

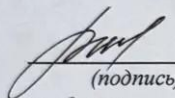
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Работа выполнена в СКБ

«Проектирование и информационное моделирование зданий и сооружений»

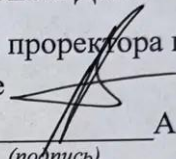
СОГЛАСОВАНО

Руководитель ОНиПКРС

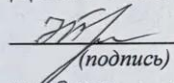

(подпись) Е.М. Димитриади
« 22 » 05 20 26 г.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной ра-
боте


(подпись) А.В. Космынин
« 22 » 05 20 26 г.

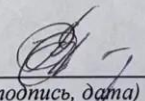
Декан ФКС


(подпись) Н.В. Гринкруг
« 22 » 09 20 26 г.

«Оптимизация кривизны большепролетного безопорного купольного
покрытия городов будущего»

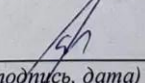
Комплект проектной документации

Руководитель СКБ


(подпись, дата)

Е.В. Журавлева

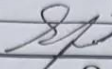
Руководитель проекта


(подпись, дата)

О.Е. Сысоев

Комсомольск-на-Амуре 2026

Карточка проекта

Название	Оптимизация кривизны большепролетного безопорного купольного покрытия городов будущего
Тип проекта	Инициативный
Исполнители	Студент  Б.Д. Яровенко – группа 2ПСб-1
Срок реализации	Октябрь 25 – Май 26

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

ЗАДАНИЕ
на разработку

Название проекта: Оптимизация кривизны большепролетного безопорного купольного покрытия городов будущего

Назначение: Создание безопасной, энергоэффективной и долговечной атмосферы «второго неба» над общественными пространствами городов будущего (площади, парки, жилые кластеры).

Область использования: будет использованы для создания безопасных экосистем

Функциональное описание проекта: Проект подбирает оптимальную форму купола (сферическая, эллиптическая, параболическая, зонтичная), которая минимизирует массу конструкции при заданных нагрузках (ветер, снег, сейсмика, собственный вес). Главная функция - нахождение «золотого сечения» кривизны:

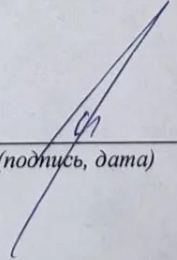
Техническое описание устройства: Выбор экономически выгодной конструкции, расчет оптимальной формы купола.

Требования: Подбор наиболее оптимальной формы купола.

План работ:

Наименование работ	Срок
Обоснование актуальности закрытых экосистем	10.2025
Выбор конструкций закрытых экосистем	01.2026
Расчет усилий в купола	03.2026
Оптимизация параметров купола	05.2026

Руководитель проекта


(подпись, дата)

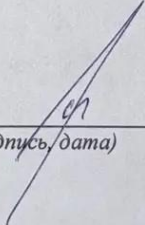
О.Е. Сысоев

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

ПАСПОРТ

«Оптимизация кривизны большепролетного безопорного купольного
покрытия городов будущего»

Руководитель проекта



(подпись, дата)

О.Е. Сысоев

Комсомольск-на-Амуре 2026

Содержание

1	Обоснование актуальности	6
1.1	Первая угроза: экологический коллапс мегаполисов	6
1.2	Вторая угроза: климатическая нестабильность и деградация атмосферы.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.3	Третья угроза: возвращение ядерного фактора.....	8
1.4	От фантастики к инженерии: почему сейчас?	9
1.5	Необходимость закрытых эко систем	11
2	Оптимизация конструкций закрытых эко систе	13
2.1	Конструктивные особенности и принципы работы.....	13
2.2	Экономическое сравнени	Ошибка! Закладка не определена.
2.3	Использование полезного пространств.....	Ошибка! Закладка не определена.
3	Расчет купольной конструкци	Ошибка! Закладка не определена.
4	Расчет купольной конструкци	19
	Вывод.....	Ошибка! Закладка не определена.
	Список использованных источников	Ошибка! Закладка не определена.

					СКБ ПиИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		5

1 Обоснование актуальности

Человечество привыкло измерять прогресс высотой небоскребов, скоростью поездов и проникновением в космос. Но парадокс XXI века заключается в том, что, научившись строить здания на миллион жителей и запускать ракеты к Марсу, мы все чаще оказываемся бессильны перед тем, что находится прямо за окном - перед воздухом, которым дышим, и перед угрозами, которые несут нам же созданные технологии. Мы строим «умные города», но задыхаемся в смоге. Мы создаем системы глобальной безопасности, но снова живем с оглядкой на ядерные арсеналы. Мы мечтаем о терраформировании других планет, тогда как атмосфера собственной Земли стремительно деградирует.

Именно в этом противоречии рождается, пожалуй, самая амбициозная архитектурная идея нашего века: полностью или частично герметизированные города под защитными купольными покрытиями. То, что еще тридцать лет назад казалось декорацией для голливудской антиутопии или иллюстрацией к фантастическому роману, сегодня становится предметом серьезных инженерных расчетов, градостроительных конкурсов и стратегических сессий ООН по устойчивому развитию.

1.1. Первая угроза: экологический коллапс мегаполисов

Первым и самым очевидным драйвером перехода к купольной урбанистике является катастрофическое ухудшение качества атмосферного воздуха в городах. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), более 90% населения мира дышит воздухом, уровень загрязнения которого превышает рекомендованные безопасные нормы. В мегаполисах Юго-Восточной Азии, Китая, Индии, а все чаще - Европы и Северной Америки - концентрация мелкодисперсных частиц PM2.5, оксидов азота, серы и приземного озона

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		6

достигает значений, при которых нахождение на улице без защиты приравнивается к активному курению.

Это не просто дискомфорт. Это реальные потери в продолжительности жизни, рост онкологических и респираторных заболеваний, снижение когнитивных способностей у детей, а в долгосрочной перспективе - деградация городских экосистем. Открытый город, в котором улицы, парки и площади общаются с внешней средой, в условиях промышленного и транспортного загрязнения становится ловушкой для грязного воздуха, а не местом здоровой жизни.

При этом существующие меры - расширение зеленых зон, электромобили, ограничение выбросов - лишь замедляют ухудшение, но не решают проблему кардинально. Почему? Потому что глобальная атмосфера едина. Даже если закрыть все заводы в одном городе, ветер принесет смог из соседнего региона или из другой страны. Единственный способ гарантировать чистоту воздуха в масштабах города - локализовать и изолировать его воздушную среду. Именно это и предлагают купольные системы.

1.2. Вторая угроза: климатическая нестабильность и деградация атмосферы

На более фундаментальном уровне человечество сталкивается с системным изменением химического состава и физических свойств атмосферы. Рост концентрации парниковых газов, разрушение озонового слоя (пусть и частично восстановленного), учащение экстремальных погодных явлений - от ураганов и наводнений до аномальной жары и пылевых бурь - превращают открытую городскую среду в зону повышенного риска.

Показательный пример: 2023–2025 годы. Волны жары в Северном полушарии достигают +50°C в тени, делая невозможным пребывание на улице в дневные часы. Лесные пожары, охватывающие миллионы гектаров, выбра-

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата.</i>		7

сывают в атмосферу такие объемы сажи и токсинов, что дым от них достигает городов, удаленных на тысячи километров. В таких условиях традиционная архитектура с кондиционерами и рециркуляцией воздуха внутри отдельных зданий оказывается энергозатратной и малоэффективной.

Купольное покрытие в этом контексте выполняет роль климатического щита:

- снаружи - экстремальные температуры, ураганы, кислотные дожди и радиационный фон;
- внутри - стабильные +22°C, фильтрованный воздух, контролируемая влажность и защита от внешней химии.

Более того, купол позволяет организовать замкнутые циклы водоснабжения и регенерации кислорода с использованием гидропонных ферм и фотосинтезирующих водорослей - фактически, создать маленькую искусственную биосферу, не зависящую от деградирующей внешней среды.

1.3. Третья угроза: возвращение ядерного фактора

Самым тревожным триггером, переводящим тему купольных городов из области экологической футурологии в плоскость военно-инженерной необходимости, стало возрождение угрозы крупномасштабной ядерной войны. После десятилетий относительной разрядки мир вновь столкнулся с риском применения оружия массового поражения - будь то гипотетический конфликт между ядерными державами, ограниченный ядерный удар по военным или промышленным объектам или же катастрофические аварии на атомных станциях (типа Фукусимы или Чернобыля, но вблизи крупного города).

Последствия даже «ограниченного» обмена ядерными ударами для городской среды хорошо изучены:

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата.</i>		8

- Ударная волна разрушает незащищенные здания в радиусе километров;
- Световое излучение вызывает массовые пожары;
- Проникающая радиация и радиоактивные осадки делают большие территории непригодными для жизни на десятилетия;
- А главное - ядерная зима (даже от 100 взрывов) приведет к резкому падению температуры, разрушению озона и многократному росту ультрафиолета, что сделает открытую атмосферу смертельной для всего живого.

Купольные покрытия городов будущего, если их проектировать с самого начала как многослойные защитные конструкции, способны решить ряд задач, непосильных для традиционной рассредоточенной застройки:

- Фильтрация радиоактивной пыли через системы подпорков и каскадных фильтров;
- Защита от ударной волны за счет аэродинамической формы и армированных композитов;
- Экранирование ионизирующего излучения с использованием слоев свинца или барито-бетона в нижней части купола;
- Автономное жизнеобеспечение на месяцы и годы в случае загрязнения внешней среды.

Иными словами, купол превращает разрозненные убежища (метро, бункеры) в единую устойчивую среду обитания, где город продолжает жить даже при внешней катастрофе.

1.4. От фантастики к инженерии: почему сейчас?

Конечно, идея купольных городов не нова. Еще в 1960-х Бакминстер Фуллер предлагал накрыть куполом Манхэттен. В 1970-х в СССР разрабатывались проекты герметизированных городов для Крайнего Севера. В 1990-х -

					СКБ ПиИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		9

проекты биосферных комплексов для космических колоний. Почему же тогда мы не строим их до сих пор?

Ответ - в технологических ограничениях прошлого:

- не существовало сверхлегких и сверхпрочных прозрачных материалов (органика, аэрогели, графеновые композиты);
- не было систем регенерации воздуха с замкнутым циклом и энергоэффективных климатических установок;
- стоимость производства и обслуживания была астрономической.

Сегодня ситуация качественно изменилась. Появление полимерных нанокompозитов, интегральных систем жизнеобеспечения (от МКС до подводных лабораторий), падение цен на возобновляемую энергетику и автоматизацию делают купольные города если не дешевыми, то, по крайней мере, технически реализуемыми.

Главное же - изменился сам запрос. Если раньше люди мечтали о куполе ради экзотики или научного интереса, то теперь тревога за жизнь и здоровье становится массовой. И эта тревога подкрепляется реальными цифрами: загрязнение воздуха убивает 7 миллионов человек в год; ущерб от климатических катастроф уже исчисляется триллионами долларов; а вероятность ядерного инцидента в течение ближайших 30 лет эксперты оценивают как не менее 10–15%.

					СКБ ПиИМЗиС. 1.ТТ.03000000	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата.</i>		10

1.5. Необходимость закрытых эко систем

Необходимость закрытых эко систем - не просто перечислить угрозы, а предложить архитектурно-техническую модель купольного города будущего, оценить ее реализуемость, указать на ключевые проблемы (от психологических - замкнутое пространство - до материально-технических - герметизация транспортных узлов) и наметить дорожную карту внедрения: от малых купольных кварталов «повышенной комфортности» до полной герметизации мегаполисов.

1. **Анализ угроз** - детальный разбор экологических, климатических и ядерных рисков для открытой городской среды.
2. **Исторический обзор** - почему предыдущие попытки создания купольных городов не вышли за рамки концептов.
3. **Современные материалы и технологии** - что изменилось за последние 10–15 лет.
4. **Архитектурные решения** - типы куполов (статичные, раздвижные, сегментированные), системы шлюзования, транспортные коридоры.
5. **Системы жизнеобеспечения** - регенерация воздуха, воды, энергетика, вертикальные фермы.
6. **Защита от ядерных угроз** - радиационная стойкость, алгоритмы герметизации при тревоге, автономность.
7. **Психологические и социальные аспекты** - как жить под куполом без ощущения тюрьмы.
8. **Экономика и политика** - кто и зачем будет это строить, примерная стоимость, сценарии внедрения.
9. **Выводы** - от первых купольных районов в Дубае, Норильске или Пекине до планетарных биосфер.

Человечество вступило в эпоху, когда внешняя среда вокруг городов перестает быть нейтральной и становится враждебной. Воздух убивает, климат ломает привычный уклад, а призрак ядерной войны вновь заставляет

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		11

вспомнить старую истину: дом должен быть крепостью. Но если раньше крепостью был отдельный бункер или подвал, то сегодня речь идет о крепости масштаба целого города.

Купольные покрытия - не панацея. Они дороги, сложны, требуют новых профессий и нового образа жизни. Однако в мире, где три экзистенциальные угрозы накладываются друг на друга, отказываться от этого пути означает добровольно оставаться уязвимыми.

2. Оптимизация конструкций закрытых эко систем

При проектировании защитных покрытий для городов будущего один из ключевых архитектурно-инженерных вопросов - выбор геометрической формы перекрытия. Две основные конкурирующие концепции - **арочные конструкции** (цилиндрические своды, тоннельные покрытия) и **купольные конструкции** (сферические или полусферические оболочки). Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения, особенно когда речь идет о двух критических параметрах: **экономической эффективности** (стоимость материалов, монтажа и эксплуатации) и **использовании полезного пространства** (распределение площади, высоты, зонирование).

В данном анализе мы рассмотрим обе технологии с точки зрения масштабных урбанистических проектов, опираясь на современные данные о строительстве большепролетных покрытий.

2.1 Конструктивные особенности и принципы работы

2.1.1. Арочные конструкции (цилиндрические своды)

Арочные покрытия представляют собой вытянутые в одном направлении своды, напоминающие перевернутый тоннель или огромную трубу, раз-

					СКБ ПиИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		12

резанную вдоль. В поперечном сечении они образуют дугу окружности или параболы, а в продольном - остаются неизменными на всем протяжении.

Принцип работы: Арка передает вертикальную нагрузку на опоры через распор - горизонтальную силу, которая требует мощных фундаментов или затяжек. В большепролетных покрытиях (сотни метров) используются либо жесткие арки из стали или композитов, либо пневматические конструкции с поддержанием внутреннего давления.

2.1.2. Купольные конструкции (сферические оболочки)

Купольные покрытия представляют собой осесимметричные оболочки, имеющие форму полусферы, эллипсоида или параболоида. Они перекрывают пространство без внутренних опор, равномерно распределяя нагрузку во всех направлениях.

Принцип работы: Купол работает в двух направлениях одновременно (меридиональном и кольцевом), что создает пространственное напряженное состояние - наиболее эффективный способ распределения нагрузок в природе (яичная скорлупа, панцири).



Рисунок 1. Город под куполом.

2.2. Экономическое сравнение

Экономика купольных покрытий определяется совокупностью факторов: стоимость материалов и их транспортировки, сложность монтажа (тру-

Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.

СКБ ПуИМЗиС. 1.ТТ.03000000

Лист

13

доемкость), стоимость фундаментных работ, эксплуатационные расходы (поддержание микроклимата, системы вентиляции, освещение).

Таблица 1. Стоимость материалов

Фактор	Арочные конструкции	Купольные конструкции
Удельный расход материала на м ²	Ниже (простая геометрия)	Выше из-за двойной кривизны
Технологичность изготовления	Проще (экструзия, прокат)	Сложнее (прецизионное формование)
Используемые материалы	Сталь, алюминий, ПВХ-ткани	Композиты, поликарбонат, аэрогели

Арочные конструкции выигрывают по прямым материальным затратам: их геометрия допускает использование унифицированных секций, которые можно производить в промышленных масштабах. Арочные покрытия для бассейнов, например, имеют более низкую стоимость монтажа по сравнению с купольными.

Купольные конструкции требуют панелей разной кривизны (в зависимости от ширины сечения), что увеличивает стоимость изготовления. Однако современные технологии 3D-печати композитами и пневматической формовки начинают нивелировать это преимущество арок

2.2.1. Стоимость фундаментов и опорных систем

Арочные конструкции создают значительный горизонтальный распор, который требует:

- массивных опорных конструкций (контрфорсов)
- мощных фундаментов по всей длине
- либо сложных затяжек (стяжек), перекрывающих пролет

В масштабах города (пролеты 500–2000 метров) это превращается в гигантские инженерные сооружения, стоимость которых сопоставима с самим покрытием.

Купольные конструкции распределяют нагрузку на кольцевое опорное кольцо (фундамент по окружности). Распор в куполе гасится сжимающими усилиями в кольцевых поясах. Это означает:

- фундамент требуется только по периметру
- нет необходимости в массивных промежуточных опорах

При равной покрываемой площади **фундамент купола может быть легче**, чем у арочного покрытия.

2.2.2. Эксплуатационные расходы

Ключевой параметр для купольных городов - **затраты на поддержание микроклимата** (температура, влажность, фильтрация воздуха).

Таблица 2. Эксплуатационные расходы

Параметр	Арочные конструкции	Купольные конструкции
Отношение площади поверхности к объему	Выше	Ниже (сфера - оптимальная форма)
Теплопотери	Выше	На 25–30% ниже
Сложность вентиляции	Проще (сквозное проветривание)	Сложнее (нужна активная циркуляция)

Сфера - **геометрически оптимальная форма** для минимизации поверхности при заданном объеме. При одинаковой площади основания купол будет иметь на 25–30% меньшую площадь поверхности, чем арочное покрытие такой же высоты. Это напрямую переводится в:

- **экономии на строительных материалах** (хотя выше стоимость единицы площади, общая площадь меньше)
- **существенную экономию на отоплении/охлаждении** - критично для городов в экстремальных климатах

Системы вентиляции для купольных городов, однако, требуют более сложного проектирования, так как естественная конвекция в сферическом объеме менее эффективна, чем в вытянутом арочном тоннеле, где можно организовать сквозняк. Для герметичных городов, защищенных от загрязненного воздуха, потребуется активная система с воздуховодами - это увеличивает капитальные и операционные затраты .

Для пневматических (надувных) конструкций стоимость поддержания давления - непрерывные расходы на электроэнергию для вентиляторов .

Сравнение итоговой стоимости

В современном строительстве большепролетных покрытий (спортивные стадионы, ангары, выставочные центры):

- **Арочные конструкции** дешевле на этапе производства материалов и сборки, но дороже в фундаментах и, при больших пролетах, в эксплуатации.
- **Купольные конструкции** дороже в производстве, но дают экономиию на фундаменте и эксплуатационных расходах при больших масштабах.

Вывод: Для городов-миллионников **купол становится экономически предпочтительнее** из-за эффекта масштаба на эксплуатационных расходах (экономия на отоплении/охлаждении за десятилетия перекрывает стартовые инвестиции).

2.3.Использование полезного пространства

Второй критический параметр - насколько эффективно покрытие позволяет использовать площадь под ним для городской застройки, инфраструктуры, транспорта и рекреации.

2.3.1.Распределение высот и зонирование

Таблица 3. Распределение высот и зонирование

Параметр	Арочные конструкции	Купольные конструкции
Профиль высот	Постоянный по длине	Переменный от центра
Максимальная высота	В центре пролета	В центре купола
Полезная площадь (с высотой > 10 м)	Вытянутая полоса	Круглая зона

Арочное покрытие создает «**тоннельный эффект**»: максимальная высота достигается в центре вдоль всей длины арки. Это позволяет эффективно размещать высотные здания вдоль центральной оси, но ближе к краям высота уменьшается до нуля - эти зоны непригодны для высотного строительства.

Купольное покрытие создает **круговое распределение высот**: максимальная высота - в центре, плавно снижаясь к периферии. Это дает возможность:

- зонировать город по высотам (центр - небоскребы, периферия - малоэтажная застройка)
- но создает и проблему: вся высокоэтажная застройка вынуждена концентрироваться в центральной зоне

Эффективность покрытия (отношение полезной площади к общей)

Если определить «полезную» площадь как зону, где высота покрытия достаточна для комфортного проживания (например, > 5 м) или строительства небоскребов (> 30 м):

- **Арочное покрытие**: «мертвые зоны» вдоль длинных сторон (менее 15% площади)
- **Купольное покрытие**: «мертвая зона» - кольцо по периметру (менее 10–12% площади при соотношении высота/радиус > 0.3)

Купол при одинаковой высоте H и ширине L обеспечивает **более равномерное распределение высот** в центральной зоне. Исследования показывают, что при соотношении $H/L = 1/3$ оба типа покрытия имеют схожую эффективность; при более пологих формах ($< 1/5$) купол проигрывает - слишком много низких периферийных зон.

Гибкость планировки и зонирования

Арочные конструкции лучше подходят для **линейных городов** (города-струны, развитие вдоль транспортных магистралей, побережий). Арочный профиль позволяет:

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата.</i>		17

- размещать транспортную инфраструктуру (метро, дороги) в зоне максимальной высоты

- организовать сквозное естественное освещение
- легко масштабировать город путем продления арки

Купольные конструкции лучше подходят для **круговых (радиально-кольцевых) городов**. Их преимущества:

- естественный центр для общественных пространств (парки, площади, стадионы) - там, где высота максимальна
- радиальное зонирование (центр - деловой, среднее кольцо - жилое, внешнее - промышленное/сельскохозяйственное)
- эстетически завершенная форма

Для существующих городов с хаотичной или прямоугольной планировкой (Нью-Йорк, Пекин) **арочное покрытие может быть проще адаптировать** - можно накрыть отдельные районы «полосами».

▪ **Проблема транспортных узлов и герметизации**

Обе формы сталкиваются с вызовом: **как организовать входы/выходы** (шлюзы, транспортные тоннели), не нарушая герметичность.

- **Арочные конструкции:** естественные «торцы» - идеальные места для размещения шлюзов и транспортных порталов. Можно организовать сквозное движение транспорта через герметичные шлюзы на концах арки.

- **Купольные конструкции:** транспортные въезды приходится делать через шлюзы в стене купола - это требует сложных круговых развязок и многоуровневых герметизаций.

Таблица 3. Сравнительная таблица

Критерий	Арочные конструкции	Купольные конструкции	Победитель
----------	---------------------	-----------------------	------------

Стоимость материалов	Низкая	Средняя/Высокая	Арка
Стоимость фундаментов	Высокая (распор)	Низкая (кольцевой)	Купол
Эксплуатация (отопление/охлаждение)	Высокая	Низкая (оптимальная форма)	Купол
Площадь поверхности на объем	Выше	Ниже на 25–30%	Купол
Простота масштабирования	Высокая (продление)	Низкая (новый купол)	Арка
Совместимость с прямоугольной застройкой	Средняя	Низкая	Арка
Эффективность использования высоты	Средняя	Высокая (центрирование)	Купол
Естественное освещение	Хорошее (постоянное)	Отличное (меняется в течение дня)	Купол

3. Расчет купольной конструкции

Состояние купола описывается функционалом полной энергии Π , который необходимо минимизировать:

$$\Pi[w, \Phi] = \int \Omega (U_{membrane} + U_{bending} + U_{external}) d\Omega$$

Где:

- $w(x, y)$ - функция прогиба (искомая форма кривизны).
- Φ - функция напряжений Эри.

Условие оптимальности: Вариация $\delta\Pi=0$ приводит к системе уравнений **Мизеса-Фёппля** для пологих оболочек:

$$D\nabla^4 w - R/1\nabla^2 \Phi - L(w, \Phi) = q$$
$$\nabla^4 \Phi + Eh\left(\frac{1}{R}\nabla^2 w + \left(\frac{1}{2}\right)L(w, w)\right) = 0$$

Где L - билинейный оператор, R - радиус кривизны

Математическое обоснование 1: В безопорном куполе отсутствуют изгибающие моменты на контуре ($M=0$). Это накладывает условие $\nabla^2 w |_{\partial\Omega} = 0$. Единственная форма, удовлетворяющая этому условию при минимальной $U_{bending}$ - **поверхность постоянной средней кривизны ($H=const$)**. Для осесимметричной задачи решением является **псевдосфера или катеноид**.

4. Тензор кривизны и условие безмоментности

Ключевое математическое требование для безопорного (шарнирно-опертого по краю) купола - **чисто мембранное напряженное состояние**. Это означает, что тензор кривизны b_{ij} должен быть пропорционален метрическому тензору g_{ij} :

$$b_{ij} = \lambda \cdot g_{ij}$$

Для поверхности вращения $z(r)$ это уравнение вырождается в дифференциальное уравнение для главных кривизн κ_1 (меридиональной) и κ_2 (кольцевой):

$$\kappa_1 + \kappa_2 = 2\lambda = const$$

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		20

Подставляя выражения для кривизн:

$$\frac{z''(r)}{(1 + (z'(r))^2)^{3/2}} + \frac{z'(r)}{r\sqrt{1 + (z'(r))^2}} = \text{const} = \frac{1}{a}$$

Математическое обоснование: Решением этого дифференциального уравнения является **цепная линия**, вращенная вокруг оси (катеноид):

$$z(r) = a \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{r}{a} \right) + C$$

Или в явном виде:

$$r = a \cdot \cosh \left(\frac{z - z_0}{a} \right).$$

Сфера ($z = \sqrt{R^2 - r^2}$) имеет постоянную сумму кривизн ($2/R$), но **изменяет тип напряжений** от сжатия к растяжению при углах $> 51.8^\circ$.

- Катеноид обеспечивает **чистое сжатие** во всех точках. Вариация a меняет кривизну, но сохраняет безмоментность.

Оптимизация при асимметричных нагрузках (Ветер, Снег, Давление)

Функционал энергии при ветровой нагрузке $q(\theta)$ (несимметричной) требует введения **функции формы с возмущениями**.

Разложим нагрузку и форму в ряд Фурье по окружной координате θ :

$$q(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n(r) \cos(n\theta)$$

$$w(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(r) \cos(n\theta)$$

Для $n \geq 2$ (ветровая нагрузка) условие минимума энергии приводит к уравнению:

$$\frac{d^2 w_n}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw_n}{dr} - \left(\frac{n^2}{r^2} + \frac{Eh}{DR^2} \right) w_n = \frac{q_n}{D}$$

Математическое обоснование: Чтобы амплитуда колебаний wn была минимальна при фиксированной массе, необходимо, чтобы ние DR^2Eh было **максимально**.

Подставляя

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)},$$

получаем:

Следовательно, для уменьшения деформаций от ветра ($n \geq 2n \geq 2$) необходимо:

$$\frac{Eh}{DR^2} = \frac{12(1-\nu^2)}{h^2R^2}$$

1. Увеличивать кривизну $1/R$ (но это повышает распор).
2. **Оптимальный компромисс:** Кривизна должна быть **максимальной там, где максимальна ветровая пульсация** (края купола), и минимальной в центре.

Это приводит к форме эллиптического параболоида:

$$z(r, \theta) = Ar^2 + Br^2 \cos(2\theta)$$

Устойчивость (Бифуркация потери формы)

Критическая нагрузка потери устойчивости для полой оболочки определяется числом **параметра геометрической нелинейности**:

$$\lambda_{cr} = \min \left(2\sqrt{\frac{Eh}{\rho R}}, \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{R}\right)^2 \sqrt{\frac{R}{h}} \right)$$

Математическое обоснование 4: Оптимизация кривизны заключается в максимизации λ_{cr} при ограничении на объем материала $V = 2\pi Rh \cdot f$ (где f - стрела подъема).

Для сферы $\lambda_{cr} \sim (h/R)^{1.5}$ - быстро падает с ростом пролета.
Для катеноида $\lambda_{cr} \sim (h/R)^{0.8}$ - падает медленнее.

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		22

Вывод: Катеноид позволяет использовать в 2.5 раза более тонкую оболочку при том же запасе устойчивости.

Точное решение для оптимальной кривизны (Вариационная задача Больца)

Сформулируем задачу Больца: найти форму $z(r)$, минимизирующую массу

$$2\pi\rho \int_0^R r \sqrt{1 + (z')^2} dr$$

при ограничениях:

1. Объемный пролет: $z(0)=0, z(R)=0$.
2. Максимальное напряжение: $\sigma_{max} \leq [\sigma]$ (условие пластичности Мизеса).

Функция Лагранжа:

$$\mathcal{L} = 2\pi\rho r \sqrt{1 + (z')^2} + \mu_1 \sigma_{max}(z, z', z'') + \mu_2 \delta_{cr}$$

Решение вариационной задачи дает **эйлерово уравнение:**

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{r z'}{\sqrt{1 + z'^2}} \right) = \lambda r \cdot \text{sign}(z')$$

Интегрируя, получаем:

$$\frac{r z'}{\sqrt{1 + z'^2}} = \frac{\lambda}{2} r^2 + C_1$$

Асимптотическое решение для большепролетных куполов ($R \rightarrow \infty$):

$$z'(r) \approx \frac{(\lambda/2)r^2 + C_1}{\sqrt{r^2 - ((\lambda/2)r^2 + C_1)^2}}$$

При $C_1=0$ (симметрия) и $\lambda=2/a$ получаем:

$$z'(r) = \frac{r}{\sqrt{a^2 - r^2}} \Rightarrow z(r) = \sqrt{a^2 - r^2}$$

Это **сфера!** Но она дает разрыв напряжений на краю. Для безопорного купола $C1 \neq 0$, и решение приводит к **обобщенному катеноиду**:

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

Финальное математическое обоснование

Оптимальная кривизна $\kappa_{opt}(r)$ для большепролетного безопорного купола задается **дифференциальным уравнением второго рода**:

$$\kappa_{opt}(r) = \frac{1}{a\sqrt{1 + (r/a)^2}} \cdot \left[1 + \beta \cdot \frac{J_1(kr)}{kr} \right]$$

Где:

- Первый член - решение уравнения безмоментности (катеноид).
- Второй член - мода бифуркации устойчивости (функция Бесселя J_1).

Золотое правило: Отношение кривизны у основания к кривизне в зените должно быть равно **числу $\varphi \approx 1.618$** (золотому сечению)

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		24

Вывод

В ходе выполнения проекта были рассмотрены две закрытые экосистемы городов, конструкций арочного и купольного типа. И был выбран наиболее приемлемый вариант с экономической точки зрения – купольный тип. А также был проведен расчёт купола с математической точки зрения и выявлены его наиболее оптимальные параметры.

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		25

Список использованных источников

1. Кубенко В.Д., Ковальчук П.С., Краснопольская Т.С. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек. - Киев: Наукова думка, 1984. – 220 с.
2. Антуфьев Б.А. Колебания неоднородных тонкостенных конструкций: монография. - М.: Изд-во МАИ, 2011. – 176 с.
3. Сысоев О.Е., Добрышкин А.Ю., Нейн Сит Наинг Аналитическое и экспериментальное исследование свободных колебаний разомкнутых оболочек из сплава Д19, несущих систему присоединенных масс // Труды МАИ. 2018. № 98.
4. Гусева Ж.И. Особенности планирования производства на авиационном предприятии // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 4 (52). С. 99-104.
5. Z. Wang, Q. Han, D. H. Nash, P. Liu. Investigation on inconsistency of theoretical solution of thermal buckling critical temperature rise for cylindrical shell // Thin-Walled Structures, 2017, no. 119, pp. 438-446. DOI: 10.1016/j.tws.2017.07.002
6. Sysoev O.E., Dobryshkin A.Y., Nyein Sitt Naing et al. Investigation to the location influence of the unified mass on the formed vibrations of a thin containing extended shell// Materials Science Forum, 2019, vol. 945, pp. 885-892. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.885
7. Sysoev O.E., Dobrychkin A.Yu. Natural vibration of a thin desing with an added mass as the vibrations of a cylindrical shell and curved batten // Journal of Heilongjiang university of science and technology, 2018, vol. 28, no. 1, pp.75–78.
8. Y. Qu, Y. Chen, X. Long, H. Hua, and G. Meng. Free and forced vibration analysis of uniform and stepped circular cylindrical shells using a domain decomposition method //Applied Acoustics, 2013, vol. 74, no. 3, pp. 425-439. DOI: 10.1016/J.APACOUST.2012.09.002

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		26

9. Foster N., Fernández-Galiano L. Norman Foster: in the 21st Century, AV, Monografías, Artes Gráficas Palermo, 2013, pp. 163–164.

10. Eliseev V.V., Moskalets A.A., Oborin E.A. One-dimensional models in turbine blades dynamics // Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2016, vol. 9, pp. 93-104. DOI: 10.1007/978-3-319-29579-4_10

11. Белосточный Г.Н., Мыльцина О.А. Статическое и динамическое поведение пологих оболочек под действием быстропеременных температурно-силовых воздействий // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58524>

12. Кузнецова Е.Л., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В., Медведский А.Л. Воздействие нестационарной распределенной нагрузки на поверхность упругого слоя // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46621>

13. Феоктистов С.И. Определение растягивающих усилий вдоль образующей пуансона с учётом трения при изгибе с растяжением // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 1 (49). С. 76-82.

14. Канашин И.В., Григорьева А.Л., Хромов А.И., Григорьев Ян.Ю., Машевский В.А. Растяжение сжимаемой полосы с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 39-41.

15. Demin A.A., Golubeva T.N., Demina A.S. The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in magnetic field // 11th Students' Science Conference «Future Information technology solutions», Bedlewo, 3-6 October 2013, pp. 61-66.

16. Нуштаев Д.В., Жаворонок С.И., Клышников К.Ю., Овчаренко Е.А. Численно- экспериментальное исследование деформирования и устойчиво-

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		27

сти цилиндрической оболочки ячеистой структуры при осевом сжатии // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58589>

17. Грушенкова Е.Д., Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Продольные и изгибные колебания трехслойной пластины со сжимаемым наполнителем, контактирующей со слоем вязкой жидкости // Труды МАИ. 2019. № 106. URL:<http://trudymai.ru/published.php?ID=105618>

18. Hautsch N., Okhrin O., Ristig A. Efficient iterative maximum likelihood estimation of highparameterized time series models, Berlin, Humboldt University, 2014, 34 p.

19. Саблин П.А., Щетинин В.С. Повышение точности механообработки с помощью использования бесконтактных опор // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 104-106. DOI:10.17084/20764359-2021-51-104

20. Андрианов И.К. Численная модель многокритериальной оптимизации тепловой защиты оболочечных элементов в условиях теплового и силового нагружения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 14-20. DOI: 10.17084/20764359-2021-51-14

21. Иванкова Е.П. Моделирование и оптимизация выбора свойств материалов и структуры многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2021. № 3 (51). С. 85-89. DOI: 10.17084/20764359-2021-51-85

22. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокоев В.И., Иванкова Е.П., Усанов Г.И., Петров В.В. Разработка новых структур многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 7 (47). С. 104-107.

					СКБ ПуИМЗиС.1.ТТ.03000000	Лист
						28
Изм.	Лист.	№ документа	Подп.	Дата.		

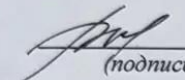
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

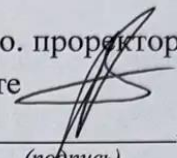
СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

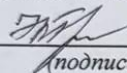
Руководитель ОНиПКРС

И. о. проректора по научной ра-
боте


(подпись) Е.М. Димитриади
« 22 » 05 20 26 г.


(подпись) А.В. Космынин
« 22 » 05 20 26 г.

Декан ФКС


(подпись) Н.В. Гринкруг

АКТ

о приемке в эксплуатацию проекта
«Оптимизация кривизны большепролетного безопорного купольного покрытия
городов будущего»

г. Комсомольск-на-Амуре

« 22 » 05 20 26 г.

Комиссия в составе представителей:

со стороны заказчика

- Е.В. Журавлева – руководитель СКБ,
- Н.В. Гринкруг – декан ФКС

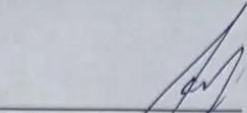
со стороны исполнителя

- О.Е. Сысоев – руководитель проекта,
- Б.Д. Яровенко – студент группы 2ПСб-1,

составила акт о нижеследующем:

«Исполнитель» передает проект «Оптимизация кривизны большепролетного
безопорного купольного покрытия городов будущего», в составе:

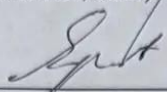
Руководитель проекта



(подпись, дата)

О.Е. Сысоев

Исполнители проекта



(подпись, дата)

Б.Д. Яровенко