

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ОПАЛУБКИ ПЕРЕКРЫТИЙ И АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Клиновой В.С.¹, Джугань С.В.², Сысоев М.И.³

¹Клиновой Владимир Сергеевич — директор;

²Джугань Сергей Викторович — директор по производству,

³Сысоев Максим Иванович — главный инженер-конструктор,

Общество с ограниченной ответственностью «Стройдеталь-Кисловодск» (ООО «СДК»),

г. Кисловодск

Аннотация: выполнено сравнительное численное исследование трёх конструктивно различных систем опалубки перекрытия: рамной системы РОП-48 (1,5–2,0), системы на телескопических стойках (3,1) и модульной чашечной системы Cup-Lock (вертикаль 2,0) для плиты перекрытия 10×10 м при высоте до низа палубы 3,3 м. Сформирован единый расчётный случай бетонирования железобетонной плиты толщиной 200 мм. Расчётное внешнее давление на палубу составило 9,3065 кПа; собственный вес каждого комплекта учитывался отдельно.

На основе трёхмерных моделей построены пространственные стержневые конечно-элементные модели с учётом рам, стоек, регулировочных винтов, диагональных связей, четырех уровней ригелей и двух взаимно перпендикулярных рядов балок БДК. Сопоставлены эквивалентные напряжения по Мизесу, вертикальные перемещения, запас до текучести и первый коэффициент линейной потери устойчивости. Экономическая оценка выполнена по стоимости приобретения и нормативной амортизации элементов первого класса. Установлено, что различия первоначальной цены значительно выше различий стоимости одного эксплуатационного цикла, поскольку для всех систем существенную долю затрат составляют общие элементы палубы и балочной решетки.

Ключевые слова: опалубка перекрытий, РОП-48, телескопическая стойка, Cup-Lock, метод конечных элементов (МКЭ).

MODELING THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF MODERN SLAB FORMWORK SYSTEMS AND ANALYSIS OF THE ECONOMIC ASPECTS OF THEIR APPLICATION

Klinovoy V.S.¹, Dzhugan S.V.², Sysoev M.I.³

¹Klinovoy Vladimir Sergeevich — Director,

²Dzhugan Sergey Viktorovich — Production Director,

³Sysoev Maxim Ivanovich — Chief Design Engineer,

“STROYDETAL-KISLOVODSK” LIMITED LIABILITY COMPANY (SDK LLC),

KISLOVODSK

Abstract: A comparative numerical study of three structurally different slab formwork systems was carried out: the ROP-48 frame system (1.5–2.0 m), a system based on telescopic props (3.1 m), and the modular Cup-Lock system with 2.0 m vertical standards. The analysis was performed for a 10 × 10 m floor slab with a height of 3.3 m from the supporting base to the underside of the formwork deck. A unified design case was developed for casting a 200 mm thick reinforced concrete slab. The design external pressure applied to the deck was 9.3065 kPa, while the self-weight of each formwork system was taken into account separately.

Spatial beam finite element models were developed on the basis of three-dimensional assemblies. The models included frames, props, adjustment screws, cross-bracing members, four levels of horizontal ledgers, and two mutually perpendicular layers of BDK beams. The equivalent von Mises stresses, vertical displacements, yield safety factors, and first linear buckling load factors were compared.

The economic assessment was based on the initial purchase cost and the standard depreciation of first-class formwork components. It was established that the differences in the initial purchase prices were significantly greater than the differences in the cost per operating cycle, since the common deck components and beam grids account for a substantial proportion of the total costs in all three systems.

Keywords: slab formwork, ROP-48, telescopic prop, Cup-Lock, finite element method, FEM.

ВВЕДЕНИЕ

В монолитном строительстве применяются различные по конструктивному исполнению системы опалубки перекрытий, включая телескопические стойки (рис. 1а), пространственные стоечно-ригельные системы (рис. 1б) и рамные опорные конструкции (рис. 1в).



а) Стойка телескопическая
(опалубка перекрытия)



б) Опалубка перекрытия Sup-lock



в) Рамная опалубка перекрытия

Рис. 1. Наиболее распространённые конструкции опалубки перекрытия.

Выбор рационального варианта определяется совокупностью конструктивно-технологических и экономических факторов, к числу которых относятся высота возводимого этажа, геометрические параметры и масса перекрытия, требуемая интенсивность производства работ, доступность элементов соответствующей номенклатуры, трудоёмкость монтажа и демонтажа, а также стоимость формирования и эксплуатации опалубочного комплекта.

Действующие нормативные документы регламентируют необходимость обеспечения прочности, жёсткости, устойчивости и геометрической неизменяемости опалубочных систем при воздействии совокупности технологических нагрузок, возникающих в процессе бетонирования монолитных перекрытий [1–5]. При этом сопоставление различных конструктивных решений исключительно по задекларированной (паспортной) несущей способности отдельных элементов либо по их первоначальной стоимости комплекта не позволяет объективно оценить фактический характер их работы в составе пространственной системы. Распределение усилий, напряжений и перемещений определяется не только несущей способностью вертикальных опор, но и общей жёсткостью расчётной схемы, количеством и расположением связей, условиями закрепления, геометрической конфигурацией и взаимодействием элементов.

Целью настоящей работы является сравнительное исследование трёх комплектов систем опалубки перекрытий при идентичных размерах расчётной области, высоте установки, граничных условиях и величине внешней нагрузки. Для достижения поставленной цели выполняется моделирование эквивалентных напряжений, суммарных перемещений, коэффициентов запаса прочности и форм потери общей устойчивости на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Дополнительно проводится технико-экономическое сопоставление исследуемых вариантов по общей стоимости комплекта, удельной стоимости опалубки на единицу площади перекрытия и расчётной стоимости одного оборота с учётом нормативной оборачиваемости элементов. Такой подход позволяет оценить не только конструктивную надёжность, но и экономическую рациональность применения каждой системы в заданных условиях строительства.

Исследование не направлено на сравнительную оценку отдельных производителей и ограничивается анализом общей пространственной работы систем. Локальные механизмы разрушения резьбовых соединений, пальцев, клиньев, замковых устройств, сварных швов и других узловых элементов в рамках настоящей работы не рассматриваются. Соединения в расчётных моделях принимаются в соответствии с принятой идеализацией, обеспечивающей оценку напряжённо-деформированного состояния и общей устойчивости системы в целом.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕДИНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В исследование включены следующие системы опалубки перекрытия:

- ❖ рамная система опалубки перекрытий РОП-48 — 24 рамы, 48 опорных узлов, продольные крестовины (связи) и поперечная жёсткость собственных рам;
- ❖ система на 100 телескопических стойках с наружной трубой 60×2,0 мм и внутренней трубой 48×2,5 мм;
- ❖ модульная система Sup-Lock — 49 вертикалей 48×3,0 мм, 336 ригелей 40×2,5 мм, образующих четыре пространственных уровня.

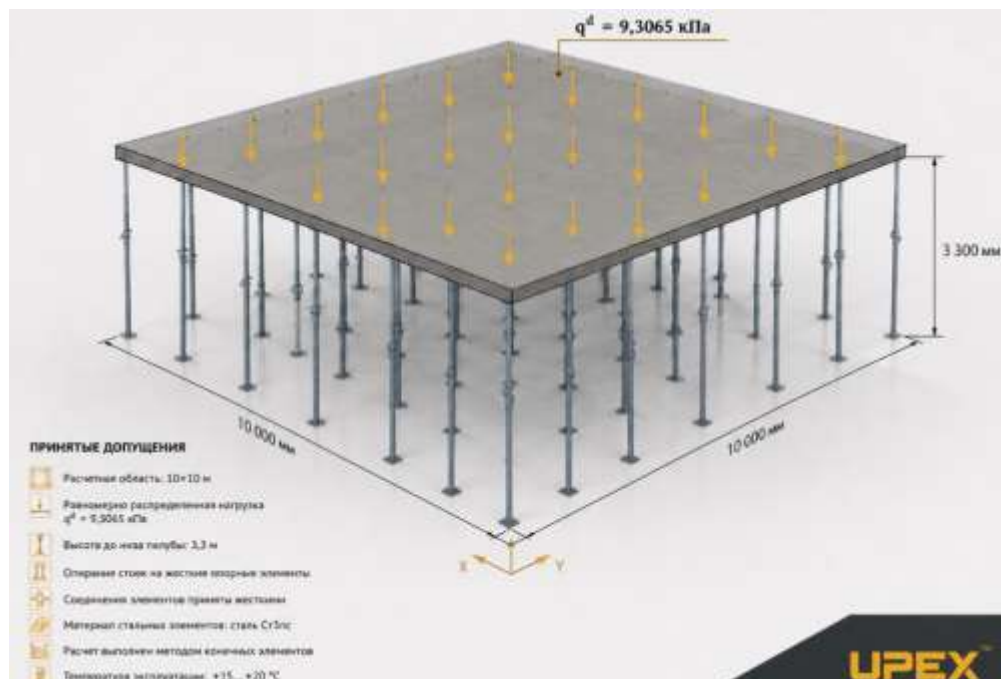


Рис. 2. Единая расчётная область и схема приложения вертикальной нагрузки.

Единые параметры расчётной области		
ПАРАМЕТР	ПРИНЯТОЕ ЗНАЧЕНИЕ	ПРИМЕЧАНИЕ
Размер плиты перекрытия	10 × 10 м	Полная модель без использования симметрии
Площадь палубы	100 м²	Одноразмерное бетонирование всей площади
Высота этажа	3,30 м	Типовая высота этажа
Толщина плиты	200 мм	Тяжелый бетон В25 (М350)
Материал палубы	Фанера ФСФ, 18 мм	Стандартовая для трех систем
Балочная обрешетка	Два ряда БДК 200 мм	Рациональная раскладка по каждой системе
Основание	Абсолютно жесткое	Переменные нагрузки опорных узлов запрещены

Рис. 3. Единая расчётная область и схема приложения вертикальной нагрузки.

Формирование расчётной нагрузки

Вертикальные нагрузки приняты по обязательному приложению «Д» ГОСТ 34329–2017 и приложению С СП 70.13330.2012 [1, 2]. Приняты следующие исходные данные: толщина перекрытия $h = 0,20 \text{ м}$; плотность бетонной смеси $\rho_b = 2500 \text{ кг/м}^3$; удельная масса арматуры, отнесённая к объёму бетона, $\rho_a = 100 \text{ кг/м}^3$; площадь палубы $A = 100 \text{ м}^2$; временная нагрузка от людей и транспортных средств $q_t = 250 \text{ кгс/м}^2$. Коэффициенты надёжности по нагрузке составляют 1,1 для собственного веса опалубки, 1,2 для бетонной смеси и арматуры и 1,3 для людей, транспорта и сосредоточенных технологических воздействий [1–3].

$$m_b = \rho_b \cdot h = 2500 \cdot 0,2 = 500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}; q_b = m_b \cdot g = 4,903 \text{ кПа} \quad (1)$$

$$m_a = \rho_a \cdot h = 100 \cdot 0,2 = 20 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}; q_a = m_a \cdot g = 0,196 \text{ кПа} \quad (2)$$

$$q_d = 1,2(q_b + q_a) + 1,3q_t = 1,2(4,903 + 0,196) + 1,3 \cdot 2,452 = 9,3065 \text{ кПа} \quad (3)$$

$$Q_d = q_d \cdot A = 9,3065 \cdot 100 = 930,65 \text{ кН} \approx 94,9 \text{ тс} \quad (4)$$

Таблица 1. Состав расчётной внешней нагрузки.

Расчетная таблица нагрузок				
Сводные нормативные и расчетные значения				
Составляющая	Нормативное значение, кгс/м²	γ_f	Расчетное значение, кгс/м²	Расчетное значение, кПа
Бетонная смесь	500	1,2	600	5,8840
Арматура	20	1,2	24	0,2354
Люди и транспорт	250	1,3	325	3,1872
Итого	770	—	949	9,3065

Собственный вес элементов включён в расчётный случай гравитационным воздействием (проекция силы тяжести), а полные реакции составили 958,34 кН для РОП-48, 960,82 кН для СТО и 962,29 кН для Cup-Lock. Различие обусловлено массой расчётных схем.

Расчёт выполнялся в линейно-упругой пространственной постановке. В области Ω выполняются уравнения равновесия, геометрические соотношения и закон Гука:

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0; \varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^t); \sigma = C : \varepsilon \quad (5)$$

Для прямолинейных трубчатых элементов и балок применена пространственная балочная модель Эйлера–Бернулли с осевой, изгибной и крутильной жёсткостью. Уравнения продольного растяжения-сжатия и поперечного изгиба имеют вид:

$$EA \cdot d^2 u / dx^2 + p_x = 0; EI \cdot d^4 w / dx^4 = q(x) \quad (6)$$

Фанера рассматривалась как распределительная поверхность. Изгиб тонкой пластины в общем виде описывается уравнением Кирхгофа–Лява:

$$D(w_{xxxx} + 2w_{xyxy} + w_{yyyy}) = q(x, y); D = Eh^3 / [12(1 - \nu^2)] \quad (7)$$

После аппроксимации перемещений формируется глобальная система метода конечных элементов

$$K \cdot U = F \quad (8)$$

Эквивалентное напряжение определялось по энергетическому критерию Мизеса:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2\}} \quad (9)$$

Запас до начала текучести определялся отношением принятого предела текучести стали к максимальному эквивалентному напряжению:

$$n_y = R_y / \sigma_{eq, max}, \text{ где } R_y \text{ — принятый предел текучести стали} \quad (10)$$

Общая устойчивость оценивалась линейным собственным расчётом с геометрической матрицей жёсткости K_G :

$$(K - \lambda_{cr} \cdot K_G) \cdot \varphi = 0 \quad (11)$$

Первый положительный коэффициент λ_{cr} показывает, во сколько раз должна быть увеличена приложенная расчётная нагрузка для достижения первой бифуркационной формы идеализированной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для визуального сопоставления все карты напряжений представлены в общей изометрии и с единой верхней границей цветовой шкалы. Красный цвет соответствует наибольшему уровню напряжений в рассматриваемом наборе моделей.

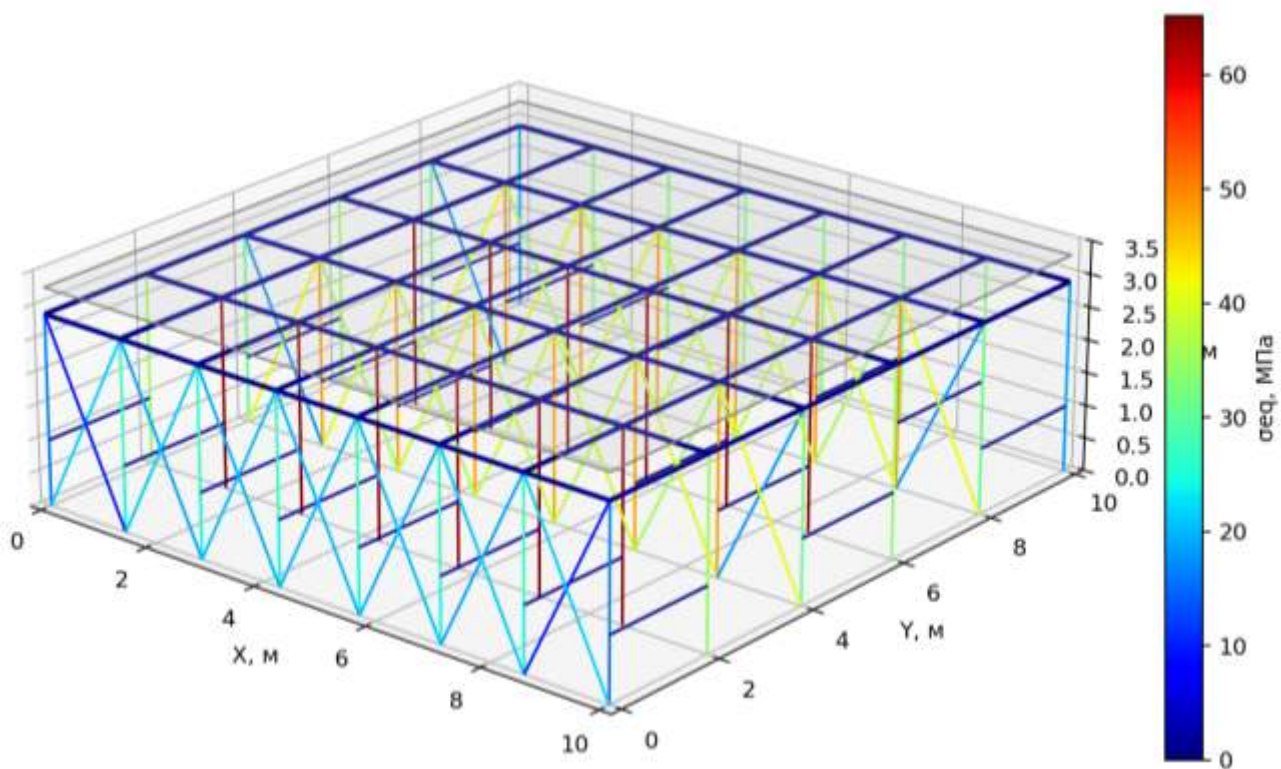


Рис. 4. РОП-48: распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при расчётной нагрузке.

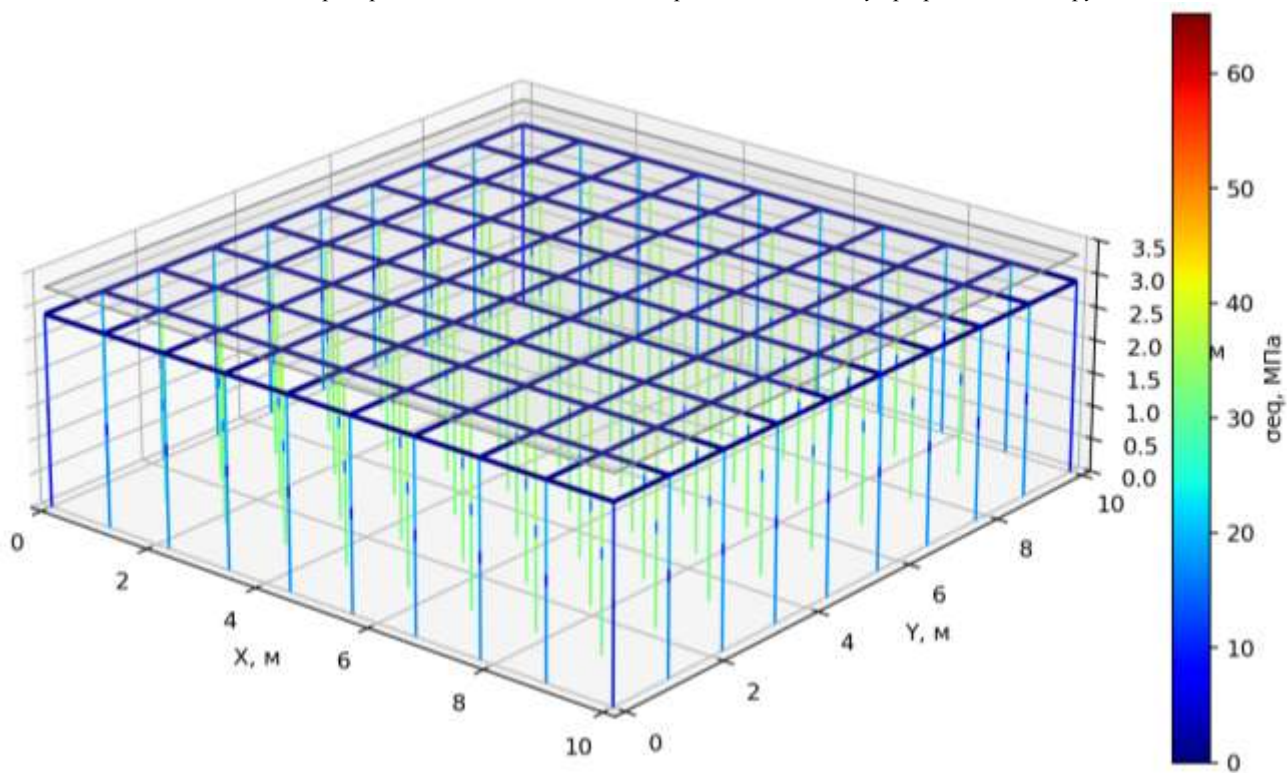


Рис. 5. СТО: распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при расчётной нагрузке.

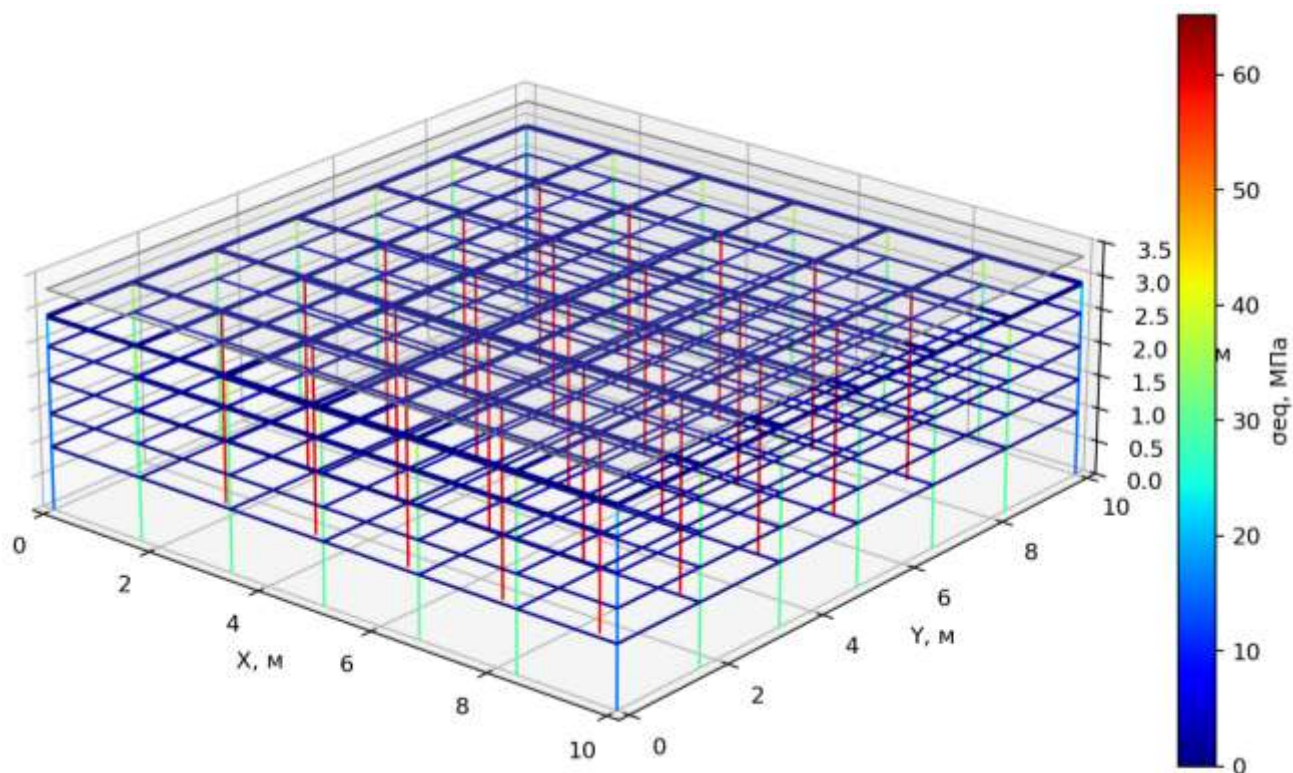


Рис. 6. Cup-Lock: распределение эквивалентных напряжений по Мизесу при расчётной нагрузке.

ось X — максимальные эквивалентные напряжения $\sigma_{eq,max}$, МПа; ось Y — максимальный прогиб w_{max} , мм;
размер пузыря — стоимость приобретения, Р/м²

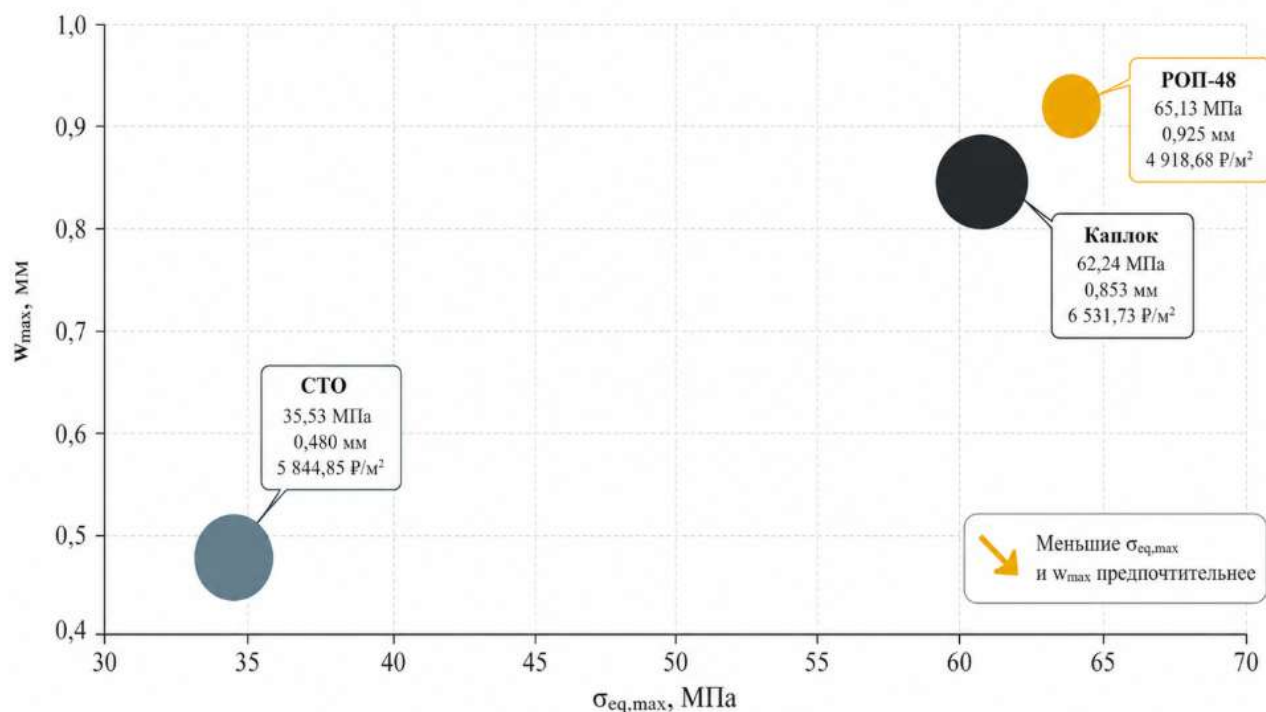


Рис. 7. Сравнение максимальных эквивалентных напряжений, прогиба и стоимости.

Трехмерные поверхности показывают вертикальные перемещения опорной решетки. Величина w включает деформацию верхней балочной системы. Локальный прогиб фанеры между второстепенными балками в настоящей работе отдельно не исследуется.

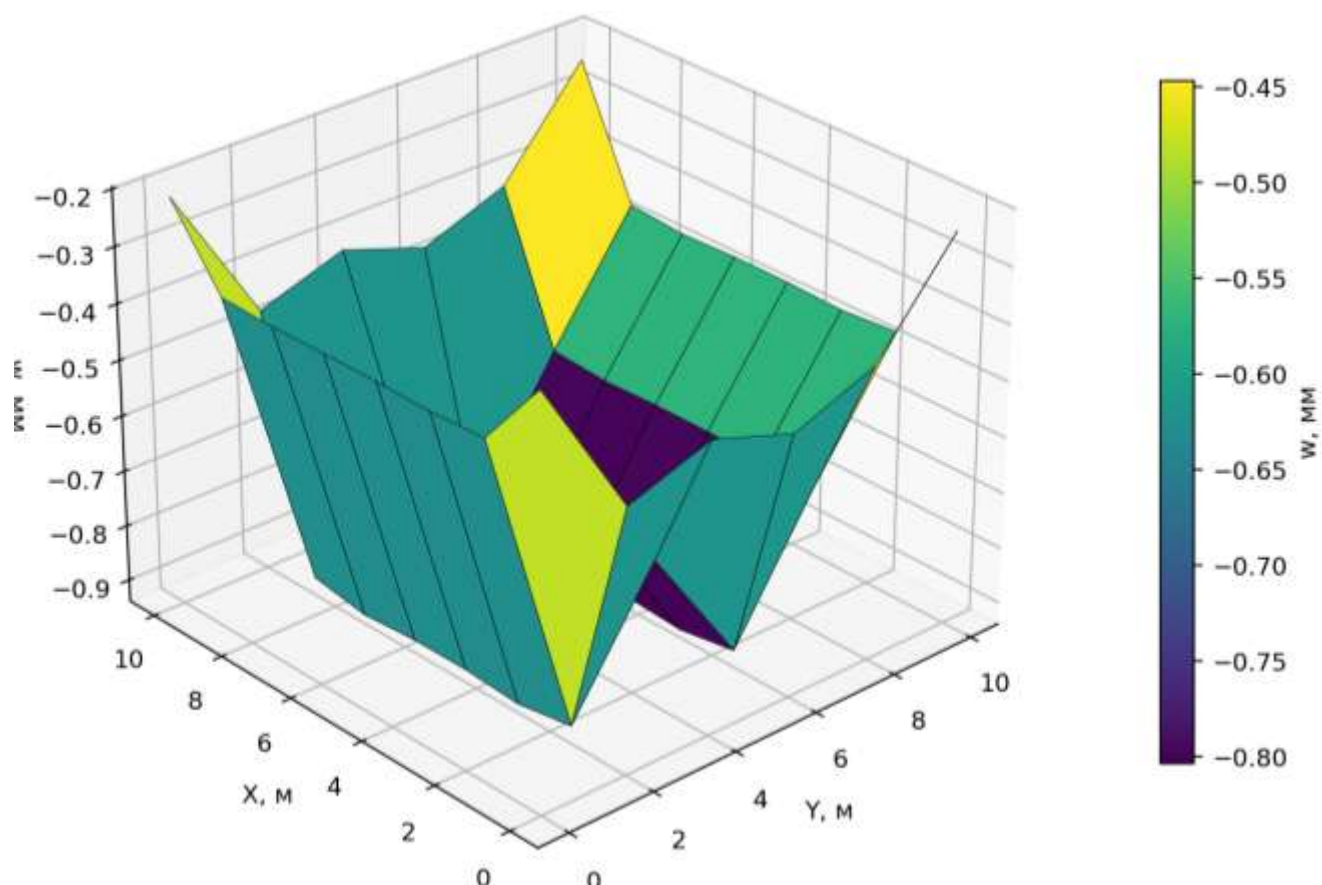


Рис. 8. РОП-48: поле вертикальных перемещений опорной решётки.

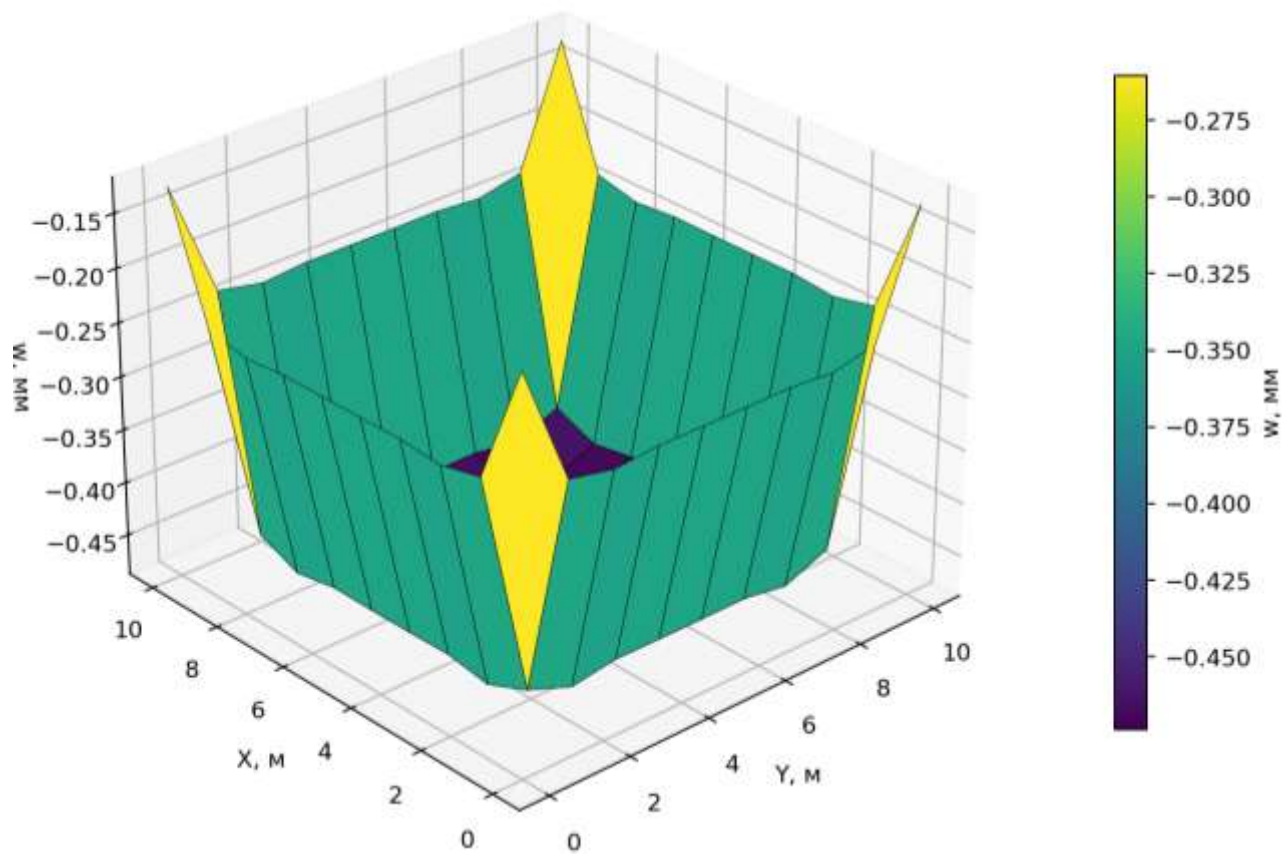


Рис. 9. СТО: поле вертикальных перемещений опорной решётки.

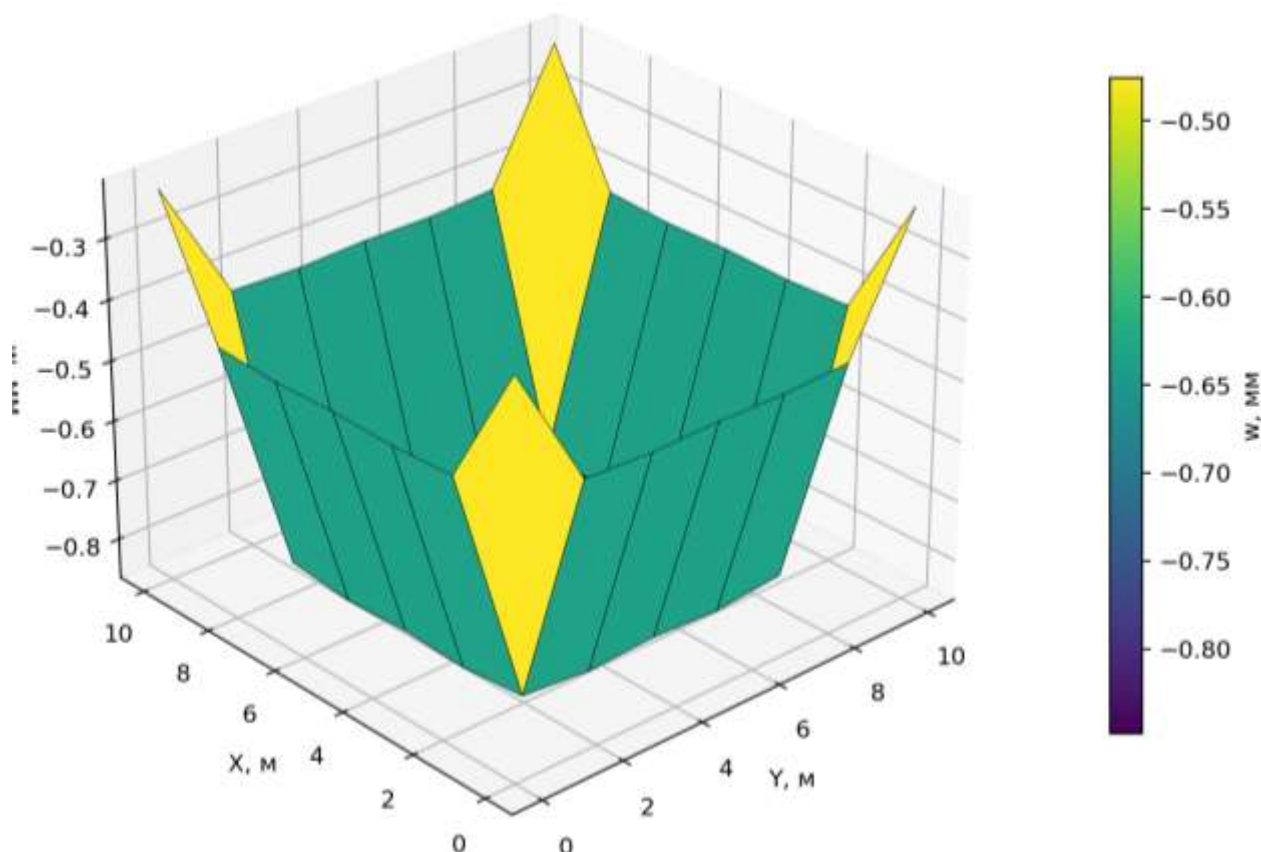


Рис. 10. Cup-Lock: поле вертикальных перемещений опорной решётки.

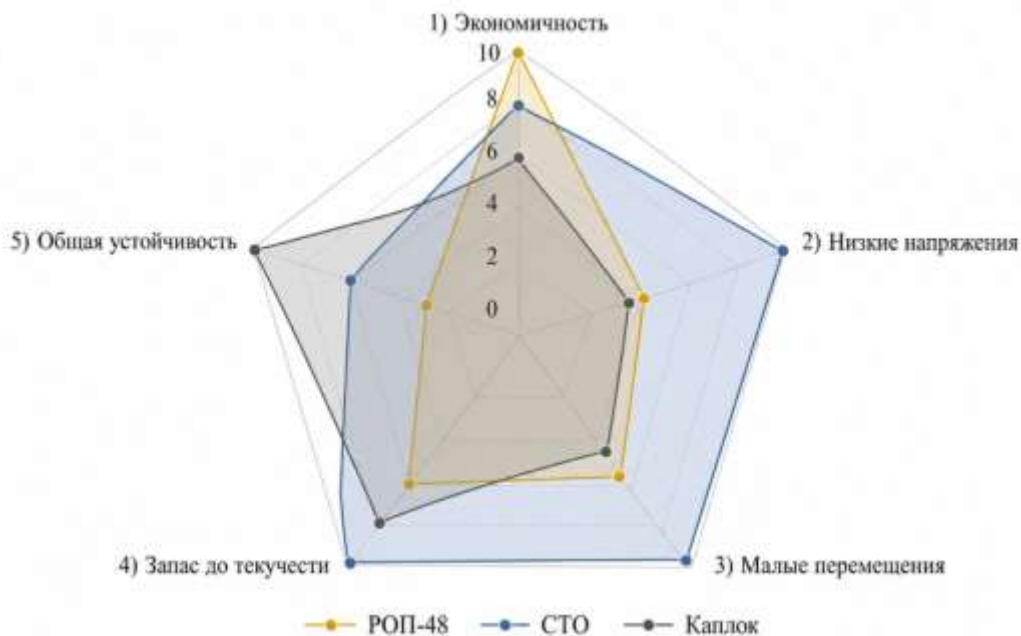


Рис. 11. Сравнение максимальных исследуемых показателей.

Наименьшие перемещения получены для системы на телескопических стойках — 0,480 мм, что связано со 100 точками опирания и наименьшей площадью, воспринимаемой одной стойкой. Значения для каплок и РОП-48 составили соответственно 0,853 и 0,925 мм.

Каплок получил наибольший коэффициент общей устойчивости $\lambda_{сг} = 4,19$. Результат обусловлен совместной пространственной работой вертикалей и четырех уровней ригелей.

Рабочий цикл опалубки состоит из нагружения от собственного веса до состояния полного расчётного давления и последующей разгрузки. Для общего описания циклической долговечности могут использоваться амплитуда и среднее напряжение

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2}; \sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (12)$$

$$\sigma_{a.eq} = \frac{\sigma_a}{(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u})} \quad (13)$$

$$N = C \cdot \sigma_{a.eq}^{-m}; FD = (\sum \frac{n_i}{N_i}) \leq 1 \quad (14)$$

Однако глобальная балочная модель не воспроизводит концентрацию напряжений в отверстиях, резьбе и сварных швах, поэтому абсолютное число усталостных циклов не используется как показатель фактической оборачиваемости. Полученные напряжения подтверждают упругую работу систем, а нормативная экономическая оценка оборачиваемости проводится отдельно по ГОСТ 34329-2017 [1].

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Экономическая часть выполнена по предоставленной комплектовочной ведомости и розничным ценам 2026 г. [14]. Сначала сопоставляется первоначальная стоимость комплектов на 100 м². Затем рассчитывается нормативная амортизационная стоимость одного оборота для опалубки первого класса. По ГОСТ 34329-2017 минимальная оборачиваемость стальных поддерживающих элементов принята 250 оборотов, деревянных поддерживающих элементов — 30 оборотов, фанеры перекрытий — 20 оборотов [1].

$$C_0 = \sum n_i \cdot p_i \quad (15)$$

$$C_{ам,1} = \frac{C_{ст}}{250} + \frac{C_{БДК}}{30} + \frac{C_{ФАН}}{20} \quad (16)$$

$$C_{ам,1} M^2 = C_{ам,1} / A, \text{ где } A \text{ площадь палубы.} \quad (17)$$

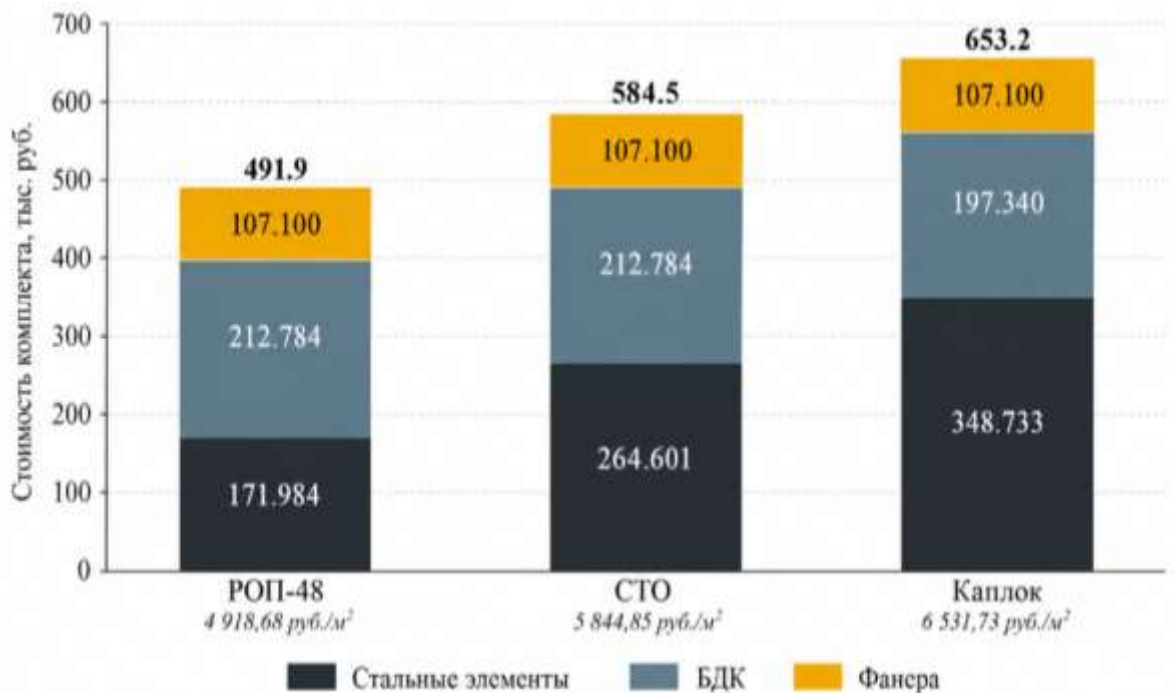


Рис. 12. Структура первоначальной стоимости комплектов на 100 м².

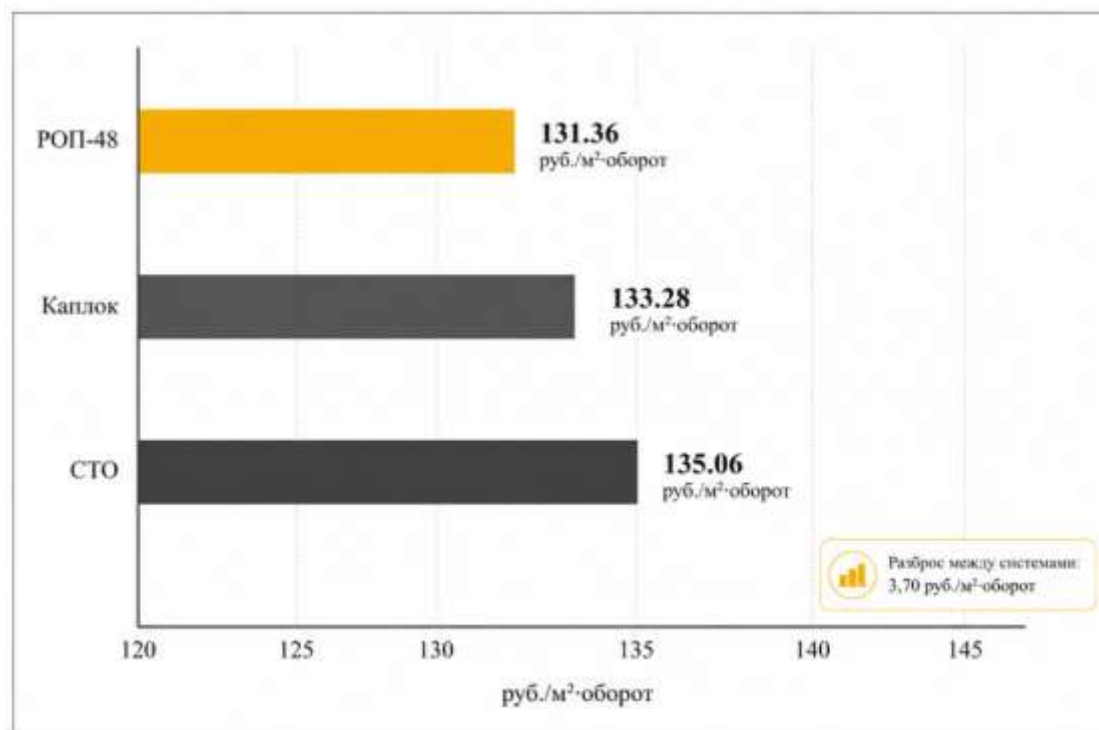


Рис. 13. Нормативная амортизационная стоимость одного оборота на 1 м².

Первоначальная стоимость РОП-48 ниже стоимости СТО на 92 617 руб. и каплока на 161 305 руб. При переходе к нормативной стоимости одного оборота различия сокращаются: 131,36 руб./м²·оборот для РОП-48, 133,28 руб./м²·оборот для каплока и 135,06 руб./м²·оборот для СТО. Причина — одинаковая фанера и близкое количество балок БДК, имеющих меньшую нормативную оборачиваемость и формирующих основную долю стоимости одного оборота.

Полная совокупная стоимость применения должна дополнительно включать монтаж, демонтаж, перемещение по объекту, транспортировку, хранение и ремонт:

$$\sum_C(n) = C_0 + n(C_{\text{монт}} + C_{\text{дем}} + C_{\text{лог}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{хр}}) \quad (18)$$

Эти затраты не включены в численное сравнение, поскольку зависят от конкретной строительной площадки, организации труда и транспортной схемы. Поэтому экономические выводы настоящей работы относятся к первоначальной цене и нормативной амортизации оборудования.

РОП-48					СТО					Каплок				
Наименование	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.	Группа	Наименование	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.	Группа	Наименование	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.	Группа
РОП 48 (2,0-1,5)	24	3 135	75 240	Основные несущие элементы	Стойка телескопическая 3,1	100	1 488	148 800	Основные несущие элементы	Вертикаль 2,0; чашки через 0,5 м	49	1 438	71 442	Основные несущие элементы
КС-25/2,5 (2,0-2,4), L=2000	24	777	18 648	Основные несущие элементы	Тренога	100	538	53 800	Основные несущие элементы	Ригель 1,5	336	588	197 568	Основные несущие элементы
ВО-40×3,5/1000 (120/П4)	48	716	34 368	Основные несущие элементы	Упиралка СТО	249	249	62 001	Основные несущие элементы	ВО-40×3,5/1000 (120/П4)	49	716	35 084	Основные несущие элементы
УВ-40×3,5/1000 (П5)	48	911	43 728	Основные несущие элементы	Балка БДК 3,3 м	124	1 716	212 784	Перекрытия, второстепенные элементы	УВ-40×3,5/1000 (П5)	49	911	44 639	Основные несущие элементы
Балка БДК 3,3 м	124	1 716	212 784	Перекрытия, второстепенные элементы	Фанера ФСФ 18 мм	34	3 150	107 100	Палуба	Балка БДК 3,3 м	115	1 716	197 340	Перекрытия, второстепенные элементы
Фанера ФСФ 18 мм	34	3 150	107 100	Палуба						Фанера ФСФ 18 мм	34	3 150	107 100	Палуба
Итого			491 868		Итого			584 485		Итого			653 173	

Рис. 14. Сводная комплектовая ведомость для палубы площадью 100 м².

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Система на телескопических стойках показала минимальные напряжения и перемещения. Данный результат объясняется не повышенной пространственной жёсткостью, а количеством опор: на каждую из 100 стоек приходится приблизительно вдвое меньшая вертикальная реакция, чем на опоры РОП-48 и каплока.

Каплок показал лучший коэффициент общей устойчивости. Четыре уровня ригелей формируют пространственную решетку и сокращают свободную длину вертикалей. При этом запас до текучести остается ниже, чем у СТО, так как число вертикалей 49 штук. Этот результат подтверждает необходимость раздельного анализа прочности материала и устойчивости системы.

РОП-48 занимает промежуточное положение по напряжениям и деформативности, но имеет минимальную цену приобретения и минимальную нормативную амортизационную стоимость одного оборота. Пространственная жёсткость обеспечивается совместной работой двухстоечных рам и крестовых связей.

Ни одна система не является безусловно лучшей по всем критериям. Телескопические стойки рациональны при приоритете минимальных напряжений и простой поэлементной компоновки; каплок — при приоритете пространственной устойчивости и геометрической неизменяемости; РОП-48 — при необходимости снизить первоначальные капитальные затраты и стоимость одного оборота при сохранении достаточного запаса прочности.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и реализована единая методика многокритериального сопоставления полных комплектов опалубки перекрытий, основанная на пространственном конечно-элементном моделировании при идентичных размерах расчётной области, граничных условиях и нагрузке. Принципиальной особенностью методики является раздельная оценка прочности материала, деформации, общей устойчивости и экономической эффективности, что исключает подмену одного критерия другим.

2. В принятой линейно-упругой идеализации все исследованные системы сохраняют упругий характер работы: коэффициент запаса до текучести изменяется от 3,76 до 6,90, а первый коэффициент линейной потери устойчивости — от 2,27 до 4,19.

3. Для системы на телескопических стойках установлены минимальные эквивалентные напряжения 35,53 МПа и вертикальное перемещение 0,480 мм. Определяющим фактором является не пространственное раскрепление, а распределение нагрузки между 100 отдельными опорами, вследствие чего реакция и площадь палубы, приходящиеся на одну стойку, приблизительно вдвое меньше, чем в системах РОП-48 и Cup-Lock.

4. Модульная система Cup-Lock показала наибольший коэффициент общей устойчивости $\lambda_{ст} = 4,19$, что на 35,6 % превышает результат системы СТО и на 84,6 % — результат РОП-48. Установленная закономерность обусловлена совместной работой вертикалей и четырёх пространственных уровней ригелей, сокращающих свободную длину стоек и формирующих геометрически неизменяемую расчётную схему.

5. Рамная система РОП-48 при максимальном напряжении 65,13 МПа и вертикальном перемещении 0,925 мм занимает промежуточное положение по показателям напряженно-деформированного состояния. Совместная работа двухстоечных рам и крестовых связей обеспечивает коэффициент запаса до текучести 3,76 и коэффициент общей устойчивости 2,27, то есть в принятой расчётной постановке система сохраняет необходимый резерв прочности и устойчивости.

6. Практический результат исследования состоит в формировании обоснованной области рационального применения систем: СТО предпочтительна при приоритете небольших высот, минимальных напряжений и перемещений; Cup-Lock — при повышенных требованиях к общей пространственной устойчивости; РОП-48 — при ограничении высот до 18 м и первоначальных капитальных затрат и стоимости одного оборота. Полученные выводы относятся к общей работе идеализированных пространственных схем; дальнейшее развитие исследования должно включать нелинейное моделирование податливости узлов, монтажных несовершенств, локальных зон резбовых и сварных соединений и экспериментальную верификацию расчётных моделей.

Список литературы / References

1. ГОСТ 34329–2017. Опалубка. Общие технические условия [Электронный ресурс]. — URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/4a482012-e431-4880-a065-c7d71e61b67b> (дата обращения: 23.07.2026).
2. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01–87 (с изменениями № 1, 3–7) [Электронный ресурс]. — URL: <https://protect.gost.ru/sp/details/2239acf1-711f-4f1f-aaa7-902fa06a8a60> (дата обращения: 23.07.2026).
3. СП 371.1325800.2017. Опалубка. Правила проектирования [Электронный ресурс]. — URL: <https://protect.gost.ru/sp/details/fd9b51f4-921b-4d3c-a2fb-eef918db063b> (дата обращения: 23.07.2026).
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* (с изменениями № 1–6) [Электронный ресурс]. — URL: <https://protect.gost.ru/sp/details/bac9e1fe-45f1-401b-8e32-949f4ee27821> (дата обращения: 23.07.2026).
5. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81* (с изменениями № 1–6) [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (дата обращения: 23.07.2026).
6. ГОСТ 380–2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки (с изменением № 1 и поправкой) [Электронный ресурс]. — URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/6c99c390-1cc9-44d5-84c3-f9c1276df24f> (дата обращения: 23.07.2026).

7. ГОСТ 26633–2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия (с изменением № 1) [Электронный ресурс]. — URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/b9da3cd9-2fb4-4473-9553-3979ad6be453> (дата обращения: 23.07.2026).
8. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25–80 (с изменениями № 1–4) [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения: 23.07.2026).
9. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th ed. Oxford: Elsevier, 2013. 756 p.
10. Bathe K.-J. Finite Element Procedures. 2nd ed. Watertown, MA: K.-J. Bathe, 2014. 1065 p.
11. Timoshenko S.P., Gere J.M. Theory of Elastic Stability. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1961. 541 p.
12. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. 4th ed. New York: Wiley, 2001. 736 p.
13. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue // Journal of Applied Mechanics. 1945. Vol. 12. No. 3. P. A159–A164.
14. Комплектующая ведомость и розничный прайс-лист систем РОП-48, СТО и Cup-Lock на площадь 100 м². ООО «Стройдеталь-Кисловодск». Кисловодск, 2026.
15. UPEX: системы строительной опалубки от производителя [Электронный ресурс]. — URL: <https://upex.pro/> (дата обращения: 23.07.2026).