. No 10602. DOI:10.4123/CUBS.106.2.
33. Rybakov V., Ogurtsov M., Dentsel I., Tsvetkova A. Lightweight steel concrete trusses// Construction of Unique Buildings and Structures. 2024.113.Art. No 11301. DOI:10.4123/CUBS.113.1.
34. Рыбаков В. А., Дружинина С. Н. Совместная работа стальных тонкостенных профилей и легкого бетона в конструкции перекрытия // Инженерные исследования. 2024. №2(17). С. 22–27. EDN: EBGXBJ.
35. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Доттуев А.И., Назмеева Т. В. Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Т. 31. № 4. С. 98–109. DOI: 10.37538/2224-9494-2021-4(31)-98-109.
36. Семенов В.С., Греховодов В.С., Кондрашов А.В. Быстровозводимые малоэтажные здания из легких стальных тонкостенных конструкций// Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. – № 9. С. 154–159. EDN: LHSIWN.
37. Бегалиев У. Т., Абдыкалыков Д.А. Применение легких стальных тонкостенных холодноформованных конструкций в строительстве // Наука и инновационные технологии. 2018. № 8 (8). С. 150–153. EDN: YSBJZB.
38. Семенов В. С., Черных-Рашевский И.А., Токарский А.В. Узловые соединения стальных тонкостенных конструкций. Основные типы. Особенности работы// Вестник КГУСТА. 2015. № 4 (40). С. 27–33. EDN: WMUIBB.

ОБ АВТОРАХ

Владимир Сергеевич Семенов (ORCID: 0009-0004-3779-3486; SPIN: 3066-8535) – д.т.н., профессор кафедры «Строительство», Кыргызско-Российский славянский университет (КРСУ). 720040, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Чуй, 126/18 44. E-mail: tie-break@mail.ru

Адыл Камбарович Акматов (SPIN: 8121-3950) – к.т.н., доцент кафедры «Строительство», Кыргызско-Российский славянский университет (КРСУ). 720065, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Киевская 44. E-mail: akmatof1980@mail.ru

Владимир Александрович Рыбаков (ORCID: 0000-0002-2299-3096; SPIN: 4936-7819; Scopus ID: 56296687300) – д.т.н., доцент ВШПГиДС ИСИ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: fishermanoff@mail.ru

Сергей Михайлович Амеличев (ORCID: 0009-0006-8260-2022) – магистрант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ), 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: amelichevsergei02@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir S. Semenov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction, Kyrgyz-Russian Slavic University (KRSU). 126/18, Chui Ave., Bishkek, 720040, Kyrgyz Republic. E-mail: tie-break@mail.ru

Adyl K. Akmatov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction, Kyrgyz-Russian Slavic University (KRU). 720065, old Republic, Bishkek, you. Kievskaya 44. E-mail: akmatof1980@mail.ru

Vladimir A. Rybakov – Doctor of Technical Sciences. assistant professor of Higher School of Industrial, Road and Civil Engineering of Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: fishermanoff@mail.ru

Sergey M. Amelichev – Master's student, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: amelichevsergei02@gmail.com

УДК 628.3

СИСТЕМА СБОРА МОРСКИХ ОТХОДОВ: ТЕХНОЛОГИИ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И НАПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Н.Т. Фам

Университет Туйлой, г. Ханой (Вьетнам)

Аннотация. Морской мусор, в основном пластиковое загрязнение, представляет собой растущую глобальную экологическую проблему с серьезными экологическими, экономическими и социальными последствиями. В данном обзоре представлен всесторонний анализ существующих технологий сбора морских отходов, включая пассивные системы (например, Eco-booms), использующие природные силы, и активные системы (например, The Ocean Cleanup, Seabin, SeaClear, WasteShark), применяющие современные технологии. Рассматриваются их эффективность, преимущества и недостатки, подчеркивается необходимость интегрированных решений, объединяющих передовые технологии с вовлечением сообществ для комплексного подхода к проблеме загрязнения морей. Обзор подчеркивает важность устойчивых инноваций, международного сотрудничества и инвестиций в решения по сбору морских отходов для сохранения морских экосистем.

Ключевые слова: морской мусор, системы сбора морских отходов, пассивные и активные технологии, экологические последствия, устойчивое управление морскими отходами.

Ссылка для цитирования: Фам Н.Т. Система сбора морских отходов: технологии, эффективность и направления устойчивого развития // Инженерные исследования. 2025. №1(21). С. 45-54. EDN: VERLQI

REVIEW OF OCEAN WASTE COLLECTION SYSTEMS: TECHNOLOGIES, EFFECTIVENESS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT DIRECTIONS

N. T. Pham

Thuyloi University, Ha Noi (Vietnam)

Abstract. Marine debris, mainly plastic pollution, represents a growing global environmental crisis with severe ecological, economic, and societal implications. While prevention strategies, such as reducing plastic consumption and enhancing waste management, are crucial, they alone cannot mitigate the substantial amounts of waste already present in marine ecosystems. This review offers a comprehensive evaluation of existing ocean waste collection technologies, emphasizing passive systems (e.g., Eco-booms) that leverage natural forces and active systems (e.g., The Ocean Cleanup, Seabin, SeaClear, WasteShark) that utilize advanced technologies for waste removal. The study assesses their effectiveness, advantages, and limitations, underscoring the need for integrated solutions combining advanced technology with community engagement to tackle marine pollution comprehensively. The review concludes by highlighting the importance of sustained innovation, collaboration, and investment in sustainable ocean waste collection solutions to preserve marine ecosystems.

Keywords: marine debris, ocean waste collection systems, passive and active technologies, environmental impacts, sustainable marine waste management.

For citation: Pham N. T. Review of ocean waste collection systems: technologies, effectiveness and sustainable development directions // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2025. No.1(21). Pp. 45-54. EDN: VERLQI

INTRODUCTION

Marine debris (Fig.1), commonly referred to as marine plastic pollution, has become an increasingly urgent global environmental issue, posing significant risks to marine ecosystems, coastal economies, and public health [1]. This term encompasses all human-made solid materials discarded into marine environments, including shorelines and estuaries [2]. While marine debris can consist of various materials, plastics dominate due to their durability and resistance to degradation, leading to prolonged accumulation in marine environments [3].



Fig. 1. Garbage washed up on the shore of Vung Tau, Vietnam
Рис. 1. Мусор, выброшенный на берег Вунгтау, Вьетнам

The scale of ocean litter is both immense and growing. Approximately 8 million tons of plastic are dumped into the ocean annually [4]. If this trend continues, it is projected that by 2050, the ocean could contain more plastic than fish by weight [5]. A prominent example of this accumulation is the Great Pacific Garbage Patch, a vast concentration of debris between California and Hawaii [6]. Moreover, in 2019 alone, 53.6 million tons of e-waste were generated globally, a portion of which likely entered the ocean [7].

The negative impacts of marine litter are multifaceted. Environmentally, plastic waste endangers marine life through entanglement, ingestion, and exposure to harmful substances [8]. Many marine species, from seabirds and sea turtles to marine mammals and fish, are directly affected by plastic pollution [9]. The degradation of plastics into microplastics, which are less than 5 mm in size, raises further concerns due to their potential to enter the food chain and impact human health [10]. Additionally, marine debris can damage fragile ecosystems such as coral reefs and mangroves [11].

Economically, marine litter impacts industries reliant on a clean marine environment, including tourism, fishing, and shipping [12]. Polluted beaches deter tourists, reducing revenue for coastal communities, while lost or damaged fishing gear due to litter results in financial losses for fishermen. Furthermore, the costs of beach clean-ups and waste management represent a significant financial burden for local governments [13].

Socially, the accumulation of marine debris diminishes the aesthetic value of coastal areas, limiting recreational activities and negatively affecting community well-being. In some cases, waste accumulation near residential areas has led to public health issues and sanitation concerns [14].

Given the severe consequences of marine debris and its ever-growing volume, the development and implementation of effective waste collection and removal systems is critical. In recent years, various systems and technologies for collecting marine debris have been proposed, ranging from fixed barriers to autonomous devices and community-driven initiatives [15]. However, due to the diversity of these approaches, a comprehensive evaluation is needed to assess their effectiveness, feasibility, and associated challenges.

Effective management of marine debris requires a comprehensive legal framework at both national and international levels. In Vietnam, the Law on Environmental Protection 2020 has introduced specific regulations on marine waste management, including control of pollution sources and marine pollution treatment [16]. The National Strategy on Integrated Solid Waste Management to 2025, with a vision to 2050 [17], outlines objectives and solutions to reduce marine plastic waste. Internationally, the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) sets stringent standards for ship-based pollution [18]. Concurrently, the United Nations Environment Programme (UNEP) has implemented numerous initiatives to address marine litter and microplastics on a global scale [19-23]. Despite these significant efforts, implementing and monitoring these regulations remain challenging, necessitating close coordination between nations and international organizations.

SEVERAL SYSTEMS DESIGNED FOR MARINE WASTE COLLECTION

Passive collection systems are designed to capture and control waste in water bodies without requiring active human or machine intervention (Fig.2). These systems rely on natural forces, such as water currents and tides, to direct debris towards collection points. Below is an example of a prominent passive system:

Eco-booms, floating trash barriers specially designed to contain and collect waste, oil spills, and other pollutants on water surfaces. They are commonly deployed in sensitive environments, such as rivers, lakes, canals, and coastal areas, to prevent waste from spreading further into marine ecosystems.



Fig. 2. Plastic waste collected¹

Рис. 2. Собранные пластиковые отходы

Eco-booms are typically constructed from durable, water- and UV-resistant materials, such as high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), or PVC-coated polyester fabric. The design features a floating section and a submerged skirt that extends below the water's surface. The floating section traps debris, while the skirt prevents pollutants from passing underneath.

Key Features of the Eco-boom System (Table 1):

- **Adaptability:** Can be customized in various sizes and shapes to suit different environments and waste types.
- **Versatility:** Suitable for deployment in diverse water conditions, from calm lakes to fast-flowing rivers.
- **Durability:** Built from materials resistant to water and UV rays, ensuring long operational life.
- **Easy to install and maintain:** Requires minimal technical expertise for setup and regular maintenance.

Table 1. Advantages and disadvantages of the Eco-boom system

Таблица 1. Преимущества и недостатки системы Eco-boom

Advantages	Disadvantages
Pollution Control: Effectively prevents waste, oil spills, and other pollutants from spreading, protecting sensitive ecosystems.	Dependent on Environmental Conditions: The efficiency of Eco-booms can be affected by factors such as strong water currents, waves, and the volume of waste.
Waste Collection: Helps improve the aesthetics of water bodies by capturing floating debris.	Frequent maintenance: Regular cleaning and repair are necessary to maintain effectiveness.
Biodiversity protection: Reduces the risk of entanglement and ingestion of waste by marine species.	Challenges in waste retrieval: Collecting large quantities of waste accumulated by Eco-booms can be difficult, especially in remote locations.
Cost-effective initial setup: Requires relatively low investment compared to more complex systems.	Limited to floating waste: Ineffective for submerged or seabed debris, limiting its scope in comprehensive cleanup efforts.

¹ The Ocean Cleanup successfully collects ocean plastic, aims to scale design [Электронный ресурс]. – URL: <https://news.mongabay.com/2019/10/the-ocean-cleanup-successfully-collects-ocean-plastic-aims-to-scale-design> (дата обращения: 06.02.2025)

Active collection systems play a significant role in addressing marine debris by directly removing waste from coastal and marine environments. These systems often employ advanced technologies, including autonomous devices and artificial intelligence (AI), to enhance the efficiency of waste collection efforts. Below are notable examples of active collection systems currently in use or development.

The Ocean Cleanup, a non-profit initiative founded by Dutch inventor Boyan Slat in 2013, focuses on large-scale plastic waste removal from the world's oceans (Fig.3, Table 2). The project has developed two main systems: a passive ocean cleanup system targeting garbage patches and an active interceptor system for river waste.



Fig. 3. The Ocean Cleanup Project²
Рис. 3. Проект The Ocean Cleanup

The ocean cleanup system features a U-shaped floating barrier, extending over a kilometer in length, that concentrates and captures floating debris. Two vessels tow the barrier slowly across the ocean surface, allowing accumulated waste to be periodically collected and transported for recycling. AI technology is employed to identify high-density waste areas and optimize operational routes.

The interceptor system, designed for river applications, is an autonomous device that prevents debris from reaching the ocean by collecting waste directly from rivers. It operates continuously, using a conveyor mechanism to lift waste from the water surface and store it in onboard containers.

Table 2. Advantages and disadvantages of The Ocean Cleanup
Таблица 2. Преимущества и недостатки The Ocean Cleanup

Advantages	Disadvantages
Large-scale capability: Effective at removing significant quantities of waste from both oceans and rivers.	High operational cost: Requires substantial financial resources for deployment and maintenance.
Advanced Technology: Incorporates AI and autonomous systems for efficient operation.	Potential environmental impact: Risks of interfering with marine life during waste collection.
Pollution reduction: Helps mitigate the impact of marine litter by removing large debris concentrations.	Durability concerns: System reliability in extreme ocean conditions remains uncertain.
Awareness-raising: Promotes global awareness of ocean plastic pollution.	Limited microplastic collection: Ineffective at capturing microplastics, which are a critical component of marine pollution.

² The Ocean Cleanup successfully collects ocean plastic, aims to scale design [Электронный ресурс]. – URL: <https://news.mongabay.com/2019/10/the-ocean-cleanup-successfully-collects-ocean-plastic-aims-to-scale-design> (дата обращения: 06.02.2025)

The Seabin Project, initiated by Australian surfers Andrew Turton and Pete Ceglinski, targets plastic pollution in calm coastal waters, such as marinas, harbors, and docks (Fig.4, Table 3). The Seabin acts as a "floating trash can," collecting surface debris through a submersible water pump that draws water into a mesh bag, where waste is trapped while clean water is returned to the environment.



Fig. 4. Seabin Project³
Рис. 4. Проект Seabin

The Seabin functions as a water filtration device designed to act as a floating trash bin. It is permanently installed in docks or other calm water environments, operating continuously to collect waste from the water surface. The device comprises a cylindrical container made from recycled HDPE plastic and stainless steel, housing a mesh bag that captures debris. A submersible water pump draws in water, trapping waste in the mesh bag while releasing filtered, clean water back into the environment. The Seabin is capable of collecting a wide range of waste materials, including large debris, microplastics, grease, and even microplastic fibers.

Table 3. Advantages and disadvantages of the Seabin project
Таблица 3. Преимущества и недостатки проекта Seabin

Advantages	Disadvantages
Continuous operation: Runs 24/7, collecting waste without requiring constant human intervention.	Limited range: Only effective in calm, enclosed waters; unsuitable for open seas or rough conditions.
Low operating cost: Requires minimal maintenance and operational expenses.	Limited capacity: Each Seabin can hold a limited amount of waste (approximately 20 kg).
Microplastic collection: Capable of capturing microplastics and small debris.	Energy consumption: Requires electricity to power the pump, contributing to carbon emissions.
Ease of use: Simple design allows for quick installation and maintenance.	Potential impact on small marine life: Risk of inadvertently trapping small marine organisms.

SeaClear, a project funded by the European Union's Horizon 2020 program, aims to tackle marine litter using a multi-robot platform that operates autonomously in coastal areas. Unlike other systems focused on surface debris, SeaClear targets waste on the seabed, where concentrations are higher and have a more direct impact on marine ecosystems (Fig.5, Table 4).

³ SF on the Bay. Seabin Project Celebrates a New Seabin Installation! [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sfonthebay.com/tag/seabin-project/> (дата обращения: 06.02.2025)



Fig. 5. SeaClear project robot⁴
Рис. 5. Робот проекта SeaClear

The system includes several robotic components:

- **Unmanned Aerial Vehicles (UAVs):** Monitor the ocean surface and identify waste hotspots.
- **Underwater Observation Robot (ROV):** Uses AI to distinguish waste from marine life and classify different types of debris.
- **Underwater Collection Robot (ROV):** Equipped with a gripper and suction mechanism to collect waste from the seabed.
- **Autonomous Surface Vessel (USV):** Serves as the control center, providing power and data processing for the other robotic units.

Table 4. Advantages and disadvantages of the Seaclear
Таблица 4. Преимущества и недостатки SeaClear

Advantages	Disadvantages
Comprehensive coverage: Can access and clean areas difficult for humans to reach, such as under docks or in deep waters.	High initial investment: Development and deployment of autonomous robots require substantial financial resources.
Environmental protection: Helps remove seabed waste, reducing its harmful effects on ecosystems.	Limited capacity: Current prototypes have limited ability to collect large or complex waste items.
Technological innovation: Promotes advancements in autonomous robotics and AI for environmental applications.	Potential ecological impact: Despite AI-based waste detection, there is a risk of inadvertently harming marine life.
Safety: Reduces the risks faced by human divers during cleanup operations.	—

WasteShark developed by RanMarine Technology, is an autonomous surface water robot designed to operate in coastal areas, ports, and inland waters (Fig.6, Table 5). Shaped like a whale shark, it features a wide open “mouth” to collect floating debris, including plastics, algae, and other pollutants. The robot is equipped with electric propulsion motors and LiDAR sensors for collision avoidance.

⁴ SeaClear Project. Autonomous Robots for Marine Litter Collection [Электронный ресурс]. – URL: <https://seaclear-project.eu/> (дата обращения: 06.02.2025)



Fig. 6. WasteShark project robot⁵
Рис. 6. Робот проекта WasteShark

WasteShark features a compact design inspired by the whale shark, with a wide, open "mouth" to collect floating debris. The robot navigates the water surface using two electric propulsion motors, safeguarded by RanMarine's proprietary protection technology. It can function autonomously or be operated remotely via a 4G connection. Equipped with LiDAR sensors for collision avoidance, WasteShark is also capable of monitoring water quality by measuring parameters such as pH, dissolved oxygen, turbidity, and other key indicators. The robot can operate continuously for up to six hours and has a capacity to collect up to 500 kg of waste per day.

Table 5. Advantages and disadvantages of the WasteShark
Таблица 5. Преимущества и недостатки WasteShark

Advantages	Disadvantages
Environmentally friendly: Powered by electric motors, it emits no greenhouse gases.	Limited operating range: Primarily effective in coastal and inland waters; not suitable for open seas.
High capacity: Can collect up to 500 kg of waste daily.	The limited waste size: Designed to collect only floating waste of certain sizes.
Flexibility: Operates in various environments, including canals, marinas, and harbors.	Automation challenges: May encounter difficulties in complex or crowded environments.
Data collection: Capable of monitoring water quality by measuring parameters such as pH, dissolved oxygen, and turbidity.	—

Comparative analysis of ocean waste collection systems. The following table provides a comparative analysis of ocean waste collection systems based on key criteria such as investment cost, collection efficiency, environmental impact, and scalability (Table 6).

Passive systems such as Eco-boom and Seabin require significantly lower initial investment compared to active systems like SeaClear and The Ocean Cleanup, which involve complex technology and substantial financial resources. WasteShark presents a moderate investment cost, benefiting from its relatively simple design and use of electric motors.

Regarding collection efficiency, The Ocean Cleanup and SeaClear demonstrate high efficiency in collecting large quantities of ocean and seabed waste, albeit at higher costs and with potential environmental risks. In contrast, Eco-boom and Seabin are effective in specific environments, primarily targeting floating debris in confined areas.

⁵ Designboom. Drone WasteShark removes plastic waste and biomass from water bodies [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.designboom.com/technology/drone-wasteshark-ranmarine-technology-plastic-waste-biomass-07-04-2022/> (дата обращения: 06.02.2025)

Table 6. Comparative analysis of ocean waste collection systems
Таблица 6. Сравнительный анализ систем сбора океанских отходов

System	Investment Cost	Collection Efficiency	Environmental Impact	Scalability
Eco-boom	Low	Moderate (targets only floating waste)	Low (minimal impact on marine life)	High (easy to deploy in various locations)
The Ocean Cleanup	High	High (collects large amounts of waste)	Moderate (potential impact on marine life)	Moderate (dependent on environmental conditions)
Seabin Project	Low	Low (limited to small areas)	Low (minimal impact on small marine life)	Low (suitable only for calm, enclosed waters such as marinas)
SeaClear	Very High	High (targets seabed waste)	Moderate (potential risks to benthic organisms)	Low (still in the experimental stage)
WasteShark	Moderate	Moderate (collects floating waste and microplastics)	Low (environmentally friendly with electric propulsion)	High (easy to deploy in coastal and inland waters)

In terms of environmental impact, Eco-boom, Seabin, and WasteShark are assessed to have low environmental impact due to their passive or eco-friendly operational mechanisms. Conversely, SeaClear and The Ocean Cleanup pose potential risks to marine ecosystems, particularly due to their active collection mechanisms and possible interference with marine life.

When considering scalability, Eco-boom and WasteShark exhibit high scalability, being relatively simple to deploy across various locations. However, SeaClear remains in the experimental phase, limiting its current scalability for large-scale deployment.

FUTURE RESEARCH DIRECTIONS AND POLICY RECOMMENDATIONS

As ocean pollution continues to escalate, future research should focus on advancing both existing technologies and innovative approaches to waste collection. Potential research directions include:

1. Development of AI-driven autonomous systems: Enhancing the capabilities of autonomous robots by integrating advanced AI and machine learning algorithms to improve real-time decision-making, navigation, and waste classification.
2. Hybrid systems combining active and passive mechanisms: Designing systems that can leverage both passive collection and active removal strategies to increase overall efficiency and adaptability to different marine environments.
3. Biodegradable collection materials: Exploring the use of biodegradable and eco-friendly materials for building collection systems to further reduce their environmental footprint.
4. Microplastic filtration technologies: Developing efficient filtration systems capable of capturing microplastics, which are a significant and persistent threat to marine ecosystems.
5. Long-term impact studies: Conducting longitudinal studies to assess the ecological and economic impacts of various waste collection systems, ensuring sustainable deployment.

Based on the findings of this study, several policy recommendations can be made to promote the adoption of ocean waste collection systems, particularly in developing countries:

1. Incentivizing public-private partnerships: Governments should encourage collaboration between public agencies, private companies, and non-governmental organizations to fund and implement ocean cleanup initiatives.
2. Subsidies and tax incentives: Providing financial support, such as subsidies and tax incentives, for companies investing in ocean waste collection technologies can accelerate their development and deployment.
3. Capacity building and knowledge transfer: Establishing international cooperation programs to share best practices, technical expertise, and resources with developing nations.
4. Community-based initiatives: Promoting community-driven cleanup programs and citizen science initiatives to raise public awareness and foster local engagement in marine conservation efforts.

5. Legislation and regulation: Implementing stricter regulations on waste management, marine littering, and plastic production, combined with enforcement mechanisms, can significantly reduce the influx of waste into the ocean.

CONCLUSIONS

Marine debris, predominantly plastic waste, has emerged as a critical environmental issue with far-reaching ecological, economic, and social implications. Despite ongoing global efforts to curb pollution at its sources, the vast quantity of waste in marine ecosystems underscores the urgent need for effective remediation strategies. This review explores a variety of ocean waste collection systems, encompassing both passive and active technologies, and highlights their respective advantages and limitations.

While passive systems present a low-cost, energy-efficient approach, they primarily target surface debris and are often limited by environmental conditions. Conversely, active systems, driven by advanced technologies, offer higher efficiency and the capacity to address a broader spectrum of marine waste, yet they require significant financial investment and may pose risks to marine life.

The findings indicate that a multifaceted approach, integrating advanced technological solutions with preventive measures and public engagement, is essential for addressing marine debris comprehensively. Future research should prioritize innovation in collection systems, particularly in enhancing scalability, cost-effectiveness, and environmental compatibility. Additionally, sustained policy support and global collaboration are crucial to advancing the deployment of sustainable waste collection solutions. Through a concerted effort, it is possible to mitigate the impact of marine debris and safeguard the health of marine ecosystems for future generations.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thuyloi University, Vietnam, funded this research. The author gratefully acknowledges the financial support from the university's research funding mechanism that made this work possible.

REFERENCES

1. Pinkse J., Murcia M.J., Kumar N., Panwar R., Mathur V.B. Integration of G20 Industrial Policies with Biodiversity Conservation // *Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 34. No. 3. P. 157–165.
2. Stajner I., Mcqueen J., Huang J. [et al.] Air quality and aerosol predictions at National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and their applications / *Environmental Health Perspectives Supplements*. 2020. Vol. 2020, No. 1. DOI 10.1289/isee.2020.virtual.o-sy-2402. EDN IGUNOJ.
3. Andrady A.L. Microplastics in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62. No. 8. P. 1596–1605.
4. Jambeck J.R., Andrady A., Lebreton L.C.M., et al. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. Vol. 347. No. 6223. P. 768–771.
5. Gupta Sh. S. Deficit Problem with the Fourth Industrial Revolution // *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*. 2022. P. 230-234. DOI 10.55524/ijirem.2022.9.1.44. EDN UQNNLH.
6. Lebreton L.C.M., Van Der Zwet J., Damsteeg J.W., Slat B., Andrady A., Reisser J. River plastic emissions to the world's oceans // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. Article 15611.
7. Forti V., Baldé C.P., Kuehr R., Bel G. The Global E-Waste Monitor 2020 // United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA). Bonn/Geneva/Rotterdam. 2020. 120 p.
8. Gregory M.R. Environmental implications of plastic debris in marine settings—entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. Vol. 364. No. 1526. P. 2013–2025.
9. Law K.L. Plastics in the marine environment // *Annual Review of Marine Science*. 2017. Vol. 9. No. 1. P. 205–229.
10. Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T.S. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. Vol. 62. No. 12. P. 2588–2597.
11. Gallo F., Fossi C., Weber R. [et al.] Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures // *Environmental Sciences Europe*. 2018. Vol. 30, No. 1. P. 1-14. DOI 10.1186/s12302-018-0139-z. EDN FOWDNJ.

12. Beaumont N.J., Aanesen M., Austen M.C., et al. Global ecological, social and economic impacts of marine plastic // *Marine Pollution Bulletin*. 2019. Vol. 142. P. 189–195.
13. Jang Y.C., Lee J.W., Kim Y.S., et al. Estimation of the annual flow and stock of marine debris in South Korea for management purposes // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 86. No. 1–2. P. 505–511.
14. Prüss-Üstün A., Wolf J., Corvalán C., Bos R., Neira M. Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks. World Health Organization. 2016. 254 p.
15. Sugianto E., Chen J.-H., Purba N.P. Cleaning technology for marine debris: A review of current status and evaluation // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. Vol. 20. No. 4. P. 4549–4568.
16. National Assembly of Vietnam. Law on Environmental Protection. Hanoi: Vietnam, 2020.
17. Prime Minister of Vietnam. Decision No. 491/QĐ-TTg approving the National Strategy on Integrated Solid Waste Management to 2025, with a vision to 2050. Hanoi: Vietnam, 2018.
18. International Maritime Organization. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). London: IMO, 1973/1978.
19. United Nations Environment Programme. From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution. Nairobi: UNEP, 2021
20. Morrison E., Shipman A., Shrestha S. [et al.] Evaluating the Ocean Cleanup, a marine debris removal project in the North Pacific gyre, using SWOT analysis // *Case Studies in the Environment*. 2019. Vol. 3, No. 1. DOI 10.1525/cse.2018.001875. EDN WHDZFH
21. Dagestad K. F., Röhrs J. Prediction of ocean surface trajectories using satellite derived vs. modeled ocean currents // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 223. P. 130-142. DOI 10.1016/j.rse.2019.01.001. EDN NCGJYL
22. Svischev N. D., Shlenov M. Ye., Ryabitsev A. S., Rybakov A. V. The system of distance Cleaning and ecological enhancing of rivers and water bodies // *International Scientific and Practical Conference World science*. 2015. Vol. 1, No. 4(4). P. 39-41. EDN VLIJPP.
23. Reppy M. A Sea Adrift in Deadly Plastics // *Earth Island Journal*. 2001. Vol. 16, No. 2. P. 11. EDN DMQYYF.

ОБ АВТОРАХ

Нгок Тхинь Фам – Университет Туйлой, 175 Тай Сон, Донг Да, Ханой (Вьетнам). E-mail: thinhtls@tlu.edu.vn

ABOUT THE AUTHORS

Ngoc Thinh Pham – Thuyloi University, 175 Tay Son, Dong Da, Ha Noi (Vietnam). E-mail: thinhtls@tlu.edu.vn