

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

"Уральский государственный университет путей сообщения"

На правах рукописи

Осокин Илья Александрович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники РФ,
д.т.н., профессор, Овчинников И.Г.

Екатеринбург 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1 Современное состояние проблемы расчета конструкций из металлических гофрированных элементов	11
1.1 Характерные типы МГК, применяемые в Российской и мировой практике проектирования и строительства	12
1.2 Условия эксплуатации металлических гофрированных конструкций, нагрузки и агрессивные среды, действующие на них	18
1.3 Характерные дефекты и повреждения эксплуатируемых металлических гофрированных конструкций	25
1.4 Существующие методы расчета металлических гофрированных конструкций	31
1.4.1 Обзор применяемых методов расчета металлических гофрированных конструкций	31
1.4.2 Методы расчета гофрированных конструкций, представленные в нормативной базе РФ: достоинства, недостатки и область применения	33
1.4.3 Методы, разработанные для проектирования тоннелей и впоследствии адаптированные для расчета металлических гофрированных конструкций: достоинства, недостатки, область применения	35
1.4.4 Применение метода конечных элементов для расчета металлических гофрированных конструкций: достоинства и недостатки	42
Выводы по главе 1	45
2 Натурные и лабораторные исследования поведения металлических гофрированных конструкций, их анализ	47
2.1 Результаты натурных обследований металлических гофрированных конструкций	48

2.2	Обзор и анализ зарубежных статических экспериментальных исследований металлических гофрированных конструкций	53
2.2.1	Испытания коробчатых металлических гофрированных конструкций (Канада, Польша)	53
2.3	Отечественные экспериментальные исследования, их анализ	62
2.3.1	Статические испытания полукруговой арочной металлической гофрированной конструкции и анализ их результатов	62
2.3.2	Динамические испытания полукруговой арочной металлической гофрированной конструкции, имитирующие сейсмические воздействия, и анализ их результатов	74
2.4	Расчет металлической гофрированной конструкции методом конечных элементов	86
2.5	Расчет металлической гофрированной конструкции как арочного свода методом сил	89
2.6	Сравнение результатов расчета методом сил и методом конечных элементов с экспериментом	95
	Выводы по главе 2	97
3	Применение теории оболочек для расчета металлических гофрированных конструкций	100
3.1	Предпосылки к использованию теории оболочек для расчета металлических гофрированных конструкций	100
3.2	Применение теории оболочек вращения к расчету круглых металлических гофрированных конструкций	104
3.2.1	Разрешающие уравнения общей теории оболочек и осесимметричной теории оболочек вращения применительно к металлическим гофрированным конструкциям	104
3.2.2	Расчет осесимметрично нагруженной металлической гофрированной конструкции с использованием осесимметричной теории оболочек вращения	112

3.3	Применение метода расчета основанного на теории оболочек ступенчато-переменной толщины к расчету круглых металлических гофрированных конструкций	123
	Выводы по главе 3	133
4	Применение «полубезмоментной» теории оболочек В.З. Власова для расчета круглых металлических гофрированных конструкций	136
4.1	Основные гипотезы и соотношения	136
4.2	Разрешающее уравнение оболочки по полубезмоментной теории В.З. Власова применительно к гофрированной цилиндрической оболочке	140
4.3	Применение вариационного метода В.З. Власова к расчету гофрированной цилиндрической оболочки	142
4.4	Результаты расчета, их анализ и сопоставление с экспериментом	148
4.5	Расчет цилиндрической гофрированной оболочки при несимметричном нагружении	153
	Выводы по главе 4	162
5	Моделирование поведения металлических гофрированных конструкций с учетом коррозионного износа и наличия защитных покрытий	164
5.1	Примеры коррозионных повреждений металлических гофрированных конструкций, а также стальных труб, эксплуатируемых в грунтовой среде; экспериментальные данные по кинетике коррозионных повреждений	164
5.2	Моделирование коррозионного повреждения металлических конструкций при отсутствии и наличии антикоррозионных покрытий	172
5.2.1	Модели коррозионного износа при отсутствии защитных покрытий и их идентификация	172
5.2.2	Модели коррозионного износа при наличии защитных покрытий и их идентификация	
		182

5.2.3	Модели долговечности защитных покрытий в агрессивной среде эксплуатации	184
5.3	Применение полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова к расчету гофрированных металлических конструкций с учетом коррозионного износа при отсутствии и наличии защитных покрытий	195
5.3.1	Основные гипотезы и соотношения	195
5.3.2	Разрешающее уравнение полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова, учитывающее коррозионный износ металлической гофрированной конструкции	199
5.3.3	Исследование совместного влияния нагрузки и коррозионного износа на поведение металлической гофрированной конструкции	200
	Выводы по главе 5	215
	Основные выводы	217
	Список литературы	222
	Приложение 1. Расчет металлической гофрированной трубы, расположенной под насыпью ж.д. пути на ст. Стриганово Свердловской железной дороги	235
	Приложение 2. Акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы	238

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Проблема корректного расчета и проектирования металлических гофрированных конструкций (МГК) в последнее время привлекает довольно пристальное внимание исследователей. Связано это в первую очередь с весомыми преимуществами МГК перед конструкциями, выполненными из традиционных материалов (бетон, железобетон, стальной прокат и т.д.). К преимуществам МГК относятся: относительно небольшой вес элементов конструкций, относительная простота сборки, меньшие, по сравнению с железобетонными конструкциями, сроки возведения, привлекательный внешний вид. Используя МГК, есть возможность перекрывать пролеты длиной до 30 м, возводить сооружения для пропуска автомобильных и железных дорог в разных уровнях (путепроводы), подземные транспортные галереи промышленных предприятий, сооружения для защиты дорог от камнепадов и другие конструкции. При этом стоимость строительства сооружений из гофрированного металла значительно ниже стоимости сооружений, имеющих аналогичную область применения. Однако на пути применения МГК лежат трудности, связанные с отсутствием достаточно надежных расчетных схем и методик расчета, учитывающих особенности их деформирования и взаимодействия с окружающим грунтовым массивом. И даже применение в определенной мере зарекомендовавшего себя метода конечных элементов не всегда спасает положение.

В настоящее время для проектирования МГК используются следующие нормативные документы: ВСН 176-78 «Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб» и ОДМ 218.2.001-2009 «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)». Область применения данных документов

распространяется только на сооружения на автомобильных и железных дорогах, что не в полной мере раскрывает потенциал металлических гофрированных конструкций. Кроме того, методика расчета, описанная в вышеуказанных документах, сводится к следующему: проектирование МГК диаметром до 3,00 м по примитивной методике, описанной в документах; проектирование МГК диаметром более 3,00 м с применением метода конечных элементов. Данный подход является весьма несовершенным, так как ни описанная в ВСН 176-78 и ОДМ 218.2.001-2009 методика, ни использование метода конечных элементов не могут гарантировать надежности произведенных расчетов.

Кроме несовершенства прочностных расчетов металлических гофрированных конструкций, крайне слабо рассмотрен вопрос защиты МГК от воздействия агрессивных эксплуатационных сред и вопрос поведения МГК с антикоррозионными покрытиями при влиянии на них агрессивных сред. Слабая проработка в действующих нормах обозначенных вопросов приводит к значительному снижению потенциального срока службы МГК.

Характерной особенностью опыта применения МГК на территории нашей страны является неспособность реализовать потенциал данного типа конструкций, несмотря на более чем столетний срок со времен постройки первой МГК на территории Российской Империи. В истории применения МГК в России есть два длительных периода, в течение которых применение этих конструкций было под запретом, возникавшим вследствие неумения проектировать и строить МГК, что приводило к авариям сооружений из них. В данный момент проектирование и строительство этих замечательных конструкций разрешено, однако фактически отсутствует опыт их проектирования и строительства, что существенно тормозит темпы внедрения МГК. Учитывая те большие преимущества, которые может дать широкое внедрение МГК в различные отрасли нашей страны, разработка надежной и объективной методики расчета МГК является весьма важной задачей.

Цель и задачи исследования. Цель - совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями.

Задачи:

- выполнить анализ существующих методик расчета МГК, особое внимание уделив методикам расчета, описанным в нормативной базе РФ и методу конечных элементов;
- провести анализ экспериментальных исследований поведения МГК с целью оценки достоверности имеющихся и предлагаемых методик расчета МГК;
- разработать аналитические методики расчета МГК на основе теории оболочек в различной трактовке;
- разработать практическую методику расчета МГК на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова с применением вариационного метода В.З. Власова;
- проанализировать достоверность предлагаемых методик расчета путем сравнения результатов расчета по предлагаемым методикам с результатами расчетов по уже используемым методикам и результатами экспериментов;
- предложить методику расчета долговечности МГК, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Научная новизна работы

- проведен анализ существующих методик расчета металлических гофрированных конструкций, отображенных в нормативной базе РФ;
- проведен сбор, изучение и систематизация лабораторных и натурных экспериментальных исследований поведения МГК с целью последующей оценки достоверности имеющихся и предлагаемых методик расчета МГК;
- предложены аналитические методики расчета МГК, основанные на теориях гладких оболочек и оболочек ступенчато-переменной толщины;
- проведен анализ достоверности предлагаемых и уже используемых методик путем сравнения результатов расчета МГК, полученных с их помощью с результатами эксперимента;

- предложена методика расчета долговечности МГК, эксплуатируемых в условиях совместного воздействия агрессивных сред и силовых нагрузок.

Степень достоверности. Результаты исследований основаны на применении известных методик, хорошо себя зарекомендовавших в нестроительных отраслях науки и техники. Также достоверность результатов работы обеспечивается объективностью исследования, в котором все рассматриваемые методики расчетов сравнивались с данными экспериментов, проведенных квалифицированными коллективами с участием автора.

Практическая значимость работы. Разработана практически ориентированная методика расчета металлических гофрированных конструкций. Данная методика в краткие сроки может быть внедрена в практику проектирования организаций, занимающихся применением МГК в транспортном, промышленном и гражданском строительстве. Результаты работы используются в учебном процессе в УрГУПС, СГТУ имени Гагарина Ю.А., а также приняты к использованию в специализированной компании «Гофросталь».

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа существующих методик расчета металлических гофрированных конструкций, отображенных в нормативной базе РФ;
2. Результаты анализа зарубежных и отечественных экспериментальных исследований, поставленных на крупномасштабных и полномасштабных моделях металлических гофрированных конструкций;
3. Методики расчета металлических гофрированных конструкций, основанные на теориях оболочек ступенчато-переменной толщины и теории гладких оболочек, адаптированной к расчету МГК;
4. Практически-направленная методика расчета МГК, основанная на теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова и вариационном методе В.З.Власова;
5. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния МГК по различным методикам и сравнения их с экспериментальными данными, показавшими большую точность методики, основанной на теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова;

6. Методики расчета долговечности МГК, эксплуатируемых в условиях воздействия различных агрессивных сред.

Апробация работы. Основные положения и результаты докладывались на Межвузовских, Всероссийских и Международных НТК: «Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов» (г. Белгород, 2010 г.), «Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве» (г.Пермь, 2011 г.), «Проблемы современного строительства» (г.Пенза, 2011 г.), «Проблеми сучасного будівництва» (Украина, г.Полтава, 2012 г.), «Сучасні методи проектування, будівництва та експлуатації систем водовідводу на автомобільних дорогах» (Украина, г.Киев, 2012 г.), «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (г. Пермь, 2013 г.), «Инновационные технологии в мостостроении и дорожной инфраструктуре» (г. Санкт-Петербург, 2014), «Современные проблемы водного хозяйства и инженерно коммуникационных систем. Экология» (Азербайджан, Баку, 2014 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 23 работы. В журналах по перечню ВАК РФ – 6 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованной литературы из 125 наименований. Изложена на 242 страницах машинописного текста, содержит 111 рисунков и 34 таблицы.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Первые конструкции из металлических гофрированных листов (металлические гофрированные конструкции – МГК) были предложены к применению в России еще в 1875 году, первые сооружения были возведены при строительстве Закаспийской железной дороги в 1887 году. Однако, в связи с некоторыми случаями отрицательного опыта применения конструкций данного типа, связанными в основном с несоблюдением технологии строительства сооружений, строительство МГК в России приостановилось на несколько десятилетий. В общемировой практике МГК применялись все более широко. Положительный мировой опыт применения конструкций данного типа привел к возобновлению их производства и строительства на территории СССР в 60-х годах XX века. В 70-х годах были разработаны нормы на проектирование и строительство гофрированных водопропускных труб (ВСН 176-71, ВСН 176-78), которые были отменены только в 2009 году. Гофрированные водопропускные трубы массово применялись при строительстве БАМа, однако нарушение технологии строительства привело к появлению больших деформаций, что повлияло на введение запрета на применение металлических гофрированных конструкций с гофром 130x32мм на главных путях железных дорог, который был введен в 1993 году. В связи с этим проектные институты перестали применять типовые решения и окончательно потеряли опыт проектирования, а строители – бесценный опыт возведения этих сооружений. В конце 90х годов XX века было возобновлено активное строительство и реконструкция автомобильных и железных дорог. К этому моменту стало возможным применение зарубежных конструкций и их огромного опыта, накопленного более чем за 100 лет возведения и эксплуатации гофрированных труб. Зарубежными производителями был разработан и освоен целый ряд видов гофры, отличающихся по прочности,

жесткости, долговечности. Этот опыт позволял существенно расширить спектр применения, увеличить отверстия и несущую способность сооружений. Стало возможным устраивать малые мосты, заменяя тем самым мостовые переходы эстакадного типа. Появились альтернативные конструкции путепроводов. Наличие зарубежных конструкций и методик, возможность инженерного сопровождения в проектировании и строительстве с участием иностранных специалистов воспринялось проектировщиками с воодушевлением. Однако многие из них отнеслись к этим сооружениям как к инновационным, технически сложным, что до сих пор отталкивает их от работы с этим простым, недорогим и надежным видом конструкций из гофрированной стали [25].

1.1 Характерные типы МГК, применяемые в Российской и мировой практике проектирования и строительства

Одной из основных областей применения МГК, рассмотренной в данной диссертации, является транспортное строительство. Современное развитие промышленности, способной производить гофрированные листы с различными геометрическими характеристиками, позволило значительно расширить область применения МГК за последние 20 лет. В настоящее время из гофрированных листов могут собираться водопропускные трубы, грунтозасыпные мосты, путепроводы, транспортные развязки, тоннели мелкого заложения, галереи, скотопрогоны, подземные пешеходные переходы и другие подземные конструкции [90].

По видам поперечного сечения, сооружения из гофролистов можно разделить на замкнутые и незамкнутые. Пролет сооружений с замкнутым поперечным сечением на сегодняшний день не превышает 15 м; пролет конструкций незамкнутого сечения может составлять до 30 м и иметь стрелу подъема до 12 м.

Самым простым типом МГК является гофрированная труба круглого очертания. Максимальный диаметр круглых гофрированных труб составляет до 8.00 м. Круглые гофрированные трубы, как правило, применяются в качестве водопропускных сооружений на автомобильных и железных дорогах, канализационных труб и кабельных тоннелей. Эллиптические вертикально-ориентированные МГК применяются в качестве водопропускных сооружений для пропуска воды при значительной разнице расчетных уровней водотока в разное время. Эллиптические горизонтально-ориентированные МГК применяются в качестве водопропускных сооружений для пропуска воды при необходимости устройства труб в низких насыпях. Трубы полицентрического очертания применяются в качестве водопропускных сооружений при низком уровне воды в водотоках, в качестве путепроводов, транспортных или пешеходных тоннелей и коллекторов. МГК замкнутого сечения не требуют устройства фундаментов, укладываются в теле насыпи на подушку из дренирующего грунта. Обратная засыпка сооружений осуществляется с послойным уплотнением.

К МГК незамкнутого сечения относятся арочные и коробчатые конструкции. Арочные конструкции используются в качестве грунтозасыпных мостов и путепроводов, а также тоннелей. Возможно использование арочных МГК пониженного и повышенного очертания в соответствии с необходимостью обеспечения требуемой высоты засыпки конструкции, либо габарита по высоте. МГК незамкнутого сечения требуют устройства фундаментов под пятami арочного свода. Тип фундамента назначается в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства. Обратная засыпка сооружений осуществляется с послойным уплотнением.

Для различных видов сооружений целесообразно применение гофрированных конструкций разного типа. Типы конструкций и области их применения представлены в таблице 1.1. Иллюстрации основных типов МГК представлены на рисунках 1.1 – 1.5.

Таблица 1.1 – Основные типы металлических гофрированных конструкций и области их применения

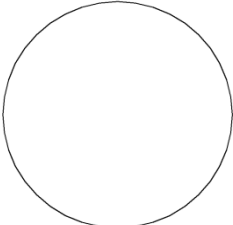
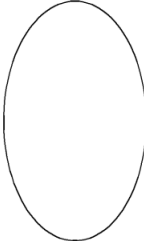
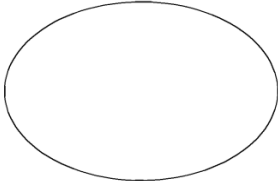
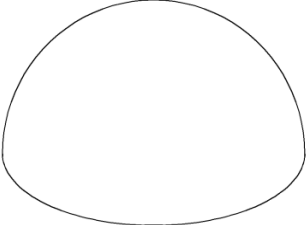
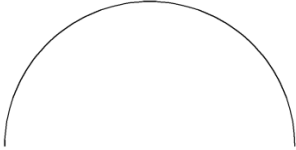
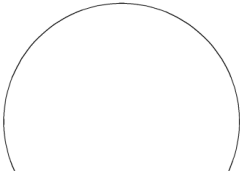
№ п.п.	Очертание	Эскиз	Пролет	Область применения
1	2	3	4	5
1	Круговое		0,15-7м	Водопропускные дорожные трубы, канализационные трубы, коммуникационные и другие тоннели
2	Вертикальный эллипс		1,5-6м	Водопропускные дорожные трубы (пропуск разных по высоте уровней воды), коммуникационные тоннели
3	Горизонтальный эллипс		3-9м	Водопропускные дорожные трубы (ограничение по высоте насыпи)
4	Полицентрическое очертание		1,5-12м	Водопропускные сооружения и путепроводы, пешеходные тоннели
5	Круговая арка		2-13м	Грунтозасыпные мосты и путепроводы
6	Арка повышенного профиля		6-15м	Грунтозасыпные мосты и путепроводы (высокий габарит)
7	Арка пониженного профиля		6-15м	Грунтозасыпные мосты и путепроводы (ограничение по высоте насыпи)
8	Квадратное(полигональное)		3-8м	Грунтозасыпные мосты и путепроводы



Рисунок 1.1 – Водопрпускная труба круглого сечения из гофрированных листов



Рисунок 1.2 – Арочный путепровод из гофрированных листов



Рисунок 1.3 – Арочная конвейерная галерея из гофрированных листов



Рисунок 1. 4 – Силосы из гофрированных листов



Рисунок 1.5 – Вентиляционный канал из гофрированных листов

Одной из интересных возможностей, открываемых МГК арочного очертания является возможность копирования формы сводов старинных арочных мостов, возведенных в X-XX в.в. из камня или бетона. Это открывает широкие возможности по ремонту и реконструкции мостов, являющихся памятниками архитектуры.

При необходимости устройства нескольких МГК рядом друг с другом (многоочковые водопропускные трубы, пропуск автомобильных дорог с большим количеством полос, пропуск нескольких путей ж.д., тоннели с несколькими параллельными трассами и т.д.), их располагают на расстоянии не меньше допустимого и тщательно уплотняют грунт в пазухах между МГК [52].

При устройстве оголовков также применяют различные типы конструкций: для водопропускных сооружений – раструбные, порталные, вертикальные или скошенные торцы труб; для путепроводов и тоннелей – вертикальные или скошенные торцы с креплением оголовка или без, железобетонные оголовки с фундаментами их порталной части.

С помощью металлических гофрированных листов также возможно возведение подпорных стенок высотой до 10 м.

1.2 Условия эксплуатации металлических гофрированных конструкций, нагрузки и агрессивные среды, действующие на них

Металлические гофрированные конструкции в основной своей массе относятся к сооружениям, расположенным в грунтовой среде. Массив грунта обладает различными химическими, физико-механическими, гидрогеологическими и другими свойствами, которые оказывают негативное влияние на расположенные в массиве грунта конструкции. Наибольшую опасность для любых стальных конструкций, расположенных в грунте, представляет вода. При этом особую опасность представляет воздействие воды, содержащей растворенные соли или другие реагенты, которые могут достигать высоких концентраций вблизи автомобильных дорог (антиобледенители) и на промышленных предприятиях. Соли хлора и соединений серы оказывают наибольшее деструктивное воздействие на металл МГК. Помимо солей, коррозионные повреждения разного рода может спровоцировать контакт стали МГК с сероводородом, углекислым газом, аммиаком и другими средами.

Несущая часть металлических гофрированных конструкций может подвергаться воздействию двух разных химических реагентов. Одни агрессивные среды воздействуют на конструкцию со стороны грунта, в то время как другие могут воздействовать на конструкцию с противоположной стороны (причем содержаться как в отводимой воде, так и в воздушной среде в виде газов).

Разделим действие факторов, воспринимаемых металлической гофрированной конструкцией на две основные категории.

К первой категории относятся нагрузки, в результате действия которых возможно появление прочностных повреждений МГК вплоть до полного разрушения. К данной категории относятся следующие нагрузки: собственный вес конструкции; вес воды, наполняющей трубу; отпор грунта; вертикальное и горизонтальное давление грунта; временная нагрузка от подвижного состава; температурные воздействия и деформации основания.

Ко второй категории относятся воздействия агрессивных сред, которые способны вызвать повреждение и разрушение материала МГК вследствие физических, химических и биологических воздействий. В данную категорию входят воздействия от агрессивных сред грунта обсыпки МГК и грунтовых вод; от жидкостей, протекающих внутри МГК (например, в дорожных водопропускных трубах); от газов, имеющих в своем составе агрессивные реагенты; от биологической коррозии и электрического тока (блуждающие токи вблизи ЛЭП и железных дорог).

Вышеперечисленные нагрузки и воздействия сгруппированы в таблице 1.2.

Воздействия от второй категории факторов, действующих на МГК, необходимо в обязательном порядке учесть при проектировании и строительстве рассматриваемого типа конструкций. Особенно актуально учитывать воздействие коррозионной среды при проектировании сооружений, эксплуатируемых под воздействием агрессивных сред разного типа. Несмотря на очевидность необходимости проектирования эффективной антикоррозионной защиты, в настоящее время зачастую ограничиваются самыми примитивными и малоэффективными антикоррозионными мероприятиями, а зачастую игнорируют их вовсе.

В ходе эксплуатации металлических гофрированных конструкций, расположенных в массиве грунта, с грунтом и грунтовыми водами контактируют наружные поверхности металлических листов МГК, фундаменты и элементы оголовков (порталы). Поверхности, соприкасающиеся с грунтом, могут подвергаться грунтовой, биологической и электрокоррозии, а внутренняя поверхность конструкций может подвергаться атмосферной, газовой, биологической и электрокоррозии.

Таблица 1. 2 – Внешние воздействия на металлические гофрированные конструкции

Группа и вид воздействия	Характер воздействия					
	во времени		по направлению		по разрушающему действию	
	постоянная нагрузка	временная нагрузка	со стороны грунта	изнутри трубы	механическое разрушение	коррозионное разрушение
1	2	3	4	5	6	7
1 группа – постоянные и временные силовые воздействия:						
– вертикальное и горизонтальное давление грунта насыпи;	*	-	*	-	*	-
– собственный вес трубы;	*	-	*	-	*	-
– вес воды в трубе;	*	-	*	-	*	-
– отпор грунта;	*	-	*	-	*	-
– вертикальная и горизонтальная нагрузка от наземного транспорта;	-	*	*	-	*	-
– действие строительных факторов;	-	*	*	-	*	-
– сейсмическое воздействие;	-	*	*	-	*	-
– динамическое воздействие подвижного состава;	-	*	*	-	*	-
– температурное воздействие;	-	*	-	*	*	-
– образование наледей	-	*	-	*	*	-

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7
2 группа - агрессивное воздействие окружающей среды:						
– воздействие грунтов и грунтовых вод;	*	-	*	-	-	*
– воздействие поверхностных вод;	-	*	-	*	-	*
– газовая (физическая и химическая) коррозия;	*	-	*	*	-	*
– атмосферная коррозия;	*	-	-	*	-	*
– биологическая коррозия;	*	-	-	*	-	*
– электрокоррозия	*	-	*	-	-	*

Коррозионное воздействие грунта и грунтовых вод на металл МГК может возникнуть вследствие следующих процессов: грунтовые воды в насыпи, содержащие кислоты, минеральные соли, контактируя с металлом, могут вызывать его коррозию. Находящиеся в грунтах и грунтовых водах легкорастворимые соли (хлориды и сульфаты) повышают коррозионную агрессивность грунта и стимулируют развитие коррозионных процессов. Внутренняя поверхность МГК также подвергается воздействию коррозии, источниками возникновения и развития которой являются: влажность воздуха внутри сооружения, грунтовые воды, просачивающиеся через нарушения гидроизоляции и стыки гофрированных листов, вода, протекающая по трубе и вызывающая газовое и биологическое воздействие на конструкции сооружения. В этих случаях разрушению подвергаются как сводовая, так и лотковая части МГК.

Анализ показывает, что в настоящее время практически не обеспечивается долговечность МГК, соизмеримая с требуемой долговечностью автомобильных

дорог, под которыми они проложены. Это требует проведения регулярного мониторинга и оценки их технического состояния, прогнозирования изменения их несущей способности, оценки остаточного ресурса, разработки мероприятий для обеспечения большей долговечности.

Для того чтобы обеспечить большую долговечность МГК, ремонт которых в случае сильного коррозионного повреждения весьма трудоемок, в дополнение к традиционным методам конструирования должны разрабатываться технические решения, повышающие защиту конструкций МГК от коррозионного воздействия, в том числе: нанесение качественных и долговечных антикоррозионных покрытий на гофрированные листы; создание прочной и долговечной гидроизоляции на поверхности труб, контактирующей с грунтом и тщательное и щадящее осуществление засыпки пазух труб.

Для того чтобы обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию МГК в течение запроектированного срока, следует организовать прочностной мониторинг сооружений, под которым понимается контроль и управление состоянием этих конструкций с учетом всех факторов, влияющих на их поведение [80].

Активный прочностной мониторинг МГК должен включать решение следующих основных задач:

- а) техническая оценка эксплуатационного, включая напряженно-деформированное, состояния конструкции, а также кинетики его изменения с учетом имеющихся дефектов и повреждений различного вида и происхождения;
- б) анализ и оценка степени соответствия несущей способности конструкции внешним воздействиям в рассматриваемый момент диагностики;
- в) разработка альтернативных стратегий по изменению эксплуатационного состояния МГК до проектного или требуемого уровня (ремонт, восстановление, усиление, реконструкция, замена).
- г) выбор и реализация наиболее рациональной стратегии изменения состояния сооружения.

Для решения первой задачи необходимо иметь расчетные модели, описывающие поведение конструкции с учетом имеющихся дефектов и повреждений различного характера, также нужны экспериментальные данные для идентификации этих моделей, а значит нужны методики технической и экспертной диагностики состояния МГК по прямым и косвенным признакам, нужны методики анализа поведения МГК с использованием этих моделей.

Решение этой задачи может быть значительно упрощено, если создать банки данных по различным моделям деформирования и разрушения материалов и конструктивных элементов МГК с определением областей применения; банки данных по моделям внешних воздействий на водопропускные трубы; банки данных по результатам лабораторных или натурных испытаний МГК различных конструкций; банки данных по типовым проектам, решения которых применены на рассматриваемых участках автомобильных дорог; банки данных по дефектам и повреждениям МГК с учетом происхождения и характера этих дефектов. Все это в целом позволит создать некоторую информационную модель, применимую для описания эксплуатационного поведения МГК в различных условиях.

Процедура построения такой модели весьма важна, но сложна и требует знания и учета многих факторов. Поэтому целесообразна разработка компьютерных экспертных систем с базами знаний, содержащими сведения экспертов, занимавшихся проблемой обследования, диагностики и оценки эксплуатационного состояния МГК с дефектами и повреждениями различного характера.

Однако следует иметь в виду, что знание только напряженно-деформированного состояния МГК не дает информации, необходимой для контроля за её эксплуатационным поведением, так как необходимо определить изменившиеся за время эксплуатации конструкции внешние воздействия и оценить степень соответствия сооружения этим воздействиям в рассматриваемый момент времени. Здесь можно идти либо по пути сопоставления напряженного состояния или поврежденности конструкции с некоторым предельным их

уровнем, либо же сравнивать несущую способность МГК с уровнем внешних воздействий.

Следует также учитывать, что первоначально МГК проектировалась на восприятие какого-то заданного (предполагаемого) комплекса внешних воздействий (в наиболее неблагоприятном их сочетании), но с течением времени, в силу разных причин, величина и характер внешних воздействий изменяются в ту или иную сторону, поэтому МГК должна воспринимать не проектные, а изменившиеся внешние воздействия.

Решение второй задачи позволяет определить необходимость проведения работ по изменению эксплуатационного состояния конструкции и приступить к разработке альтернативных вариантов реализации этого изменения (ремонт, восстановление, реконструкция, ограничение внешних воздействий).

Для того чтобы оценить, к каким изменениям эксплуатационного состояния МГК приведут различные стратегии, также необходимо разработать расчетные модели поведения модернизированных конструкций МГК. Здесь также большую помощь могут оказать банки данных, содержащие информацию о различных видах инженерных решений по модернизации сооружений с целью изменения их эксплуатационного состояния, банки данных по моделям поведения модифицированных конструкций водопропускных труб, по методам их анализа.

Агрессивная эксплуатационная среда является одним из главных факторов, влияющих на работоспособность инженерных сооружений. Одной из наиболее распространенных агрессивных эксплуатационных сред для многих конструкций водопропускных сооружений является агрессивная хлоридсодержащая среда.

Среди основных источников хлоридного загрязнения элементов конструкций следует выделить: хлоридсодержащие средства-антиобледенители (на основе каменной соли), применяемые с целью обеспечения безопасности проезда автотранспорта при гололеде на проезжей части; морскую воду или солевой туман (характерный для приморской атмосферы), имеющие контакт с поверхностью конструкции; технологические хлоридсодержащие среды на

предприятиях; добавки-ускорители твердения (на основе хлоридных солей), вводимые при зимнем бетонировании в бетонную смесь.

Воздействие хлоридсодержащей среды приводит к потере материала несущих конструкций, к значительному изменению его кратковременных и длительных механических характеристик, что, в конечном итоге, приводит к существенному снижению несущей способности, уменьшению надежности и сокращению долговечности конструкций.

1.3 Характерные дефекты и повреждения эксплуатируемых металлических гофрированных конструкций

МГК, эксплуатируемые под насыпями автомобильных и железных дорог, как и другие транспортные сооружения, подвергаются воздействиям многих поражающих факторов. Негативную роль играют: агрессивная среда, с которой контактирует сооружение, значительная величина и сложный характер нагрузок от подвижного состава, включающий также и динамическую составляющую, воздействия водного потока, особенно значительно проявляющие себя при сужении отверстием сооружения русла водотока в период осеннего и весеннего паводков.

Для МГК, выполняющих функцию водопропускных сооружений, как и для любых других сооружений, построенных с целью преодоления водных преград, характерны все виды дефектов и повреждений, вызванные воздействием водного потока: подмывы и размывы конструкций, повреждения берегоукрепительных и руслоукрепительных конструкций, повреждения, вызванные карчеходом и ледоходом, образование наледей, заиливание и замусоривание отверстия трубы. Для МГК, выполняющих функцию путепроводов, наиболее часто встречающимися повреждениями являются повреждения, вызванные ударами негабаритов.

Дефектами и повреждения, характерными именно для МГК являются всевозможные деформации гофрированной оболочки сооружений. К подобным дефектам и повреждениям относятся: погибы; овализации тел сооружений (симметричные и несимметричные, в продольном и в поперечном направлениях); местные деформации оболочки МГК (вмятины и т.п.). Характерной особенностью МГК является их гибкость. Как правило, даже при значительных перегрузках конструкций под действием нагрузок, превышающих проектные, сооружения данного типа не разрушаются, а теряют проектную геометрию, сохраняя в целом свои эксплуатационные свойства. Однако, несмотря на это, последствия потери формы сооружения негативно сказываются как на эксплуатационных свойствах участка дороги, в состав которого входит сооружение (появление ям в полотне дороги над трубой), так и на долговечности сооружения (появление прогибов, что способствует застою воды в сооружении, появление остаточных напряжений и т.д.).

Проиллюстрируем разные типы повреждений гофрированных конструкций, которые представлены в источниках [116, 118]. К наиболее распространенным типам дефектов и повреждений МГК можно отнести: деформации, превышающие проектные в результате перегрузов конструкций (рисунок 1.6 и рисунок 1.7); коррозионные повреждения, характерные для лотковой части конструкций (рисунок 1.8 и рисунок 1.9); вымывание грунта из пазух грунтового конверта, окружающего конструкцию (рисунок 1.10). К менее распространенному, но, тем не менее, встречающемуся повреждению, относится абразивный износ (рисунок 1.11).



Рисунок 1.6 – Деформации гофрированных листов МГК



Рисунок 1.7 – Значительные деформации и разрушение МГК



Рисунок 1.8 – Коррозионные повреждения МГК



Рисунок 1.9 – Сквозная коррозия МГК



Рисунок 1.10 – Вымывание грунта из грунтового конверта, окружающего МГК



Рисунок 1.11 –Сквозные повреждения лотковой части МГК вследствие абразивного износа



Рисунок 1.12 – Бобровая плотина в отверстии водопропускной трубы из МГК

По результатам анализа повреждений МГК можно сделать вывод о том, что данный тип конструкций весьма требователен как к качеству проектирования, так и к качеству строительства. Наиболее вероятной причиной появления повреждений силового характера является несоблюдение технологического цикла при строительстве конструкций, в частности, недостаточно тщательное уплотнение грунтовой обоймы. Однако, помимо несоблюдения технологического цикла, весомый вклад в появление повреждений могло внести несовершенство методик расчета, примененных при проектировании.

Также МГК подвержены влияниям различных агрессивных сред. Как и для любых других металлических конструкций, крайне актуален вопрос эффективной антикоррозионной защиты конструкций, а также расчета долговечности, который бы учитывал влияние агрессивных сред, а также работу антикоррозионных покрытий во времени.

1.4 Существующие методы расчета металлических гофрированных конструкций

1.4.1 Обзор применяемых методов расчета металлических гофрированных конструкций

Сооружения из металлических гофрированных элементов отличаются от других подземных конструкций тем, что являются гибкими. В отличие от жестких конструкций, которые полностью воспринимают нагрузку от грунта и транспортных средств, гибкие конструкции реализуют в полной мере идею совместной работы системы «обделка – грунтовый массив». Для расчета МГК используют методы, первоначально разработанные для расчета подземных сооружений и впоследствии адаптированные к расчету гофрированных конструкций [90].

Развитие методов расчета МГК идет от простых расчетов по способу Фельдта-Грыжевского, Леви, Ясевича, Головина, Р. Прево, М. Шпенглера, А.А. Герцога, Г.К. Клейна, В.А. Ярошенко до более трудоемких методов С.В. Виноградова, Б.Г. Галеркина, П.М. Емельянова, В.М. Лисова, в основу которых положен метод расчета О.Е. Бугаевой [9, 25, 47, 48]. В настоящее время наиболее употребляемым для расчета МГК является метод «Метропроекта», который был адаптирован для подобных конструкций В.Н. Абрамовым, А.А. Потапкиным, К.Б. Щербиной, О.А. Янковским для небольших диаметров круговых сооружений и М.В. Фрезе для больших размеров арочных конструкций [90]. Данные методы ранее использовались, преимущественно, для расчета тоннелей.

Методы расчета с использованием аппарата теории сплошных сред были разработаны и усовершенствованы в работах Ю.Н. Айвазова, В.Ш. Барбакадзе, И.В. Баклашова, Н.С. Булычева, С.С. Вялова, Б.Г. Галеркина, Ю.К. Зарецкого,

Б.А. Картозия, М.М. Кондаурова, Л.Н. Рассказова, И.В. Родина, Н.Н. Фотиевой и др. [6, 10].

Применение МКЭ к расчету подземных сооружений представлено в работах А.М. Белостоцкого, Д.М. Голицынского, А.Л. Гольдина, Е.А. Демешко, Д.Б. Долотказина, Ю.К. Зарецкого, М.Г. Зерцалова, С.Б. Косицына, Л.Н. Рассказова, Ю.С. Фролова, В.В. Чеботаева, Н.Н. Шапошникова, А.Г. Шашкина, В.И. Шейнина, Е.В. Щекудова, С.Б. Ухова, П.Б. Юркевича и др. [36, 55, 100].

Расчеты плоской задачи МКЭ применительно к МГК были выполнены Ф.С. Балсоном, Дж. Васлестадом, Дж. Высоковским, Д.М. Дунканом, М.Г. Катоней, М.К. Маквеем и др. Проведенные исследования моделировали МГК в виде бинарной системы, где грунтовые элементы моделировали и по упругой модели, и по нелинейной.

Как видно из приведенного выше краткого обзора, в основном методы расчета МГК, используемые в настоящее время, можно разделить на три основных группы:

- методы, изначально разработанные для проектирования тоннелей и впоследствии адаптированные для расчета МГК;
- методы, использующие аппарат теории сплошной среды;
- численные методы расчета (МКЭ, МКР, МГЭ и т.д.).

В [90] предложена несколько иная классификация существующих методов расчета МГК:

- инженерные методы расчета на основе строительной механики и механики грунтов (не заданные нагрузки);
- аналитические методы расчета системы «обделка – грунтовый массив» на основе механики сплошной и дискретной среды;
- численные методы, реализующие математические модели подземных сооружений в виде контактного взаимодействия и совместной работы системы «обделка – грунтовый массив».

Однако, необходимо отметить, что в современных условиях расчета и проектирования строительных конструкций, при широком использовании программ и программных комплексов, словосочетание «инженерные методы расчета» носит весьма размытый характер, который может включать и расчеты численными методами и расчеты на основе методов строительной механики, а в некоторых случаях также расчеты на основе методов механики сплошной и дискретной среды. Автор настоящей работы считает, что классификация, указывающая на происхождение и начальную область применения того или иного метода обладает более четко очерченными границами.

Рассмотрим существующие методы расчета МГК (в соответствии с предложенной классификацией) более подробно.

1.4.2 Методы расчета гофрированных конструкций, представленные в нормативной базе РФ: достоинства, недостатки и область применения

Основными нормативными документами, применяемыми на территории РФ для проектирования МГК, на настоящий момент являются: ВСН 176 – 78 «Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб» и ОДМ 218.2.001-2009. «Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон)». В настоящее время ВСН 176-78 отменен, заменяющим документом является ОДМ 218.2.001-2009, однако область применения ОДМ 218.2.001-2009 распространяется только на МГК, проектируемые в составе автомобильных дорог, в то время как область применения ВСН 176-78 распространяется как на ж.д. так и на а.д. МГК.

Метод расчета, представленный в данных нормативных документов для круглых водопропускных труб относительно малых диаметров фактически идентичен. Различия по статическому и конструктивному расчетам конструкций,

помимо более ограниченной области применения ОДМ 218.2.001-2009, заключаются в том, что ОДМ 218.2.001-2009 содержит рекомендации по расчету сооружений больших диаметров и некругового очертания с применением МКЭ [82].

Для иллюстрации методики расчета МГК по действующим на настоящий момент нормам, произведем расчет гофрированной водопропускной трубы, расположенной в тупике взрывчатых веществ на станции Стриганово Свердловской ж.д. Результаты визуального осмотра данного сооружения представлены в [84] и [85]. Расчет представлен в приложении 1 данной диссертации. По результатам расчета удовлетворяются условия прочности и устойчивости гофрированной стенки трубы, а деформации составляют:

- в горизонтальном направлении 1,48 см;
- в вертикальном направлении 2,50 см.

Сравнив расчетные значения деформаций с результатами измерений деформаций, возникших в процессе эксплуатации реального объекта, (в горизонтальном направлении – до 24 см, в вертикальном направлении – до 35 см), становится видно, что реальные значения деформаций превосходят расчетные в 10 и более раз. Можно сделать вывод о том, что методика расчета МГК, представленная в нормативной базе РФ, не в полной мере отражает реальную работу сооружения и не является надежной. Ненадежность является основным недостатком данной методики расчета. Помимо этого, к недостаткам можно отнести невозможность определения параметров напряженно-деформированного состояния в продольном направлении МГК, невозможность учесть несимметричное нагружение сооружения. Единственным достоинством методики является ее относительная простота.

В связи с вышесказанным очень неясно выглядит область применения методики расчета МГК, представленной в ОДМ 218.2.001-2009. Несмотря на то, что сам документ рекомендует использование данной методики для сооружений диаметром до 3 м (для сооружений большего диаметра/пролета рекомендуется использование МКЭ), в связи с большими несоответствиями результатов

расчетных и фактических деформаций, возможно, необходимо дополнительное исследование и ограничение области применения данной методики.

1.4.3 Методы, разработанные для проектирования тоннелей и впоследствии адаптированные для расчета металлических гофрированных конструкций: достоинства, недостатки, область применения

Методы, применяемые для расчета тоннелей, основаны на определении усилий в конструкции под воздействием прикладываемых к ней нагрузок. Для расчета оболочки МГК необходимо определить действующие на нее постоянные и временные нагрузки. Далее расчет сводится к применению различных методов строительной механики, например методов сил и перемещений, а также методов механики грунтов, как правило, основанных на гипотезе Фусса-Винклера [10].

Развитие методов расчета МГК идет от относительно простых методов, при применении которых не учитывается упругая работа грунтовой обоймы, при этом вертикальная нагрузка от подвижного состава и грунта засыпки уравнивается такой же по величине нагрузкой, приложенной в уровне лотка. В дальнейшем развитии методов расчета подземных конструкций появились методы, учитывающие упругую работу грунта совместно с работой оболочки (обделки) сооружения в качестве «Винклерового» основания. Одним из данных методов является метод расчета О.Е. Бугаевой [9].

Суть метода О.Е. Бугаевой заключается в том, что замковая часть кольца обделки тоннеля считается безотпорной зоной, на которую действует только нагрузка от вышележащего грунтового массива, а уровень отпора окружающего обделку грунта постепенно увеличивается от границы безотпорной зоны до лотка тоннеля (рисунок 1.13).

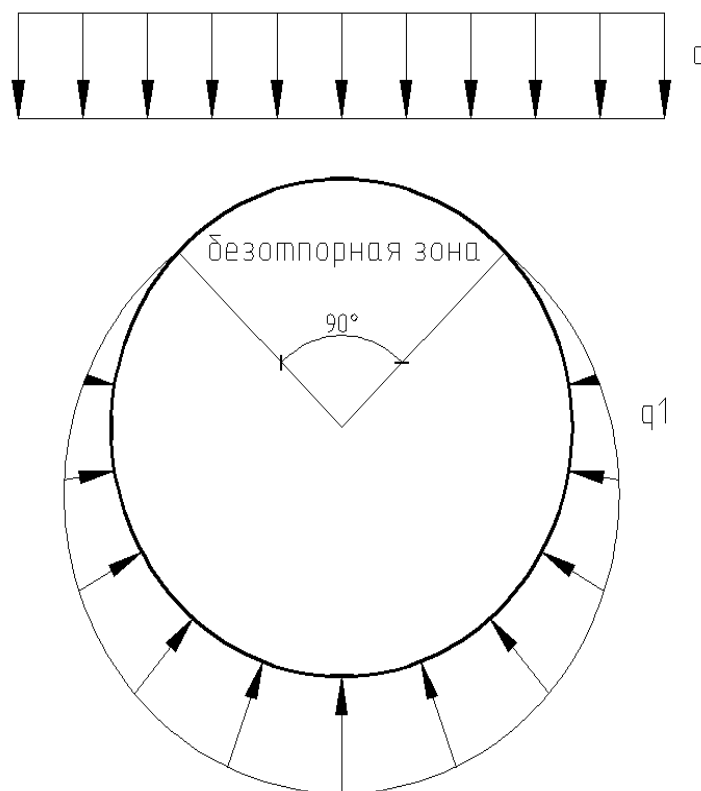


Рисунок 1.13 – Расчетная схема круговых оболочек (обделок) по методу О.Е. Бугаевой (q –вертикальная нагрузка в уровне шельги, q_1 –упругий отпор грунта).

Определение изгибающих моментов в оболочке (обделке) по методу О.Е. Бугаевой:

$$M_{00} = 0,25 \cdot q r^2 (1 - 0,056 \cdot n) \quad (1.1)$$

$$M_{01} = \xi_0 \cdot M_{00} \quad (1.2)$$

$$n = 1 / (0,06416 + (EI / k r^4)) \quad (1.3)$$

$$\xi_0 = 1 - 0,056 n \quad (1.4)$$

где M_{00} – момент в замке обделки;

M_{01} – момент в лотке обделки;

k – коэффициент постели;

q – интенсивность равномерно-распределенной нагрузки;

r – радиус кольца обделки;

EI —изгибная жесткость кольца обделки.

Другим методом, позволяющим рассчитывать подземные сооружения, является метод «Метропроекта».

Суть метода «Метропроекта» заключается в замене криволинейного очертания оболочки (обделки) ломаным, замене сплошной равномерно-распределенной нагрузки сосредоточенными силами в узлах, а упругой среды грунтового массива – упруго-податливыми опорами, расположенными по всем вершинам многоугольника в предполагаемой зоне упругого отпора грунта (рисунок 1.14). Зона упругого отпора уточняется в процессе расчета путем последовательных приближений. Исключаются те опоры, где были получены растягивающие напряжения. Усилия, приложенные взамен упругой реакции грунта, рассчитываются с учетом коэффициента упругого отпора.

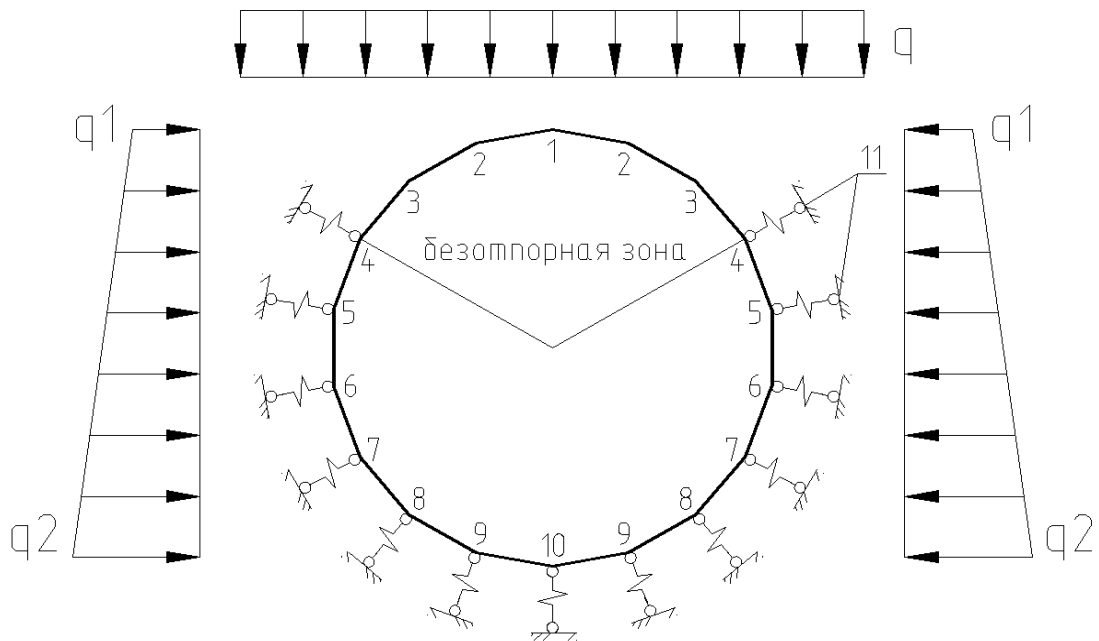


Рисунок 1.14 – Расчетная схема круговых оболочек (обделок) по методу «Метропроекта» (q —вертикальная нагрузка в уровне шельги, q_1 , q_2 —горизонтальные нагрузки от грунта, 1-10 – расчетные узловые точки оболочки (обделки), 11 – упруго-податливые опоры).

Метод «Метропроекта» реализует стержневую систему, каждый элемент которой характеризуется изгибной жесткостью EI и площадью поперечного сечения F . Грунтовый массив представлен упруго-податливыми опорами, не воспринимающими усилия растяжения. Жесткость упруго-податливых опор равна ks , где k – коэффициент постели грунта; s – средняя длина примыкающих стержневых элементов конструкции.

Основная система образуется путем введения шарниров во всех вершинах многоугольника, расположенных в зоне упругого отпора грунта. К данным вершинам прикладываются неизвестные парные изгибающие моменты, определяемые путем решения системы канонических уравнений. Канонические уравнения в матричной форме имеют вид:

$$A \cdot \vec{M} + \vec{\Delta}_p = 0, \quad (1.5)$$

$$A = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{vmatrix}, \quad (1.6)$$

$$\vec{M} = \begin{vmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_i \end{vmatrix}, \quad (1.7)$$

$$\vec{\Delta}_p = \begin{vmatrix} \Delta_{1p} \\ \Delta_{2p} \\ \vdots \\ \Delta_{ip} \end{vmatrix}, \quad (1.8)$$

где $\vec{M}$ – вектор неизвестных изгибающих моментов;

A – матрица единичных перемещений;

$\vec{\Delta}_p$ – вектор грузовых перемещений.

Единичные и грузовые перемещения определяют по развернутой формуле Мора с учетом стержневого характера системы и жесткости упругого основания:

$$\delta_{ik} = \int \frac{\overrightarrow{M_i M_k}}{EI} ds + \sum \frac{\overrightarrow{N_i N_k s}}{EF} + \sum \frac{\overrightarrow{R_i R_k}}{D}, \quad (1.9)$$

$$\Delta_{ip} = \int \frac{\overrightarrow{M_i M_p}}{EI} ds + \sum \frac{\overrightarrow{N_i N_p s}}{EF} + \sum \frac{\overrightarrow{R_i R_p}}{D}, \quad (1.10)$$

где $\overrightarrow{M_i}, \overrightarrow{M_k}, \overrightarrow{M_p}, \overrightarrow{N_i}, \overrightarrow{N_k}, \overrightarrow{N_p}$ – изгибающие моменты и продольные силы от действия единичных и действующих нагрузок;

$\overrightarrow{R_i}, \overrightarrow{R_k}, \overrightarrow{R_p}$ – реакции упруго-податливых опор от действия единичных и действующих нагрузок;

I – осредненная величина момента инерции стержней, являющихся сторонами многоугольника;

F – осредненная величина площади поперечного сечения стержней, являющихся сторонами многоугольника;

D – приведенная жесткость упруго-податливой опоры.

$$D = ksb, \quad (1.11)$$

где b – ширина рассматриваемого кольца оболочки (обделки);

s – длина стороны многоугольника;

k – коэффициент упругого отпора грунта.

Усилия в основной системе определяют, используя принцип независимости действия сил, последовательно от каждого воздействия. Основная система разделена на упругий свод, расположенный в безотпорной зоне и мног шарнирную цепь на упругих опорах. Усилия в шарнирной цепи определяются путем последовательного вырезания узлов. Определив усилия в основной системе, становится возможным решение канонических уравнений и определение значений неизвестных. Зная их, усилия в конструкции можно определить по формулам:

$$M_0 = M_p + \sum M_i \cdot M_k, \quad (1.12)$$

$$R_0 = R_p + \sum R_i \cdot R_k, \quad (1.13)$$

$$N_0 = N_p + \sum N_i \cdot N_k, \quad (1.14)$$

где M_k, N_k, R_k – изгибающие моменты, продольные силы и от реакции упруго-податливых опор от действия единичных и действующих нагрузок.

Жесткость грунтового массива характеризуется коэффициентом постели, который определяется по формуле Галеркина:

$$k = \frac{E}{R(1+\nu)}, \quad (1.15)$$

где E – модуль деформации грунта засыпки;

R – радиус поперечного сечения конструкции по средней линии стенки;

ν – коэффициент Пуассона грунта засыпки.

Метод «Метропроекта» и аналогичные ему приближенные методы расчета стержневых систем в условиях действия упругого отпора являются наиболее функциональными для проектирования подземных конструкций. Достоинствами данного метода являются быстрота получения результата, наглядность напряженно-деформированного состояния конструкции, достаточно точная оценка работы обделки и грунта массива. Недостатками метода «Метропроекта» являются использование коэффициента упругого отпора грунта для определения жесткости упругого основания и задание безотпорной зоны [6, 10].

Методы механики сплошной среды

Несмотря на то, что фактически грунт является дискретной средой, для описания его свойств с успехом применяется аппарат механики сплошной среды. Критерии использования данного аппарата были установлены Н.М. Герсеговым [24]. В механике подземных сооружений массив грунта представляют в виде упругого полупространства сплошной среды. Сплошная среда представляется в виде континуума, заполняющего некоторый объем. Основными свойствами сплошной среды являются: сплошность, однородность, изотропность, деформируемость.

При применении данных методов, расчетная модель состоит из полупространства, ограниченного дневной поверхностью и границами оболочки

(рисунок 1.15). Грунт и оболочка (обделка) претерпевают совместные деформации без возможности отрыва оболочки (обделки) от грунта. Основными характеристиками системы «обделка-грунтовый массив» являются коэффициент общих деформаций и коэффициент Пуассона.

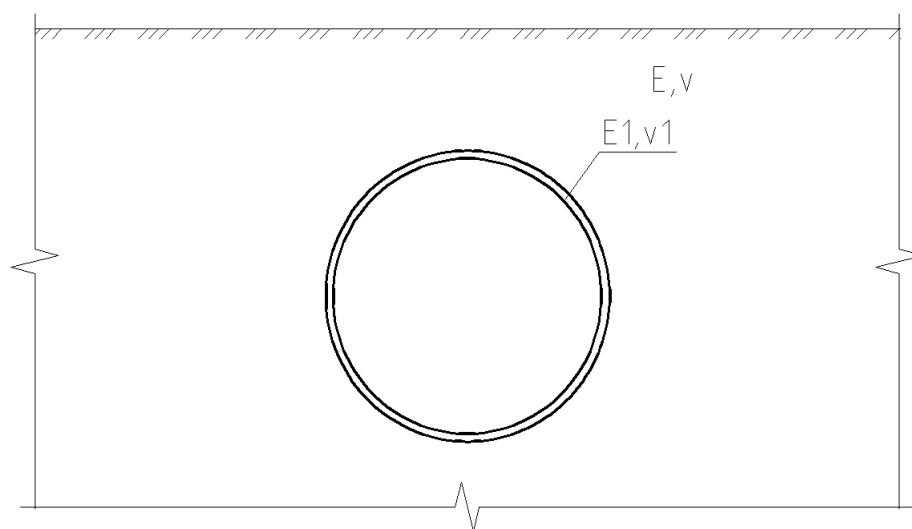


Рисунок 1.15 – Расчетная схема круговых оболочек (обделок) в массиве грунта (полупространстве сплошной среды). E, E_1 —модули деформации грунта и материала обделки, ν, ν_1 —коэффициенты Пуассона грунта и материала обделки.

Связь между перемещениями среды в точке с координатами (x, y) и реактивным давлением p , характеризующая модель грунта как упругого, однородного и изотропного полупространства принимается в виде:

$$w = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi, \eta) K(x - \xi; y - \eta) d\xi d\eta, \quad (1.16)$$

где K – некоторое ядро преобразования, вид которого определяется решением задачи о загрузении полупространства единичной силой;

ξ, η – приращения координат расчетных точек.

Основным достоинством данного метода является возможность получения полей напряжений в массиве грунта, окружающего оболочку (обделку), а не только напряжения в грунте в зоне действия упругого отпора, что характерно для методов О.Е.Бугаевой и «Метропроекта». Это дает возможность проектировщику наглядно представить образование в массиве грунта полей напряжений, исключая необходимость рассчитывать нагрузку на оболочку (обделку) [6,10].

Расчет данными методами имеет сложность, заключающуюся в необходимости получения растягивающих напряжений в грунте при деформации оболочки (обделки) внутрь выработки под действием собственного веса грунтового массива, так как нет возможности получения безотпорной зоны. Устранение этого недостатка привело к возникновению гибридных методов, особенность которых заключается в объединении оболочки (обделки) сооружения с грунтовым массивом посредством контактного слоя. Также осложняющим расчет фактором можно считать необходимость учета накопления напряжений при учете последовательности работ по обратной засыпке сооружения и получении растягивающих напряжений в грунте за оболочкой (обделкой).

1.4.4 Применение метода конечных элементов для расчета металлических гофрированных конструкций: достоинства и недостатки

В последние несколько десятилетий, в связи с развитием компьютерной техники, широкое распространение получили численные методы, такие как МКЭ, МГЭ, МДЭ и гибридные методы. Наиболее распространенным на настоящий момент является метод конечных элементов – МКЭ.

МКЭ является результатом слияния матричных методов строительной механики и вариационно-разностных методов теории упругости, она является универсальным методом решения дискретных и континуальных задач.

МКЭ – численный метод решения дифференциальных уравнений. В этом качестве он служит и методом построения математической модели и методом ее исследования. Основная идея МКЭ состоит в том, что непрерывная (определенная бесконечным числом значений) функция аппроксимируется дискретной моделью. Дискретная модель строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Непрерывная величина может быть как векторной, так и скалярной, например вектор перемещений. Для данной

величины, например поля возможных перемещений (v), определяется минимум полной потенциальной энергии системы $\Pi(v)$ по формуле:

$$\Pi(v) = U(v) - W(v), \quad (1.17)$$

где U – потенциальная энергия деформации;

W – потенциал внешних нагрузок.

Точное определение минимума $\Pi(v)$ эквивалентно точному решению дифференциального уравнения теории упругости, которое является бесконечномерной задачей. Замена задачи n -мерной, т.е. дискретизация модели ведется за счет образования узлов, в которых должны быть определены значения функции. Алгоритм основан на методе Релея – Ритца: вводятся пробных функций $v = V_1, v = V_2 \dots v = V_n$. В классе возможных линейных комбинаций $v = y_1 V_1 + \dots + y_n V_n$ вычисляется такая частная комбинация $w = u_1 V_1 + \dots + u_n V_n$, которая соответствует минимальному значению $\Pi(v)$. Путем преобразования системы в матричный вид переходим к основному уравнению для неизвестных параметров Ритца:

$$[K]\{u\} = \{R\}, \quad (1.18)$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости конструкции;

$\{u\}$ – вектор перемещений;

$\{R\}$ – вектор нагрузки.

Поскольку поле перемещений внутри каждого элемента определено его функциями формы и значениями перемещений в его узлах, после решения системы (18) можно вычислить деформации и напряжения для всех элементов.

С помощью МКЭ возможно проводить исследование работы конструкции на математической модели сооружения. Модель является математическим представлением реального объекта в масштабе 1:1 с получением объемного эффекта в случае решения пространственной задачи [55, 100].

Применительно к расчету МГК, система «оболочка – грунтовая обойма» рассчитывается совместно, но в отличие от методов теории упругости, оболочка

сооружения и грунтовая обойма разбиваются на конечные элементы, в узлах которых происходит передача усилий. Для решения плоских задач используются одно и двумерные конечные элементы, для решения пространственных задач двух и трехмерные элементы. Современные программные комплексы, такие как ЛИРА, ANSYS, Midas Civil и т.д. позволяют строить конечноэлементные модели конструкций, как в плоской, так и в пространственной задачах, учитывать геометрическую нелинейность работы конструкции и физическую нелинейность работы материалов.

Определенной сложностью при использовании программных комплексов, реализующих МКЭ, является моделирование грунтового массива, так как грунт может обладать нелинейностью и консолидацией при длительном приложении нагрузок. Отдельным направлением при моделировании подземных сооружений является создание контактных слоев, которые могли бы обеспечить отсутствие растягивающих напряжений в конечных элементах, моделирующих грунтовый массив. В частности, А. Жинкин справедливо отмечает, что при моделировании работы МГК методом конечных элементов требуется досконально описать те данные, которые заранее неизвестны и/или могут меняться в широком диапазоне, что в целом характерно для сооружений, работающих в грунтовой среде [35]. Прямым последствием этого является необходимость заново моделировать конструкцию в программном комплексе даже при небольших изменениях входных параметров, что приводит к перерасчету всей схемы и, как следствие, затягивает сроки проектирования. Также в целом можно отметить, что моделирование МГК методом конечных элементов требует определенной квалификации инженера, выполняющего эту работу. От него требуется не только опыт и знания в области моделирования строительных конструкций в программных комплексах (особенно конструкций, работающих в грунте), но и четкое понимание работы этих конструкций, для предотвращения появления грубых ошибок. Фактически, в современной практике не рассмотрено достаточно надежного метода, которым можно было бы быстро проверить вручную правильность расчета конструкции в программе, как это можно сделать со

стержневыми конструкциями. Все это зачастую приводит к тому, что проектировщики отказываются разрабатывать проекты МГК, отдавая предпочтение конструкциям, работа которых им хорошо известна.

Как показывает анализ зарубежной литературы, несмотря на озвученные выше недостатки применения МКЭ, данный метод фактически вытеснил другие (особенно в сфере расчета средних и больших МГК). Это видно по публикациям [106, 107, 109, 111 – 116, 118 – 125]. Однако, необходимо отметить, что в зарубежной практике исследования работы МГК ставится большое количество экспериментов на всех типах гофрированных конструкций, что позволяет формировать базы экспериментальных данных, позволяющих проверять результаты расчетов даже по не очень точным методикам и избегать грубых ошибок. Некоторые эксперименты, поставленные за рубежом, рассмотрены в главе 2 настоящей диссертации.

Выводы по главе 1

1. Конструкции из металлических гофрированных листов представляют собой большой практический интерес для транспортного, промышленного и гражданского строительства. Они могут применяться в качестве водопропускных сооружений, путепроводов, тоннелей различного назначения, галерей и т.д. МГК экономичны как в строительстве (в некоторых случаях их возведение обходится в несколько раз дешевле, чем строительство аналогичных мостовых сооружений), так и в эксплуатации (при высоком качестве строительно-монтажных работ при возведении эксплуатационные затраты минимальны). Несмотря на очевидные плюсы сооружений данного типа, опыт применения сооружений данного типа в России, хотя и имеет давнюю историю, отстает от общемирового.

2. Проведенный анализ условий работы сооружений, а также дефектов и повреждений, наблюдаемых на МГК, эксплуатируемых в составе автомобильных

и железных дорог показал, что степень воздействия агрессивных сред на сооружения велика. Без принятия специальных мер по обеспечению защиты конструкций от воздействия агрессивных сред, значительно (до нескольких раз) сокращается срок эксплуатации сооружений, возрастает риск возникновения аварийных ситуаций и обрушений.

3. Существенным препятствием для освоения данного типа сооружений представляет несовершенство методов расчета МГК. На настоящий момент для расчета МГК применяются либо методы, разработанные для расчета подземных сооружений (тоннелей и т.д.), либо МКЭ (универсальный метод по решению задач механики деформируемых твердых тел). Учитывая этот факт, актуальной становится задача определения достоверности результатов, которые были получены при применении данных методов к расчету МГК, а также разработка новых методик, позволяющих достоверно рассчитывать гофрированные конструкции.

4. Методика расчета МГК, представленная в нормативной базе РФ, несовершенна и также требует проверки достоверности результатов. Для дальнейшего развития нормативной базы необходимо разработать новые уточняющие методики расчета сооружений.

5. Применение МКЭ, который в настоящее время широко применяется в отечественной и, в особенности, зарубежной практике проектирования МГК, также не лишено недостатков. Основными недостатками МКЭ являются необходимость ввода большого количества заранее неизвестных параметров, сложность расчета пространственных систем, что делает невозможным учет параметров напряженно-деформированного состояния в продольном направлении МГК. В настоящее время остро стоит вопрос о разработке точной и простой методике расчета, которая может стать альтернативой МКЭ.

2 НАТУРНЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ИХ АНАЛИЗ

Исследования реального поведения МГК представляют большой интерес для совершенствования методики расчета данного типа конструкций по следующим причинам:

- проверка работоспособности разных типов конструкций;
- анализ результатов эксперимента позволит сформулировать гипотезы для построения новых расчетных моделей;
- проверка достоверности используемых расчетных моделей.

Для правильного решения трех вышеперечисленных основных задач по совершенствованию методов расчета МГК необходимо иметь и результаты натурных испытаний конструкций, и результаты лабораторных исследований на моделях МГК. К сожалению, результатов натурных испытаний (и других натурных исследований) немного, а количество результатов исследований, обладающих достаточной степенью достоверности минимально. Лабораторные исследования периодически публикуются в печатных изданиях, проводятся разными авторами для решения своих задач. В связи с этим результаты лабораторных исследований для решения задач идентификации и верификации расчетных моделей МГК, как правило, можно использовать только частично. Учитывая различные условия, в которых были поставлены эксперименты, разные типы испытываемых конструкций, а также зачастую различный характер силовых нагрузок, представляет интерес систематизация и анализ известных экспериментальных исследований поведения гофрированных конструкций, взаимодействующих с грунтом с целью выбора наиболее эффективных и корректных расчетных схем для анализа поведения гофрированных металлических конструкций в реальных условиях эксплуатации.

Для поиска приемлемых экспериментальных данных о работе гофрированных конструкций, взаимодействующих с грунтовой засыпкой автор

предпринял определенные усилия по их поиску и анализу. В настоящей главе будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований, поставленных за рубежом [110, 117] и на территории России [7, 8,66]. Помимо данных, полученных в лабораторных условиях, в настоящей главе также будут представлены результаты натурных обследований МГК, рассмотренные в публикациях [84, 85].

2.1 Результаты натурных обследований металлических гофрированных конструкций

В силу особенностей своей конструкции и сложности полного соблюдения технологии строительства металлические гофрированные водопропускные трубы в ходе жизненного цикла могут утратить значительную часть своих эксплуатационных свойств, например, вследствие изменения проектных геометрических характеристик, что приведет к перераспределению усилий, появлению непредусмотренных нормами напряжений и, как следствие, дальнейшему развитию повреждений.

Для определения характерных повреждений МГК, эксплуатируемых на территории РФ, приведем результаты визуального осмотра и измерений геометрических параметров металлических гофрированных труб, выполненных на территории Свердловской области в октябре – декабре 2011 г.

Для получения более полной информации о работе сооружений под разной нагрузкой были выполнены осмотр и измерения геометрических параметров водопропускных труб, эксплуатируемых под насыпями автомобильных и железных дорог. Ниже приведены данные, полученные в ходе осмотра одной железнодорожной трубы, эксплуатируемой на тупике взрывчатых веществ станции Стриганово Свердловской железной дороги, и пяти автодорожных труб

(в том числе двух двухочковых), эксплуатируемых на автомобильной дороге Артемовский – Зайково (дорога регионального значения, III категория).

В результате выполненных измерений установлено, что все трубы имеют одинаковый диаметр и геометрические параметры гофрированного листа. Диаметр труб составляет 1,5 м (по средней линии гофров), геометрические параметры гофрированного листа представлены на рисунке 2.1.

Длина труб составляет от 20 до 30 м. Трубы выполнены без оголовков, со срезом концевых звеньев перпендикулярно оси трубы. Насыпи выполнены из местных супесей и суглинков. Высота засыпки различна и изменяется в пределах от 1 до 5,5 м.

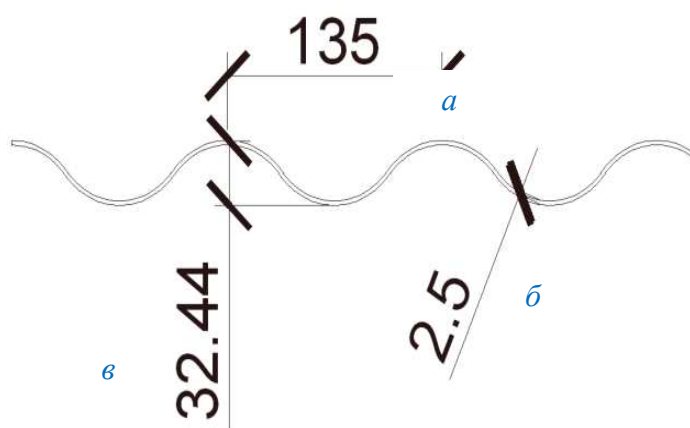


Рисунок 2.1 – Геометрические параметры гофрированного листа
(а – расстояние между вершинами гофров – 135 мм; б – толщина гофрированного листа – 2,5 мм; в – высота гофрированного листа – 32,44 мм)

В ходе обследования были выявлены следующие дефекты и повреждения:

- продольный прогиб трубы, имеющий наибольшее значение в зоне приложения временной нагрузки от подвижного состава, составляющий для автодорожной трубы до 140 мм, для железнодорожной трубы – до 350 мм. Прогиб железнодорожной трубы показан на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Прогиб железнодорожной трубы

– овализация тела трубы. В конструкциях автодорожных труб овализация составила до 20 мм, а в железнодорожной трубе – до 240мм. В двухочковых автодорожных трубах наблюдается ассиметричная овализация. Данный дефект проиллюстрирован на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Овализация тела автодорожной трубы

Основные геометрические параметры гофрированных труб и величины деформаций представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные геометрические параметры гофрированных труб и величины деформаций

Сооружение	Длина, м	Высота засыпки, м	Прогиб, мм	Овализация, мм
Труба на ст. Стриганово Свердловской ж.д.	29	3,6	350	240
Труба на а.д. Артемковский-Зайково, км 4 ПК 3	22	1,5	140	18
Труба на а.д. Артемковский – Зайково, км 7 ПК 8	27	2,0	115	11
Труба на а.д. Артемковский-Зайково, км 14 ПК 2	23	1,7	120	14
Труба на а.д. Артемковский-Зайково, км 18 ПК 3	24	1,8	125	16

Также при фиксации деформаций было отмечено, что деформации поперечного сечения трубы (прогиб шельги, овализация) являются неравномерными по длине трубы. Наибольшие деформации наблюдаются в зонах приложения временной нагрузки: в центральных частях полос автомобильных дорог; над рельсовой колеей железной дороги. Разность между деформациями в рамках одного сооружения составляет до 90% (деформации в ненагруженной части сооружения могут составлять лишь порядка 10% от наибольших деформаций на самых нагруженных участках обследуемой МГК). Подобную картину деформаций, появившихся в процессе эксплуатации МГК, также наблюдали еще в 80-е годы XX века.

Деформации тела трубы привели к появлению местных просадок полотна проезжей части дороги над ней.

Кроме данных повреждений, которые свидетельствуют о неправильной работе конструкции, были обнаружены также и другие дефекты: неправильная сборка звеньев железнодорожной трубы, нарушение обмазочной гидроизоляции и сплошная коррозия, местные прогибы и разрывы, заиливание и обводнение отверстия трубы. Данные дефекты показаны на рисунках 2.4, 2.5.



Рисунок 2.4 – Нарушение обмазочной гидроизоляции и коррозия гофрированной трубы



Рисунок 2.5 – Местный разрыв стенки гофрированной трубы

По результатам осмотров можно сделать вывод о неправильной работе сооружений данного типа. Наиболее вероятными причинами появления не предусмотренных проектом деформаций могут быть нарушения технологии производства работ, а также несовершенство приведенной в нормативной базе РФ методики расчета. С количественной точки зрения, вероятнее всего, появление деформаций водопропускных труб обусловлено в основном несоблюдением технологии производства работ. Однако повсеместное появление прогибов также свидетельствует и о несовершенстве методики расчета, по которой проектировались данные сооружения.

2.2 Обзор и анализ зарубежных статических экспериментальных исследований металлических гофрированных конструкций

Для совершенствования методик расчета МГК в международной практике ведутся научно-исследовательские работы, в рамках которых проводятся эксперименты на моделях МГК (чаще всего – в натуральную величину), которые подвергаются различным нагрузкам, имитирующим те или иные силовые воздействия. В процессе нагружения измеряются напряжения, деформации и другие характерные параметры напряженно-деформированного состояния модели. Впоследствии данные, полученные в ходе эксперимента, сопоставляются с результатами расчета модели с использованием какого-либо программного комплекса, реализующего метод конечных элементов. Подобные сопоставления, выполненные за рубежом, представлены в работах [110,117]. Рассмотрим их в настоящей главе более подробно.

2.2.1 Испытания коробчатых металлических гофрированных конструкций (Канада, Польша)

Основными целями эксперимента, описанного в [117] являлись:

- 1) создание испытательного полигона с целью постановки на нем эксперимента, включающего испытание большепролетной МГК с доведением ее до предельного состояния;
- 2) дополнение банка экспериментальных данных сведениями о результатах испытания МГК коробчатого очертания, выполненной из стальных листов с глубокой гофрировкой, уточнение методик расчета и развитие норм проектирования МГК;

3) уточнение параметров для моделирования МГК в программных комплексах, использующих метод конечных элементов применительно к задачам в плоской и пространственной постановке;

4) измерение параметров напряженно-деформированного состояния конструкции, находящейся под предельной расчетной нагрузкой с целью определения резервов несущей способности конструкции.

Объектом исследования являлась арочная МГК коробчатого очертания. Пролет МГК составляет 10,15 м, высота составляет 2,55 м (по центральной линии гофров). МГК выполнена из гофрированных листов профилем 400х150 мм, толщиной 6 мм. Схема конструкции представлен на рисунке 2. 6.

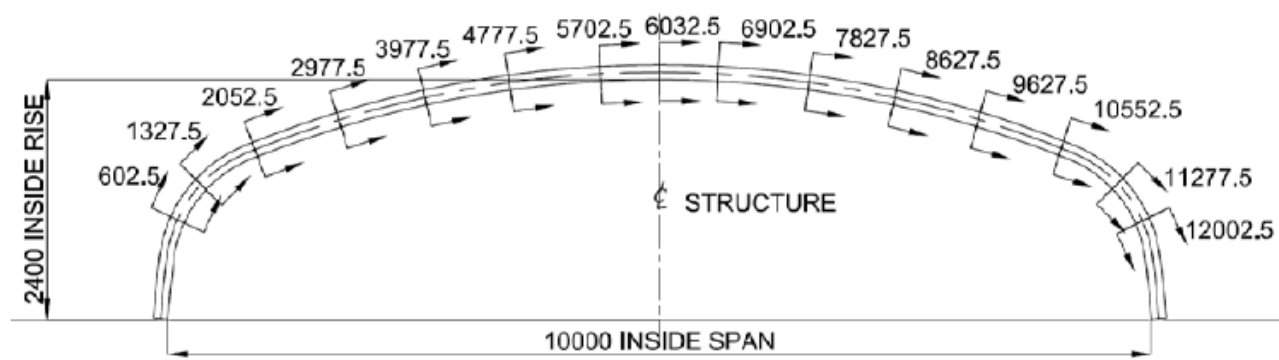


Рисунок 2.6 – Вид конструкции с указанием местоположения тензорезисторов.

Испытания проводились в испытательной камере, размерами 16,0×8,0×3,0 м. Пазуха между стенками камеры и МГК заполнялась крупнозернистым песком с послойным уплотнением. Общий вид камеры объемного нагружения и смонтированной внутри нее модели МГК представлен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Возведение сооружения и засыпка свода

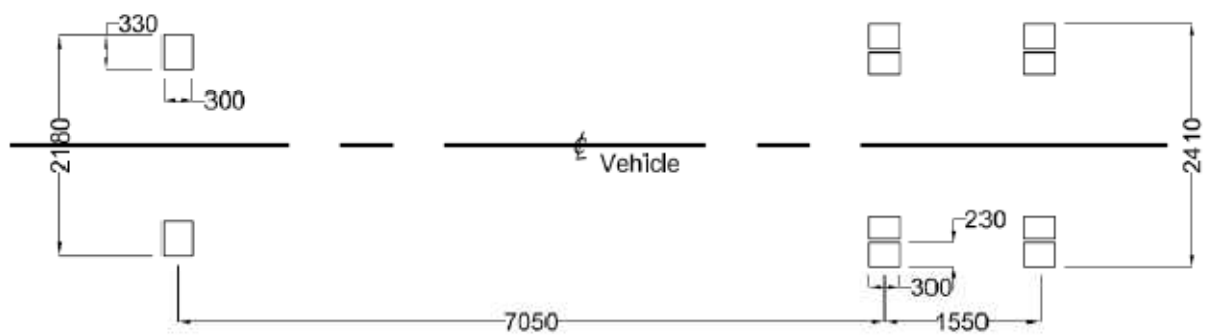
Нагрузка осуществлялась двумя разными способами: в первой части эксперимента с помощью грузового автомобиля, который устанавливался над сводом МГК в разных положениях (для более точной имитации реально действующих на МГК нагрузок); во второй части эксперимента – с помощью штампа, имитирующего сдвоенную заднюю ось грузового автомобиля (для создания нагрузки высокой интенсивности). Основные характеристики испытательных нагрузок представлены в таблице 2.2. Вид МГК с установленной на нее нагрузкой от грузового автомобиля представлен на рисунке 2.8. Схема установки колесной нагрузки представлена на рисунке 2.9.

Таблица 2.2 – Основные характеристики испытательных нагрузок

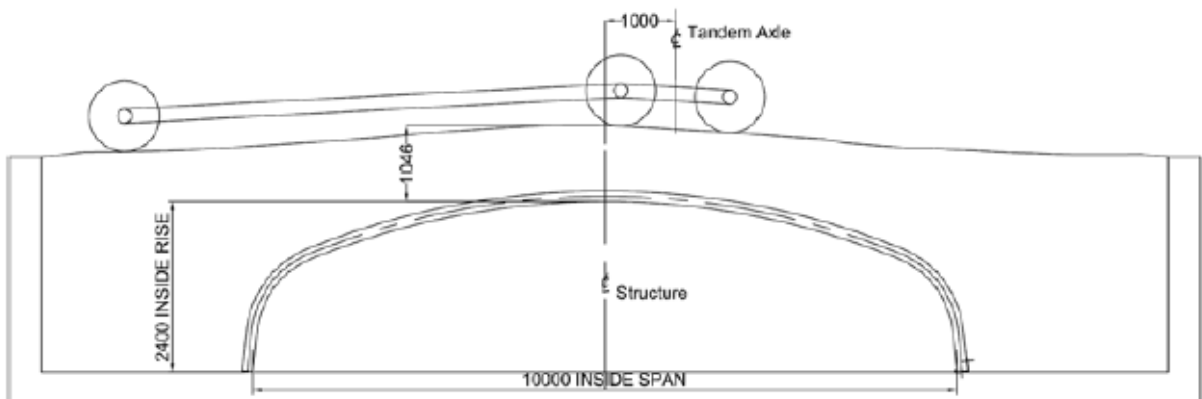
Схема нагрузки	Засыпка, мм	Описание нагрузки	Смещение оси от центра, м	Максимальное приложенное усилие, кН
1	2	3	4	5
B1	1046	Сдвоенная ось грузовика	6	240
B2	1046	Сдвоенная ось грузовика	5	240
B3	1046	Сдвоенная ось грузовика	4	240
B4	1046	Сдвоенная ось грузовика	3	240
B5	1046	Сдвоенная ось грузовика	2	240
B6	1046	Сдвоенная ось грузовика	4	240
B7	1046	Сдвоенная ось грузовика	0	240
B8	1046	Сдвоенная ось грузовика	-1	240
E5	450	Сдвоенная ось	0	1200



Рисунок 2.8 – Грузовой автомобиль, установленный над сооружением во время испытаний



а) План установки



б) Схема установки колесной нагрузки в позиции В8

Рисунок 2.9 – Схема приложения нагрузки от груженого грузовика

В ходе эксперимента контролировались деформации конструкции и напряжения в стальных листах МГК. Деформации фиксировались электронным тахеометром с одной точки с помощью отражателей, установленных в характерных точках по продольной оси МГК. Напряжения фиксировались с помощью тензодатчиков, установленных по вершине и впадине гофров, а также по боковой поверхности гофров. Вид МГК с установленными отражателями и тензодатчиками представлен на рисунке 2.10.

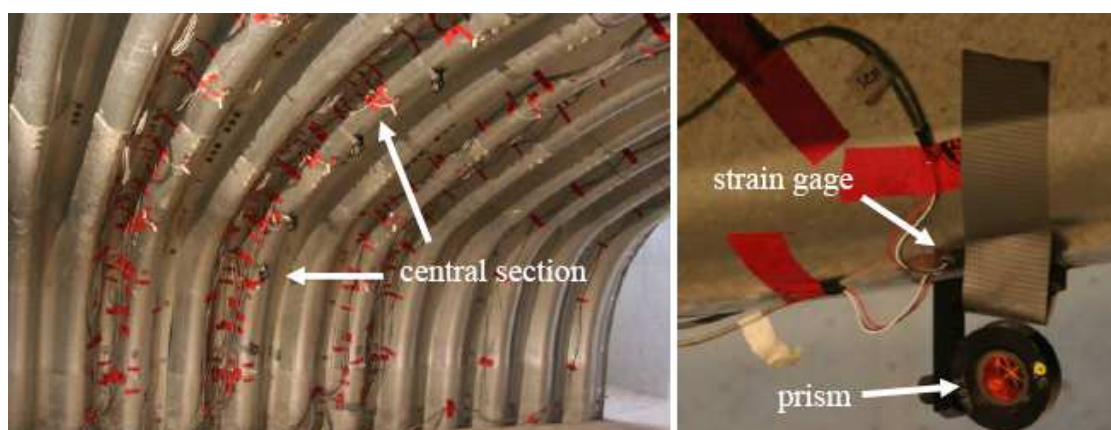


Рисунок 2.10 – Измерительные приборы (вид изнутри)

По результатам эксперимента были получены значения продольных сил, значения изгибающих моментов и значения перемещений. Распределение перемещений представлено на рисунке 2.11; распределение нормальных сил представлено на рисунках 2.12, 2.13; распределение изгибающих моментов представлено на рисунках 2.14, 2.15.

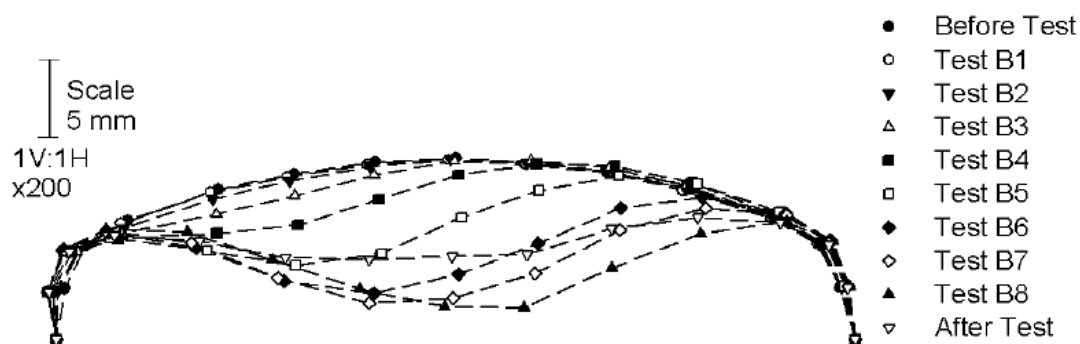


Рисунок 2.11 – Вертикальные перемещения при различном положении осей колесной нагрузки

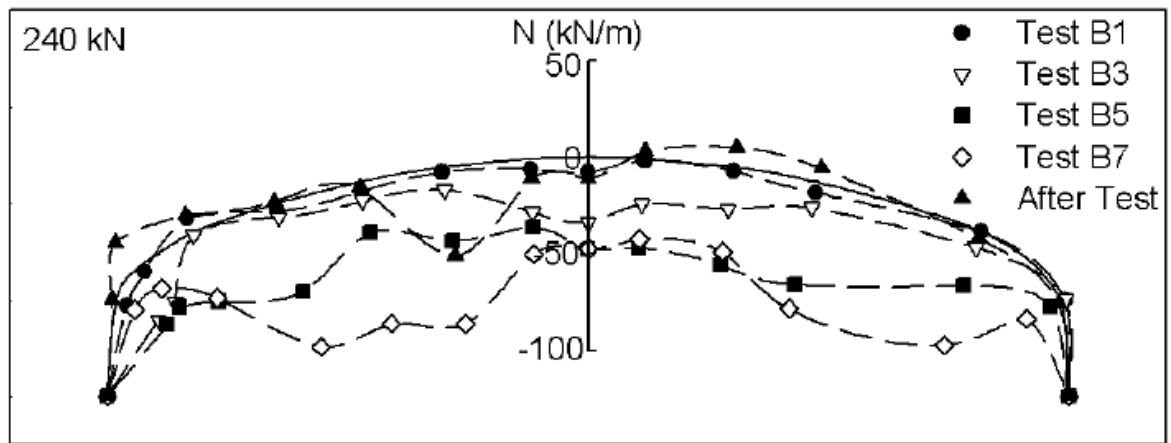


Рисунок 2.12 – Распределение погонных продольных сил (кН/м) по срединной линии ($z=0$) при различном положении осей колесной нагрузки

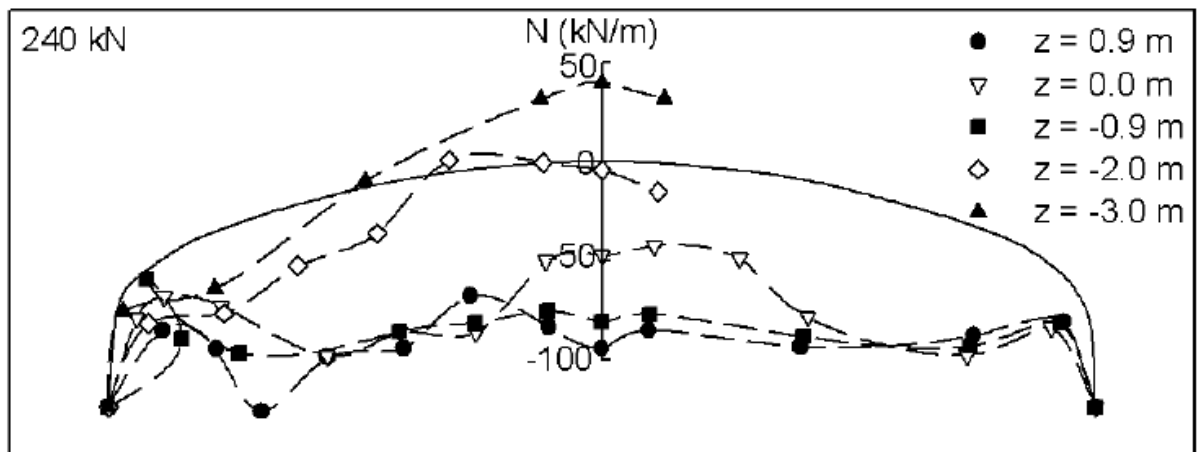


Рисунок 2.13 – Распределение погонных продольных сил (кН/м) в поперечном направлении по коньку свода

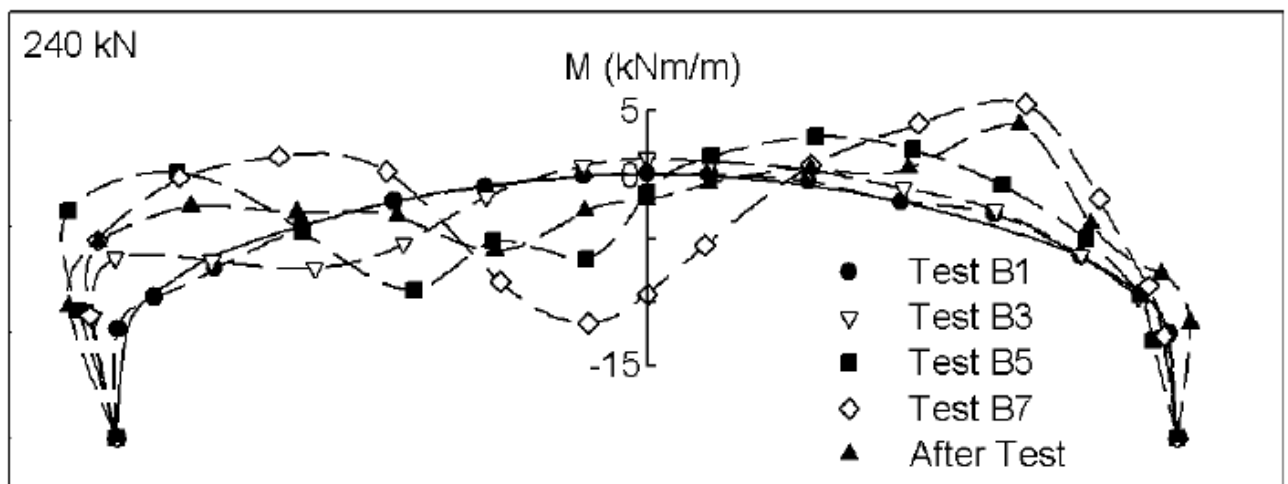


Рисунок 2.14 – Изменение распределения M по срединной линии ($z=0$) для различных загрузений колесной нагрузкой

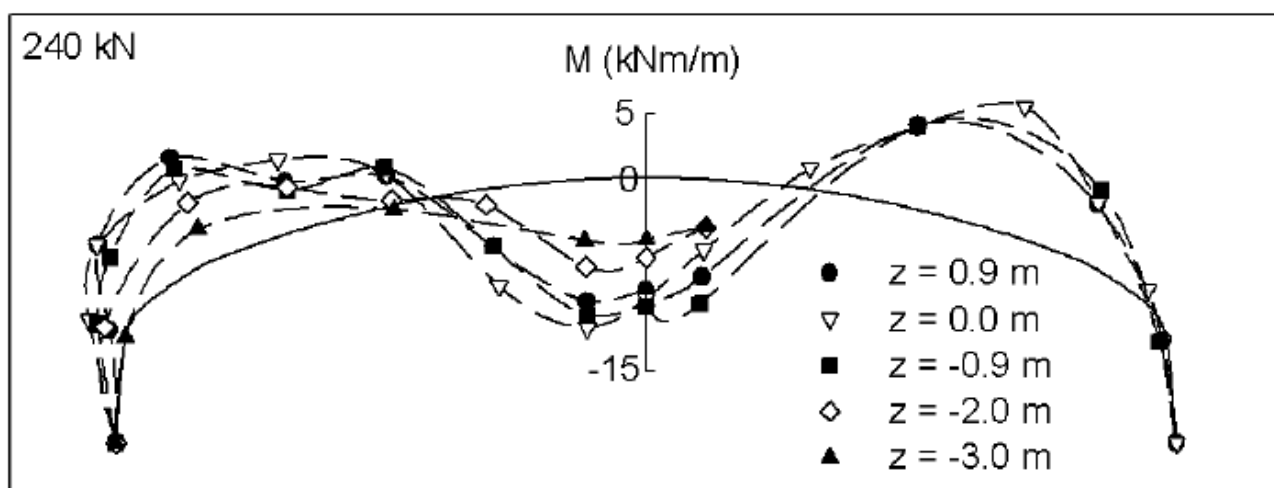


Рисунок 2.15 – Изменение распределения M в различных сечениях со смещением от срединной линии

По результатам анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что при нагружении модели с помощью грузового автомобиля (нагрузка от сдвоенной оси составляет 240 kN) максимальный прогиб составил $9,5 \text{ мм}$, максимальный изгибающий момент – 13 кНм/м , погонная сжимающая сила – 95 кН/м . Полученные по результатам испытаний усилия оказались значительно ниже расчетных. При нагружении модели с помощью штампа (с целью доведения конструкции до предельного состояния) локальное разрушение произошло при нагрузке 1100 кН , что превышает предельно допустимую расчетную нагрузку более чем в 2 раза. В целом в [117] делается вывод о высокой прочности и надежности МГК коробчатого типа.

Схожий эксперимент был поставлен на территории Польши [110]. Объектом исследования являлась арочная МГК коробчатого очертания. Пролет МГК составлял $12,315 \text{ м}$, высота составляла $3,55 \text{ м}$ (по центральной линии гофров). МГК выполнена из гофрированных листов профилем $380 \times 140 \text{ мм}$, толщиной 7 мм . Схема конструкции представлена на рисунке 2.16.

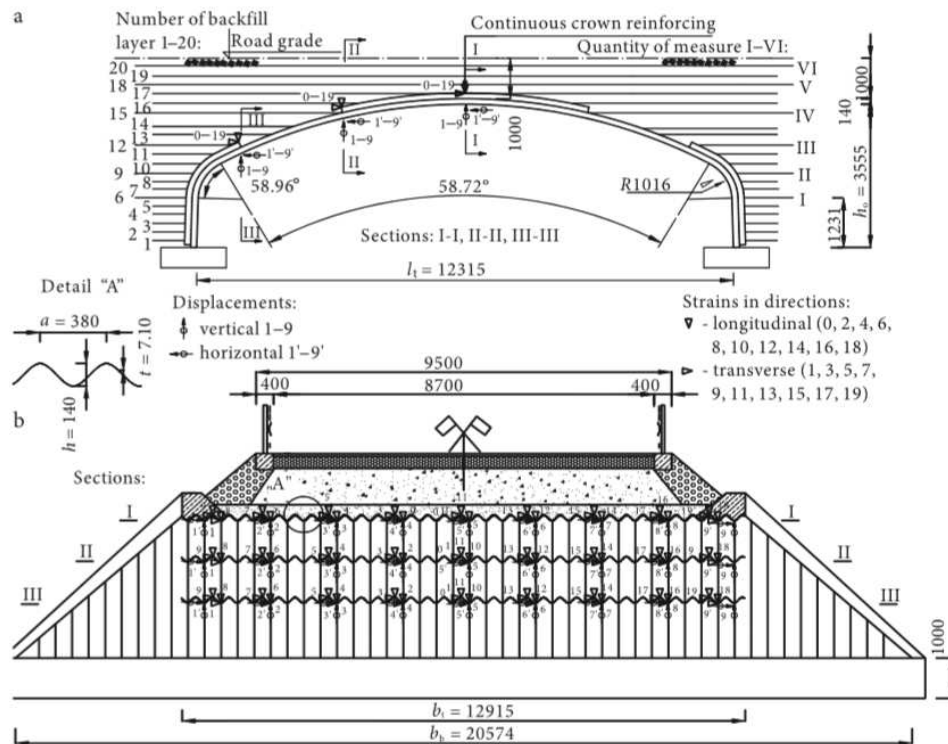


Рисунок 2.16 – Схема МГК

Нагружение МГК выполнялось с помощью осевых нагрузок, имитирующих нагрузки от реальных транспортных средств, причем загрузки конструкции проводились в трех местах по длине сооружения, то есть поперек насыпи земляного полотна (схема установки временной нагрузки представлена на рисунке 2.17). В ходе эксперимента измерялись деформации поперечного сечения МГК, причем не только в одном поперечном сечении сооружения, но и по длине МГК. Результаты определения прогибов при разных нагружениях по длине сооружения представлены на рисунке 2.17.

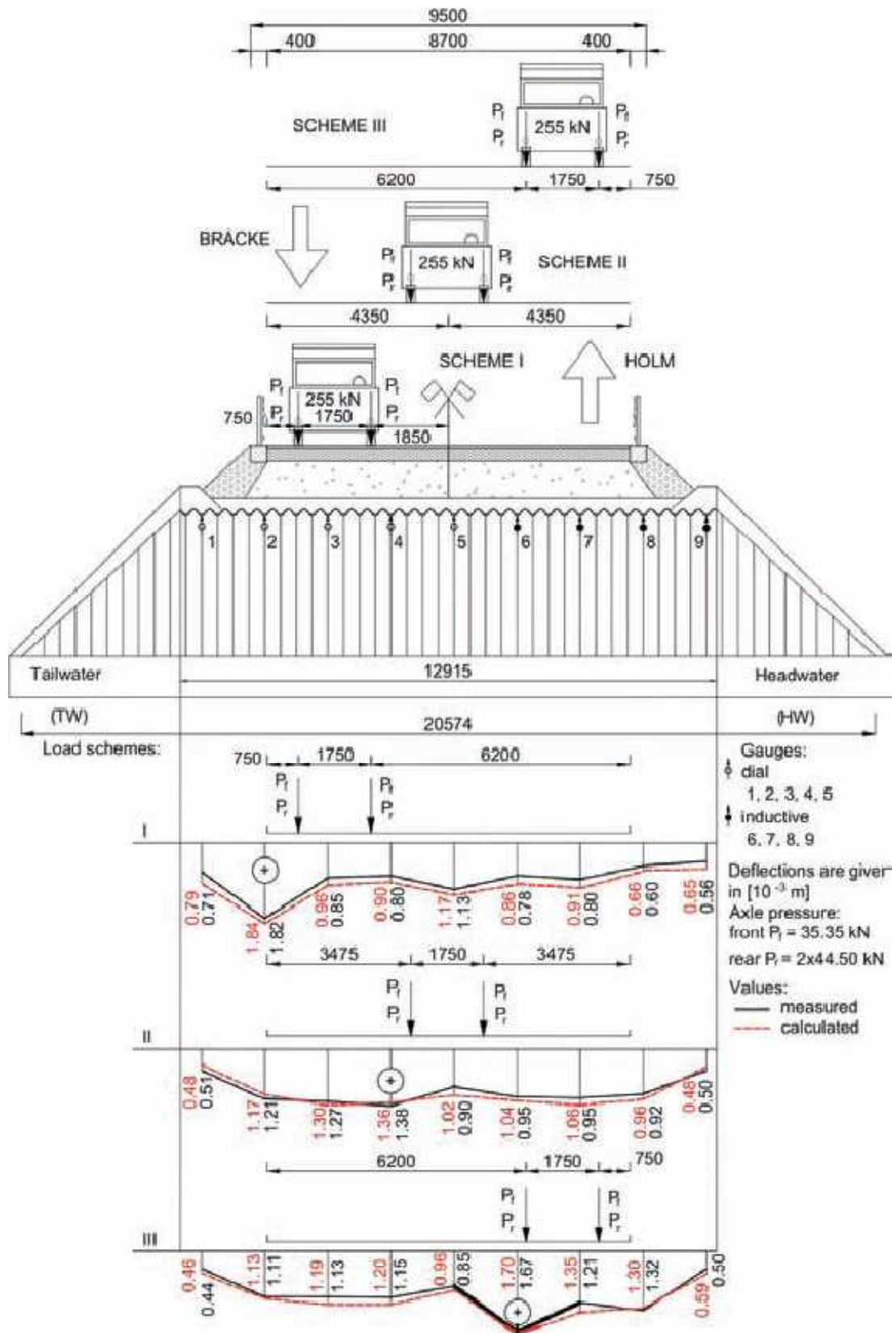


Рисунок 2.17 – Прогибы замка МГК при установке нагрузок в разных местах по длине сооружения

Как видно по результатам измерений прогибов, наблюдаются различия в значениях прогибов при установке временной нагрузки в разных местах по длине

сооружения. Этот эксперимент свидетельствует о том, что металлическая гофрированная конструкция в реальных условиях нагружения работает как оболочечная конструкция, испытывающая различные деформации, как по длине конструкции, так и по контуру, то есть в конструкции оболочки возникают изгибающие моменты, как в продольном, так и в окружном направлении. Этот факт следует учитывать при конечно-элементном моделировании поведения МГК и выборе подходящих конечно-элементных моделей.

Данные наблюдения позволяют также предполагать, что расчетные модели, учитывающие пространственную работу конструкций, будут более корректными в плане определения реальной работы конструкции.

Несмотря на некоторую разницу в фиксируемых параметрах МГК в экспериментах, поставленных на территории Канады и Польши, конструкции сооружений, материале, из которого они изготовлены и нагрузках, под которыми были испытаны МГК, в целом эксперименты можно считать подобными. Благодаря этому сходству были получены близкие результаты экспериментов, что позволяет сделать общие выводы[66].

2.3 Отечественные экспериментальные исследования, их анализ

2.3.1 Статические испытания полукруговой арочной металлической гофрированной конструкции и анализ их результатов

Объектом исследования являлась арочная МГК кругового очертания, с углом кругового сектора $\varphi=90^\circ$ (полукруговая арка). МГК выполнена из гофрированных листов профилем 381x140 мм, толщиной 4 мм. Испытания проводились в камере объемного нагружения, размерами 8,0×4,5×3,5 м, имеющей одну подвижную стенку. Перемещение подвижной стенки осуществлялось с

помощью батареи гидродомкратов, имеющих суммарное усилие ~ 2700 т.с. и ход штоков до 1,0 м. МГК находилась в камере объемного нагружения в горизонтальном положении. Закрепление пят арочной МГК – шарнирное. Пазуха между стенками камеры и МГК заполнялась крупнозернистым песком с послойным уплотнением. Общий вид камеры объемного нагружения и смонтированной внутри нее модели МГК представлен на рисунке 2.18.



Рисунок 2.18 – Общий вид камеры объемного нагружения и модели МГК

При проведении экспериментальных исследований модели МГК полукружного сечения в условиях имитации действия статической нагрузки фиксировались основные параметры напряженно-деформированного состояния испытуемой МГК и грунтовой среды засыпки. К регистрируемым параметрам относились: прогибы гофрированной оболочки в центральном (по длине) сечении МГК, в семи точках (рисунок 2.19); нормальные напряжения, возникающие в материале оболочки на гребне и впадине гофра в этом сечении; давление грунта в ряде точек грунтовой среды.

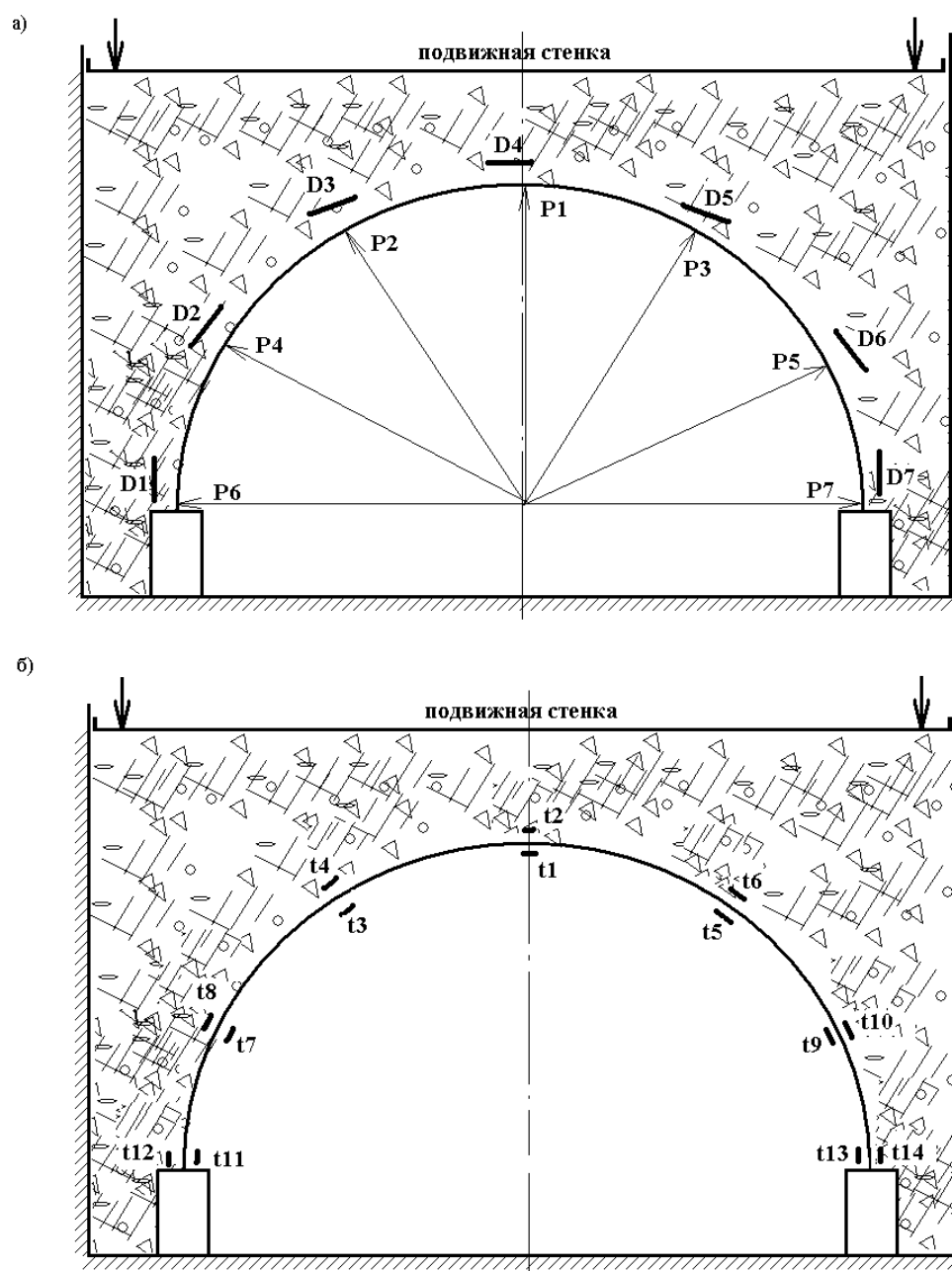


Рисунок 2.19 – Схема расположения датчиков
(а – перемещения давления, б – относительных деформаций)

Всего было установлено 28 датчиков, в том числе 7 датчиков давления грунта (мессдоз), 14 датчиков относительных деформаций (тензорезисторов), 7 датчиков прогибов. Все датчики деформаций ориентированы вдоль гофра. На рисунке 2.20 показаны установленные датчики относительных деформаций и датчик относительных перемещений внутри модели МГК.



Рисунок 2.20 – Датчики, установленные внутри МГК

Датчики перемещений устанавливались на неподвижной опоре, а концы их тросиковых элементов крепились к внутренней поверхности гофра. Вид датчиков перемещений и способ крепления тросиковых элементов показан на рисунке 2.21.

Производилась послойная засыпка песчаным грунтом пространства между стенками нагрузочной камеры и МГК, причем нужная высота засыпки в 2,6 м была достигнута укладкой восьми слоев грунта по 0,25-0,35 м. Процесс формирования грунтового массива засыпки образца МГК иллюстрируется фотографиями на рисунке 2.18.

Для моделирования статического нагружения, имитирующего действие грунтовой насыпи использовалась боковая подвижная стенка гидросилового стенда, представляющего собой систему гидродомкратов, установленными между подвижной стенкой и упорной поверхностью стенда (рисунок 2.22). Давление рабочего тела в гидродомкратах контролировалось и регистрировалось с помощью датчика ДДИ с аппаратурой ИВП.

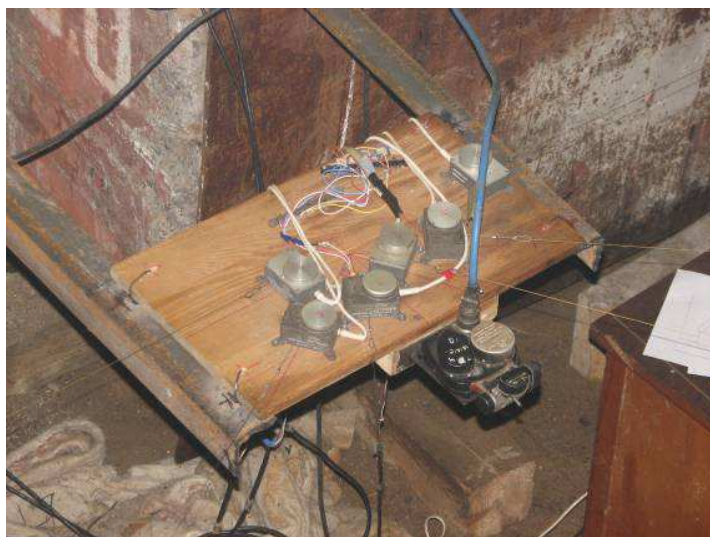


Рисунок 2.21 - Расположение датчиков перемещений внутри модели МГК



Рисунок 2.22 – Батарея гидродомкратов, имитирующих грунтовое давление

Испытания проводились при трех вариантах приложения распределенной по всей площади подвижной стенки нагрузки, величина которой определяется по показаниям мессдоз. Показания указанных мессдоз усреднялись и переводились в высоту столба условного грунта с удельным весом 20000 Н/м^3 . При первом нагружении высота эквивалентной насыпи принята равной 12,5 м; при втором

нагрузении высота эквивалентной насыпи принята равной 20 м; при третьем нагружении высота эквивалентной насыпи принята равной 30 м. В таблицах 2.3-2.5 приведены показания датчиков перемещений точек главных диагональных сечений МГК и тензодатчиков, регистрирующих относительные деформации в материале гофрированных листов. Схема расстановки датчиков была приведена на рисунке 2.19.

Анализ приведенных таблиц показывает, что, скорее всего, датчик перемещений Р2 и датчики относительных деформаций Т7 и Т14, были повреждены в процессе монтажа, засыпки или испытаний и не работали.

Таблица 2.3 – Показания датчиков при условной высоте засыпки 12,5 м

Максимальная амплитуда условного напряжения в точках МГК, МПа													
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
244	-220	50	-178	-54	8	-	44	-208	58	-140	70	-122	-
Относительные перемещения точек центрального сечения МГК, мм													
P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
-45		-		-16		-13		-8		0		0	

Таблица 2.4 – Показания датчиков при условной высоте засыпки 20,0 м

Максимальная амплитуда условного напряжения в точках МГК, МПа													
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
580	-543	24	-346	-150	268	-	130	-390	114	-310	126	-288	-
Относительные перемещения точек центрального сечения МГК, мм													
P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
-77		-		-26		-17		-8		0		0	

Таблица 2.5 – Показания датчиков при условной высоте засыпки 30,0 м

Максимальная амплитуда условного напряжения в точках МГК, МПа													
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
780	-543	-84	-396	-270	274	-	130	-544	196	-520	146	-568	-
Относительные перемещения точек центрального сечения МГК, мм													
P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
-116		-		-31		-18		-5		0		0	

На основании обработки опытных данных для каждой высоты эквивалентной засыпки построены графики экспериментальных распределений условных напряжений в модели МГК. Графики показаны на рисунках 2.23, 2.24, 2.25.

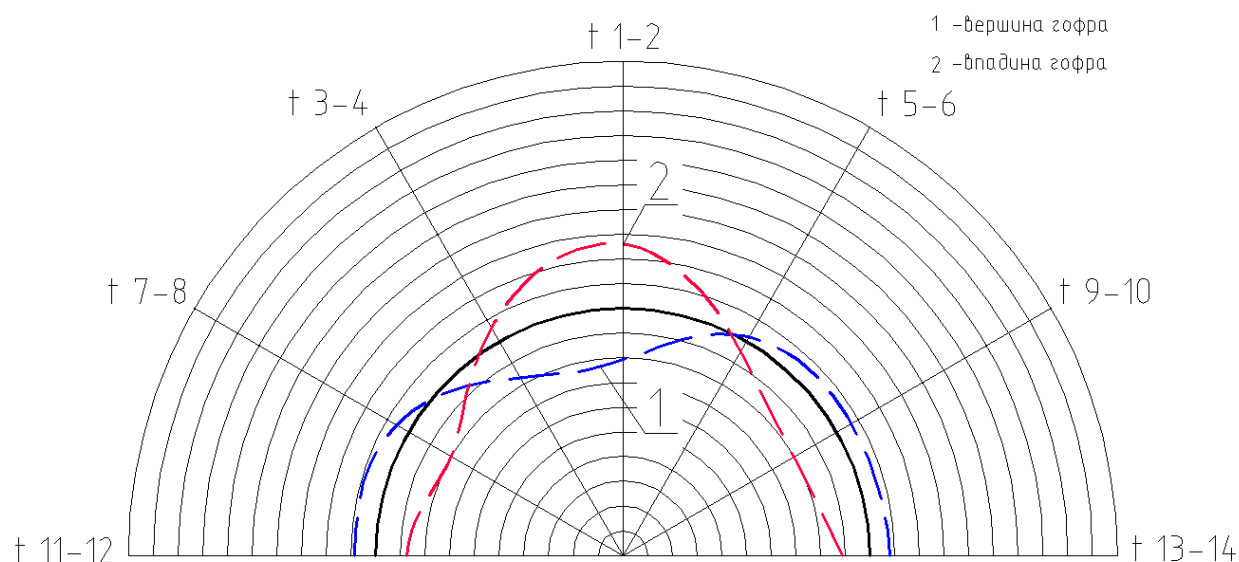


Рисунок 2.23 – Распределение условного напряжения по сечению модели МГК для высоты засыпки 12,5 м (1 радиальное деление – 100 МПа)

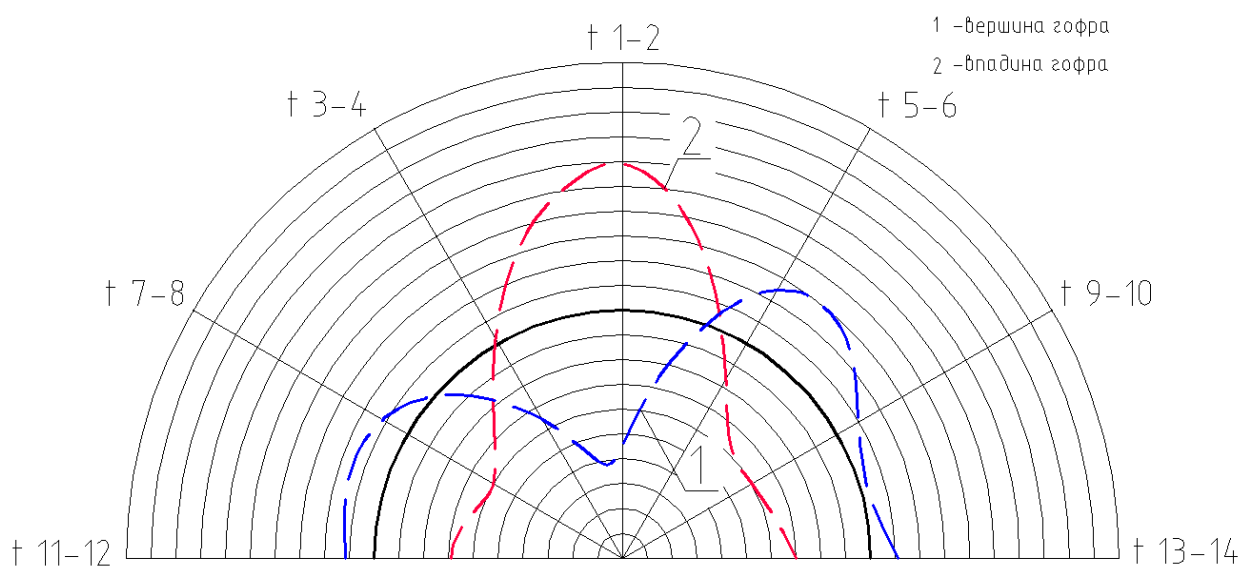


Рисунок 2.24 – Распределение условного напряжения по сечению модели МГК для высоты засыпки 20,0 м (1 радиальное деление – 100 МПа)

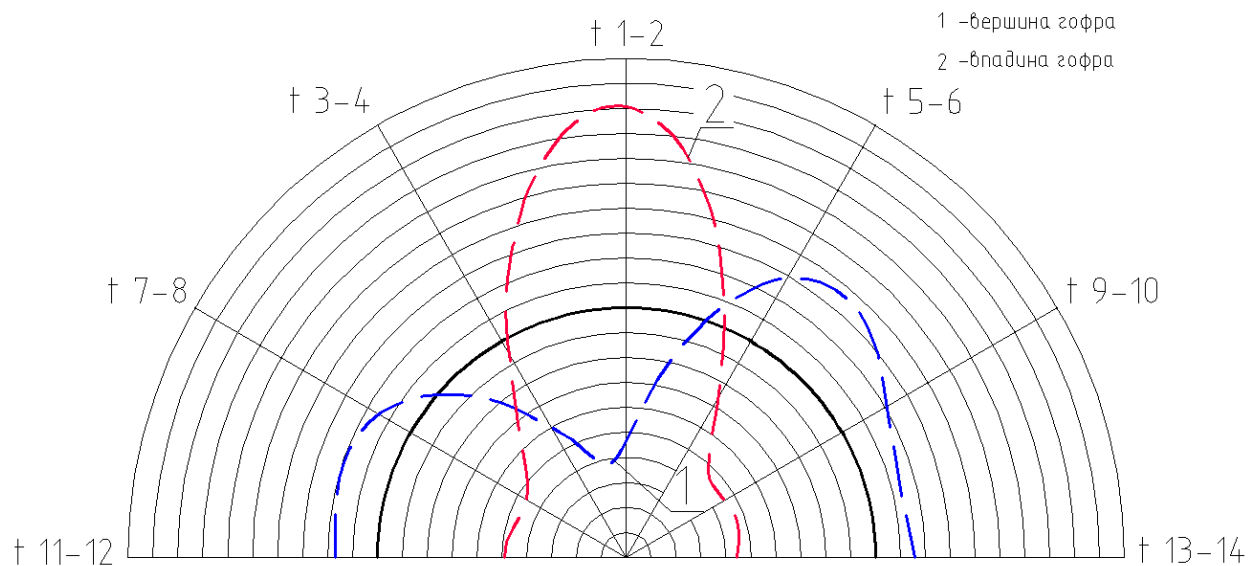


Рисунок 2.25 – Распределение условного напряжения по сечению модели МГК для высоты засыпки 30,0 м (1 радиальное деление – 100 МПа)

Обратим внимание на то обстоятельство, что датчики относительных деформаций Т7 и Т14, по которым рассчитывались условные напряжения, как выше указывалось, не работали, однако на приведенных эпюрах условных напряжений в соответствующих точках приведены некоторые значения напряжений. Эти значения были получены путем интерполяции значений в близлежащих точках.

Кроме того, ввиду определенной симметрии самой гофрированной конструкции и ожидаемой симметрии приложения давления с помощью гидродомкратов, ожидалось, что эпюры напряжений будут симметричны. Однако, как видно из рисунках 2.23, 2.24, 2.25 определенная симметрия наблюдается только у эпюр напряжений, построенных на впадинах гофров, независимо от высоты засыпки. Эпюры же напряжений, построенные для вершин гофров металлической гофрированной конструкции ожидаемой симметрией не обладают, причем эта асимметрия увеличивается с ростом высоты засыпки.

Графики распределения нормального (по отношению к МГК) давления в грунтовой засыпке по сечению арки, определенного с помощью мессдоз,

показаны на рисунках 2.26, 2.27, 2.28. Графики иллюстрируют распределение давления в центральном сечении модели МГК.

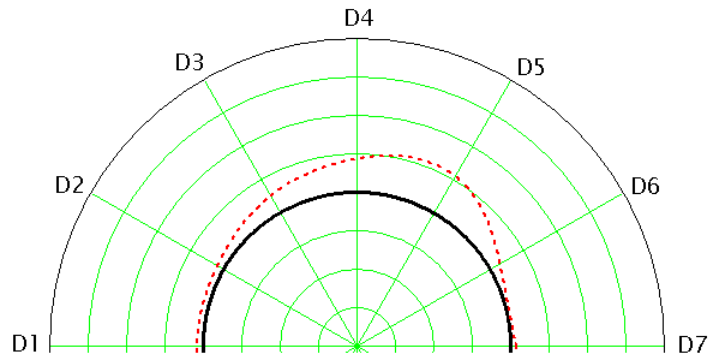


Рисунок 2.26 – Распределение давления в грунте; высота эквивалентной засыпки 12,5 м (1 радиальное деление – 250 кПа)

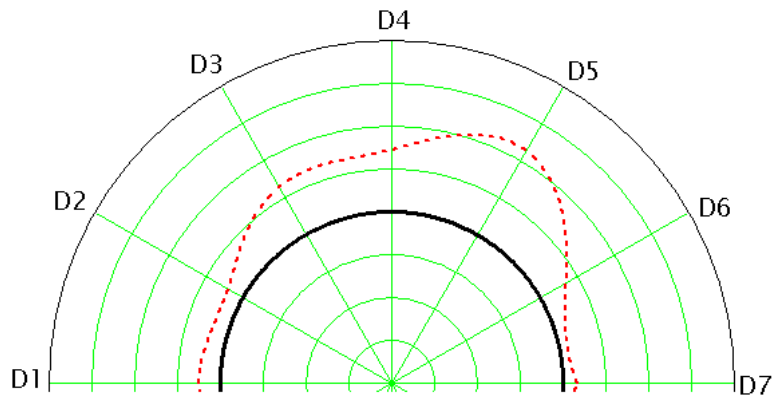


Рисунок 2.27 – Распределение давления в грунте; высота эквивалентной засыпки 20,0 м (1 радиальное деление – 250 кПа)

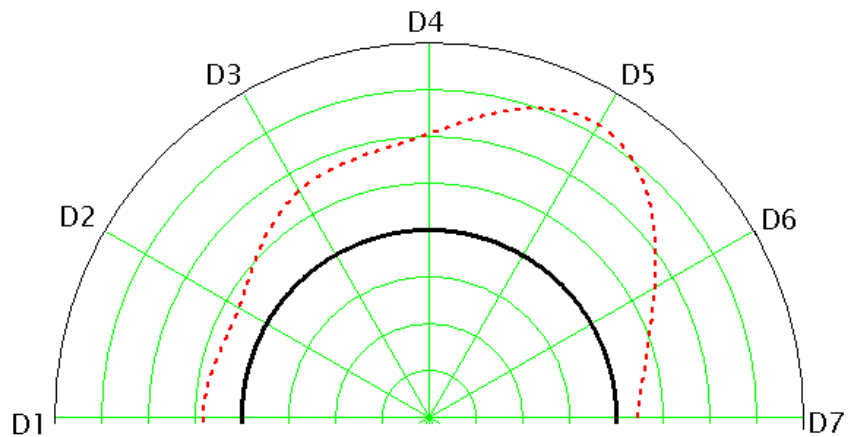


Рисунок 2.28 – Распределение давления в грунте; высота эквивалентной засыпки 30,0 м (1 радиальное деление – 250 кПа)

Как показывает анализ экспериментальных эпюр давления грунта на гофрированную конструкцию, ожидаемой симметрии распределения давления не наблюдается, причем асимметрия увеличивается по мере увеличения высоты засыпки.

Возможными причинами такой несимметрии распределения давления грунта могут быть или нарушение синхронности работы домкратов во время испытаний, или же неоднородность уплотнения грунта засыпки, в результате чего с левой стороны сначала происходило доуплотнение грунта и только потом давление передавалось на зоны вблизи гофрированной конструкции.

Форма деформированного состояния сечения модели МГК в зависимости от высоты эквивалентной засыпки представлена на рисунках 2.29, 2.30, 2.31.

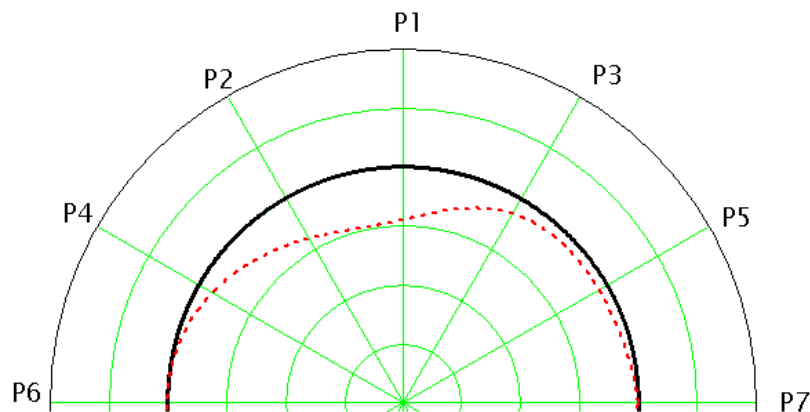


Рисунок 2.29 – Форма деформации МГК; высота эквивалентной засыпки 12,5 м (1 радиальное деление –50 мм)

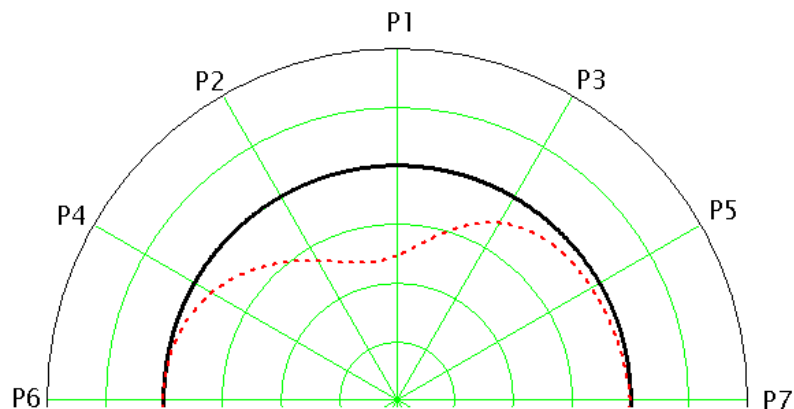


Рисунок 2.30 – Форма деформации МГК; высота эквивалентной засыпки 20,0 м (1 радиальное деление –50 мм)

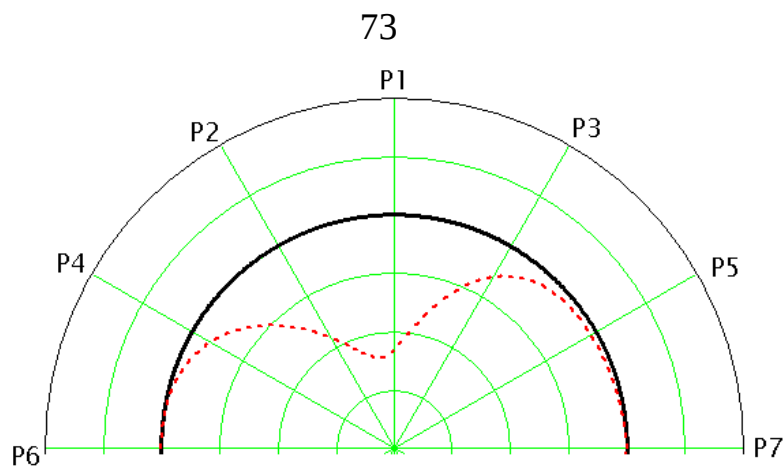


Рисунок 2.31 – Форма деформации МГК; высота эквивалентной засыпки 30,0 м (1 радиальное деление – 50 мм)

Анализ эпюр радиальных перемещений подтверждает высказанное предположение о неравномерности уплотнения грунта в засыпке. С правой стороны, там, где грунт был хорошо уплотнен, он начал работать в виде дополнительного свода совместно с гофрированной конструкцией, создавая дополнительный отпор и препятствуя перемещению правой части конструкции. В левой части конструкции давлению грунта сопротивлялась в основном гофрированная конструкция, жесткость которой оказалась меньше и потому с левой стороны конструкции мы наблюдаем несколько большие перемещения.

Как показывают графики на рисунках 2.29, 2.30, 2.31 перемещения в модели МГК возрастали с увеличением высоты условной засыпки. Переход материала фрагментов МГК в пластическое состояние определялся по деформации большей $15 \cdot 10^{-4}$ отн.ед., что соответствует напряжению 300 МПа.

Появление пластических деформаций в фрагментах МГК произошло при значении высоты условной засыпки 12,5 м (640 секунда процесса нагружения). Первыми условное напряжение большее 300 МПа зарегистрировали тензодатчики, находящиеся в вершинах сводов фрагментов МГК. Соответствующие данной условной высоте эквивалентной грунтовой засыпки показания тензорезисторов и датчиков относительных перемещений приведены в таблице 2.3.

Устойчивое развитие пластических деформаций в испытываемой модели МГК произошло при втором варианте нагружения, соответствующей условной высоте эквивалентной засыпки 20,0 м.

Испытания были остановлены при достижении уровня нагружения, соответствующего высоте эквивалентной засыпки 30,0 м. Указанное значение превосходит значение условной высоты эквивалентной засыпки, при которой возникли пластические деформации в модели исследуемой МГК (12,5 м) приблизительно в 2,5 раза. Несмотря на столь значительную величину действующих нагрузок, исследуемая модель МГК не потерпела катастрофического разрушения. Осмотр модели МГК после испытаний не выявил ни общей потери устойчивости конструкции модели МГК, ни нарушения болтовых соединений гофрированных листов. Изучение модели МГК после изъятия из грунтового массива подтвердило целостность модели МГК и элементов соединения гофрированных листов [7].

2.3.2 Динамические испытания полукруговой арочной металлической гофрированной конструкции, имитирующие сейсмические воздействия, и анализ их результатов

Объектом исследования являлась арочная МГК кругового очертания, с углом кругового сектора $\varphi = 182^\circ$ (полукруговая арка). МГК выполнена из гофрированных листов профилем 381x140 мм, толщиной 4 мм. Пролет арки составлял 5,0 м, высота 2,55 м. Испытания проводились с применением сейсмоплатформы СГД-75. Сейсмоплатформа СГД-75 представляет собой прямоугольную металлическую конструкцию размером 11,3*5,0*0,5 м, установленную с зазором внутри жесткого обрамления коробчатой формы на пневматических элементах подушечного типа. На сейсмоплатформе закреплен лоток с жесткими стенками. Размеры внутренней полости лотка

составляют 9,5*2,6*4,0 м. Испытательная установка расположена на открытой площадке (рисунок 2.32).



Рисунок 2.32 – Общий вид камеры сеймоплатформы СГД-75

Для обеспечения требуемого по условиям испытаний движения сеймоплатформы используется силовой привод, состоящий из набора пороховых толкателей, пневматических и гидравлических активаторов, с помощью которых реализуется импульсное нагружение, вибромашин для воспроизведения вибрационного нагружения и системы программного управления их действием. В результате суперпозиции этих процессов и их наложения на колебание упруго опертой сеймоплатформы формируется испытательное нагружение с заданными параметрами. Сеймоплатформа может совершать как однонаправленное (горизонтальное, вертикальное), так и многокомпонентное, включающее вращательные составляющие, движение.

Управление параметрами испытательного движения помимо программного включения в действие устройств силового привода производится путем вариации характеристик пороховых толкателей (масса, тип заряда), пневматических и пневмогидравлических активаторов (величина давления, дроссельное сопротивление, уровень заполнения и т.д.), расположения и режимов работы вибромашин. В результате целенаправленного выбора характеристик силового привода на

сейсмоплатформе обеспечивается реализация трех основных видов сейсмических воздействий:

- «ударносейсмического», воспроизводящего сотрясение заглубленных конструкций при воздействии, например, близких промышленных взрывов;
- «жесткосейсмического», имитирующего, в частности, сейсмические колебания на высоких (12 м и выше) отметках зданий и сооружений, а также воспроизводящие, в соответствии с законами подобия, условия сейсмических испытаний маломасштабных моделей заглубленных конструкций;
- «мягкосейсмического», имитирующего движение грунта и натурных или крупномасштабных образцов заглубленных конструкций в условиях землетрясений различной интенсивности.

Пределы изменения амплитудно-временных значений движения сейсмоплатформы при этих видах испытаний представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Параметры испытательных режимов

Типы режима нагружения	Ускорения (g) по осям		Скорости (м/с) по осям		Смещения (м) по осям		Длительности нагружения, с
	oz	ox(oy)	oz	ox(oy)	oz	ox(oy)	
Ударно-сейсмический	+15/-2	±30	+3/-1	±3	+0,1	±0,1	до 1,0
Жестко-сейсмический	±7/-2	±10	±2	±2	±0,2	±0,2	до 10,0
Мягко-сейсмический	±2	±2	±1	±1	+0,3/-0,2	±0,5	до 60,0

При проведении экспериментальных исследований модели МГК полукружного сечения в условиях имитации действия сейсмической нагрузки фиксировались основные параметры напряженно-деформированного состояния испытуемой МГК и грунтовой среды засыпки. К регистрируемым параметрам относятся: прогибы арки; относительные деформации на вершинах и впадинах гофра; давление грунта в прилегающей к МГК области засыпки. Измерения производились в центральном продольном сечении лотка сейсмоплатформы с целью снижения влияния граничных условий. Все датчики деформаций ориентированы вдоль гофра.

Измерению и регистрации подлежали следующие параметры движения сейсмоплатформы: ускорения в вертикальном и горизонтальном направлениях с амплитудами до $\pm 50 \text{ м/с}^2$ (5g) и с частотным диапазоном $0 \div 100 \text{ Гц}$; смещения в вертикальном и горизонтальном направлениях с амплитудами до $\pm 0.25 \text{ м}$ и с частотным диапазоном $0 \div 10 \text{ Гц}$; относительные смещения точек МГК с амплитудами до $\pm 0.06 \text{ м}$ и с частотным диапазоном $0 \div 10 \text{ Гц}$; давления грунта с амплитудами до 10 кг/см^2 и с частотным диапазоном $0 \div 30 \text{ Гц}$.

Схема расстановки датчиков представлена на рис. 2.33 (продольный разрез в центральном сечении лотка). Всего установлено 40 датчиков, в том числе 14 датчиков относительных деформаций (тензорезисторов) материала МГК (№№ Т1÷Т14), 7 датчиков прогиба (относительных перемещений) точек МГК (№№ Р1÷Р7), 7 датчиков давления грунта (№№ D1÷D7), 4 датчика вертикальных и горизонтальных ускорений сейсмоплатформы (№№ А166, А192, А184, А193), 4 датчика вертикальных и горизонтальных перемещений сейсмоплатформы (№№ Р8÷Р11).

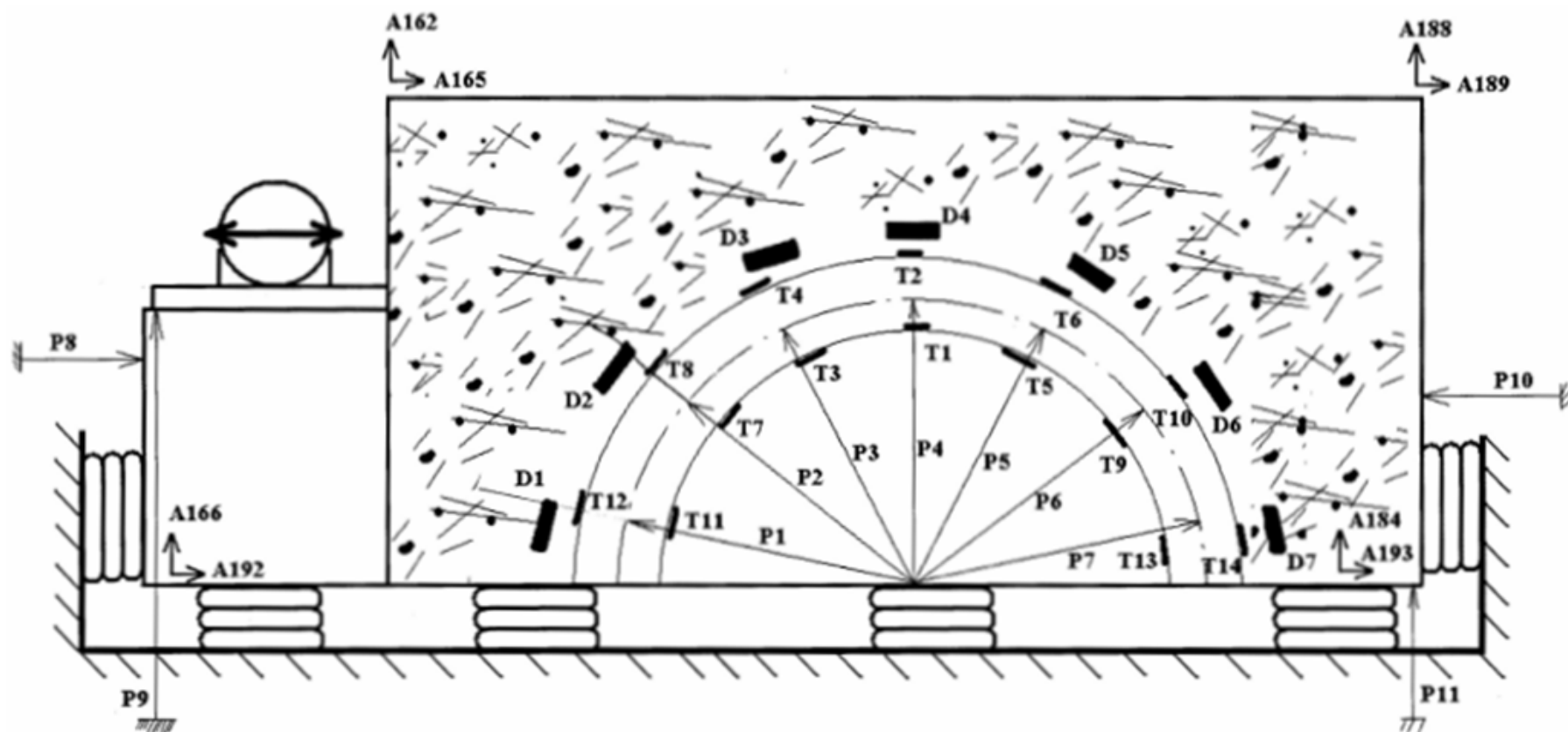


Рисунок 2.33 – Схема расположения датчиков

Представленные в настоящей главе диссертации испытания воспроизводят сейсмические колебания арки из МГК и окружающего грунта засыпки в процессе землетрясения с повторяемостью 1 раз в 500 лет. Пиковое значение горизонтального ускорения грунта в основании МГК при землетрясении составляет 0,253 g, пиковое значение вертикального ускорения – 0,152 g, а расчетная сейсмичность 8,3 балла по шкале MSK-64.

Вид акселерограмм вертикального и горизонтального расчетного испытательного движения сейсмоплатформы показан на рисунках 2.34 и 2.35. На этих рисунках приведены также графики изменения во времени ускорения верха стенки грунтового лотка сейсмоплатформы в горизонтальном и вертикальном направлениях при проведении опытов. Эти графики представляют собой выделенную искусственно часть существенно более длительного процесса колебаний сейсмоплатформы (45-50 с) и соответствуют наиболее интенсивной стадии сейсмического нагружения – взаимного наложения импульсивной и вибрационной составляющих возбуждаемых колебаний. Рассматриваемая часть процесса находится в интервале от 16,8 до 26,8 с.

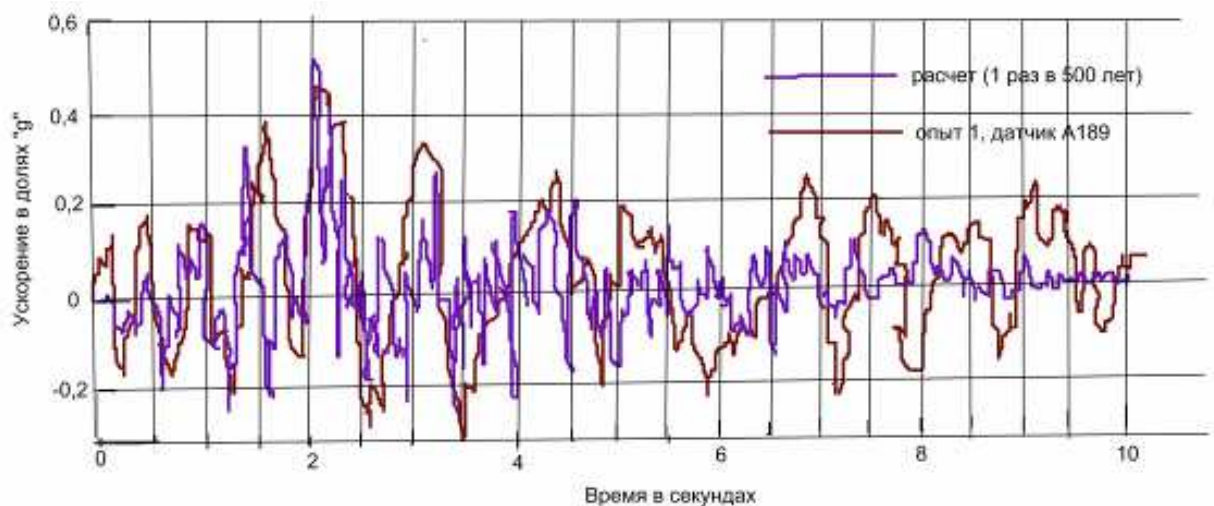


Рисунок 2.34 – Расчетная и опытная акселерограммы горизонтального испытательного движения сейсмоплатформы

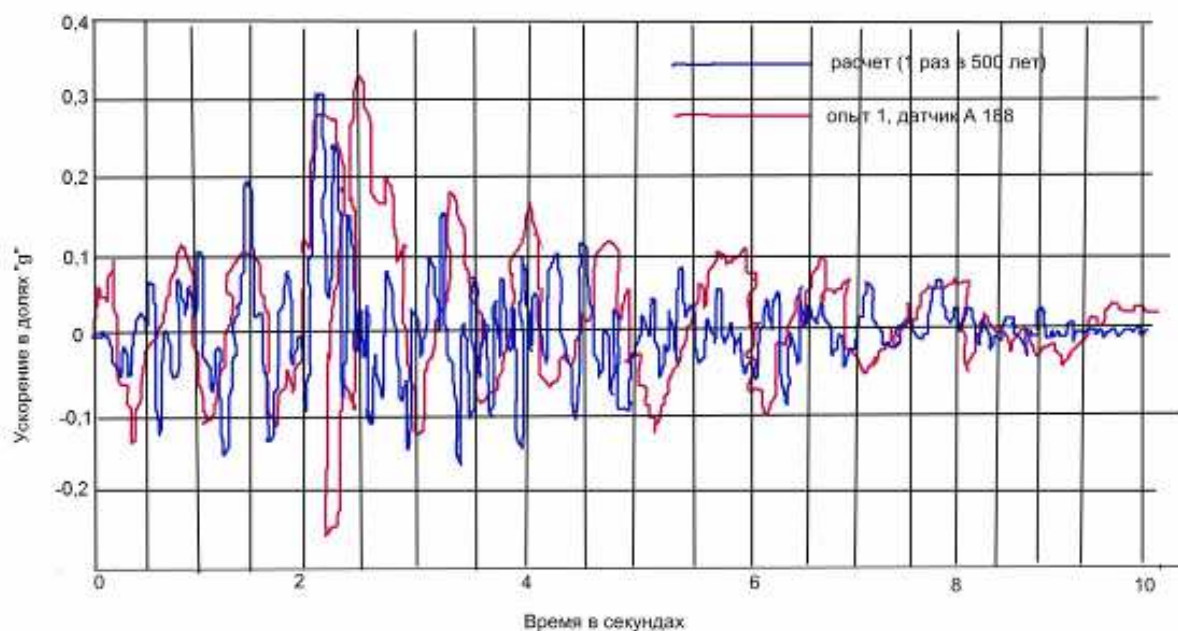


Рисунок 2.35 – Расчетная и опытная акселерограммы вертикального испытательного движения сейсмоплатформы

Расчетные акселерограммы получены с помощью программного комплекса ANSYS, при этом, учтены особенности поведения грунтовой среды при динамических нагрузениях [8].

Из сравнения расчетных и опытных акселерограмм на рисунках 2.34, 2.35 можно отметить вполне удовлетворительное соответствие частотно-временных характеристик моделируемого и испытательного сейсмического нагружения и пиковых значений процессов, особенно для горизонтальной составляющей. Амплитуды ускорения вертикального движения сеймоплатформы в экспериментах изменяются в более широком диапазоне, чем это требуется из данных расчета, и опытные акселерограммы огибают расчетную практически во всем временном интервале. Это приводит к некоторому избыточному нагружению испытываемой модели грунтозасыпной МГК в вертикальном направлении. В целом, условия испытательного нагружения модели можно оценить как соответствующие с незначительным консерватизмом требованиям моделирования и удовлетворяющие целям экспериментов.

Результаты испытаний

В таблицах 2.7 – 2.10 представлены полученные в результате обработки опытных данных максимальные значения знакопеременных амплитуд изменения параметров напряженно-деформированного состояния системы «арка из МГК – грунт» на трех стадиях испытательного процесса. Согласно показаниям датчиков сейсмические нагрузки испытываемой модели послужили причиной весьма умеренной и далекой от критической, динамической деформации конструкций арки и окружающего грунта.

Таблица 2.7 – Максимальные перемещения точек центрального поперечного сечения модели МГК на стадиях процесса динамической деформации

Точка измерения		1	2	3	4	5	6	7
Номер датчика		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Максимальные перемещения, мм, на стадиях процесса	1	0	- 0,81/ -0,52	- 0,70/ -0,50	- 0,42/ -0,40	- 0,52/ -0,20	+0,40/ +0,30	0
	2	0	+0,61	+0,75	-0,20	-0,70	-0,65	0
	3	0	-0,39	-0,50	-0,60	-0,40	+0,3	0

Таблица 2.8 – Максимальные относительные деформации материала гофролистов (вершина гофра) на стадиях процесса динамической деформации

Точка измерения		1	2	3	4	5	6	7
Номер датчика		T11	T7	T3	T1	T5	T9	T13
Относительные деформации, 10^{-4} на стадии процесса	1	- 0,22/ -0,20	+0,30/ +0,16	+0,32/ +0,15	- 0,30/ -0,11	+0,41/ +0,35	-0,40/ -0,35	- 0,37/ -0,35
	2	-0,19	-0,25	-0,51	+0,31	+0,51	+0,32	+0,18
	3	-0,21	-0,08	+0,10	+0,25	+0,40	-0,38	-0,45

Таблица 2.9 – Максимальные относительные деформации материала гофролистов (впадина гофра) на стадиях процесса динамической деформации

Точка измерения		1	2	3	4	5	6	7
Номер датчика		T12	T8	T4	T2	T6	T10	T14
Относительные деформации, 10^{-4} на стадии процесса	1	+0,10/ +0,08	-0,36/ -0,17	-0,40/ -0,20	~ 0	-0,40/ -0,28	+0,21/ +0,19	+0,13/ +0,10
	2	+0,21	+0,24	+0,50	~ 0	-0,31	-0,25	-0,13
	3	+0,12	+0,02	+0,21	~ 0	-0,29	+0,27	+0,20

Таблица 2.10 – Максимальные значения давления грунта на удалении (~ 10 см) от модели МГК в ее центральном поперечном сечении на стадиях процесса динамического нагружения

Точка измерения		1	2	3	4	5	6	7
Номер датчика		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Давления, кПа, на стадии процесса	1	-9,0/ -4,0	+1,5/ +1,0	+9,0/ +5,0	+0,8/ +0,4	+12,0/ +10,0	+2,2/ +2,0	~ 0
	2	+8,5	+4,0	+13,0	+1,5	-7,0	-1,0	~ 0
	3	-4,0	-4,0	+5,0	~ 0	+7,5	+1,0	~ 0

Максимальные величины прогиба МГК вдоль периметра центрального поперечного сечения изменялись в диапазоне от 0,40 мм до -0,81 мм на первой стадии нагружения, от 0,75 мм до - 0,70 мм на второй и от 0,3 мм до - 0,6 мм на третьей стадиях, максимальные динамические напряжения в материале гофролистов ($E=2 \cdot 10^5$ МПа) на вершинах гофра: от 8,2 МПа до - 7,4 МПа (первая стадия) и от 10,2 МПа до - 10,2 МПа (вторая стадия) и от 8,0 МПа до - 9,0 МПа (третья стадия), на впадинах гофра: от 4,2 МПа до - 8,0 МПа, от 10,0 МПа до - 6,2 МПа и от 5,4 МПа до - 5,9 МПа соответственно. Давления в грунтовой среде вокруг МГК изменялись в диапазоне от 12,0 кПа до - 9,0 кПа (первая стадия), от 13,0 кПа до - 7,0 кПа (вторая стадия) и от 7,5 кПа до - 4,0 кПа (третья стадия).

В качестве стадий, определяющих напряженно-деформированное состояние системы «арка из МГК – грунт» можно выделить первую (вибрационную) и вторую (импульсивно-вибрационную активную) стадии испытательного нагружения.

Необходимо отметить, что, как и во время активной фазы (вторая стадия), максимальные значения параметров состояния МГК и давления грунта на первой

стадии реализуются практически синхронно с максимальными амплитудами ускорения сейсмоплатформы. Отличия во временах достижения максимумов процессов в различных точках измерений не превышают $0,1 \div 0,2$ с, их появление связано с эффектами фактически существующей деформируемости конструкций сейсмоплатформы, сжимаемости грунтовой среды и возможности взаимной подвижности гофролистов в болтовых отверстиях. Точная оценка отмеченных эффектов при анализе показаний опытов затруднена.

В связи с этим приемлемым для получения консервативных оценок является условный прием объединения табличных (таблицы 2.7 – 2.10) амплитудных значений при построении эпюр (рисунки 2.36 – 2.39), характеризующих состояние МГК и грунта, несмотря на некоторую разновременность достижения максимумов в точках измерений. Вид эпюр динамической деформации центрального сечения МГК (рисунок 2.36), указывает на превалирующее влияние обжатия арки на основной части периметра сечения на первой стадии нагружения и существенно несимметричный прогиб гофролистов на второй активной стадии нагружения с образованием области вдавливания со стороны действия пневматического активатора. В целом наблюдаются аналогичные закономерности формирования динамических напряжений в материале гофролистов на вершинах (рисунок 2.37) и на впадинах (рисунок 2.38) гофров, а также в прилегающей к МГК грунтовой среде (рисунок 2.39). Следует отметить близость по модулю опытных значений динамических напряжений на вершинах и впадинах гофра и подобие их распределения по периметру МГК, положительные значения которых соответствуют сжатию материала, отрицательные – растяжению материала. Такая картина деформации гофрированной поверхности свидетельствуют об упругой работе материала МГК. С учетом этого обстоятельства наиболее вероятной причиной появления выявленного при анализе опытных данных нелинейного эффекта – образования остаточных прогибов МГК – может быть проскальзывание болтов в болтовых отверстиях при действии интенсивных динамических испытательных нагрузок. Вид центрального поперечного сечения МГК после окончания опыта иллюстрируется опытной эпюрой на рисунке 2.40. Анализ

рисунка позволяет отметить почти равномерное остаточное обжатие сборной листовой конструкции арки с максимальным остаточным прогибом в своде (0,6 мм) [8].

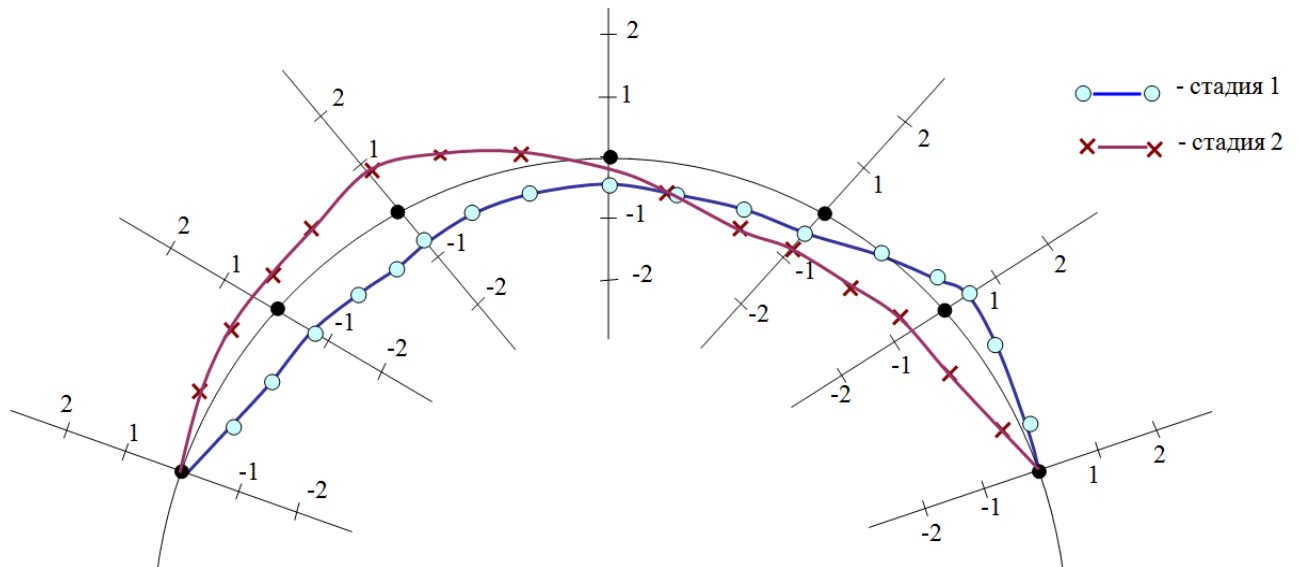


Рисунок 2.36 – Деформация центрального сечения МГК (мм) при максимальном нагружении

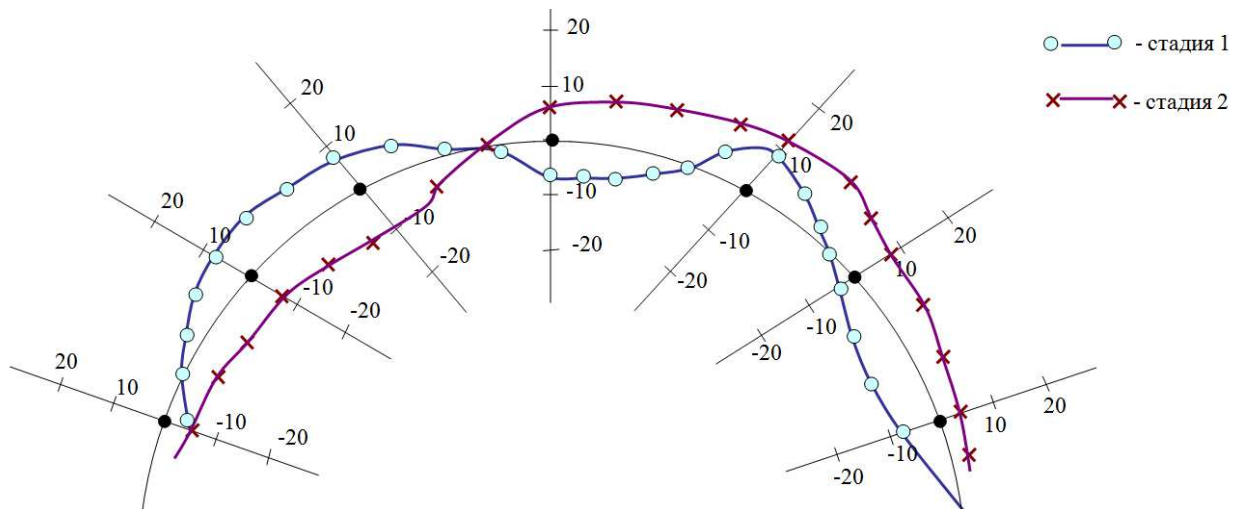


Рисунок 2.37 – Динамические напряжения в материале гофролистов (МПа) центрального поперечного сечения МГК (вершина гофра) в момент максимальной деформации

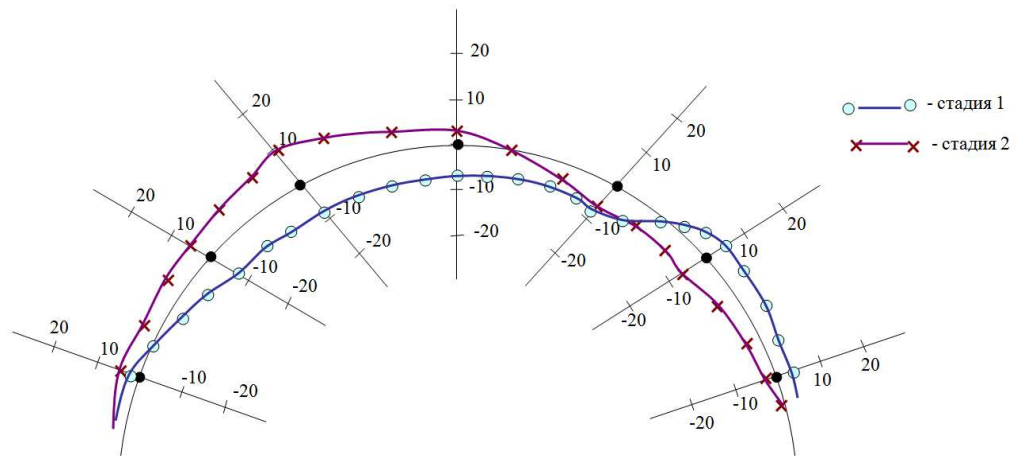


Рисунок 2.38 – Динамические напряжения в материале гофролистов (МПа) центрального поперечного сечения МГК (впадина гофра) в момент максимальной деформации

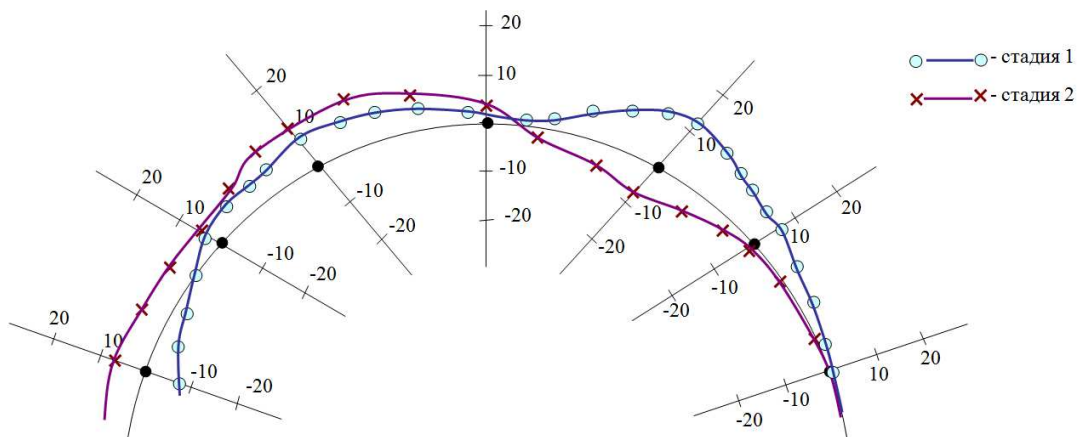


Рисунок 2.39 – Распределение динамического давления в грунте (кПа) около МГК при максимальном нагружении

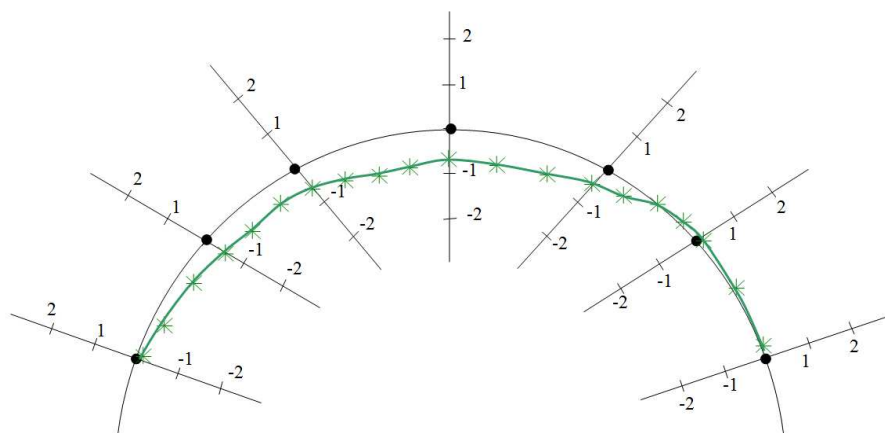


Рисунок 2.40 – Деформированное состояние центрального сечения МГК (мм) после завершения опыта

Выводы по результатам динамических испытаний:

1. В соответствии с полученными данными, следует ожидать, что конструкция без ущерба выдержит сейсмические воздействия при условии сохранности фундаментных опор арки. При этом максимальные значения прогиба МГК в поперечном сечении не превысят 2 мм, а максимальные динамические напряжения в материале гофров – 11 МПа (для сравнения расчетное сопротивление для стали 09Г2-12 составляет 290 МПа).

2. Обследование модели после опыта и данные экспресс – обработки записей датчиков подтвердили вполне удовлетворительное состояние металлических конструкций МГК, отсутствие каких-либо повреждений болтовых соединений гофролистов, нарушений сплошности грунтовой засыпки. Как следствие, можно предположить, что испытанная конструкция способна выдерживать и более интенсивные сейсмические воздействия.

3. Результаты проведенных испытаний могут быть использованы при построении и идентификации динамической модели гофрированной металлической конструкции, основанной на использовании моментной и полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова.

2.4 Расчет металлической гофрированной конструкции методом конечных элементов

В работе [7] проводился расчет подобной конструкции методом конечных элементов с использованием программного комплекса «Зенит-95». На рисунках 2.41, 2.42 и 2.43 приведены графики, иллюстрирующие изменение формы модели МГК при различных вариантах приложения расчетной нагрузки, полученные при расчете методом конечных элементов, в сравнении с формами, полученными при экспериментах.

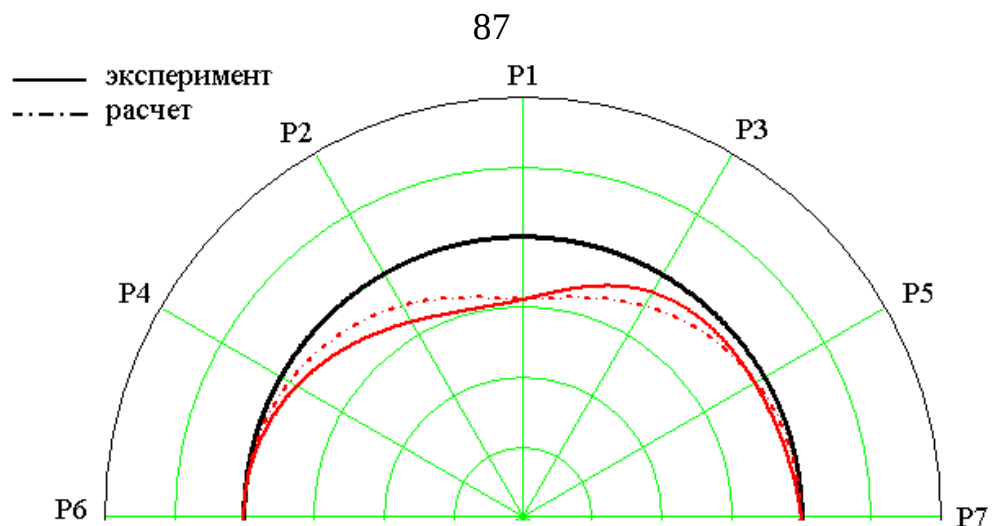


Рисунок 2.41 – Экспериментальная и расчетная форма деформации МГК для варианта нагружения 1 (1 радиальное деление –50 мм)

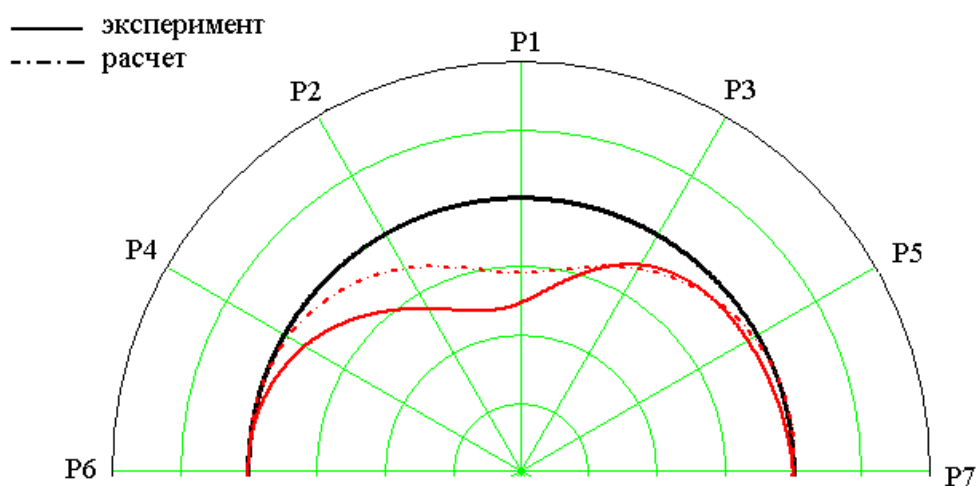


Рисунок 2.42 – Экспериментальная и расчетная форма деформации МГК для варианта нагружения 2 (1 радиальное деление –50 мм)

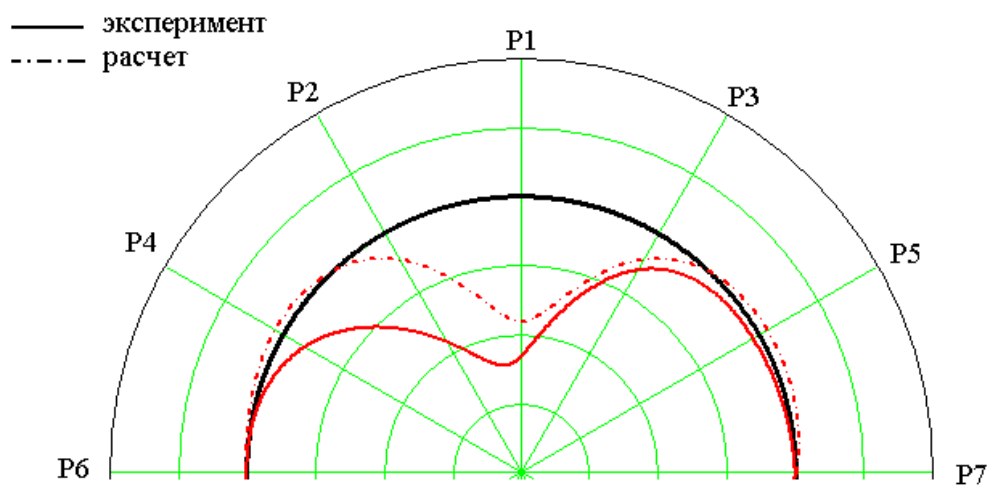


Рисунок 2.43 – Экспериментальная и расчетная форма деформации МГК для варианта нагружения 3 (1 радиальное деление –50 мм)

На рисунках 2.44, 2.45 и 2.46 приведено распределение нормальных напряжений по сечению МГК (расчетных и экспериментальных) в зависимости от варианта расчетной нагрузки.

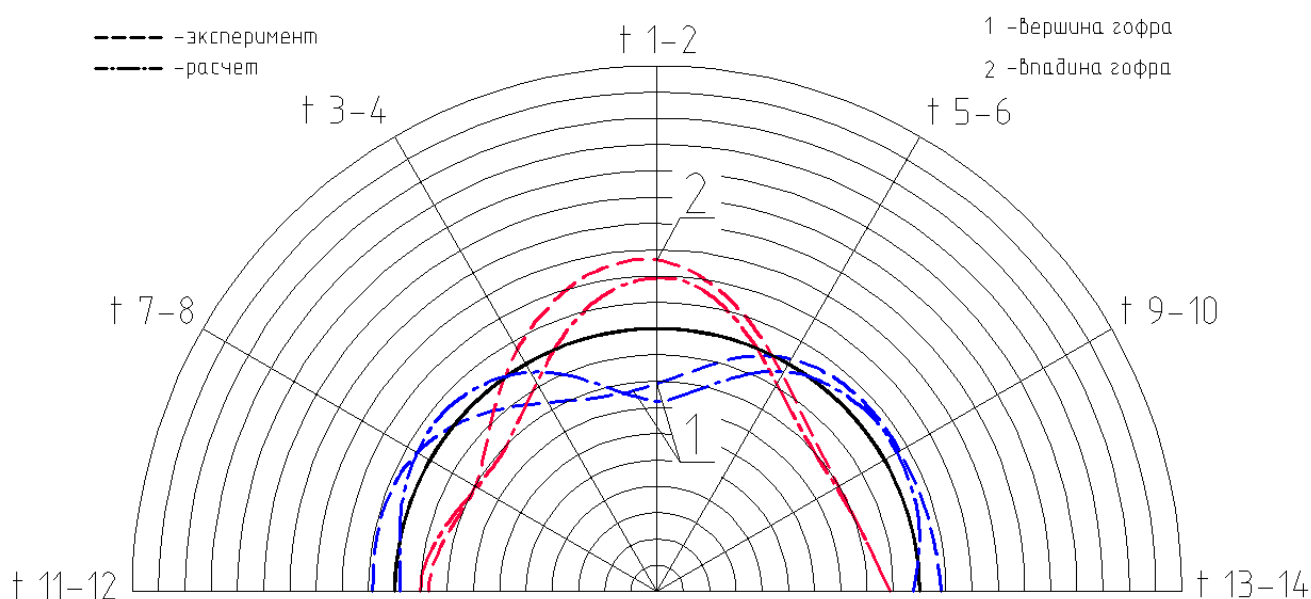


Рисунок 2.44 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 1 (1 радиальное деление – 100 МПа)

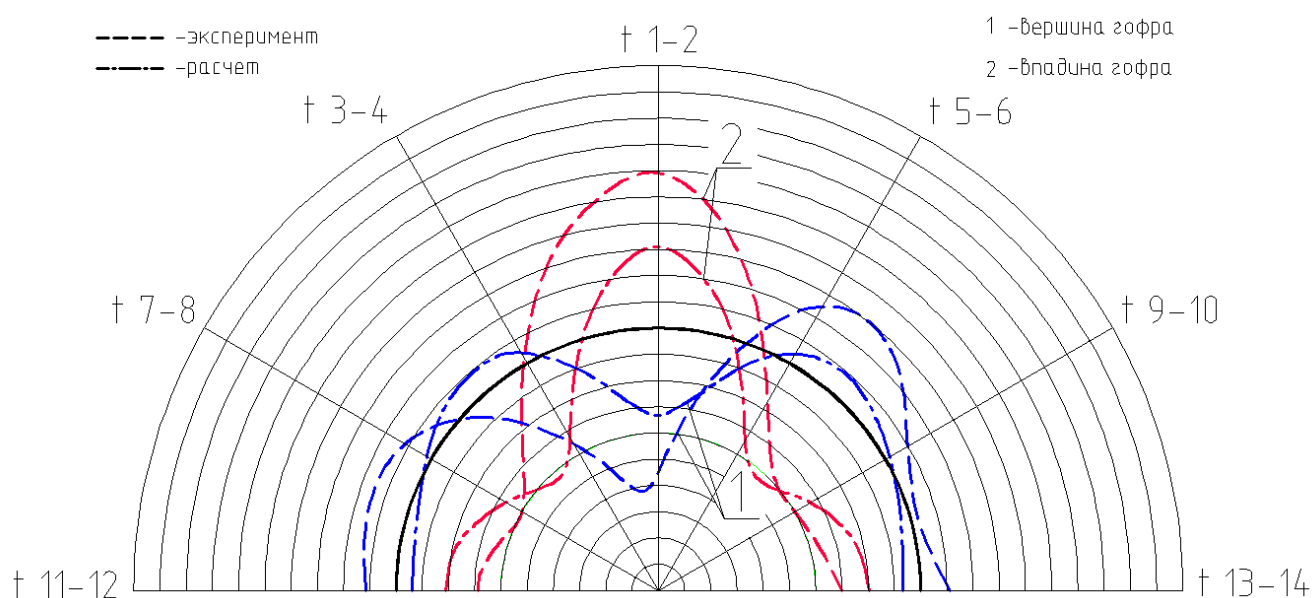


Рисунок 2.45 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 2 (1 радиальное деление – 100 МПа)

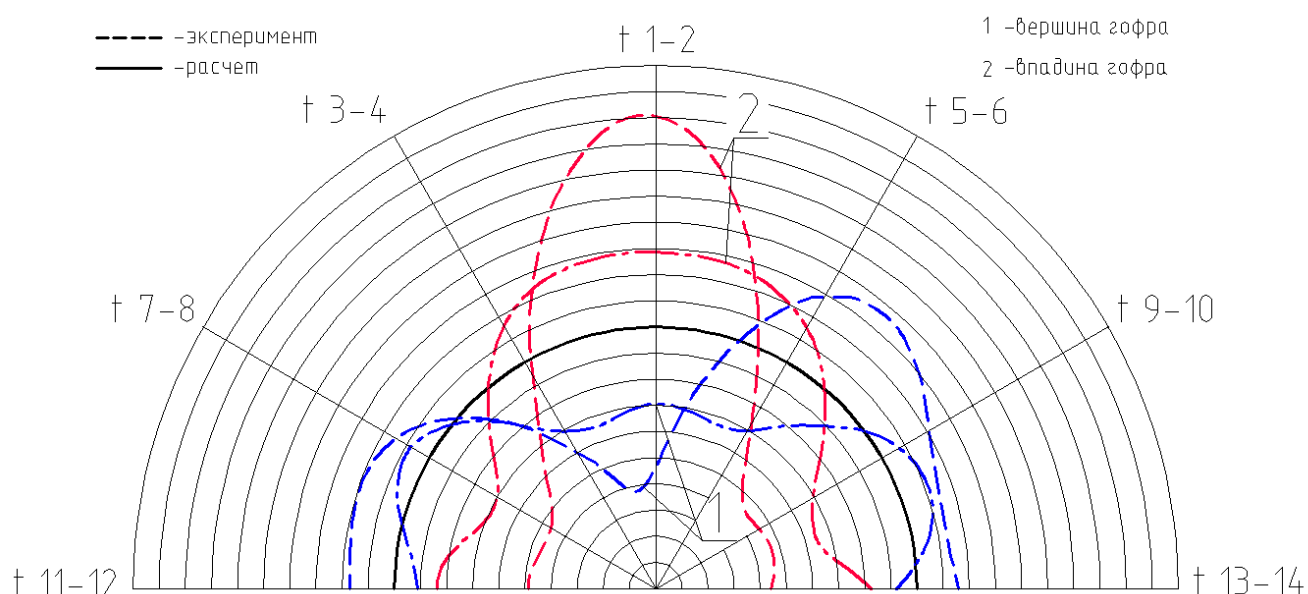


Рисунок 2.46 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 3 (1 радиальное деление – 100 МПа)

2.5. Расчет металлической гофрированной конструкции как арочного свода методом сил

Возможным вариантом расчета МГК, испытанной в рамках описанного выше статического эксперимента является расчет с применением «плоской» расчетной схемы, где МГК представляется в виде криволинейного стержня кругового очертания с геометрическими и прочностными характеристиками для ширины 1,0 м, а нагрузки также прикладываются к приведенной ширине 1,0 м. Расчетная схема представлена на рисунке 2.47.

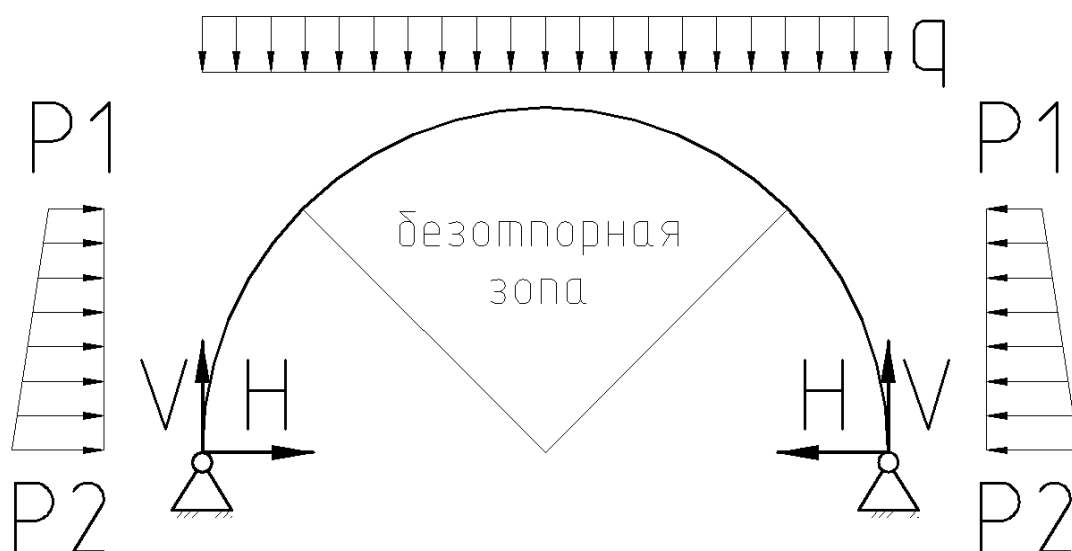


Рисунок 2.47 – Плоская расчетная схема МГК арочного очертания

Для имитации загрузки к расчетной схеме приложена равномерно-распределенная нагрузка, имитирующая 3 стадии загрузки, использованные в статическом эксперименте. Приложенная нагрузка имитирует нагрузку от грунта насыпи разной высоты (от 12,5 до 30 м). Величины равномерно-распределенных нагрузок в зависимости от стадии нагружения представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Значения интенсивности эквивалентной нагрузки для разных вариантов загрузки МГК

Вариант нагружения	q , кН/м	Высота условной засыпки, м
1	170	12,5
2	273	20,0
3	467	30,0

Расчетные значения физико-механических характеристик стали, которые были использованы при разработке расчетной модели, аналогичны характеристикам, представленным в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Основные характеристики материалов

Наименование параметра	Грунт	Сталь (до перехода в пластическое состояние)
Модуль упругости, МПа	22,2	$2 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона	0.3	0.3
Плотность, кг/м/м/м	1700	7 800
Расчетное сопротивление по пределу пластичности, МПа	-	300
Коэффициент сцепления, МПа	0,005	-
Угол внутреннего трения	37	-

В силу статической неопределимости конструкции расчет производился методом сил по методике расчета двухшарнирных арок, опорные узлы которых не допускают перемещения вдоль вертикальной и горизонтальной осей, но допускают поворот в плоскости арки. Очертание арки, принятое в расчете – круговое. Система является один раз статически-неопределимой. Участие в работе конструкции грунтового конверта учитывалось с помощью нагрузений вдоль горизонтальной оси, имитирующих пассивный отпор грунта. Расчет напряжений в гофрированном листе произведен в ПК «Лира-КТС 9.6».

Результаты расчета

В расчетной схеме были определены узлы и области, соответствующие схемам установки тензометрических датчиков и датчиков перемещений, в которых определялись экспериментальные значения контролируемых параметров.

Расчетные значения условных напряжений в материале МГК, перемещений точек сечения МГК, для варианта распределения давления №1, представлены в таблице 2.13. Те же данные для случаев распределения давления №№ 2 и 3 – в таблицах 2.14 и 2.15 соответственно.

Таблица 2.13 – Расчетные значения параметров состояния МГК для варианта нагружения 1

Максимальная амплитуда условного напряжения в точках МГК, МПа							
T1	T2	T5	T6	T9	T10	T13	T14
213	-242	49	-5	-193	288	-47	-47
Относительные перемещения точек центрального сечения МГК, мм							
P1		P3		P5		P7	
-44		-31		-12		0	

Таблица 2.14 – Расчетные значения параметров состояния МГК для варианта нагружения 2

Максимальная амплитуда условного напряжения в точках МГК, МПа							
T1	T2	T5	T6	T9	T10	T13	T14
361	-401	32	-144	-394	304	-83	-83
Относительные перемещения точек центрального сечения МГК, мм							
P1		P3		P5		P7	
-63		-42		-15		0	

Таблица 2.15 – Расчетные значения параметров состояния МГК для варианта нагружения 3

Максимальная амплитуда условного напряжения в точках МГК, МПа							
T1	T2	T5	T6	T9	T10	T13	T14
560	-617	156	-102	-643	421	-103	-103
Относительные перемещения точек центрального сечения МГК, мм							
P1		P3		P5		P7	
-91		-59		21		0	

Сравнение результатов расчета методом сил с экспериментом

При сравнении рассматривались три варианта нагружения модели МГК. Практический интерес представляет сравнение всех параметров напряженно-деформированного состояния модели МГК.

На рисунках 2.48, 2.49 и 2.50 приведены графики, иллюстрирующие изменение формы модели МГК при различных вариантах приложения расчетной нагрузки, в сравнении с формами, полученными при экспериментах.

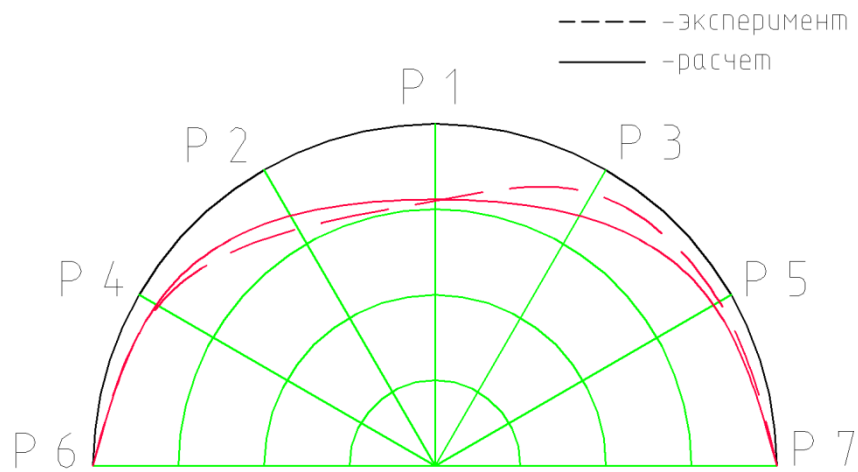


Рисунок 2.48 – Экспериментальная и расчетная форма деформации МГК для варианта нагружения 1 (1 радиальное деление –50 мм)

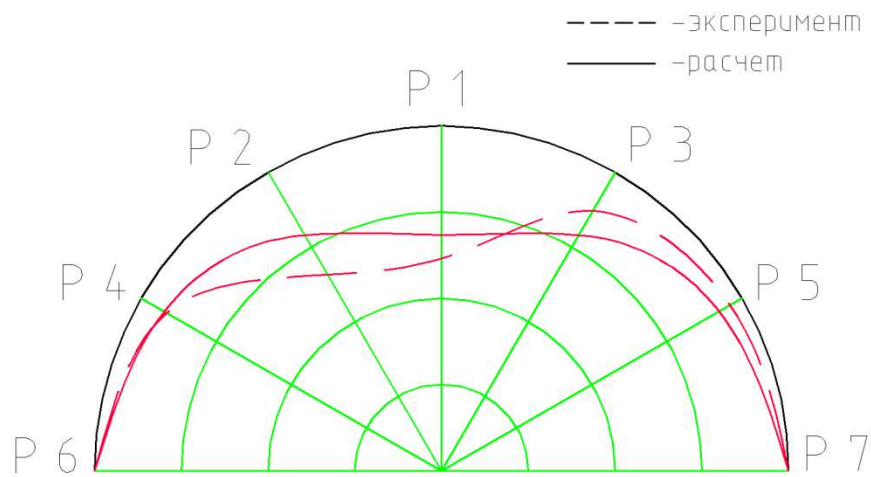


Рисунок 2.49 – Экспериментальная и расчетная форма деформации МГК для варианта нагружения 2 (1 радиальное деление –50 мм)

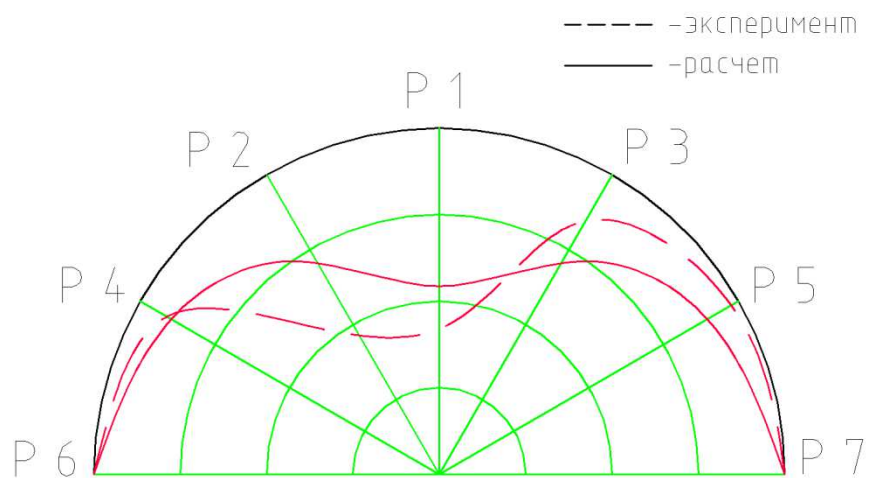


Рисунок 2.50 – Экспериментальная и расчетная форма деформации МГК для варианта нагружения 3 (1 радиальное деление –50 мм)

На рисунках 2.51, 2.52 и 2.53 приведено распределение нормальных напряжений по сечению МГК (расчетных и экспериментальных) в зависимости от варианта расчетной нагрузки.

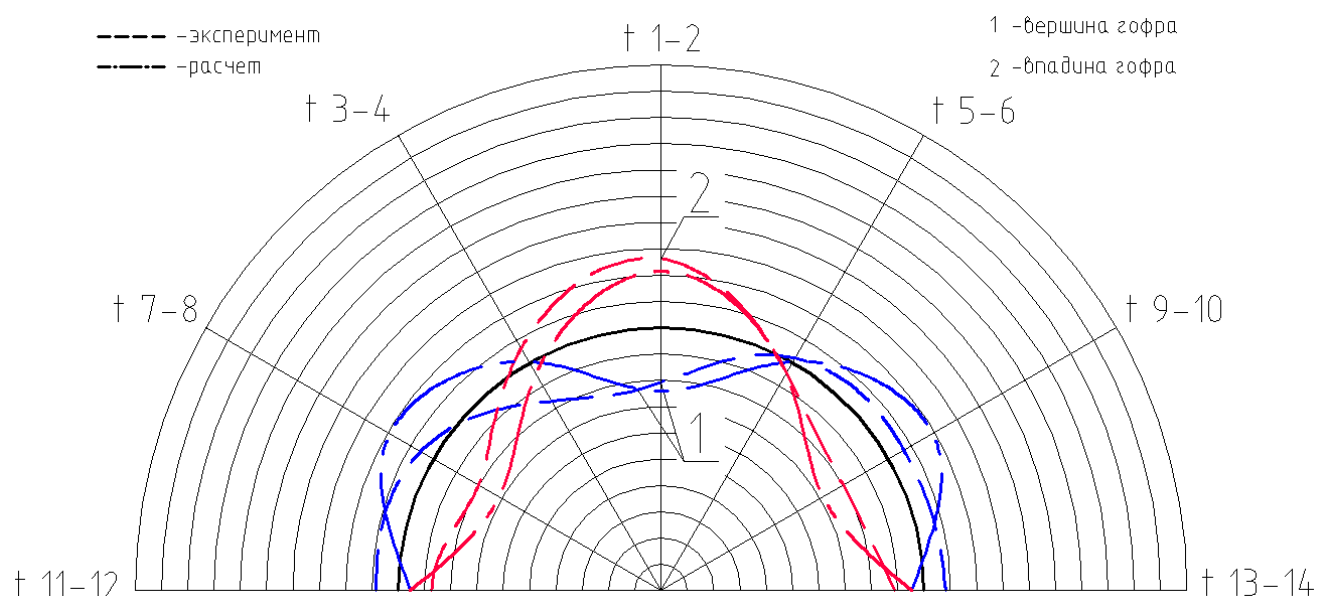


Рисунок 2.51 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 1 (1 радиальное деление – 100 МПа)

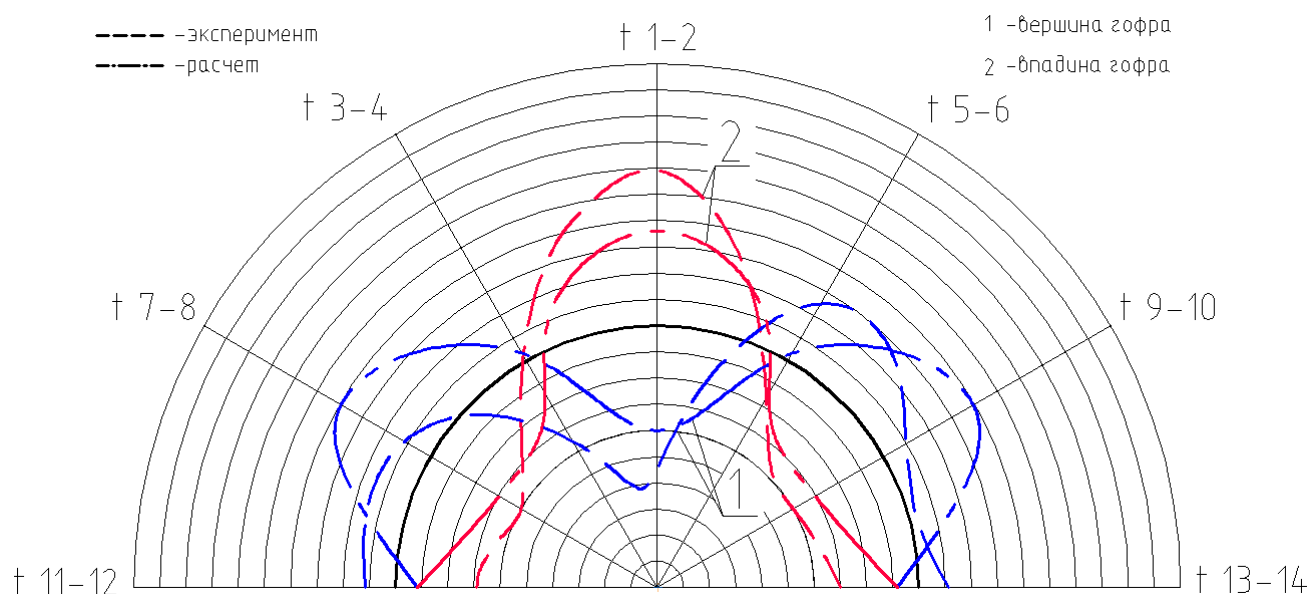


Рисунок 2.52 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 2 (1 радиальное деление – 100 МПа)

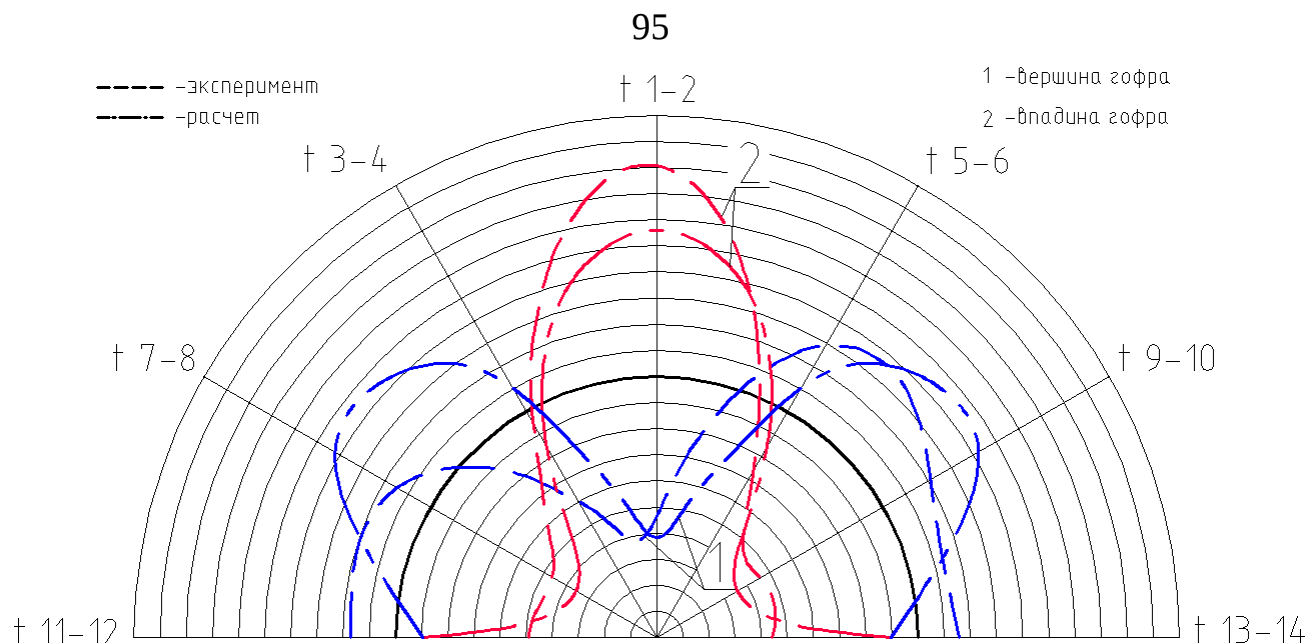


Рисунок 2.53 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 3 (1 радиальное деление – 100 МПа)

Сравнение графиков на рисунках 2.48 – 2.53 показывает, что расчетные значения и перемещений и напряжений в МГК в определенной мере соответствуют экспериментальным данным. При этом следует учитывать, что в эксперименте имела место несимметрия в характере напряженно-деформированного состояния, а в расчете эта несимметрия не учитывалась.

2.6. Сравнение результатов расчета методом сил и методом конечных элементов с экспериментом

Выполним сравнение расчетных значений нормальных напряжений и прогибов МГК, полученных разными методами (методом сил и методом конечных элементов) с экспериментальными. Сравнение значений нормальных напряжений представлено в таблицах 2.16; 2.17, 2.18; сравнение значений перемещений представлено в таблице 2.19, 2.20, 2.21.

Таблица 2.16 – Значение нормальных напряжений при загрузении 1

Метод определения напряжений	Местоположение фиксируемых напряжений	Значения нормальных напряжений, Мпа						
		t11-12	t7-8	t3-4	t1-2	t5-6	t9-10	t13-14
Эксперимент	Вершина гофра	+85	+56	-169	-209	+17	+67	+81
Метод сил		-47	+191	+5	-242	+5	+191	-47
Метод конечных элементов		-29	+52	-47	-283	-47	+52	-29
Эксперимент	Впадина гофра	-128	-200	+64	+261	-40	-200	-111
Метод сил		-47	-288	-49	+213	-49	-288	-47
Метод конечных элементов		-105	-218	-94	+183	-94	-218	-105

Таблица 2.17– Значение нормальных напряжений при загрузении 2

Метод определения напряжений	Местоположение фиксируемых напряжений	Значения нормальных напряжений, Мпа						
		t11-12	t7-8	t3-4	t1-2	t5-6	t9-10	t13-14
Эксперимент	Вершина гофра	+115	+115	-356	-550	+249	+99	+112
Метод сил		-83	+395	+32	-401	+32	+395	-83
Метод конечных элементов		-55	+32	+57	-317	+57	+32	-55
Эксперимент	Впадина гофра	-311	-399	+21	+592	-167	-400	-301
Метод сил		-83	-304	-114	+361	-114	-304	-83
Метод конечных элементов		-178	-324	-317	+301	-317	-324	-178

Таблица 2.18 – Значение нормальных напряжений при загрузении 3

Метод определения напряжений	Местоположение фиксируемых напряжений	Значения нормальных напряжений, Мпа						
		t11-12	t7-8	t3-4	t1-2	t5-6	t9-10	t13-14
Эксперимент	Вершина гофра	+169	+147	-400	-609	+298	+209	+158
Метод сил		-103	+421	+102	-617	+102	+421	-103
Метод конечных элементов		-103	+67	-314	-300	-314	+67	-103
Эксперимент	Впадина гофра	-512	-538	-58	+806	-262	-542	-557
Метод сил		-103	-643	-165	+560	-165	-643	-103
Метод конечных элементов		-185	-318	+146	+268	+146	-318	-185

Таблица 2.19. Значение прогибов при загрузении 1

Метод определения деформации	Значения прогибов, мм						
	P6	P4	P2	P1	P3	P5	P7
Эксперимент	0	13	40	45	16	8	0
Метод сил	0	12	31	44	31	12	0
Метод конечных элементов	0	4	24	45	24	4	0

Таблица 2.20. Значение прогибов при загрузении2

Метод определения деформации	Значения прогибов, мм						
	P6	P4	P2	P1	P3	P5	P7
Эксперимент	0	17	69	77	23	8	0
Метод сил	0	15	42	63	42	15	0
Метод конечных элементов	0	3	26	54	26	3	0

Таблица 2.21. Значение прогибов при загрузении3

Метод определения деформации	Значения прогибов, мм						
	P6	P4	P2	P1	P3	P5	P7
Эксперимент	0	18	108	116	31	5	0
Метод сил	0	21	59	91	59	21	0
Метод конечных элементов	0	-8	27	87	27	-8	0

Выводы по главе 2

1. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что поведение экспериментальной модели металлической гофрированной конструкции под нагрузкой довольно сильно зависит от степени уплотнения грунта в засыпке, через который нагрузка от батареи домкратов передается на испытываемую конструкцию, поэтому при подготовке испытаний следует особое внимание уделять обеспечению одинакового уровня уплотнения грунта с тем, чтобы обеспечить симметричную работу гофрированной конструкции при симметричном нагружении.

2. Так как идеальную симметрию и модели конструкции и уплотнения грунта и характера нагружения в процессе экспериментального моделирования обеспечить невозможно, а моделируемая конструкция весьма чувствительна к несимметричным нагружениям (особенно при нагрузках, близких к критическим), то следует и впредь ожидать не симметричного, а несимметричного (или даже кососимметричного) деформирования конструкции.

3. Учитывая это, следует рекомендовать при строительстве реальных металлических гофрированных конструкций, засыпаемых грунтом, уделять весьма большое внимание однородности грунта засыпки, одинаковой и симметричной степени его уплотнения над конструкцией с тем, чтобы исключить, или хотя бы уменьшить вероятность проявления несимметричного характера деформирования конструкций. Кстати, имеющийся у автора опыт наблюдения в реальных условиях за поведением гофрированных конструкций в случае несимметричного их нагружения в процессе присыпки грунтом подтверждает правильность этого заключения.

4. Как видно из проведенного анализа, применение и метода сил к арочной модели гофрированной металлической конструкции и конечно-элементной модели без учета несимметричности поведения гофрированной конструкции в процессе нагружения, дает результаты, достаточно сильно отличающиеся от экспериментальных данных, особенно при больших нагрузках. Ну и понятно, что так как в расчетных моделях не закладывалась возможность несимметричного поведения, то она не отразилась на результатах расчета.

5. Интересно, то, что при сравнении расчетных и экспериментальных эпюр напряжений можно сделать вывод о том, что использование арочной модели и метода сил для расчета дает более близкие к экспериментальным данным результаты, чем использование конечно-элементной модели.

6. Наконец, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при расчете гофрированной металлической конструкции весьма большое внимание следует уделять не только моделированию поведения самой гофрированной конструкции, но и правильному учету работы грунтовой засыпки с учетом ее возможной неоднородности и включения в работу как дополнительного несущего слоя.

7. В ходе проведенных динамических испытаний было доказано, что МГК хорошо переносят сейсмические и другие динамические нагрузки, тем самым подтверждаются предположения, что МГК, являясь гибкими

конструкциями, могут достаточно широко применяться в сейсмически опасных районах.

8. Можно также предположить, что применение для расчета металлической гофрированной конструкции, взаимодействующей с грунтом под нагрузкой, оболочечной модели (в форме полубезмоментной модели В.З. Власова, или даже уравнений более полной моментной теории оболочек) может оказаться более эффективным, так как позволит учесть возможные случаи неустойчивого деформирования конструкции.

9. Проведенный выше анализ позволяет заключить, что при анализе поведения таких сложных конструкций, как гофрированная оболочка, взаимодействующая с грунтом, проведение экспериментальных исследований является необходимым элементом исследования, так как построение и использование расчетных моделей без учета эффектов, обнаруживаемых в процессе эксперимента, может привести к не всегда правильным выводам о несущей способности и вообще о поведении гофрированных конструкций, взаимодействующих с грунтом.

3 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1 Предпосылки к использованию теории оболочек для расчета металлических гофрированных конструкций

Представленный в главе 1 настоящей работы обзор и анализ применяемых в настоящее время методов расчета металлических гофрированных конструкций, показал, что существует три основных типа методов расчета МГК:

- методы, изначально разработанные для проектирования тоннелей и впоследствии адаптированные для расчета МГК;
- методы, использующие аппарат теории сплошной среды;
- численные методы расчета (МКЭ, МКР, МГЭ и т.д.).

Более подробно данные методы рассмотрены в главе 1 настоящей работы. В данном разделе рассмотрим основные преимущества и недостатки существующих методов расчета МГК.

Говоря об аналитических методах, разработанных для расчета тоннелей и методах, использующих аппарат теории сплошной среды необходимо отметить, что данные методы расчета имеют общий существенный недостаток – они не позволяют рассчитывать задачи в пространственной постановке. Невозможность пространственного расчета приводит к тому, что напряжения, причиной появления которых служат продольные усилия, возникающие в оболочке МГК, не учитываются. Данный факт может привести к весьма существенным различиям между прогнозируемым и фактическим НДС рассчитываемых МГК.

Отдельно необходимо отметить некоторые особенности применения численных методов расчета (в частности, метода конечных элементов – МКЭ). В процессе формирования адекватной расчетной модели проектировщиков ожидает ряд трудностей, так как при моделировании работы МГК методом конечных

элементов требуется досконально описать те данные, которые заранее неизвестны и/или могут меняться в широком диапазоне. В особенности данный тезис касается моделирования грунтового массива и контактного слоя на границе «гофрированная оболочка-грунт». Помимо сложности моделирования грунтового массива и контактных слоев при применении метода конечных элементов для расчета гофрированных конструкций следует весьма осторожно использовать те или иные упрощения, как-то: использование симметрии, упрощенные схемы взаимодействия с грунтом, использование не оболочечных, а пластинчатых конечных элементов для расчета оболочечных конструкций.

Как видно из сказанного выше, все применяемые на данный момент методы расчета МГК имеют свои существенные недостатки. В связи с этим автор настоящей работы видит большой потенциал в применении теории оболочек. Аппарат теории оболочек с одной стороны ориентирован на расчет пространственных задач, позволяет учитывать сложное нагружение конструкции. С другой стороны аппарат теории оболочек не имеет недостатков, характерных для численных методов, так как является аналитическим.

Теория оболочек в разных проявлениях является отдельным направлением расчета гибких конструкций.

Моментная теория оболочек получила развитие в работах В.З. Власова [14,15,17], А.Л. Гольденвейзера [26,27], И.Е. Милейковского [63], В.В. Новожилова [65], безмоментная – в работах А.Р. Ржаницына [93,94,95], Ю.Н. Работнова [91], В.В. Соколовского [96].

Широко применяемая в инженерных расчетах полубезмоментная теория оболочек рассмотрена в трудах В.З. Власова [14,15,17], А.А. Гвоздева [23], Н.Н. Леонтьева [17], И.Е. Милейковского [63], В.В. Петрова [88], И.Г. Овчинникова [74,75] и других.

Нелинейная теория оболочек рассматривает геометрическую нелинейность (задача больших прогибов), и физическую нелинейность материала оболочек. Эта теория представлена в работах А.А. Ильюшина [40], Х.Н. Муштари [64], Ю.Н. Работнова [91], В.В. Новожилова [65], В.В. Петрова [88], В.А. Крысько [56],

И.Г. Овчинникова [74, 75], М.С. Корнишина [50] и других. Вопросам устойчивости оболочек посвящены труды Э.П. Аксельрада[2,108], А.С. Вольмира [19,20,21], С.Н. Кана[43], В.В. Новожилова[65]и других.

Отдельное направление в теории оболочек составляют исследования работы складок, многоволновых оболочек, ребристых цилиндрических оболочек Д.В. Вайнберга[12], В.З. Власова[14,15,17], И.Е. Милейковского[63], В. Флюгге [103], В.В. Карпова [45]. Учет в расчетах ребер ведется для схемы гладких конструктивно-ортотропных оболочек, когда жесткость дискретных ребер распределяется по всей поверхности оболочек.

Учет контактного взаимодействия конструкции с грунтом в теории оболочек рассмотрен в работах М.Г. Асратяна[5], В.И. Гуляева[29], Б.Я. Кантора [44], Г.И. Львова[11], И.Г. Емельянова[32,33]. При рассмотрении задач теории гибких оболочек с использованием гофра можно выделить два направления: устойчивость и прочность. Вопросы устойчивости исследовались в работах Э.В. Антоненко[4], Д.В. Вайнберга[12], Г.Л. Комиссаровой[49], для продольно гофрированных оболочек и Э.А. Аксельрадом[2, 108] для пластин и гибких стержней с полой гофрировкой.

Автором настоящей работы для расчета металлических гофрированных конструкций предлагается рассмотреть: метод расчета круговых цилиндрических оболочек, адаптированный для расчета гофрированных конструкций; расчет с помощью теории оболочек ступенчато-переменной толщины (геометрические характеристики листов ступенчато-переменной толщины эквивалентны по своим жесткостям гофрированным листам); метод конечных элементов.

Отдельно необходимо отметить, что наиболее точное решение возможно получить при применении общей моментной теории оболочек вращения, описывая меридиан гофрированной оболочки криволинейной линией, соответствующей по форме продольному сечению гофрированного листа. Однако применение данной теории содержит ряд трудностей. Одной из основных трудностей является то, что при использовании полярных координат, в случае гофрированного меридиана оболочки, выражающего форму срединной

поверхности гофрированного листа, одному и тому же углу Θ могут соответствовать две (в некоторых случаях несколько или даже множество) точек (рисунок 3.1). Также к сложностям применения данной теории относится все большая чувствительность к точности задания углов Θ , возрастающая с уменьшением значения угла Θ .

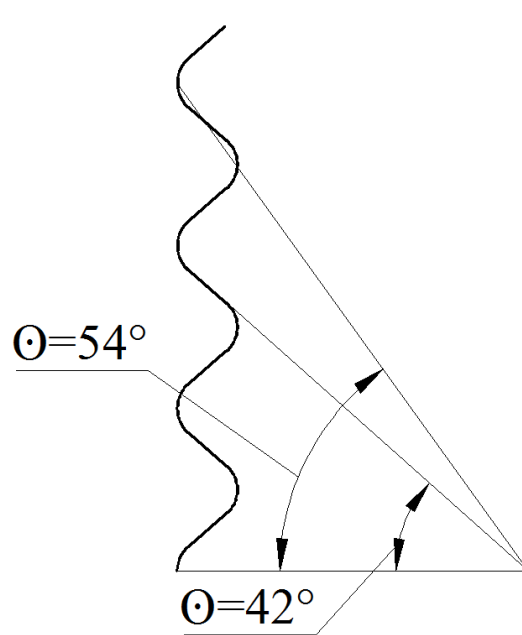


Рисунок 3.1 – Меридиан гофрированной оболочки вращения. Одному значению угла Θ могут соответствовать более чем одна точка поверхности вращения.

Учитывая представленные выше сложности, а также то, что их преодоление неминуемо приведет к усложнению решения, данный метод в настоящей работе рассматриваться не будет.

3.2 Применение теории оболочек вращения к расчету круглых металлических гофрированных конструкций

3.2.1 Разрешающие уравнения общей теории оболочек и осесимметричной теории оболочек вращения применительно к металлическим гофрированным конструкциям

Для решения задач по расчету круглых металлических гофрированных конструкций (МГК) автором предлагается использовать уравнения круговых цилиндрических оболочек. Однако для получения достоверного результата и учета повышенной прочности гофрированного листа относительно гладкого, необходимо адаптировать теорию расчета гладких цилиндрических оболочек к расчету гофрированных цилиндрических оболочек.

В качестве базовых уравнений предлагается использовать уравнения равновесия и геометрические соотношения для расчета круглых цилиндрических оболочек. Данные уравнения представлены, например, в [4,51, 101].

Основные уравнения

Система координат.

В цилиндрической оболочке

$$\frac{1}{R_1} = 0, \frac{1}{R_2} = \frac{1}{r}, \quad (3.1)$$

где R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны оболочки;

r – радиус цилиндрической оболочки по срединной поверхности.

Для удобства расчета цилиндрической оболочки от декартовой системы координат с осями x , y , z , где z – координата, нормальная к срединной поверхности оболочки, а x и y – линии главных кривизн, перейдем к безразмерным ξ и φ :

$$\xi = \frac{x}{r}, \varphi = \frac{y}{r}, \quad (3.2)$$

при этом:

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 = (rd\xi)^2 + (rd\varphi)^2; A_1 = r; A_2 = r, \quad (3.3)$$

где A_1 и A_2 – метрические коэффициенты Ламе.

Для получения уравнений равновесия цилиндрической оболочки воспользуемся системой дифференциальных уравнений равновесия оболочки общего вида:

Уравнения равновесия

$$\frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial(N_1 A_2)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(S_2 A_1)}{\partial \alpha_2} + S_1 \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} - N_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \right] + \frac{Q_1}{R_1} + q_1 = 0; \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial(Q_1 A_2)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(Q_2 A_1)}{\partial \alpha_2} \right] - \frac{N_1}{R_1} - \frac{N_2}{R_2} + q_n = 0; \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial(M_2 A_1)}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial(H_1 A_2)}{\partial \alpha_1} + H_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} - M_1 \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \right] - Q_2 = 0, \quad (3.6)$$

где $N_1, N_2, Q_1, Q_2, S_1, S_2$ – продольные, поперечные и сдвигающие силы;

M_1, M_2, H_1, H_2 – изгибающие и крутящие моменты;

q_1 и q_n – внешняя равномерно-распределенная нагрузка.

Исходя из уравнений (3.4) – (3.6) и имея в виду выражения для A_1 и A_2 согласно (3.3) получим:

$$\frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S_2}{\partial \varphi} + r q_1 = 0; \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + Q_2 + r q_2 = 0;$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_2}{\partial \varphi} - N_2 + r q_n = 0; \frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} - Q_2 r = 0;$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H_2}{\partial \varphi} - Q_1 r = 0; S_1 - S_2 - \frac{H_2}{r} = 0. \quad (3.7)$$

Для получения интересующих нас геометрических соотношений цилиндрической оболочки, обратимся к формулам параметров деформации срединной поверхности оболочки общего вида, приведенным в книге [88].

Геометрические соотношения:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} u_2 + \frac{w}{R_1}; \\
 \varepsilon_2 &= \frac{1}{A_2} \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} u_1 + \frac{w}{R_2}; \\
 \omega &= \frac{A_2}{A_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{u_2}{A_2} \right) + \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{u_1}{A_1} \right); \\
 x_1 &= -\frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial \alpha_1} - \frac{u_1}{R_1} \right) - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \left(\frac{1}{A_2} \frac{\partial w}{\partial \alpha_2} - \frac{u_2}{R_2} \right); \\
 x_2 &= -\frac{1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{1}{A_2} \frac{\partial w}{\partial \alpha_2} - \frac{u_2}{R_2} \right) - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial \alpha_1} - \frac{u_1}{R_1} \right); \\
 \tau &= -\frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} - \frac{1}{A_1} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \frac{\partial w}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \frac{\partial w}{\partial \alpha_2} \right) + \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{A_2} \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_2} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} u_1 \right) + \\
 &+ \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial u_2}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} u_2 \right), \tag{3.8}
 \end{aligned}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – осевые деформации точки срединной поверхности оболочки;

ω – сдвиг в точке срединной поверхности оболочки, возникающий в результате деформации;

x_1, x_2 – величины, характеризующие изменения кривизн срединной поверхности оболочки;

τ – величина, характеризующая кручение срединной поверхности оболочки;

u_1, u_2 и w – компоненты вектора перемещений точек срединной поверхности оболочки.

Геометрические соотношения (3.8) при учете (3.3) и (3.5) приобретают вид:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi}; \varepsilon_2 = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w \right); \omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \right);$$

$$x_1 = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; \quad x_2 = -\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \right); \quad \tau = -\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial u_2}{\partial \xi} \right). \quad (3.9)$$

Замечания о физических уравнениях

Соотношения упругости (физические уравнения) сохраняют свой общий вид (3.10), (3.11), при котором шестое уравнение равновесия (3.7) удовлетворяется автоматически в связи, с чем в дальнейшем рассматривать его не будем.

$$N_1 = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \quad M_1 = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} (x_1 + \mu x_2); \quad (3.10)$$

$$S = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \omega; \quad H = \frac{Eh^3}{12(1+\mu)} \tau, \quad (3.11)$$

где E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона для данного материала.

Граничные условия.

Статические граничные условия на торцах $\xi = \xi_0$ и $\xi = \xi_L$ замкнутой цилиндрической оболочки имеют вид:

$$\begin{aligned} N_1|_{\xi=\xi_0} &= N_1^{\{0\}}, \left[Q_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial \varphi} \right]_{\xi=\xi_0} = \left[Q_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial \varphi} \right]^{\{0\}}; \\ \left[S_1 + \frac{H_1}{r} \right]_{\xi=\xi_0} &= \left[S_1 + \frac{H_1}{r} \right]^{\{0\}}, M_1|_{\xi=\xi_0} = M_1^{\{0\}}; \\ N_1|_{\xi=\xi_L} &= N_1^{\{L\}}, \left[Q_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial \varphi} \right]_{\xi=\xi_L} = \left[Q_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial H_1}{\partial \varphi} \right]^{\{L\}}; \\ \left[S_1 + \frac{H_1}{r} \right]_{\xi=\xi_L} &= \left[S_1 + \frac{H_1}{r} \right]^{\{L\}}, M_1|_{\xi=\xi_L} = M_1^{\{L\}}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Вместо граничных условий (3.12) или части из них могут быть заданы кинематические условия – условия для функций u_1 , u_2 , w и ϑ_1 , при этом нельзя задавать одновременно энергетически связанные усилия (момент) и перемещения (поворот).

Разрешающие уравнения в перемещениях.

Будем следовать классической схеме получения разрешающих уравнений в перемещениях, а именно, выразим условия равновесия через параметры деформации, пользуясь физическими уравнениями, в результате чего получим уравнения равновесия в деформациях, справедливые для оболочки, материал которой подчиняется закону Гука.

Далее, используя геометрические соотношения (3.9), представим эти уравнения через перемещения. Сам факт использования уравнений (3.9) гарантирует совместимость деформаций, вследствие чего полученные уравнения в перемещениях выражают равновесие оболочки, материал которой подчиняется закону Гука и в которой соблюдается совместимость деформаций.

Предварительно упростим исходные уравнения равновесия – исключим из них Q_1 и Q_2 . Для этого найдем Q_2 из четвертого, Q_1 – из пятого уравнений системы (3.7) и подставим соответствующие выражения во второе и третье уравнения той же системы. Произведя эти операции и учитывая сказанное выше о шестом уравнении равновесия, получим систему уравнений равновесия в следующем виде [101]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S_2}{\partial \varphi} + r q_1 = 0; \quad \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} \right) + r q_2 = 0; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H_2}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} \right) - N_2 + r q_n = 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для адаптации данного вида уравнений к решению задач расчета цилиндрических гофрированных оболочек введем следующие предположения:

- 1) в продольном направлении оболочку примем условно-гладкой. При этом кривизна образующей не учитывается, следовательно радиус в продольном направлении равен бесконечности ($R_1 = \infty$, $1/R_1 = 0$)
- 2) в поперечном направлении вместо величины r (радиус от центра окружности цилиндрической оболочки до ее срединной поверхности) вводится функция $r(x)$. Причем вид функции может быть различным и будет зависеть от формы образующей рассматриваемой оболочки

3) жесткость оболочки в поперечном направлении учитывается с помощью увеличенной приведенной толщины оболочки $h_{пр}$ (из условия равенств цилиндрических жесткостей гофрированной и гладкой оболочек), жесткость оболочки в продольном направлении принять равной жесткости гладкой оболочки фактической толщины.

Адаптация основных уравнений для расчета гофрированных оболочек.

Безразмерные координаты ξ и φ примут вид:

$$\xi = \frac{x}{r(x)}, \varphi = \frac{y}{r(x)}. \quad (3.14)$$

Уравнения равновесия примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S_2}{\partial \varphi} + r(x) \cdot q_1 &= 0; \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + Q_2 + r(x) \cdot q_2 = 0; \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \xi} + \frac{\partial Q_2}{\partial \varphi} - N_2 + r(x) \cdot q_n &= 0; \frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} - Q_2 \cdot r(x) = 0; \\ \frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H_2}{\partial \varphi} - Q_1 \cdot r(x) &= 0; S_1 - S_2 - \frac{H_2}{r(x)} = 0. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Геометрические соотношений примут вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{r(x)} \frac{\partial u_1}{\partial \xi}; \varepsilon_2 = \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w \right); \omega = \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \right); \\ x_1 &= -\frac{1}{r(x)^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; x_2 = -\frac{1}{r(x)^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \right); \\ \tau &= -\frac{1}{r(x)^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial u_2}{\partial \xi} \right). \end{aligned} \quad (3.16)$$

Уравнения равновесия после исключения из них членов Q_1 и Q_2 примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S_2}{\partial \varphi} + q_1 \cdot r(x) &= 0; \\ \frac{\partial S_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \varphi} + \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} \right) + q_2 \cdot r(x) &= 0; \\ \frac{1}{r(x)} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H_2}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r(x)} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial H_1}{\partial \xi} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi} \right) - N_2 + q_n \cdot r(x) &= 0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Рассмотрим дальнейший вывод разрешающих уравнений, представленный в [101] для гладких цилиндрических оболочек с учетом предлагаемых дополнений для гофрированных цилиндрических оболочек.

Выразим силы N_1 , N_2 , S_1 , S_2 и моменты H_1 , H_2 , M_1 , M_2 через перемещения, пользуясь физическими уравнениями (3.10) и (3.11) и геометрическими соотношениями (3.9):

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) = \frac{Eh}{(1-\mu^2)r(x)} \left[\frac{\partial u_1}{\partial \xi} + \mu \left(\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w \right) \right]; \\
 N_2 &= \frac{E\bar{h}}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) = \frac{E\bar{h}}{(1-\mu^2)r(x)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w + \mu \frac{\partial u_1}{\partial \xi} \right]; \\
 S_1 &= \frac{Eh}{2(1+\mu)} \omega + \frac{Eh^3}{12(1+\mu)r(x)} \tau = \frac{Eh}{2(1+\mu)r(x)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \right) - \frac{Eh^3}{12(1+\mu)r(x)^3} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial w}{\partial \varphi} - u_2 \right) \right]; \\
 S_2 &= \frac{E\bar{h}}{2(1+\mu)} \omega = \frac{E\bar{h}}{2(1+\mu)r(x)} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \right); \\
 H_1 &= \frac{Eh^3}{12(1+\mu)} \tau = -\frac{Eh^3}{12(1+\mu)r(x)^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial w}{\partial \varphi} - u_2 \right); \\
 H_2 &= \frac{E\bar{h}^3}{12(1+\mu)} \tau = -\frac{E\bar{h}^3}{12(1+\mu)r(x)^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial w}{\partial \varphi} - u_2 \right); \\
 M_1 &= \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} (x_1 + \mu x_2) = -\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)r(x)^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \mu \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \right); \\
 M_2 &= \frac{E\bar{h}^3}{12(1-\mu^2)} (x_2 + \mu x_1) = -\frac{E\bar{h}^3}{12(1-\mu^2)r(x)^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right). \tag{3.18}
 \end{aligned}$$

Подставляя (3.14) в (3.13), получим:

$$\frac{Eh}{1-\mu^2} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} + \mu \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) + \frac{E\bar{h}}{2(1+\mu)r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varphi^2} \right) + r(x) \cdot q_1 = 0;$$

$$\begin{aligned}
& \frac{Eh}{2(1+\mu)} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right) - \frac{E\bar{h}^3}{12(1+\mu)} \frac{1}{(r(x))^3} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \xi^3 \partial \varphi} - \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} \right) + \frac{E\bar{h}}{1-\mu^2} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \right. \\
& \left. + \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right) + \frac{1}{r(x)} \left[- \frac{Eh^3}{12(1+\mu)} \frac{1}{(r(x))^2} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} - \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} \right) - \frac{E\bar{h}^3}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{(r(x))^3} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \mu \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right) \right] + r(x) \cdot q_2 = 0; \\
& \frac{E}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{(r(x))^3} \left[h^3 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \mu \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} - \mu \frac{\partial^3 u_2}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right) + \bar{h}^3 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} - \frac{\partial^3 u_2}{\partial \varphi^3} \right) \right] + \\
& + \frac{E}{12(1+\mu)} \frac{1}{(r(x))^2} \left[h^3 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 u_2}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right) + \bar{h}^3 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} - \frac{\partial^3 u_2}{\partial \varphi^3} + \mu \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} \right) \right] + \\
& + \frac{E\bar{h}}{(1-\mu^2)r(x)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w + \mu \frac{\partial u_1}{\partial \xi} \right] - r(x) \cdot q_n = 0. \tag{3.19}
\end{aligned}$$

или, приведя подобные, получим:

$$\begin{aligned}
& \frac{Eh}{1-\mu^2} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + \mu \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} + \mu \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) + \frac{E\bar{h}}{2(1+\mu)} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varphi^2} \right) + r(x) \cdot q_1 = 0; \\
& \frac{Eh}{2(1+\mu)} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right) - \frac{E\bar{h}^3}{12(1+\mu)} \frac{1}{(r(x))^3} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \xi^3 \partial \varphi} - \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} \right) + \frac{E\bar{h}}{1-\mu^2} \frac{1}{r(x)} \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \right. \\
& \left. + \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right) + \frac{1}{r(x)} \left[- \frac{Eh^3}{12(1+\mu)} \frac{1}{(r(x))^2} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} - \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} \right) - \frac{E\bar{h}^3}{12(1-\mu^2)} \frac{1}{(r(x))^3} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \mu \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right) \right] + r(x) \cdot q_2 = 0; \\
& \frac{E}{12(1-\mu^2)} \frac{h^3}{(r(x))^3} \left[\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + (\mu + 1) \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} - (\mu + 1) \frac{\partial^3 u_2}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right] + \\
& + \frac{E}{12(1+\mu)} \frac{\bar{h}^3}{(r(x))^2} \left[2 \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} - 2 \frac{\partial^3 u_2}{\partial \varphi^3} + \mu \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} \right] + \frac{E\bar{h}}{(1-\mu^2)r(x)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w + \mu \frac{\partial u_1}{\partial \xi} \right] - \\
& - r(x) \cdot q_n = 0. \tag{3.20}
\end{aligned}$$

Представленные выше уравнения могут быть использованы для моделирования поведения металлических гофрированных конструкций круглого очертания. Для решения полученных уравнений могут быть использованы либо вариационные, либо численные методы (метод конечных разностей, метод ортогонализации С.К. Годунова). Применение полученных полных и упрощенных

уравнений гофрированных цилиндрических оболочек позволит проанализировать их поведение с учетом реальных схем нагружения и граничных условий[86].

3.2.2 Расчет осесимметрично нагруженной металлической гофрированной конструкции с использованием осесимметричной теории оболочек вращения

В качестве частного случая применения теории гладких оболочек, адаптированных для расчета МГК, рассмотрим случай симметричного нагружения.

Примером может служить колодец, устроенный в грунтовой среде (рисунок 3.2). Представим себе, что стенка колодца отделена от днаща.

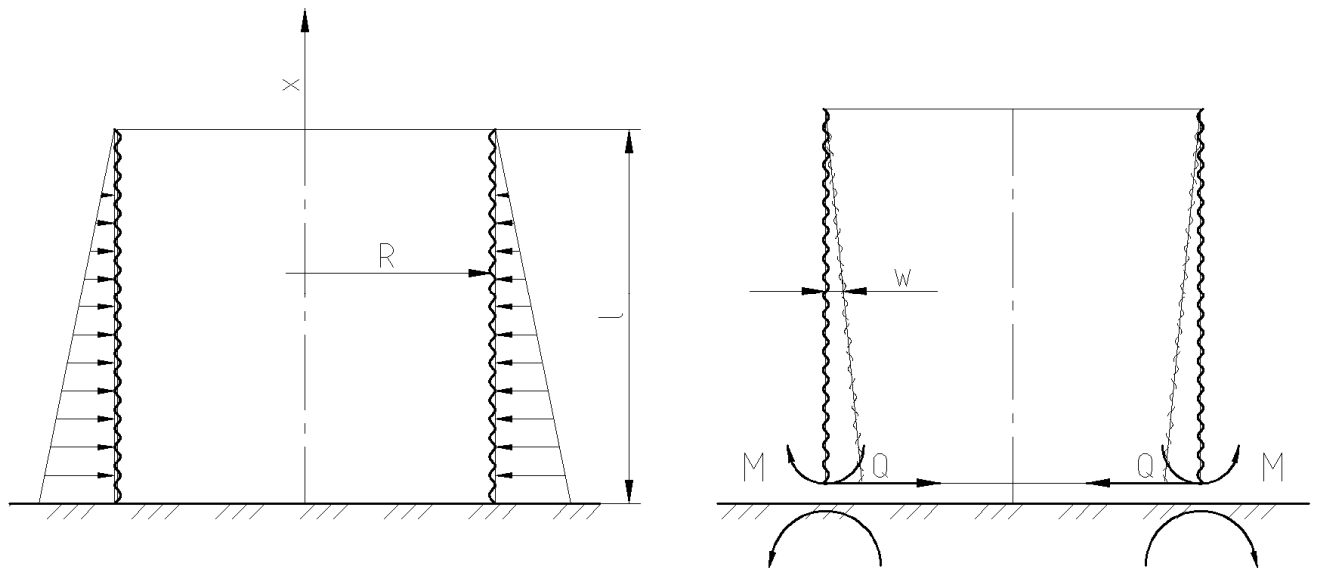


Рисунок 3.2 – Вид колодца из гофрированных листов, выполненного в грунте

В этом случае расчет оболочки может быть проведен по безмоментной теории. Внешняя нагрузка от грунта в указанной системе координат определяется формулой:

$$p_3 = \gamma(l - x), \quad (3.21)$$

где γ – удельный вес грунта засыпки колодца.

Определяем кольцевое усилие N_2 по следующей формуле:

$$N_2 = \gamma(l - x)R. \quad (3.22)$$

Принимая $v = 0$, определим удлинение оболочки в кольцевом направлении:

$$\varepsilon_2 = \frac{\gamma R}{Eh}(l - x). \quad (3.23)$$

Учитывая, что при симметричной нагрузке перемещения $v=0$, получим:

$$w = -\frac{\gamma R^2}{Eh}(l - x). \quad (3.24)$$

Прогиб w прямо пропорционален расстоянию $l - x$ от верхнего края оболочки. Это значит, что стенка при деформации остается прямолинейной. Радиус оболочки (расстояние по нормали от оси вращения до срединной поверхности) увеличивается от R до $R + w$. Так как прогиб w согласно исходным гипотезам принимается малым, то изменением кривизны χ_2 (кривизна параллельного круга) можно по малости пренебречь. Это означает, что в оболочке, отделенной от основания, изгибающие моменты и поперечные силы не возникают.

Но в действительности нижний край оболочки не может свободно перемещаться, так как связан с основанием. На этом крае должны возникнуть статически неопределимые осесимметричные краевые усилия Q и изгибающие моменты M (рисунок 3.3).

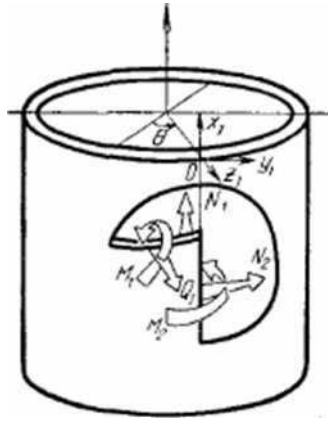


Рисунок 3.3 – Система координат и усилия, возникающие в цилиндрической оболочке при осесимметричном загрузении

Эти силы не могут быть определены по безмоментной теории. Вследствие действия этих сил в оболочке возникнут дополнительные усилия изгибного состояния M_1 , Q_1 , M_2 , которые повлияют на перераспределение усилий безмоментного состояния.

На рисунке 3.3 показаны внутренние усилия, возникающие в цилиндрической оболочке при действии осесимметричной нагрузки. Вследствие симметрии нагрузки все усилия будут постоянны по окружности; сдвигающие силы, крутящие моменты и перерезывающая сила Q_2 будут равны нулю.

При условии симметрии формы оболочки и действующей на нее нагрузки три из шести уравнений равновесия удовлетворяются тождественно и остаются лишь три уравнения. Два из них получаются при проектировании всех сил, действующих на элемент цилиндрической оболочки, на оси O_{x1} и O_{z1} . Третье уравнение равновесия получают, приравняв нулю сумму моментов всех сил относительно оси O_{y1} . Эти уравнения можно получить, положив $M_{12} = M_{21} = S = 0$:

$$а) \frac{dN_1}{dx} = 0,$$

$$б) \frac{dQ_1}{dx} - \frac{1}{R} N_2 = -p_3,$$

$$в) \frac{dM_1}{dx} - Q_1 = 0. \quad (3.25)$$

Первое уравнение показывает, что силы N_1 постоянны и не зависят ни от x ,

ни от θ . В дальнейшем примем их равными нулю. Эти силы могут возникнуть при действии распределенной продольной нагрузки по контуру и будут равны внешним силам. Напряжения и деформации, соответствующие продольным усилиям, могут быть легко подсчитаны и наложены на напряжения и деформации оболочки, вызванные поперечной нагрузкой.

Для решения задачи имеется, следовательно, два уравнения, которые содержат три неизвестных.

Из уравнений (3.25) следует, что:

$$\frac{d^2 M_1}{dx^2} - \frac{N_2}{R} = -p_3. \quad (3.26)$$

Подставим в это уравнение M_1 и N_2 , выраженные через прогиб w и его производные.

Учитывая равенство нулю перемещения v , производных по θ и пренебрегая коэффициентом Пуассона:

$$\begin{aligned} N_2 &= Eh \frac{w}{R}, \\ M_1 &= -D \frac{d^2 w}{dx^2}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

После подстановки равенств (3.27) в выражение (3.26) получим основное уравнение нашей задачи:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} - Eh \frac{w}{R^2} = +p_3. \quad (3.28)$$

Это линейное дифференциальное уравнение четвертого порядка с постоянными коэффициентами и правой частью. Общее решение этого, уравнения состоит из двух частей: из решения w_0 однородного уравнения, соответствующего (3.28), и частного решения w_1 уравнения (3.28):

$$w = w_0 + w_1. \quad (3.29)$$

В качестве частного решения уравнения может быть принят прогиб, полученный по безмоментной теории:

$$w_1 = \frac{\gamma R^2}{Eh} (l - x). \quad (3.30)$$

w_0 получим, решая однородное уравнение:

$$D \frac{d^4 w_0}{dx^4} + Eh \frac{w_0}{R^2} = 0. \quad (3.31)$$

Введем обозначение:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{Rh}} \sqrt[4]{3(1 - \nu^2)}, \quad (3.32)$$

тогда уравнение (3.28) запишем в таком виде:

$$\frac{d^4 w_0}{dx^4} + 4\beta^4 w_0 = 0. \quad (3.33)$$

Решение этого уравнения ищем в форме:

$$w_0 = e^{nx}. \quad (3.34)$$

Подстановка выражения (3.34) в уравнение (3.33) приводит к характеристическому уравнению для определения n :

$$n^4 + 4\beta^4 = 0. \quad (3.35)$$

Корни характеристического уравнения равны:

$$n_{1,2} = +(1 \pm i)\beta; \quad n_{3,4} = -(1 \pm i)\beta. \quad (3.36)$$

Поэтому решение (3.34) записывается в форме:

$$w_0 = e^{\beta x} (C_1 e^{l\beta x} + C_2 e^{-l\beta x}) + e^{-\beta x} (C_3 e^{l\beta x} + C_4 e^{-l\beta x}). \quad (3.37)$$

Но $e^{lx} = \cos x + i \sin x$, $e^{-lx} = \cos x - i \sin x$.

Поэтому:

$$\begin{aligned} C_1 e^{l\beta x} + C_2 e^{-l\beta x} &= \frac{C_1 + C_2}{2} (e^{l\beta x} + e^{-l\beta x}) + \frac{C_1 - C_2}{2} (e^{l\beta x} - e^{-l\beta x}) = \\ &= \frac{C_1 + C_2}{2} 2 \cos \beta x + \frac{C_1 - C_2}{2} 2 \sin i \beta x. \end{aligned}$$

Обозначим $C_1 + C_2 = D_1, C_1 - C_2 = D_2$. Преобразовав таким же образом вторую скобку и с обозначив $C_3 + C_4 = D_3, C_3 - C_4 = D_4$, получим:

$$w_0 = e^{\beta x} (D_1 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (D_3 \cos \beta x + D_4 \sin \beta x). \quad (3.38)$$

Так как C_1 и C_2 – произвольные постоянные, то можно считать $C_1 + C_2$ действительной величиной, а $C_1 - C_2$ мнимой, т.е. D_1 и D_2 (так же, как и D_3 и D_4) будут всегда некоторыми действительными произвольными постоянными.

Общее решение неоднородного уравнения (3.11) принимает вид:

$$\begin{aligned} w_0 &= e^{\beta x} (D_1 \cos \beta x + D_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (D_3 \cos \beta x + D_4 \sin \beta x) + \\ &\quad + \frac{\gamma R^2}{Eh} (l - x). \end{aligned} \quad (3.39)$$

Найдя соответствующие производные от w и подставляя их в равенства (3.25), получим следующие выражения для компонентов напряженного состояния оболочки:

$$\begin{aligned} M_1 &= -D \frac{d^2 w}{dx^2} = -2D\beta^2 [e^{\beta x} (D_2 \cos \beta x - D_1 \sin \beta x) + \\ &\quad + e^{-\beta x} (D_3 \sin \beta x - D_4 \cos \beta x)], \\ Q_1 &= \frac{dM_1}{dx} = -2D\beta^3 [e^{\beta x} ((D_2 - D_1) \cos \beta x - (D_1 + D_2) \sin \beta x) + \\ &\quad + e^{-\beta x} ((D_4 + D_3) \cos \beta x + (D_4 - D_3) \sin \beta x)], \\ N_2 &= \gamma R(l - x) - \frac{Eh}{R} [e^{\beta x} (D_1 \cos \beta x - D_2 \sin \beta x) + \\ &\quad + e^{-\beta x} (D_4 \sin \beta x + D_3 \cos \beta x)]. \end{aligned} \quad (3.40)$$

Произвольные постоянные D_1, D_2, D_3, D_4 определяются из четырех граничных условий, причем на каждом крае цилиндрической оболочки могут быть поставлены два граничных условия.

Так, например, для колодца со стенками, жестко закрепленными у основания и свободными у верхнего края (рисунок 3.2), произвольные постоянные определяются из следующих условий:

$$x = 0, w = 0, \frac{dw}{dx} = 0,$$

$$x = l, M_1 = -D \frac{d^2 w}{dx^2} = 0, Q = -D \frac{d^3 w}{dx^3} = 0.$$

Эти условия позволяют составить четыре алгебраических уравнения для определения постоянных D_1, D_2, D_3, D_4 . Определив эти постоянные для заданных граничных условий, получают окончательное решение задачи.

Прогиб оболочки, определяемый w_0 , представляет собой по форме две пары быстро затухающих периодических функций (рисунок 3.4). Каждая пара затухает по мере удаления от верхнего или нижнего края. Вычислим длину полуволны этих затухающих функций:

$$\sin \beta \lambda = \sin \pi,$$

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda}.$$

Для оценки быстроты затухания функции, изображенной на рисунке 3.4, составим отношение амплитудных значений прогиба в интервалах двух соседних полуволн:

$$\frac{w_{n+1}}{w_n} = -\frac{e^{\beta(x+\lambda)}}{e^{\beta x}} = -e^{\beta \lambda} = -e^{\pi} \approx 23.$$

Этот подсчет показывает, что функция w_0 состоит из двух частей: первой с коэффициентом $e^{\beta x}$, быстро убывающей по мере удаления от края $x = l$, и второй с коэффициентом $e^{-\beta x}$, быстро убывающей по мере удаления от края $x = 0$.

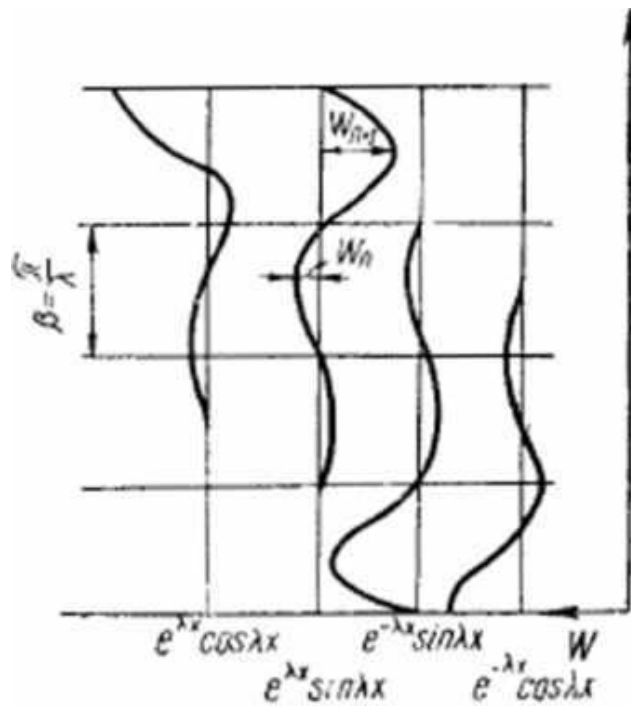


Рисунок 3.4 – Форма быстро затухающих периодических функций

При достаточной длине оболочки оказывается, что обе части выражения для прогиба имеют самостоятельное значение.

Первая описывает картину деформированного и напряженного состояния у края $x = l$, вторая – у края $x = 0$.

Используя это свойство решения и рассматривая напряженное состояние у одного какого-либо края, в выражении (3.39) нужно брать лишь одну часть, соответствующую рассматриваемому краю.

Таким образом, при постановке граничных условий для каждого края достаточно длинной цилиндрической оболочки получим по два независимых алгебраических уравнения для определения лишь двух произвольных постоянных вместо системы четырех уравнений с четырьмя неизвестными в общем случае, когда влиянием краев друг на друга пренебречь нельзя.

В случае высокого колодца с заземленными у основания стенками общее выражение для прогиба будет иметь вид:

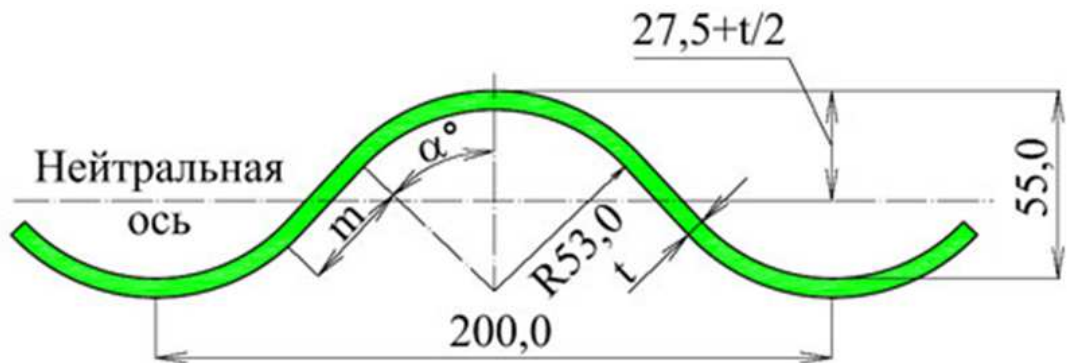
$$w = \frac{\gamma R^2}{Eh} (l - x) + (e^{-\beta x} (D_3 \cos \beta x + D_4 \sin \beta x)). \quad (3.41)$$

Соответственно упрощаются выражения для силовых компонентов[53].

Пример расчета

В качестве примера произведем расчет цилиндрического колодца, выполненного из стальных гофрированных листов.

Размеры колодца: $l=4,0$ м; $R=2,0$ м (по срединной линии гофров). Удельный вес грунта засыпки составляет: $\gamma=26,5$ кН/м³. Колодец выполнен из стальных гофрированных листов 200х55 мм, толщиной 5 мм. Поперечное сечение и характеристики данного типа листов представлены на рисунке 3.5.



Толщина листа t , мм	Длина прямой вставки m , мм	Угол α , °	Момент инерции сечения I , мм ⁴ /мм	Момент сопротивления сечения W , мм ³ /мм	Пластический момент сопротивления сечения $W_{пл}$, мм ³ /мм
5	28,5	46,33	2288,80	76,29	99,60

Рисунок 3.5– Геометрические характеристики гофрированного листа профилем 200х55 мм

Произвольные постоянные D_3 и D_4 решения (3.41) определим из граничных условий на защемленном крае:

$$x = 0, w = 0, \frac{dw}{dx} = 0,$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{\gamma R^2}{Eh} + \beta e^{-\beta x} ((D_4 - D_3) \cos \beta x + (-D_3 - D_4) \sin \beta x),$$

$$w(0) = \frac{\gamma R^2}{Eh} l + D_3 = 0,$$

Откуда $D_3 = -\frac{\gamma R^2}{Eh} l$.

Для прогиба получаем окончательно следующее выражение:

$$\frac{dw(0)}{dx} = -\frac{\gamma R^2}{Eh} + \beta(-D_3 + D_4) = 0,$$

Откуда $D_4 = \frac{\gamma R^2}{Eh\beta} - \frac{\gamma R^2}{Eh} l = \frac{\gamma R^2}{Eh} \left(\frac{1}{\beta} - l \right)$.

Для прогиба получаем окончательно следующее выражение:

$$w = +\frac{\gamma R^2}{Eh} [l - x - e^{-\beta x} l (\cos \beta x + \left(-\frac{1}{l\beta} + 1 \right) \sin \beta x)]. \quad (3.42)$$

Подставляя (3.41) в соотношения (3.10), получим:

$$M_1 = -D \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{\gamma R l h}{\sqrt{12}} e^{-\beta x} \left(\sin \beta x - \left(1 - \frac{1}{l\beta} \right) \cos \beta x \right),$$

$$Q_1 = -D \frac{d^3 w}{dx^3} = -\gamma \frac{l}{2\beta} e^{-\beta x} \left(\frac{1}{\beta l} \sin \beta x - \left(2 - \frac{1}{l\beta} \right) \cos \beta x \right),$$

$$N_2 = \frac{Eh w}{R} = \gamma R [l - x - e^{-\beta x} l (\cos \beta x + \left(1 - \frac{1}{l\beta} \right) \sin \beta x)]. \quad (3.43)$$

Имея эти выражения, нетрудно вычислить наибольшие значения усилий в оболочке.

Наибольший изгибающий момент M_1 действует у дна колодца. Он равен:

$$M_1 = \frac{\gamma R l h}{\sqrt{12}} \left(1 - \frac{1}{l\beta} \right). \quad (3.44)$$

Учитывая, что гофрированные листы, из которых выполнен колодец, имеют разную жесткость в разных направлениях, при расчетах будем использовать не только параметр h (толщину гофрированного листа, характеризующую жесткость конструкции в продольном направлении), но и $\bar{h}$ – приведенную толщину листа в поперечном направлении, полученную из условия равенства моментов инерции гофрированного листа с приведенным гладким листом.

С учетом вышесказанного, для заданных размеров колодца:

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{Rh}} \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} = \sqrt{\frac{1}{200 \cdot 0,5}} \sqrt[4]{3(1-0,3^2)} = \frac{1}{12,85} \left[\frac{1}{\text{см}} \right],$$

$$\lambda = \pi \cdot 12,85 = 40,37 \text{ см},$$

$$\bar{\beta} = \sqrt{\frac{1}{R\bar{h}}} \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} = \sqrt{\frac{1}{200 \cdot 5,76}} \sqrt[4]{3(1-0,3^2)} = \frac{1}{26,41} \left[\frac{1}{\text{см}} \right],$$

$$\bar{\lambda} = \pi \cdot 26,41 = 82,98 \text{ см}.$$

Параметры h , β , λ используются для вычисления усилий и перемещений, возникающих в продольном направлении оболочки: M_1 и Q_1 . Параметры $\bar{h}$, $\bar{\beta}$, $\bar{\lambda}$ используются для вычисления усилий и перемещений, возникающих в поперечном направлении оболочки: N_2 и w (выполняется замена параметров h , β , λ на соответствующие им параметры $\bar{h}$, $\bar{\beta}$, $\bar{\lambda}$ при расчете N_2 и w в представленных выше формулах).

Эпюры M_1 и N_2 показаны на рисунке 3.6.

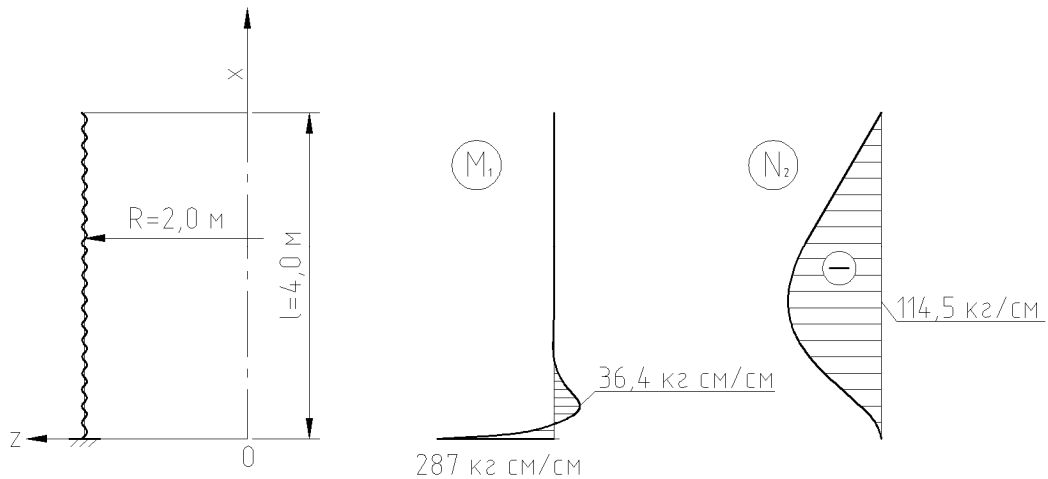


Рисунок 3.6 – Эпюры M_1 и N_2

3.3 Применение метода расчета основанного на теории оболочек ступенчато-переменной толщины к расчету круглых металлических гофрированных конструкций

Для решения задач по расчету круглых металлических гофрированных конструкций (МГК), помимо метода, представленного в разделе 3.2 настоящей главы, возможно применение теории расчета оболочек ступенчато-переменной толщины [7,8,9,10,11]. Для учета геометрических характеристик гофрированного листа необходимо учитывать эквивалентность листа ступенчато-переменной толщины гофрированному листу по жесткости и прочности.

Модель конструктивного элемента

Учитывая характерные соотношения размеров металлической гофрированной конструкции и характерные особенности ее деформирования под действием нагрузки, в качестве основной модели конструктивного элемента будем рассматривать модель круговой цилиндрической оболочки, для которой справедлива гипотеза прямых нормалей: любой прямолинейный элемент, нормальный к срединной поверхности, остается прямолинейным и нормальным к срединной поверхности после деформирования оболочки, и длина его не изменяется.

Для построения модели гофрированной оболочки, предлагается перейти от собственно гофрированной оболочки к эквивалентной ей оболочке ступенчато-переменной толщины. Рассмотрим условие эквивалентности, при котором гофрированная оболочка и оболочка ступенчато-переменной толщины имеют равные цилиндрические жесткости.

Переход от гофрированной оболочки к эквивалентной ей оболочке ступенчато-переменной толщины

Исходя из предположения, что один гофр может быть заменен участком оболочки с одним ребром жесткости, примем шаг ребер жесткости для эквивалентной оболочки равным длине волны гофрированной оболочки. Толщину

обшивки оболочки ступенчато-переменной толщины и толщину ребра жесткости примем равными толщине листа гофрированной оболочки.

Для примера рассмотрим задачу эквивалентной замены гофрированного листа 200x55 мм с толщиной листа 5 мм производства фирмы «Гофросталь» эквивалентной пластинкой, укрепленной ребрами жесткости (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Вид и геометрические характеристики гофрированного листа фирмы «Гофросталь»

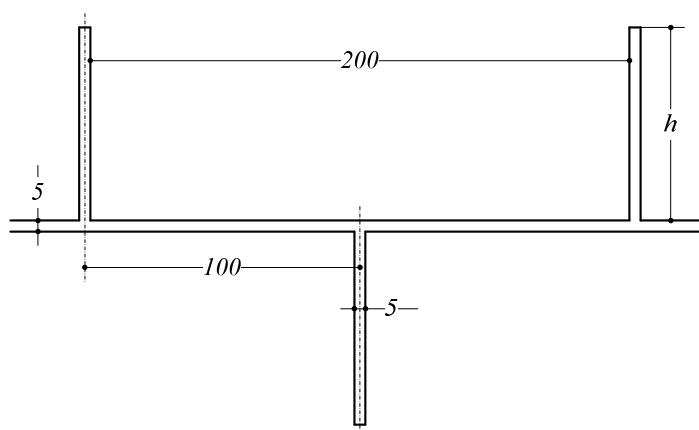


Рисунок 3.8 – Общий вид эквивалентной ребристой пластинки

Определим неизвестную высоту ребра жесткости пластины (h) из условия равенства изгибных жесткостей пластины с ребрами и гофрированного листа.

Полагая, что материал, (следовательно, и модули упругости) пластины и гофрированного листа одинаковы, получаем условие эквивалентности в виде:

$$D_{\text{экв пласт}} = D_{\text{гофр лист}}, \quad (3.45)$$

где $D_{\text{экв пласт}}$ – цилиндрическая жесткость эквивалентной пластины, усиленной ребрами жесткости;

$D_{\text{гофр лист}}$ – цилиндрическая жесткость гофрированного листа (рассчитывается, с использованием данных производителя).

Цилиндрическая жесткость пластины ступенчато-переменной толщины определяется выражением:

$$D_{\text{экв пласт}} = \frac{E J_{\text{экв пласт}}}{b \cdot (1 - \nu^2)}, \quad (3.46)$$

где $J_{\text{экв пласт}}$ – момент инерции участка пластины ступенчато-переменной толщины, равного по ширине длине волны гофров гофрированного листа (относительно срединной поверхности обшивки ребристой оболочки);

b – ширина участка оболочки ступенчато-переменной толщины, равного по ширине длине волны гофров гофрированного листа;

ν – коэффициент Пуассона.

Цилиндрическая жесткость гофрированного листа определяется выражением:

$$D_{\text{гофр лист}} = \frac{E J_{\text{гофр лист}}}{b \cdot (1 - \nu^2)}, \quad (3.47)$$

где $J_{\text{гофр лист}}$ – момент инерции участка гофрированного листа, равного по ширине длине волны гофров (относительно нейтральной оси);

b – ширина участка гофрированного листа, равного по ширине длине волны гофров;

ν – коэффициент Пуассона.

Приравняем выражения (3.45) и (3.46) с учетом того, что гофрированный лист и оболочка ступенчато-переменной толщины выполнены из одинаковых материалов:

$$\frac{E J_{\text{экв пласт}}}{b \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{E J_{\text{гофр лист}}}{b \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (3.48)$$

После сокращения равных членов уравнение (3.48) примет вид:

$$J_{\text{экв пласт}} = J_{\text{гофр лист}}. \quad (3.47)$$

Рассчитаем моменты инерции участков пластины ступенчато-переменной толщины и гофрированного листа шириной, равной длине волны гофров b . Момент инерции участка гофрированного листа шириной b равен:

$$J_{\text{гофр лист}} = J_{1 \text{ п.мм}} \cdot b, \quad (3.49)$$

где $J_{1 \text{ п.мм}}$ – момент инерции одного погонного мм гофрированного листа (принимается по данным производителя);

b – длина волны гофрированного листа (шаг ребер жесткости).

Момент инерции участка пластины ступенчато-переменной толщины шириной b равен:

$$J_{\text{экв пласт}} = \sum \frac{b \cdot h^3}{12} + \sum b \cdot h \cdot \left(\frac{h+t}{2}\right)^2, \quad (3.50)$$

где t – толщины пластинки и ребра жесткости (приняты равными толщине гофролиста);

h – высота ребра жесткости;

b – шаг ребер жесткости (принят равным длине волны гофров).

Тогда выражение (3.50) примет вид:

$$J_{\text{экв пласт}} = \frac{b \cdot t^3}{12} + 2 \frac{t \cdot h^3}{12} + h \cdot t \cdot \left(\frac{h+t}{2}\right)^2 =$$

$$= h^3 \left(\frac{5t}{12} \right) + h^2 \left(\frac{t^2}{2} \right) + h \left(\frac{t^3}{4} \right) + b \left(\frac{t^3}{12} \right). \quad (3.51)$$

Приравняв выражение (3.51) к величине $J_{\text{гофр лист}}$ получим:

$$h^3 \left(\frac{5t}{12} \right) + h^2 \left(\frac{t^2}{2} \right) + h \left(\frac{t^3}{4} \right) + b \left(\frac{t^3}{12} - J_{1 \text{ п.мм}} \right) = 0. \quad (3.52)$$

Зная толщину гофрированного листа (t) и длину волны гофров(b) из уравнения (3.52) можно найти значение h .

Основные уравнения теории оболочек ступенчато-переменной толщины

Для удобства расчета цилиндрической оболочки от декартовой системы координат с осями x, y, z , где z – координата, нормальная к срединной поверхности оболочки, а x и y – линии главных кривизн, перейдем к безразмерным ξ и φ :

$$\xi = \frac{x}{r}, \varphi = \frac{y}{r}, \quad (3.53)$$

Рассмотрим бесконечно малый участок цилиндрической оболочки. На исследуемый участок действуют изгибающий моменты, нормальные и сдвигающие силы.

Далее находим сумму всех сил на все координатные оси и сумму изгибающих моментов относительно осей ξ и φ , сумма моментов относительно оси превращается в тождество. В результате получаем 5 уравнений равновесия оболочки. Выразив сдвигающие силы Q_1 и Q_2 через изгибающие и крутящие моменты N, M_1, M_2 и подставив их в оставшиеся уравнения. Уравнения, описывающие равновесие оболочки примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{r \partial \xi} + \frac{\partial S}{r \partial \varphi} + q_1 &= 0; \\ \frac{\partial S}{r \partial \xi} + \frac{\partial N_2}{r \partial \varphi} + \frac{\partial M_2}{r^2 \partial \varphi} + \frac{\partial H_1}{r^2 \partial \xi} + q_2 &= 0; \\ \frac{\partial^2 M_1}{r^2 \partial \xi^2} + \frac{\partial M_2}{r^2 \partial \varphi} + \frac{2 \partial^2 H}{r \partial \xi \partial \varphi} - \frac{N_2}{r} + q_n &= 0. \end{aligned} \quad (3.54)$$

где q_1 , q_2 и q_n – составляющие внешней нагрузки, действующей на водопропускную трубу соответственно в направлении осей ξ , φ , z .

Выражения для деформаций любой точки на расстоянии z от срединной поверхности оболочки запишем в виде:

$$\varepsilon_1^z = \varepsilon_1 + \chi_1 z; \varepsilon_2^z = \varepsilon_2 + \chi_2 z; \omega^z = \omega + \tau z. \quad (3.55)$$

Геометрические соотношения для цилиндрической оболочки переменной толщины (эквивалентной гофрированной) в отсчетной поверхности $z=0$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi}; \varepsilon_2 = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w \right); \omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial u_2}{\partial \xi} + \frac{\partial u_1}{\partial \varphi} \right); \\ x_1 &= -\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; \quad x_2 = -\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial u_2}{\partial \varphi} \right); \tau = -\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial u_2}{\partial \xi} \right). \end{aligned} \quad (3.56)$$

Модель нагружения

Так как целью данного расчета является определение напряженно-деформированного состояния цилиндрической гофрированной металлической водопропускной трубы при ее произвольном нагружении, то составляющие внешней нагрузки q_1 , q_2 , q_n , действующей на водопропускную трубу, можно представить в виде произвольных функций:

$$q_1 = g_1(\xi, \varphi); q_2 = g_2(\xi, \varphi); q_n = g_n(\xi, \varphi). \quad (3.57)$$

Модель деформирования материала оболочки, находящейся в плоском напряженном состоянии

Металлические гофрированные водопропускные трубы по своим геометрическим параметрам можно отнести к классу тонких оболочек. Для моделирования гофр оболочки приведем гофрированную оболочку к эквивалентной ей оболочке переменной толщины (см. раздел 3.2).

Металл водопропускной трубы можно считать изотропным материалом, одинаково сопротивляющимся растяжению и сжатию. Основные физические соотношения, описывающие поведение цилиндрической водопропускной трубы,

принимаются как физические соотношения для металла, работающего в условиях плоского напряженного состояния.

Физические соотношения для металла принимаются в виде:

$$\sigma_1 = \frac{E_c}{1-\mu^2} (\varepsilon_1^z + \nu \varepsilon_2^z); \sigma_2 = \frac{E_c}{1-\mu^2} (\varepsilon_2^z + \nu \varepsilon_1^z); \tau_{1,2} = \frac{E_c}{2(1+\mu)} \omega^z \quad (3.58)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{1,2}$ – компоненты тензора напряжений;

μ – коэффициент Пуассона;

$E_c = \sigma_i / \varepsilon_i$ – секущий модуль упругости, представляющий собой нелинейную функцию интенсивности напряжений σ_i и интенсивности деформаций ε_i , определяемую на основе экспериментальных данных для рассматриваемого материала.

Физические соотношения для усилий и деформаций, возникающих в цилиндрической водопропускной трубе, рассматриваемой в качестве цилиндрической оболочки ступенчато-переменной толщины

Получим выражения для изгибающих моментов и усилий в цилиндрической оболочке водопропускной трубы, полагая, что металлом оболочки воспринимаются моменты и усилия M_1, M_2, N_1, N_2, H и S . Границами определенных интегралов является толщина оболочки ступенчато-переменной толщины в точке конструкции, для которой ведется расчет. В представленных выше уравнениях для определения усилий рассмотрен участок оболочки ступенчато-переменной толщины, где ребро жесткости расположено с внешней стороны обшивки оболочки. Выражения для усилий и момента, воспринимаемых материалом оболочки (для металла):

$$\begin{aligned} N_1 &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_1 dz; N_2 = \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_2 dz; \\ M_1 &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_1 z dz; M_2 = \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_2 z dz; \\ H &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \tau_{1,2} z dz; S = \int_{-t/2}^{t/2+h} \tau_{1,2} dz. \end{aligned} \quad (3.59)$$

С учетом соотношений (3.57) и (3.58), выражения (3.59) примут вид:

$$\begin{aligned}
 N_1 = \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_1 dz &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} (\varepsilon_1^z + u_2 \varepsilon_2^z) dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} [\varepsilon_1 + \chi_1 z + \\
 &+ u_2 (\varepsilon_2 + \chi_2 z)] dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} z + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} + \frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} z - \right. \right. \\
 &\left. \left. - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} z \right) \right] dz = \frac{E_c(h+t)}{1-\mu^2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} \right) \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} - u_2 \left(\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right) \right];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N_2 = \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_2 dz &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} (\varepsilon_2^z + u_2 \varepsilon_1^z) dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} [\varepsilon_2 + \chi_2 z + \\
 &+ u_2 (\varepsilon_1 + \chi_1 z)] dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} + \frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} z - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} z + u_2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} - \right. \right. \\
 &\left. \left. - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} z \right) \right] dz = \frac{E_c(h+t)}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} - \right. \\
 &\left. - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} u_2 \right];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_1 = \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_1 z dz &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} (\varepsilon_1^z + u_2 \varepsilon_2^z) z dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} [\varepsilon_1 + \chi_1 z + \\
 &+ u_2 (\varepsilon_2 + \chi_2 z)] z dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} z + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} + \frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} z - \right. \right. \\
 &\left. \left. - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} z \right) \right] z dz = \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} \right) \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} - \right. \\
 &\left. - u_2 \left(\frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right) \right];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_2 = \int_{-t/2}^{t/2+h} \sigma_2 z dz &= \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} (\varepsilon_2^z + u_2 \varepsilon_1^z) z dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} [\varepsilon_2 + \chi_2 z + \\
 &+ u_2 (\varepsilon_1 + \chi_1 z)] z dz = \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} + \frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} z - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} z + u_2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} - \right. \right. \\
 &\left. \left. - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} z \right) \right] z dz = \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi} + \frac{w}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_1}{\partial \xi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{r^2 \partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \varphi^2} - \right. \\
 &\left. - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} u_2 \right];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}+h} \tau_{1,2} dz = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}+h} \frac{E_c}{2(1+\mu)} \omega^z dz = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}+h} \frac{E_c}{2(1+\mu)} [\omega + \tau z] dz = \\
&= \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \xi} + \frac{\partial u_1}{r \partial \varphi} + \frac{\partial u_2}{r^2 \partial \xi} z - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \xi \partial \varphi} z \right] dz = \frac{E_c(h+t)}{1+\mu} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \xi} + \frac{\partial u_1}{r \partial \varphi} \right] + \\
&+ \frac{E_c h(h+t)}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial u_2}{r^2 \partial \xi} - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \xi \partial \varphi} \right]; \\
H &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}+h} \tau_{1,2} z dz = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}+h} \frac{E_c}{2(1+\mu)} \omega^z z dz = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}+h} \frac{E_c}{2(1+\mu)} [\omega + \tau z] z dz = \\
&= \int_{-t/2}^{t/2+h} \frac{E_c}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \xi} + \frac{\partial u_1}{r \partial \varphi} + \frac{\partial u_2}{r^2 \partial \xi} z - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \xi \partial \varphi} z \right] z dz = \frac{E_c h(h+t)}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial u_2}{r \partial \xi} + \frac{\partial u_1}{r \partial \varphi} \right] + \\
&+ \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1+\mu)} \left[\frac{\partial u_2}{r^2 \partial \xi} - \frac{\partial^2 w}{r^2 \partial \xi \partial \varphi} \right]. \tag{3.60}
\end{aligned}$$

Разрешающие уравнения цилиндрической оболочки ступенчато-переменной толщины при действии на нее произвольной нагрузки

Распишем с учетом выражений (3.60), чему будут равны производные от моментов и усилий, участвующие в уравнениях равновесия (3.54).

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_1}{\partial \xi} &= \frac{E_c(h+t)}{1-\mu^2} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + u_2 \left(\frac{\partial^3 u_2}{r \partial \varphi^2 \partial \xi} + \frac{\partial w}{r \partial \xi} \right) \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r^2 \partial \xi \partial \varphi} - \right. \\
&\left. - u_2 \left(\frac{\partial^3 w}{r^2 \partial \xi \partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^3} \right) \right]; \\
\frac{\partial S}{\partial \varphi} &= \frac{E_c(h+t)}{1+\mu} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r \partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{r \partial \varphi^2} \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r^2 \partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial^3 w}{r^2 \partial \xi \partial \varphi^2} \right]; \\
\frac{\partial S}{\partial \xi} &= \frac{E_c(h+t)}{1+\mu} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r \partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{r \partial \xi \partial \varphi} \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r^2 \partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{r^2 \partial \xi^2 \partial \varphi} \right]; \\
\frac{\partial N_2}{\partial \varphi} &= \frac{E_c(h+t)}{1-\mu^2} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r^2 \partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{r^2 \partial \varphi^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 \right]; \\
\frac{\partial M_2}{\partial \varphi} &= \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r^2 \partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{r^2 \partial \varphi^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 \right]; \\
\frac{\partial H}{\partial \xi} &= \frac{E_c h(h+t)}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r \partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{r \partial \xi \partial \varphi} \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{r^2 \partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{r^2 \partial \xi^2 \partial \varphi} \right];
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_1}{\partial \xi^2} = & \frac{E_c h(h+t)}{2(1-\mu^2)} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^3 u_1}{\partial \xi^3} + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{r \partial \varphi \partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{r \partial \xi^2} \right) \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^3 u_2}{r^2 \partial \varphi \partial \xi^2} - \right. \\ & \left. - u_2 \left(\frac{\partial^4 w}{r^2 \partial \xi^2 \partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} \right) \right]; \\ \frac{\partial^2 H}{\partial \xi \partial \varphi} = & \frac{E_c h(h+t)}{2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^3 u_2}{r \partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^3 u_1}{r \partial \xi \partial \varphi^2} \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3(1+\mu)} \left[\frac{\partial^3 u_2}{r^2 \partial \xi^2 \partial \varphi} - \frac{\partial^4 w}{r^2 \partial \xi^2 \partial \varphi^2} \right]. \quad (3.61) \end{aligned}$$

Выразив в выражении (3.54) деформации через перемещения по формулам (3.61), получим разрешающие уравнения металлической оболочки ступенчато-переменной толщины, нагруженной произвольной нагрузкой:

$$\begin{aligned} & \frac{E_c(h+t)}{r(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi^2} + u_2 \left(\frac{\partial^3 u_2}{\partial \varphi^2 \partial \xi} + \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} - u_2 \left(\frac{\partial^3 w}{\partial \xi \partial \varphi^2} + \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^3} \right) \right] + \\ & + \frac{E_c(h+t)}{r(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \varphi^2} \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2r^2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi \partial \varphi} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi \partial \varphi^2} \right] + q_1 r = 0; \\ & \frac{E_c(h+t)}{r(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2r^2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right] + \\ & + \frac{E_c(h+t)}{r(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \right. \\ & + \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3r^3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 \right] + \\ & + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3r^3(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right] + q_1 r = 0; \\ & \frac{E_c h(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^3 u_1}{\partial \xi^3} + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial \varphi \partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right) + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \\ & + \frac{E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3r^3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^3 u_2}{\partial \varphi \partial \xi^2} - u_2 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} \right) + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 \right] + \\ & + \frac{E_c h(h+t)}{r(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right] + \frac{2E_c h(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4})}{3r^2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right] - \frac{E_c(h+t)}{r(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w + \right. \\ & + \left. \frac{\partial u_1}{\partial \xi} u_2 \right] + \frac{E_c h(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} u_2 \right] + q_n r = 0. \quad (3.62) \end{aligned}$$

В результате получается система трех уравнений (3.62), описывающих напряженно-деформированное состояние цилиндрической гофрированной металлической конструкции с неизвестными перемещениями u_1, u_2, w . Для определения характеристик напряженно-деформированного состояния металлической оболочки ступенчато-переменной толщины необходимо решить полученную систему уравнений (3.62) с соответствующими граничными условиями. Эти граничные условия позволяют получить для каждого конкретного случая однозначное решение. Решив систему уравнений и найдя функции перемещений $u_1(\xi, \varphi), u_2(\xi, \varphi), w(\xi, \varphi)$, можно определить напряжения и деформации в любой точке оболочки водопропускной трубы при загрузке трубы произвольной нагрузкой [9].

Данная система уравнений выведена для участка с ребрами на внутренней стороне обшивки. Для участков с ребрами на внешней стороне обшивки соотношения будут иметь аналогичный вид, но с другим знаком (так как высота и толщина ребер эквивалентной оболочки ступенчато-переменной толщины с внутренней и внешней стороны оболочки одинакова).

Выводы по главе 3

1. В настоящий момент в России для расчета МГК применяются методики расчета, представленные в нормативной базе РФ, а также МКЭ. Однако, методики, представленные в ОДМ 218.2.001-2009 и ВСН 176-78 несовершенны и требуют доработки. МКЭ не является в полной мере надежным в связи со сложностью моделирования в программе работы грунтового массива; сложностью моделирования гофрированного листа формы, достаточно близкой к оригинальной; сложностью моделирования взаимодействия гофрированной оболочки трубы с грунтовым массивом и сложностью моделирования работы сооружения в условиях поражения конструкции агрессивными средами.

2. Автором предложены два альтернативных способа, позволяющие рассчитывать МГК.

Первый способ основан на методике расчета оболочек вращения (в данной главе рассмотрены цилиндрические оболочки), адаптирован для расчета гофрированных оболочек путем замены в уравнениях константы r (радиус от центра до срединной поверхности цилиндрической оболочки) на функцию $r(x)$, изменяющую свое значение по длине оболочки в соответствии с формой гофрирования, а также путем введения разных жесткостей в продольном и в поперечном направлениях оболочки.

Второй способ основан на методике расчета оболочек вращения ступенчато-переменной толщины (в данной главе также рассмотрены цилиндрические оболочки ступенчато-переменной толщины). При применении данного способа гофры оболочки МГК заменяются ребрами оболочки ступенчато-переменной толщины, причем геометрические характеристики обшивки и ребер оболочки ступенчато-переменной толщины эквивалентны геометрическим характеристикам гофрированной оболочки. В данной главе рассмотрен случай равенства изгибных жесткостей гофрированного листа и листа ступенчато-переменной толщины.

3. Помимо предложенных автором способов, расчет МГК возможен с помощью МКЭ. Для получения объективных данных, позволяющих определить, какой способ наиболее точен, необходимо выполнить сравнение расчетов, произведенных по двум предложенным способам, а также с помощью МКЭ и сравнить их с результатами экспериментов, проведенных в лабораторных условиях.

4. Несмотря на озвученные в 1 – 3 главах настоящей диссертации достоинства аналитических методов расчета и недостатки применения численных методов расчета (в частности МКЭ), для расчета и проектирования металлических гофрированных конструкций по результатам главы 3 можно сказать, что применение теории оболочек в различной трактовке для расчета МГК также не лишено недостатков. К наиболее значительному недостатку относится громоздкость и сложность расчетов, что приведет к сложности внедрения

обозначенных в главе методик в практику проектирования. Однако существуют частные теории, например, теория «полубезмоментных» оболочек В.З. Власова, которая предлагает существенно менее громоздкий расчетный аппарат. Автор считает эту теорию наиболее перспективной для практического применения и рассмотрит их в дальнейших главах настоящей диссертационной работы.

4 ПРИМЕНЕНИЕ «ПОЛУБЕЗМОМЕНТНОЙ» ТЕОРИИ ОБОЛОЧЕК В.З. ВЛАСОВА ДЛЯ РАСЧЕТА КРУГЛЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Как уже было отмечено выше, фактически металлические гофрированные конструкции представляют собой оболочечные конструкции, гладкие в одном направлении и имеющие гофрировку в другом. В связи с этим логично предположить, что подходящим для расчета данных конструкций является использование аппарата теории оболочек в различной трактовке (общая моментная теория оболочек, теория оболочек ступенчато-переменной толщины, полубезмоментная теория оболочек и т.д.). Мы полагаем, что достаточно перспективным для расчета металлических гофрированных конструкций является применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова [16].

4.1 Основные гипотезы и соотношения

Модель конструктивного элемента

В качестве модели конструктивного элемента, учитывая характерные соотношения размеров большинства МГК, а также характер ее деформирования под действием нагрузки, будем рассматривать полубезмоментную модель круговой цилиндрической оболочки. Отнесем эту оболочку радиусом R и длиной L к цилиндрической системе координат x, y, z ; где z – координата, нормальная к срединной поверхности оболочки, а x и y – линии главных кривизн (рисунок 4.1). Введем безразмерные координаты:

$$\alpha = \frac{x}{R}; \beta = \frac{y}{R}. \quad (4.1)$$

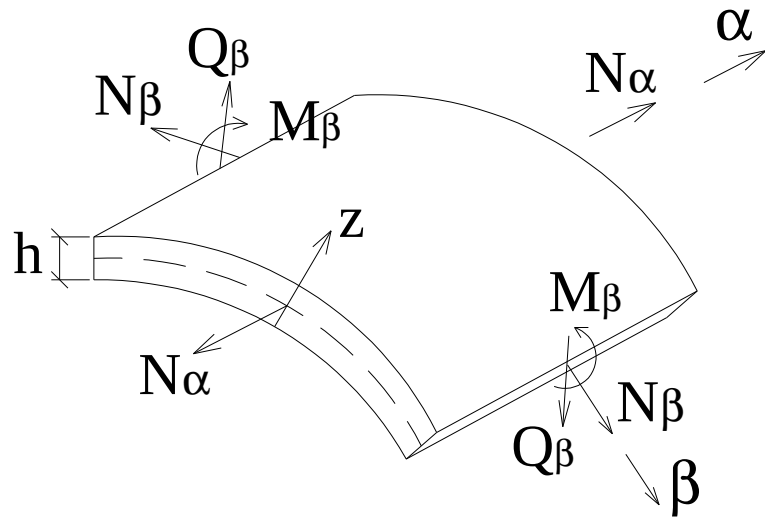


Рисунок 4.1 – Схема участка оболочки по полубезмоментной модели с координатами и усилиями

Уравнения, описывающие равновесие оболочки при условии, что моменты M_α , $M_{\alpha\beta}$, $M_{\beta\alpha}$, перерезывающая сила Q_α и сдвигающее усилие $N_{\alpha\beta}$ равны нулю, имеют вид [78]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\alpha}{\partial \alpha} + R \cdot P_\alpha &= 0; \quad \frac{\partial N_\beta}{\partial \beta} + Q_\beta + R \cdot P_\beta = 0; \\ \frac{\partial Q_\beta}{\partial \beta} - N_\beta + R \cdot P_z &= 0; \quad \frac{\partial M_\beta}{\partial \beta} - R \cdot Q_\beta = 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Если выразить Q_β через производную от M_β и подставить это выражение во второе и третье уравнения, то получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\alpha}{\partial \alpha} + R \cdot P_\alpha &= 0; \quad \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M_\beta}{\partial \beta^2} - N_\beta + R \cdot P_z = 0; \\ R \frac{\partial N_\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial M_\beta}{\partial \beta} + R^2 \cdot P_\beta &= 0, \end{aligned} \quad (4.3)$$

где P_α , P_β , P_z – составляющие нагрузки, действующей на трубу-оболочку соответственно в направлении осей α , β , z .

Используя геометрические гипотезы В.З. Власова, выражения для деформаций любой точки на расстоянии z от срединной поверхности оболочки запишем в виде:

$$e_{\alpha}(z) = \varepsilon_{\alpha}; e_{\beta}(z) = z \cdot \chi_{\beta}; e_{\alpha\beta} = 0; \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \alpha}; \chi_{\beta} = -\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} - \frac{\partial v}{\partial \beta} \right), \quad (4.5)$$

где $u(\alpha, \beta)$, $v(\alpha, \beta)$, $W(\alpha, \beta)$ – перемещения точек срединной поверхности по направлению координат α , β , z ;

χ_{β} – изменение кривизны;

ε_{α} – линейная деформация срединной поверхности.

Модель нагружения

Особенность водопропускных труб под насыпями на автомобильных дорогах состоит в их совместной работе с окружающим грунтом. Грунт создает нагрузку, является основанием для трубы и средой, передающей надземные нагрузки. Водопропускные трубы обычно считают жесткими и рассчитывают по недеформированной схеме, то есть без учета бокового отпора грунта. Поэтому, допуская, что водопропускная труба не изменяет предельного напряженного состояния окружающего грунта, рассматриваемого как сыпучее тело, можно получить следующие выражения для составляющих нагрузки в точке верхней половины трубы, лежащей на глубине y от поверхности насыпи [78]:

$$P_z = \gamma y (\cos^2 \theta + \xi \sin^2 \theta), P_{\alpha} = 0;$$

$$P_{\beta} = \gamma y (1 - \xi) \cos \theta \sin \theta, \quad (4.6)$$

где $\xi = \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)}$;

φ – угол внутреннего трения грунта;

γ – объемный вес грунта;

θ – угол между касательной в рассматриваемой точке и горизонталью.

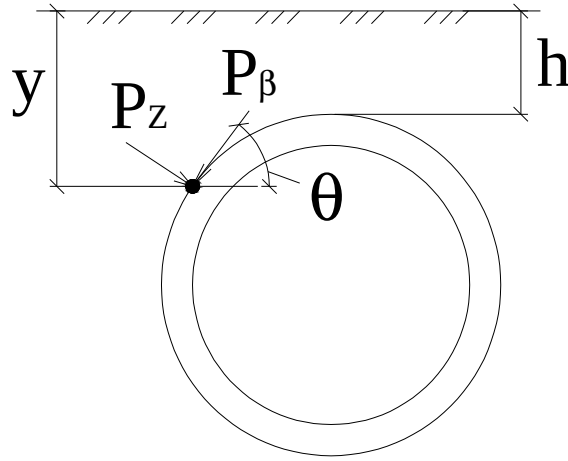


Рисунок 4.2 – Нагрузки, действующие на оболочку в поперечном направлении

Для описания поведения стали МГК в данном случае применяется модель однородного линейно упругого материала. Компоненты тензора напряжений для плоского напряженного состояния, в котором находится материал трубы (при отсутствии сдвигающих напряжений), имеют вид:

$$\sigma_\alpha = \frac{E}{1-\nu^2} (e_\alpha + \nu e_\beta); \sigma_\beta = \frac{E}{1-\nu^2} (e_\beta + \nu e_\alpha), \quad (4.7)$$

где $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$, – компоненты тензора напряжений;

ν – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Физические соотношения для усилий и деформаций, возникающих в оболочке МГК

Выражения для усилий и момента в оболочке трубы имеют вид:

$$N_\alpha = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\alpha dz; N_\beta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\beta dz; M_\beta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\beta z dz \quad (4.8)$$

С учетом (4.7) и (4.4) получим:

$$N_\alpha = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\alpha dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_\alpha + \nu e_\beta) dz = \frac{E \varepsilon_\alpha h}{1-\nu^2};$$

$$N_\beta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\beta dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_\beta + \nu e_\alpha) dz = \frac{E \nu \varepsilon_\alpha \bar{h}}{1-\nu^2};$$

$$M_\beta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\beta z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_\beta + \nu e_\alpha) z dz = \frac{E \chi_\beta \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (4.9)$$

где h – толщина гофрированного листа;

$\bar{h}$ – приведенная толщина гофрированного листа в поперечном направлении (из условия, что цилиндрическая жесткость гофрированного листа в сечении поперек гофров равна цилиндрической жесткости гладкого листа толщиной $\bar{h}$).

4.2 Разрешающее уравнение оболочки по полубезмоментной теории В.З. Власова применительно к гофрированной цилиндрической оболочке

Принимая во внимание соотношения [16]:

$$W = \frac{\partial v}{\partial \beta}, \frac{\partial v}{\partial \beta} = -\frac{\partial v}{\partial \alpha} \quad (4.10)$$

и исключив из (4.5) перемещения, получим следующее уравнение неразрывности деформаций:

$$\Omega \varepsilon_\alpha + R \frac{\partial^2 \chi_\beta}{\partial \alpha^2} = 0, \quad (4.11)$$

где $\Omega = \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2}$ – дифференциальный оператор В.З. Власова.

Уравнение (4.11) удовлетворяется тождественно, если ввести функцию перемещений $\Phi(\alpha, \beta)$ в формулы:

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}; v = \frac{\partial \Phi}{\partial \beta}. \quad (4.12)$$

Тогда из (4.10) и (4.5) следует:

$$W = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2}; \varepsilon_\alpha = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2}; \chi_\beta = -\frac{1}{R^2} \Omega \Phi. \quad (4.13)$$

Уравнения равновесия (4.3) сводятся к следующему разрешающему уравнению:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 N_\alpha}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{R} \Omega M_\beta = q, \quad (4.14)$$

где

$$q = -\frac{\partial P_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_\beta}{\partial \beta} - \frac{\partial^2 P_z}{\partial \beta^2}. \quad (4.15)$$

Подставляя в (4.14) выражения (4.15) с учетом (4.9) получим окончательное уравнение:

$$\left[\Omega \left(\frac{E \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)} \right) \Omega \Phi \right] - \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\left(\frac{ERh}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} \right] = R^3 \cdot q. \quad (4.16)$$

Раскроем уравнение (4.16):

$$\left[\left(\frac{E \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \beta^4} \right) \right] - \left[\left(\frac{ERh}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^4} \right] = R^3 \cdot q. \quad (4.17)$$

Введем обозначение:

$$\left[\left(\frac{E \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \beta^4} \right) \right] - \left[\left(\frac{ERh}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^4} \right] = L(\Phi). \quad (4.18)$$

Следовательно:

$$L(\Phi) = R^3 q. \quad (4.19)$$

4.3 Применение вариационного метода В.З. Власова к расчету гофрированной цилиндрической оболочки

Для решения уравнения (4.19) применим вариационный метод В.З. Власова, согласно которому искомую функцию $\Phi(\alpha, \beta)$ представим в виде разложения:

$$\Phi(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n F_n(\alpha) \cdot \sin n\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_\kappa - \beta_0} \right), \quad (4.20)$$

где $\sin n\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_\kappa - \beta_0} \right)$ – аппроксимирующие функции в окружном направлении;

$F_n(\alpha)$ – функции, подлежащие определению.

В дальнейшем, полагая $\beta_0 = 0$, а $\beta_\kappa = \pi$, что соответствует полукруговой арке, и, ограничиваясь первыми тремя членами ряда, запишем:

$$\Phi(\alpha, \beta) = F_1(\alpha) \cdot \sin\beta + F_2(\alpha) \cdot \sin 2\beta + F_3(\alpha) \cdot \sin 3\beta. \quad (4.21)$$

Вариационное уравнение метода В.З. Власова в нашем случае имеет вид:

$$\int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \Phi d\beta = 0.$$

С учетом выражений (4.21), оно приводится к системе трех дифференциальных уравнений относительно функций $F_n(\alpha)$:

$$\begin{cases} \int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \sin\beta d\beta = 0, \\ \int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \sin 2\beta d\beta = 0, \\ \int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \sin 3\beta d\beta = 0. \end{cases} \quad (4.22)$$

Рассмотрим первое уравнение.

Учитывая (4.18) получим:

$$\int_0^\pi \left(\left[\left(\frac{EhR}{1-\nu^2} \right) \cdot \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^4} \right] - \left[\left(\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \beta^4} \right) \right] + R^3 q \right) \sin\beta d\beta = 0. \quad (4.23)$$

Введем обозначения:

$$\left(\frac{EhR}{1-\nu^2}\right) = A_1; \left(\frac{E\bar{h}^3}{12(1-\nu^2)}\right) = A_2. \quad (4.24)$$

Принимая во внимание (4.24) и (4.21) получим:

$$\int_0^\pi \left(\left[A_1 \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin \beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \right. \\ \left. - [A_2 \cdot 144(F_2(\alpha) \sin 2\beta + 36F_3(\alpha) \sin 3\beta)] + R^3 q \right) \sin \beta d\beta = 0. \quad (4.25)$$

Учитывая (4.24) получим:

$$\int_0^\pi \left(\left[\frac{EhR}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin \beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{E\bar{h}^3}{12(1-\nu^2)} \cdot 144(F_2(\alpha) \sin 2\beta + 36F_3(\alpha) \sin 3\beta) \right] + R^3 q \right) \sin \beta d\beta = 0. \quad (4.26)$$

Рассмотрим член уравнения (4.26) $R^3 q$, учитывая соотношения (4.6) и (4.15):

$$q = -\frac{\partial P_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_\beta}{\partial \beta} - \frac{\partial^2 P_z}{\partial \beta^2}, \quad (4.27)$$

При этом:

$$P_\alpha = 0;$$

$$P_\beta = \gamma y (1 - \xi) \sin \beta \cos \beta;$$

$$P_z = \gamma y (\cos^2 \beta + \xi \sin^2 \beta);$$

где γ – объемный вес грунта;

$$\xi = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi};$$

φ – угол внутреннего трения грунта.

Необходимо отметить, что углы θ и β равны, что соответствует полукруговой арке. Учитывая сказанное выше, можно записать:

$$q = \frac{\partial}{\partial \beta} [\gamma y (1 - \xi) \sin \beta \cos \beta] - \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} [\gamma y (\cos^2 \beta + \xi \sin^2 \beta)]. \quad (4.28)$$

Принимая во внимание, что $y = H + R\cos\beta$, можно записать выражение (4.28) следующим образом:

$$q = \frac{\partial}{\partial\beta} [\gamma(H + R\cos\beta)(1 - \xi)\sin\beta\cos\beta] - \frac{\partial^2}{\partial\beta^2} [\gamma(H + R\cos\beta)(\cos^2\beta + \xi\sin^2\beta)]. \quad (4.29)$$

Выполнив операции дифференцирования, получим:

$$q = 3\gamma H(1 - \xi)\cos 2\beta + \gamma R\cos\beta - 5,25\gamma R\xi\cos 3\beta. \quad (4.30)$$

Подставив значение q в выражение (4.27), получим:

$$\begin{aligned} & \int_0^\pi \left[\frac{EhR}{1-v^2} \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial\alpha^4} \sin\beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha)}{\partial\alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha)}{\partial\alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \\ & - \left[\frac{Eh^3}{12(1-v^2)} \cdot 144(F_2(\alpha)\sin 2\beta + 36F_3(\alpha)\sin 3\beta) \right] + R^3 [3\gamma H(1 - \xi)\cos 2\beta + \\ & + \gamma R\cos\beta - 5,25\gamma R\xi\cos 3\beta] \sin\beta d\beta = 0. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Выполним операции интегрирования:

$$\left(\frac{Eh\pi}{2(1-v^2)} \right) \cdot \frac{d^4 F_1(\alpha)}{d\alpha^4} - 2R^2\gamma H(1 - \xi) = \frac{d^4 F_1(\alpha)}{d\alpha^4} - \frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-v^2)}{Eh\pi} = 0. \quad (4.32)$$

Получили дифференциальное уравнение четвертого порядка, из которого можно получить функцию $F_1(\alpha)$.

Введем следующее обозначение:

$$\frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-v^2)}{Eh\pi} = \mathcal{U}. \quad (4.33)$$

Получим:

$$\frac{d^4 F_1(\alpha)}{d\alpha^4} = \mathcal{U}. \quad (4.34)$$

Решением неоднородного дифференциального уравнения (4.34) является:

$$F_1(\alpha) = \frac{\eta}{24} \alpha^4 + \frac{C_1}{6} \alpha^3 + \frac{C_2}{2} \alpha^2 + C_3 \alpha + C_4, \quad (4.35)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования.

Для поиска произвольных постоянных введем граничные условия, соответствующие свободному краю оболочки:

$$u\left(0, \frac{l}{R}\right) = 0 \text{ и } N_\alpha\left(0, \frac{l}{R}\right) = 0. \quad (4.36)$$

Учитывая, что $N_\alpha = -\frac{Eh \sin \beta}{(1-\nu^2)R} \frac{\partial^2 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^2}$, а $u = -\sin \beta \frac{\partial F_1(\alpha)}{\partial \alpha}$, можно переписать граничные условия следующим образом (при $\alpha = 0, \alpha = \frac{l}{R}$):

$$\frac{d^2 F_1(\alpha)}{d\alpha^2} = 0, \frac{dF_1(\alpha)}{d\alpha} = 0. \quad (4.37)$$

Выполнив дифференцирование, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_3 = 0, \\ C_2 = 0, \\ \frac{\eta}{6} \alpha^3 + \frac{C_1}{2} \alpha^2 = 0, \\ \frac{\eta}{2} \alpha^2 + C_1 \alpha = 0. \end{cases} \quad (4.38)$$

В итоге получим: $C_1 = -\frac{\eta l}{2R}, C_2 = 0, C_3 = 0.$

Подставим полученные значения произвольных постоянных в уравнение (4.35):

$$F_1(\alpha) = \frac{\eta}{24} \alpha^4 - \frac{\eta l}{12R} \alpha^3 + C_4. \quad (4.39)$$

Выполним операции, аналогичные проделанным в уравнениях (4.23) – (4.32) для второго и третьего уравнений системы (4.22).

Второе уравнение после завершения операций будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{Eh\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{d^4 F_2(\alpha)}{d\alpha^4} - \frac{6E\pi\bar{h}^3}{(1-\nu^2)} \cdot F_2(\alpha) - 2R^2\gamma H(1-\xi) = \\ & = \frac{d^4 F_2(\alpha)}{d\alpha^4} - \frac{12\bar{h}^3}{h} \cdot F_2(\alpha) - \frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-\nu^2)}{Eh\pi} = 0. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Третье уравнение после завершения операций будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{Eh\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{d^4 F_3(\alpha)}{d\alpha^4} - \frac{3E\pi\bar{h}^3}{2(1-\nu^2)} \cdot F_3(\alpha) - 2R^2\gamma H(1-\xi) = \\ & = \frac{d^4 F_3(\alpha)}{d\alpha^4} - \frac{3\bar{h}^3}{h} \cdot F_3(\alpha) - \frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-\nu^2)}{Eh\pi} = 0. \end{aligned} \quad (4.41)$$

Как видим, второе и третье уравнения имеют одинаковый вид, который в общем виде можно записать следующим образом:

$$y(x) = y'''' - B \cdot y - \mathcal{C} = 0, \quad (4.42)$$

Решением неоднородного дифференциального уравнения (4.39) является:

$$y(x) = C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot x} + C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot x} + C_3 \sin(\sqrt[4]{B} \cdot x) + C_4 \cos(\sqrt[4]{B} \cdot x) + \frac{\mathcal{C}}{B_1}. \quad (4.43)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования.

Для поиска произвольных постоянных введем граничные условия, аналогичные условиям (4.38), соответствующим свободному краю оболочки:

$$\text{При } x = 0, x = \frac{l}{R};$$

$$y(x)'' = 0, y(x)' = 0. \quad (4.44)$$

Выполнив дифференцирование, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_1 - C_2 + C_3 = 0, \\ C_1 + C_2 - C_3 = 0, \\ C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} - C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} + C_3 \cos\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) - C_4 \sin\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) = 0, \\ C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} + C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} - C_3 \sin\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) - C_4 \cos\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) = 0. \end{cases} \quad (4.45)$$

В итоге получим: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$.

Подставим полученные значения произвольных постоянных в уравнение (4.43):

$$y(x) = \frac{\eta}{B}. \quad (4.46)$$

Учитывая уравнения (4.42) – (4.46), получим значения $F_2(\alpha)$ и $F_3(\alpha)$:

$$F_2(\alpha) = \frac{R^2 \gamma H (\xi - 1) (1 - v^2)}{3 E \pi h^3}, \quad (4.47)$$

$$F_3(\alpha) = \frac{4 R^2 \gamma H (\xi - 1) (1 - v^2)}{3 E \pi h^3}. \quad (4.48)$$

Зная $F_1(\alpha), F_2(\alpha), F_3(\alpha)$, можно получить формулы, позволяющие рассчитать значения усилий в оболочке N_α, N_β и M_β :

$$\begin{aligned} N_\alpha &= -\frac{Eh}{(1-v^2)R} \frac{d^2}{d\alpha^2} [F_1(\alpha) \sin\beta + F_2(\alpha) \sin 2\beta + F_3(\alpha) \sin 3\beta] = \\ &= -\frac{Eh \sin\beta}{(1-v^2)R} \left[\frac{2R^2 \gamma H (1-\xi) (1-v^2)}{Eh\pi} \alpha^2 - \frac{2R\gamma H l (1-\xi) (1-v^2)}{Eh\pi} \alpha \right], \\ N_\alpha &= -\frac{2(1-\xi)\gamma H \sin\beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \end{aligned} \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} N_\beta &= -\frac{E\bar{h}v}{(1-v^2)R} \frac{d^2}{d\alpha^2} [F_1(\alpha) \sin\beta + F_2(\alpha) \sin 2\beta + F_3(\alpha) \sin 3\beta] = \\ &= -\frac{E\bar{h}v \sin\beta}{(1-v^2)R} \left[\frac{2R^2 \gamma H (1-\xi) (1-v^2)}{Eh\pi} \alpha^2 - \frac{2R\gamma H l (1-\xi) (1-v^2)}{Eh\pi} \alpha \right], \\ N_\beta &= -\frac{2(1-\xi)\bar{h}v\gamma H \sin\beta}{h\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]. \end{aligned} \quad (4.50)$$

Получим значение M_β :

$$\begin{aligned}
 M_\beta &= -\frac{E\bar{h}^3}{12(1-\nu^2)R^2} \left[\frac{d^4}{d\beta^4} (F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{d^2}{d\beta^2} (F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta) \right], \\
 M_\beta &= -\frac{E\bar{h}^3}{12(1-\nu^2)R^2} \left[\frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-\nu^2)}{E\pi\bar{h}^3} \sin 2\beta + \frac{96R^2\gamma H(\xi-1)(1-\nu^2)}{E\pi\bar{h}^3} \sin 3\beta \right], \\
 M_\beta &= -\frac{\gamma H(\xi-1)}{\pi} \left[\frac{1}{3} \sin 2\beta + 8 \sin 3\beta \right]. \tag{4.51}
 \end{aligned}$$

В конечном итоге получаем следующие уравнения для получения усилий, действующих в полукруглой МГК:

$$N_\alpha = -\frac{2(1-\xi)\gamma H \sin\beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \tag{4.52}$$

$$N_\beta = -\frac{2(1-\xi)\bar{h}\nu\gamma H \sin\beta}{h\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \tag{4.53}$$

$$M_\beta = -\frac{\gamma H(\xi-1)}{\pi} \left[\frac{1}{3} \sin 2\beta + 8 \sin 3\beta \right]. \tag{4.54}$$

4.4 Результаты расчета, их анализ и сопоставление с экспериментом

Результаты расчета

Используя формулы (4.52 – 4.54), можно вычислить усилия, действующие в поперечном и продольном направлениях гофрированной оболочки. На рисунках 4.3 – 4.5 представлены эпюры усилий.

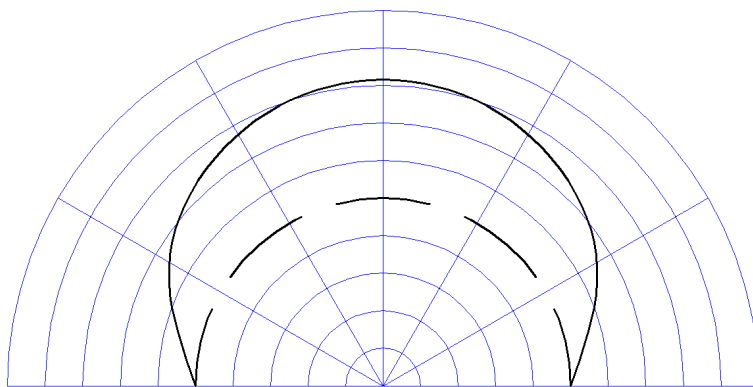


Рисунок 4.3 – Эпюра N_β в центре МГК по длине

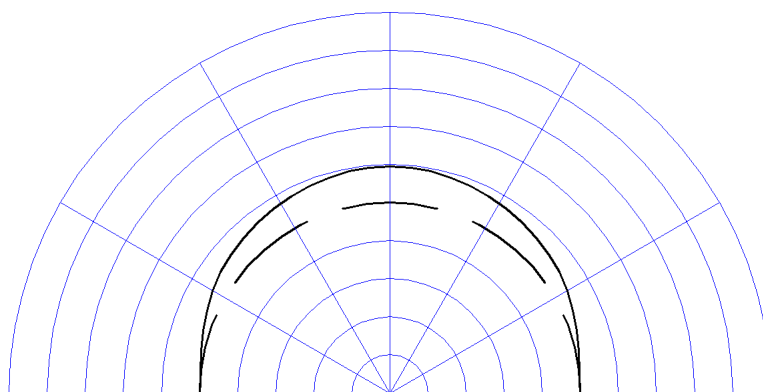


Рисунок 4.4 – Эпюра N_α в центре МГК по длине

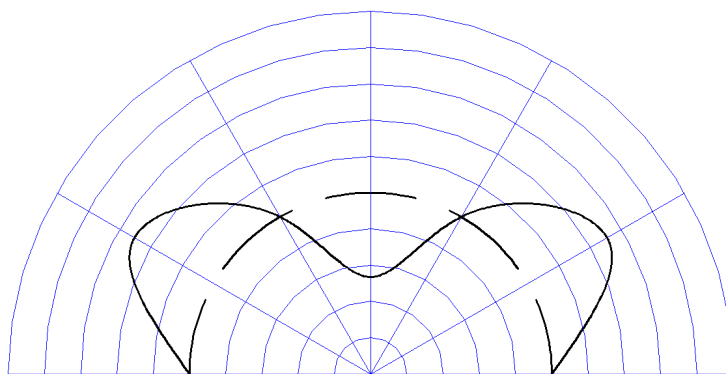


Рисунок 4.5 – Эпюра M_β

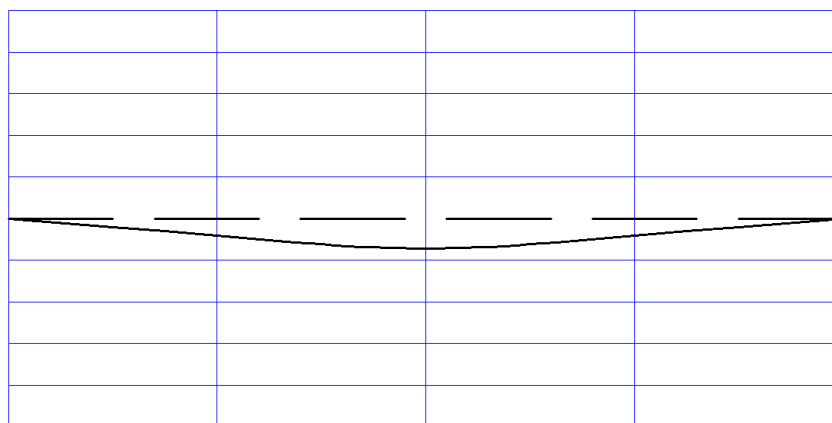


Рисунок 4.6 – Эпюра N_α по длине МГК (в замковой части арки)

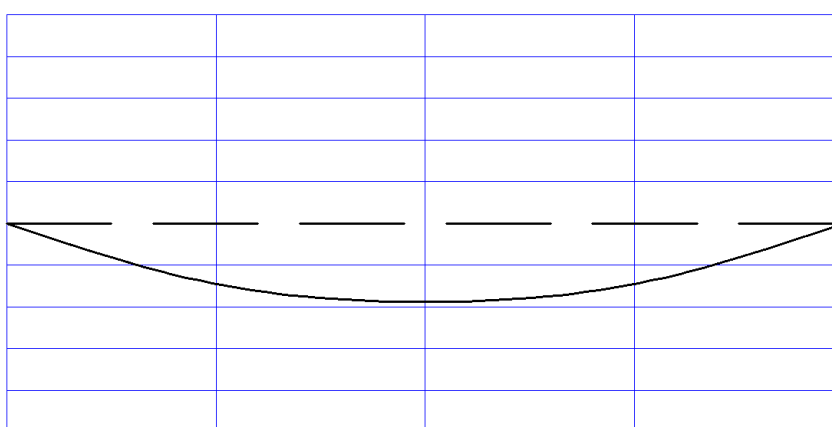


Рисунок 4.7 – Распределение усилий N_β по длине МГК (в замковой части арки)

Как видно на представленных эпюрах, центральная по длине конструкции зона МГК является наиболее загруженным участком, где действуют наибольшие продольные силы, действующие в продольном и в поперечном направлении оболочки. Изгибающий момент, действующий в поперечном направлении оболочки, не зависит от продольной координаты. Необходимо произвести дальнейшие экспериментальные исследования, которые подтвердили бы или опровергли гипотезу о возникновении наибольших продольных сил в центральной части по длине конструкции.

Также необходимо отметить, что продольная сила, действующая в направлении вдоль оболочки (N_α), является значительным по величине усилием, составляющим до 1/3 от продольной силы, действующей в поперечном направлении оболочки (N_β). Данное наблюдение является весьма важным, так как

в традиционных методиках расчета МГК (расчет по приближенным методикам и расчет с помощью МКЭ с применением «плоских» расчетных схем) данный тип усилий не учитывался.

Имея значения усилий, для дальнейших расчетов, рассмотрим гофрированную оболочку действительной формы гофрирования и вычислим напряжения. Для этого автором предлагается использование ПК ЛИРА 9.6, в частности модуля ЛИР-КТС (конструктор тонкостенных сечений), применяя который легко подсчитать значения напряжений во всех точках гофрированного листа. На рисунке 4.8 представлена иллюстрация эпюр напряжений, возникающих в гофрированном листе. На рисунке хорошо видны разные знаки напряжений на вершине и во впадине гофра.

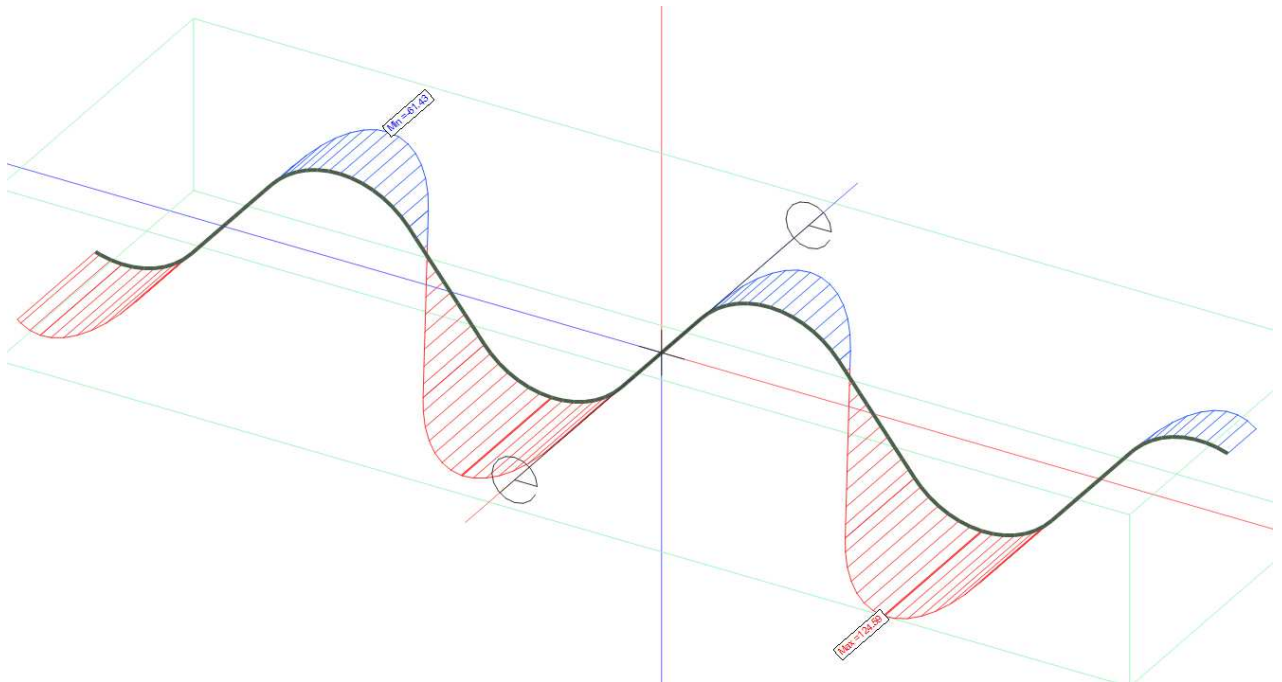


Рисунок 4.8 – Напряжения в гофрированном листе

Получив значения напряжений в листах МГК, можно сравнить результаты расчета с экспериментом, описанным в главе 2.

Сопоставление результатов расчета с экспериментом

На рисунках 4.9, 4.10, 4.11 приведено распределение экспериментальных и расчетных нормальных напряжений по сечению МГК в зависимости от варианта нагружения.

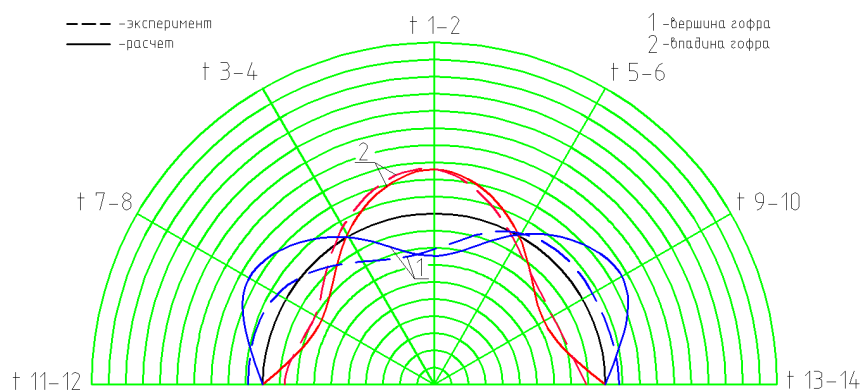


Рисунок 4.9 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 1 (1 радиальное деление – 100 МПа)

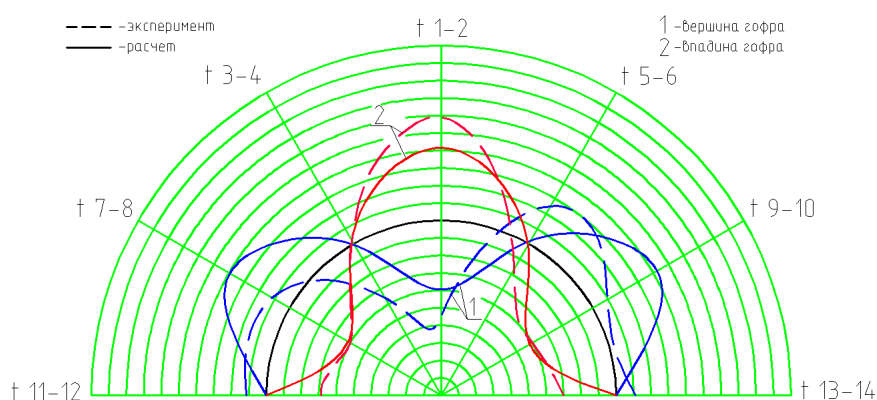


Рисунок 4.10 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 2 (1 радиальное деление – 100 МПа)

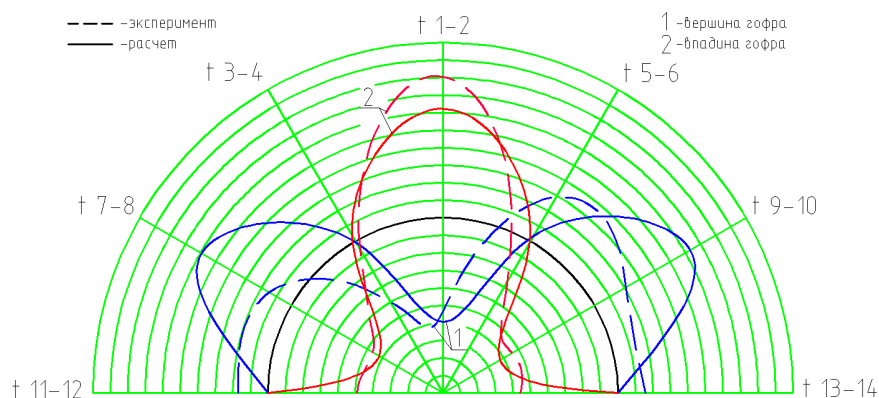


Рисунок 4.11 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 3 (1 радиальное деление – 100 МПа)

Анализ приведенных эпюр нормальных напряжений позволяет отметить, что расчет МГК с помощью теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова

также обеспечивает качественное совпадение расчетных эпюр с экспериментальными. Количественное расхождение в значениях нормальных напряжений не превышает 50% при всех видах нагрузений. Кроме того, применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова дает возможность расчета напряжений, возникающих в продольном направлении МГК, что неосуществимо в случае применения плоских КЭ моделей.

4.5 Расчет цилиндрической гофрированной оболочки при несимметричном загрузении

Основные соотношения в случае несимметричного загрузения останутся теми же, что и при симметричном загрузении. Основными изменениями будут нагрузка, а также соотношения, полученные после введения в уравнения членов, соответствующих нагрузке. Рассмотрим случай несимметричного загрузения МГК, где нагрузка изменяется в пределах от 0 до γH :

$$P_z = \gamma HR(1 - \cos\theta)\cos\theta, P_\alpha = 0;$$

$$P_\beta = \gamma HR(1 - \cos\theta)\sin\theta. \quad (4.55)$$

где γ – объемный вес грунта;

θ – угол между касательной в рассматриваемой точке и горизонталью (рисунок 4.12).

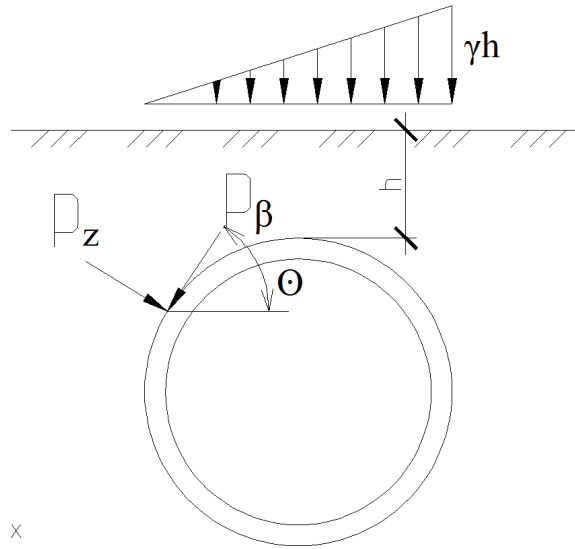


Рисунок 4.12 – Нагрузки, действующие на оболочку в поперечном направлении

Вид вариационных уравнений В.З. Власова при кососимметричном загрузении также не изменится. Рассмотрим вывод уравнений после разложения дифференциального уравнения (4.27) с учетом новых соотношений для нагрузки (4.55):

$$q = -\frac{\partial P_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_\beta}{\partial \beta} - \frac{\partial^2 P_z}{\partial \beta^2}.$$

При этом:

$$P_\alpha = 0;$$

$$P_\beta = \gamma HR(1 - \cos\theta)\sin\theta;$$

$$P_z = \gamma HR(1 - \cos\theta)\cos\theta;$$

где γ – объемный вес грунта.

Необходимо отметить, что углы θ и β равны. Учитывая сказанное выше, можно записать:

$$q = \frac{\partial}{\partial \beta} [\gamma HR(1 - \cos\beta)\sin\beta] - \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} [\gamma HR(1 - \cos\beta)\cos\beta]. \quad (4.56)$$

Выполнив операции дифференцирования, получим:

$$q = \gamma HR[2\cos\beta + \cos 2\beta]. \quad (4.57)$$

Подставим значение q в выражение (4.27), получим:

$$\begin{aligned} & \int_0^\pi \left(\left[\frac{EhR}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin \beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha)}{\partial \alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \right. \\ & \left. - \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \cdot 144(F_2(\alpha) \sin 2\beta + 36F_3(\alpha) \sin 3\beta) \right] + \right. \\ & \left. + R^4 \gamma H [2 \cos \beta + \cos 2\beta] \right) \sin \beta d\beta = 0. \end{aligned} \quad (4.58)$$

Выполним операции интегрирования:

$$\left(\frac{Eh\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \frac{2R^3 \gamma H}{3} = \frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \frac{4R^3 \gamma H(1-\nu^2)}{3Eh\pi} = 0. \quad (4.59)$$

Получили неоднородное дифференциальное уравнение четвертого порядка, из которого можно получить функцию $F_1(\alpha)$.

Перед началом решения дифференциального уравнения введем следующее обозначение:

$$\frac{4R^3 \gamma H(1-\nu^2)}{3Eh\pi} = \psi. \quad (4.60)$$

Получим:

$$\frac{\partial^4 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \psi = 0. \quad (4.61)$$

Решением неоднородного дифференциального уравнения (4.61) является:

$$F_1(\alpha) = \frac{\psi}{24} \alpha^4 + C_1 \alpha^3 + C_2 \alpha^2 + C_3 \alpha + C_4, \quad (4.62)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования.

Для поиска произвольных постоянных введем граничные условия, соответствующие свободному краю оболочки:

$$u\left(0, \frac{l}{R}\right) = 0 \text{ и } N_\alpha\left(0, \frac{l}{R}\right) = 0. \quad (4.63)$$

Учитывая, что $N_\alpha = -\frac{Eh\sin\beta}{(1-\nu^2)R} \frac{\partial^2 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^2}$, а $u = -\sin\beta \frac{\partial F_1(\alpha)}{\partial \alpha}$, можно переписать граничные условия следующим образом:

$$\text{При } \alpha = 0, \alpha = \frac{l}{R};$$

$$\frac{\partial^2 F_1(\alpha)}{\partial \alpha^2} = 0, \frac{\partial F_1(\alpha)}{\partial \alpha} = 0. \quad (4.64)$$

Выполнив дифференцирование, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_3 = 0, \\ C_2 = 0, \\ \frac{\gamma}{6}\alpha^3 + 3C_1\alpha^2 = 0, \\ \frac{\gamma}{2}\alpha^2 + 6C_1\alpha = 0. \end{cases} \quad (4.65)$$

В итоге получим: $C_1 = -\frac{\gamma l}{12R}, C_2 = 0, C_3 = 0.$

Подставим полученные значения произвольных постоянных в уравнение (4.62):

$$F_1(\alpha) = \frac{\gamma}{24}\alpha^4 - \frac{\gamma l}{12R}\alpha^3 + C_4. \quad (4.66)$$

Выполним операции, аналогичные проделанным в уравнениях (4.60) – (4.66) для второго и третьего уравнений системы (4.22).

Второе уравнение после завершения операций будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{EhR\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{\partial^4 F_2(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \frac{6E\pi\overline{h^3}}{(1-\nu^2)} \cdot F_2(\alpha) + \frac{8}{3}R^4\gamma H = \\ & = \frac{\partial^4 F_2(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \frac{12\overline{h^3}}{hR} \cdot F_2(\alpha) + \frac{16R^3\gamma H(1-\nu^2)}{3Eh\pi} = 0. \end{aligned} \quad (4.67)$$

Третье уравнение после завершения операций будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{EhR\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{\partial^4 F_3(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \frac{3E\pi\bar{h}^3}{2(1-\nu^2)} \cdot F_3(\alpha) + \frac{6}{5} R^4 \gamma H = \\ & = \frac{\partial^4 F_3(\alpha)}{\partial \alpha^4} - \frac{3\bar{h}^3}{hR} \cdot F_3(\alpha) + \frac{6R^3 \gamma H(1-\nu^2)}{5Eh\pi} = 0. \end{aligned} \quad (4.68)$$

Как видим, второе и третье уравнения имеют одинаковый вид, который в общем виде можно записать следующим образом:

$$y(x) = y'''' - B \cdot y - \dot{Q} = 0. \quad (4.69)$$

Решением неоднородного дифференциального уравнения (4.69) является:

$$y(x) = C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot x} + C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot x} + C_3 \sin(\sqrt[4]{B} \cdot x) + C_4 \cos(\sqrt[4]{B} \cdot x) + \frac{\dot{Q}}{B_1}, \quad (4.70)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования.

Для поиска произвольных постоянных введем граничные условия, аналогичные условиям (4.38), соответствующим свободному краю оболочки:

$$\text{При } x = 0, x = \frac{l}{R};$$

$$y(x)'' = 0, y(x)' = 0. \quad (4.71)$$

Выполнив дифференцирование, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_1 - C_2 + C_3 = 0, \\ C_1 + C_2 - C_3 = 0, \\ C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} - C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} + C_3 \cos(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}) - C_4 \sin(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}) = 0, \\ C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} + C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} - C_3 \sin(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}) - C_4 \cos(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}) = 0. \end{cases} \quad (4.72)$$

В итоге получим: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$.

Подставим полученные значения произвольных постоянных в уравнение (4.69):

$$y(x) = \frac{\dot{y}}{B}. \quad (4.73)$$

Учитывая уравнения (4.67) – (4.68) получим значения $F_2(\alpha)$ и $F_3(\alpha)$:

$$F_2(\alpha) = -\frac{4R^4\gamma H(1-v^2)}{9E\hbar^3\pi}, \quad (4.74)$$

$$F_3(\alpha) = -\frac{2R^4\gamma H(1-v^2)}{5E\hbar^3\pi}. \quad (4.75)$$

Зная $F_1(\alpha), F_2(\alpha), F_3(\alpha)$, можно получить формулы, позволяющие рассчитать значения усилий в оболочке N_α, N_β и M_β :

$$\begin{aligned} N_\alpha &= -\frac{Eh}{(1-v^2)R} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} [F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta] = \\ &= -\frac{Eh\sin\beta}{(1-v^2)R} \left[\frac{2R^3\gamma H(3+\xi)(1-v^2)}{3Eh\pi} \alpha^2 - \frac{2R^2\gamma Hl(3+\xi)(1-v^2)}{3Eh\pi} \alpha \right]; \\ N_\alpha &= -\frac{2R\gamma H(3+\xi)\sin\beta}{3\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \end{aligned} \quad (4.76)$$

$$\begin{aligned} N_\beta &= -\frac{E\hbar v}{(1-v^2)R} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} [F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta] = \\ &= -\frac{E\hbar v\sin\beta}{(1-v^2)R} \left[\frac{2R^3\gamma H(3+\xi)(1-v^2)}{3Eh\pi} \alpha^2 - \frac{2R^2\gamma Hl(3+\xi)(1-v^2)}{3Eh\pi} \alpha \right]; \\ N_\beta &= -\frac{2R\gamma H\hbar v(3+\xi)\sin\beta}{3h\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \end{aligned} \quad (4.77)$$

Получим значение M_β :

$$\begin{aligned} M_\beta &= -\frac{E\hbar^3}{12(1-v^2)R^2} \left[\frac{\partial^4}{\partial \beta^4} (F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} (F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta) \right]; \end{aligned}$$

$$M_{\beta} = -\frac{E\bar{h}^3}{12(1-\nu^2)R^2} \left[-\frac{32R^4\gamma H(1-\nu^2)}{9E\bar{h}^3\pi} \sin 2\beta - \frac{144R^4\gamma H(1-\nu^2)}{5E\bar{h}^3\pi} \sin 3\beta \right];$$

$$M_{\beta} = \frac{\gamma HR^2}{\pi} \left[\frac{8}{27} \sin 2\beta + \frac{12}{5} \sin 3\beta \right]. \quad (4.78)$$

В конечном итоге получаем следующие уравнения для получения усилий, действующих в полукруглой МГК при несимметричном нагружении:

$$N_{\alpha} = -\frac{2R\gamma H(3+\xi)\sin\beta}{3\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]; \quad (4.79)$$

$$N_{\beta} = -\frac{2R\gamma H\bar{h}\nu(3+\xi)\sin\beta}{3h\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]; \quad (4.80)$$

$$M_{\beta} = \frac{\gamma HR^2}{\pi} \left[\frac{8}{27} \sin 2\beta + \frac{12}{5} \sin 3\beta \right]. \quad (4.81)$$

Эпюры усилий, полученных при использовании формул (4.79 – 4.81) представлены на рисунках 4.13 – 4.17.

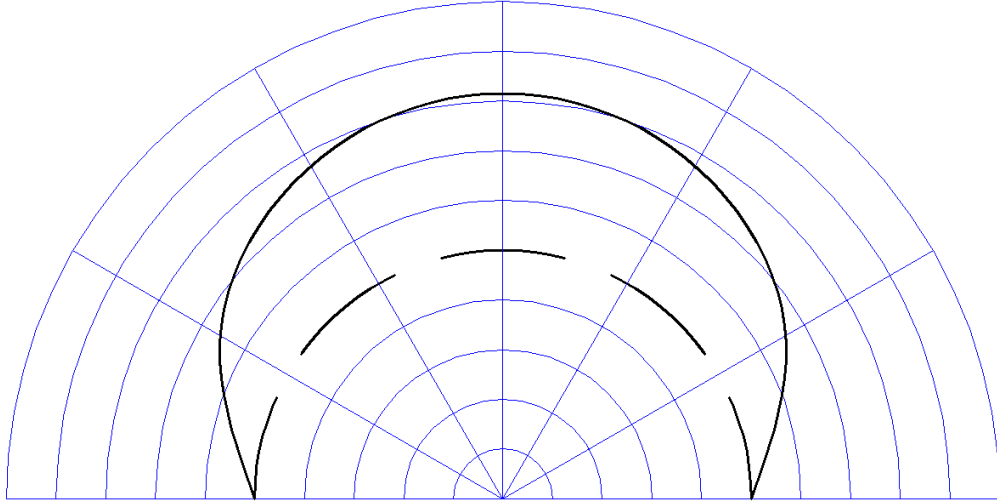


Рисунок 4.13 – Эпюра N_{β}

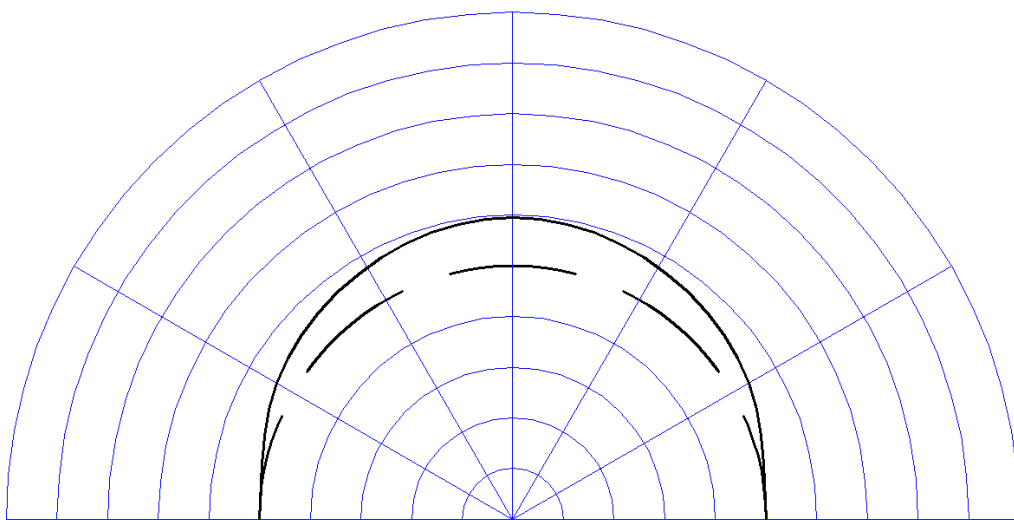


Рисунок 4.14 – Эпюра N_α в центре МГК по длине

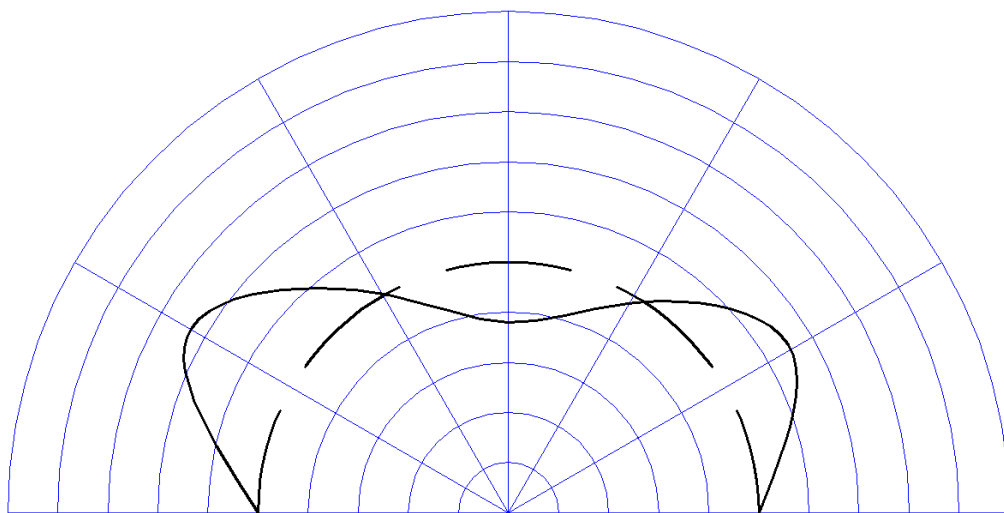


Рисунок 4.15 – Эпюра M_β

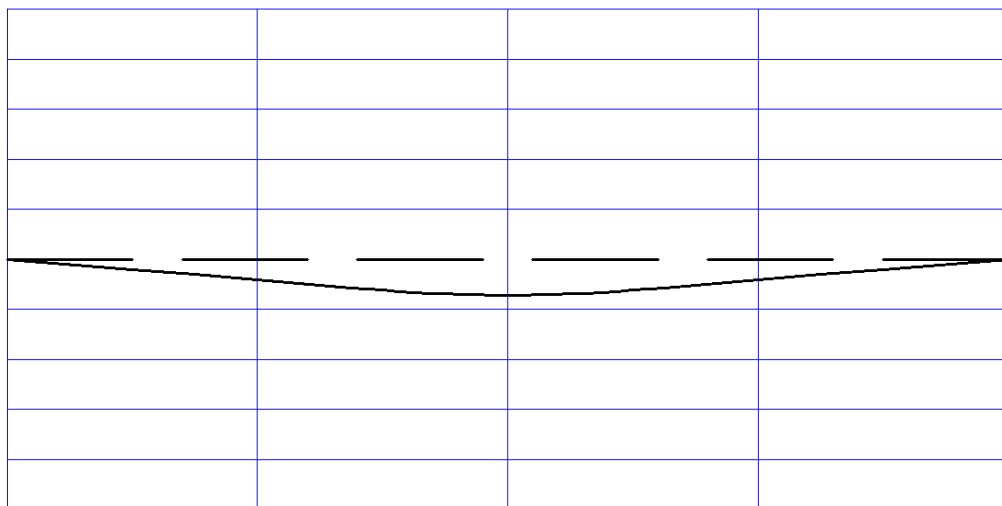


Рисунок 4.16 – Эпюра N_α по длине МГК (в замковой части арки)

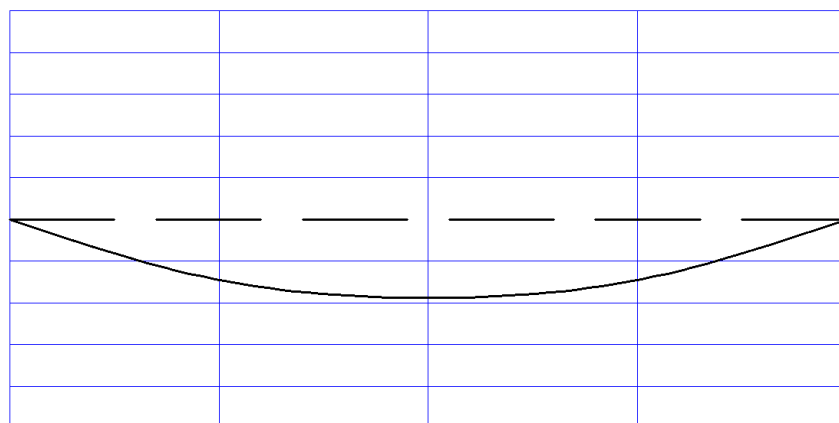


Рисунок 4.17 – Распределение усилий N_β по длине МГК (в замковой части арки)

Выводы по главе 4

1. Используя аппарат теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова можно получить довольно простые уравнения для получения усилий в металлических гофрированных конструкциях. Простота полученных уравнений позволяет легко рассчитывать усилия в конструкциях и позволяет внедрить данный аппарат в практику проектирования в короткие сроки. С помощью аппарата теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова можно создать банк готовых методик расчета для разного типа конструкций (замкнутых и незамкнутых круговых и эллиптических МГК), что позволит создать простые и понятные в использовании программы для расчета МГК.

2. Применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова позволяет рассчитывать МГК, находящиеся при симметричном и несимметричном нагружении, что позволит учитывать реальные условия, возникающие при строительстве и эксплуатации МГК.

3. Расчеты, выполненные с применением теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова, отличаются большей точностью, чем расчеты, выполненные с помощью метода конечных элементов и значительно более точны, чем расчеты, выполненные с помощью приближенных методик, представленных в нормативной базе.

4. Применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова позволяет учитывать продольную силу, действующую вдоль оболочки, а также учитывать распределение продольной силы, действующей в поперечном направлении оболочки по длине сооружения. Данные компоненты напряженно-деформированного состояния МГК ранее учитывались только при применении пространственных моделей в программных комплексах, использующих МГК. Использование пространственных моделей является весьма сложной задачей, так как, имея все недостатки применения МКЭ (приведены в главе 1 настоящей работы), к тому же требуют высочайшей квалификации инженера и незаурядной

способности обрабатывать огромные массивы данных, полученных в результате расчета. Расчет с применением теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова в сравнении с применением пространственных конечноэлементных моделей требует ввода около 10 исходных данных и применения 3 формул.

5. При расчете компонентов напряженно-деформированного состояния МГК в направлении вдоль оболочки обнаружено, что обе продольные силы имеют неоднородное распределение по длине конструкции. Наибольшие значения продольных сил, действующих вдоль и поперек конструкции, зафиксированы в центральной части оболочки. В целом данное наблюдение, полученное в результате расчетов, на настоящий момент не может быть подтверждено или опровергнуто, так как экспериментальные данные почти не содержат сведений о работе МГК по длине. Для изучения данного вопроса необходимо провести дополнительные исследования.

5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА И НАЛИЧИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В процессе эксплуатации МГК подвергаются воздействию силовых нагрузок, агрессивной среды и температурным воздействиям. Разного рода агрессивные среды оказывают весьма разнообразное влияние на конструкции. Достаточно подробный анализ представлен в п.п. главы 1 настоящей работы (таблица 1.2). Помимо самих конструкций некоторые агрессивные среды оказывают значительное влияние на грунт, окружающий сооружение, меняя его свойства. В момент, когда фронт агрессивной среды достигает металла конструкций, начинается процесс коррозии. Причем коррозионный процесс протекает по-разному, в зависимости от того, является ли конструкция защищенной или не защищенной защитными покрытиями.

5.1 Примеры коррозионных повреждений металлических гофрированных конструкций, а также стальных труб, эксплуатируемых в грунтовой среде; экспериментальные данные по кинетике коррозионных повреждений

Коррозионные повреждения металлических гофрированных конструкций весьма распространены. В подтверждение данного высказывания необходимо отметить коррозионные повреждения внутренней поверхности гофрированных труб, которые были обнаружены при проведении осмотров трубы в тупике взрывчатых веществ ст. Стриганово Свердловской ж.д. и гофрированных водопропускных труб на автомобильной дороге Артемовский – Зайково [84,85].

Коррозионные повреждения внутренней поверхности МГК в основном появляются в местах скопления влаги – в лотке. Также к характерному типу повреждений МГК относится коррозия металла в гофрах лотка, где вода застаивается дольше всего. Характерные коррозионные повреждения МГК представлены на рисунках 5.1 – 5.3.

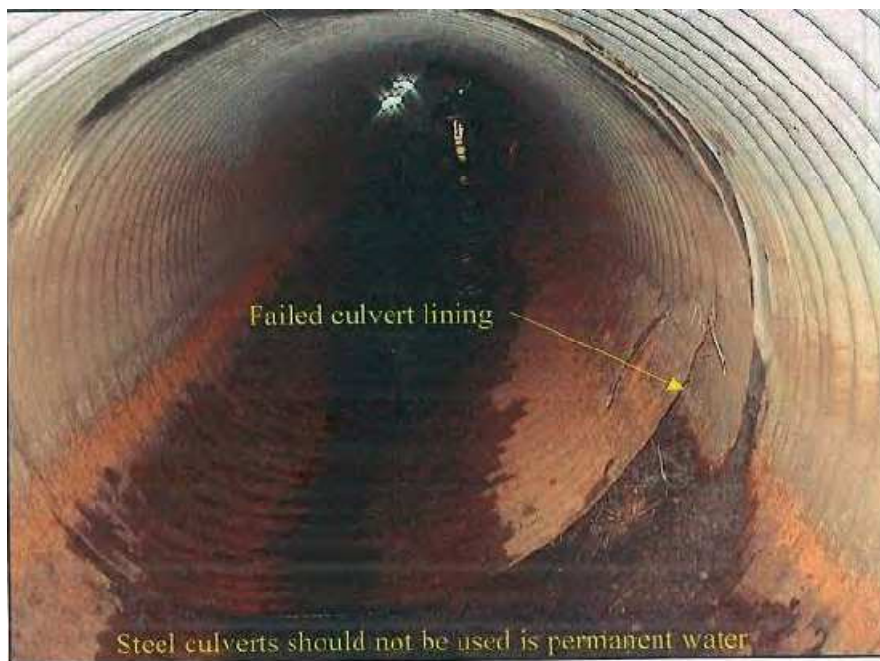


Рисунок 5.1 – Характерные коррозионные повреждения лотка МГК

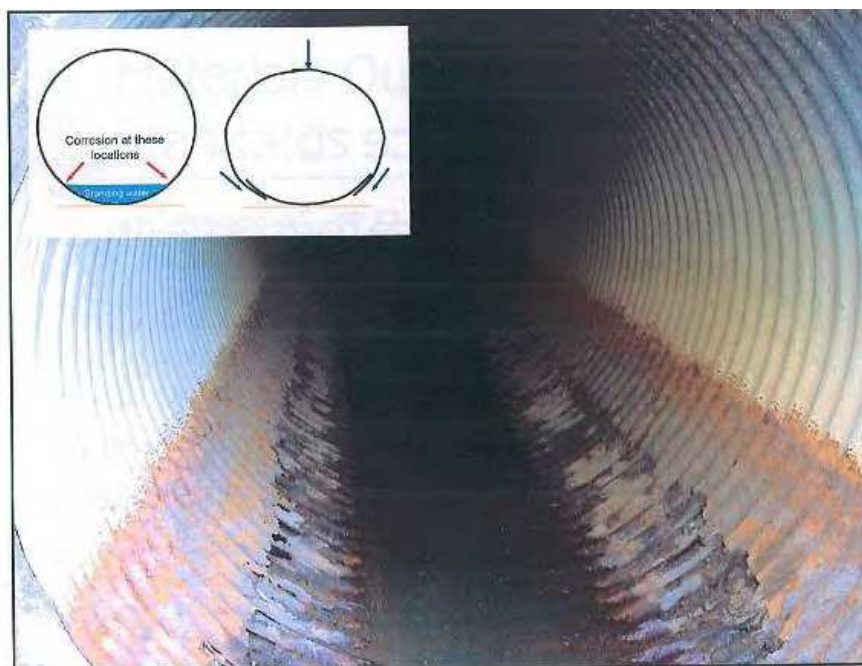


Рисунок 5.2 – Характерные коррозионные повреждения лотка МГК



Рисунок 5.3 – Характерные коррозионные повреждения лотка МГК

Следует, однако, отметить, что в процессе осмотров и обследований эксплуатируемых сооружений крайне сложно определить характер и степень коррозионного поражения внешней поверхности МГК (так как для этого необходима откопка обследуемого сооружения). Фактически возможно установить только коррозионные явления в значительной степени развития, приведшие к сквозному коррозионному поражению.

Учитывая вышесказанное, для построения моделей коррозионного поражения придется прибегнуть к использованию имеющихся данных, полученных в ходе обследования иных металлических сооружений, эксплуатируемых в грунтовой среде. Одним из типов данных сооружений являются подземные трубопроводы. Характер коррозионного поражения трубопроводов достаточно хорошо изучен и описан в книге [71].

Экспериментальные данные по кинетике коррозионных повреждений

К настоящему времени накоплено достаточное количество экспериментальных данных по кинетике коррозионных процессов различных

металлических конструкций. Различные экспериментальные кривые, собранные из различных публикаций, приведены в монографиях [54, 67, 68, 70, 72, 87, 89, 30].

Поэтому ниже мы приведем экспериментальные данные, которые пока что не нашли отражения в упомянутой литературе, а именно экспериментальные данные по кинетике коррозионных процессов конструкций с учетом влияния защитных покрытий и температуры.

В статье [92] приведены экспериментальные данные по зависимости глубины разъедания образцов ($\delta, 10^{-3}$ мм) от продолжительности коррозионного процесса при разных температурах (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Экспериментальные данные по зависимости глубины разъедания образцов ($\delta, 10^{-3}$ мм) от продолжительности коррозионного процесса при разных температурах

Время, часы	Температура, °C				
	20	30	40	50	60
120	4,754	5,889	14,192	24,127	43,057
240	17,740	24,150	45,415	74,509	144,417
360	39,029	51,092	95,798	155,407	293,377
480	65,284	78,767	155,295	245,528	485,087
600	98,637	119,925	242,689	369,359	716,502
720	145,902	164,620	309,889	507,994	985,432

Эксперименты проводились с образцами из стали 17Г1С-У с размерами 50x100x0,3 мм. Коррозионная среда – 3,5%-ный раствор NaCl. В реальных условиях концентрация NaCl колеблется в пределах 0,05-0,07%. В качестве материала для антикоррозионного слоя на поверхности образцов использовалась композиция в виде суспензии разных пигментов в толуольных растворах полиорганосилоксановых смоло-кремнийорганических лаков. Среднестатистическая толщина слоя $25 \cdot 10^{-3}$ мм.

Автор настоящей диссертационной работы, основываясь на результатах экспериментов, отвергает до сих пор бытовавшее мнение, что под слоем антикоррозионной защиты коррозионные процессы полностью отсутствуют. Эти процессы происходят с возрастающей во времени скоростью. По всей видимости, это вызвано повышением проницаемости антикоррозионного материала для ионов-окислителей из-за разрушения защитного материала во время его

взаимодействия с коррозионной средой. Интенсивность коррозионных процессов может быть уменьшена путем увеличения толщины антикоррозионной защиты.

А.Ф. Марченко [62] также отмечает, что интенсивная коррозия стали оболочечных конструкций, эксплуатируемых в грунтовой среде, независимо от района расположения конструкции, наблюдается в тех случаях, когда он работает при повышенных температурах. Кроме того, удалось экспериментально установить, что, вопреки ранее бытовавшим утверждениям, коррозионная активность грунтов не может быть установлена через показатели удельного электросопротивления почвенно-грунтовой среды; гальванические макропары, которые действительно образуются, не являются механизмом коррозионного процесса. Чтобы металл корродировал (в почвенных или атмосферных условиях), необходимы вода и кислород. Наличие этих двух компонентов вполне достаточно для совершения коррозионного процесса. И механизм коррозии металлов состоит не в работе микро- и макропар, а в адсорбционных процессах.

Автор справедливо утверждает, что движущей силой коррозионного процесса является энергия. По этой причине скорость коррозии металлов с повышением температуры обычно увеличивается, а при понижении – уменьшается; температура – основной фактор, определяющий в каждом конкретном случае скорость коррозионного процесса.

Результаты экспериментальных исследований почвенной коррозии трубопроводной стали в естественных условиях в различных районах приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2–Результаты экспериментальных исследований почвенной коррозии трубопроводной стали в естественных условиях в различных районах

Район размещения коррозионной станции	Общая характеристика почв грунта на станции	Температура, °С на глубине, м		Коррозионные потери стали, г/дм ² в год на глубине, м		Характеристики коррозионного разрушения
		0,6	1,2	0,6	1,2	
1	2	3	4	5	6	7
На Крайнем Севере						
Салехард	суглинок	-1,5	-3,0	0,0	0,0	равномерный

Окончание таблицы 5.2

1	2	3	4	5	6	7
Тарка	супесь	+1,2	-0,9	0,8	0,0	равномерный
Игрим	торфяник	+1,3	+0,8	1,6	0,6	
Сургут	супесь	+2,2	+1,3	1,2	1,3	
Надым	торфяник	+2,3	-1,2	1,4	0,0	
Ухта	суглинок	+3,2	-1,1	1,9	0,0	
В Западной и Восточной Сибири						
Тюмень	суглинок	+4,5	+2,3	2,2	1,1	равномерный
Екатеринбург	суглинок	+9,2	+4,6	1,7	0,9	
Челябинск	супесь	+7,2	+3,6	1,6	0,9	
Новосибирск	супесь	+8,2	+4,1	1,9	0,7	
Иркутск	чернозем	+9,0	+5,0	2,1	0,9	
Чита	суглинок	+6,2	+4,2	1,3	1,1	
Хабаровск	чернозем	+9,3	+6,5	1,8	1,3	
Омск	супесь	+7,2	+4,3	2,0	1,4	
Красноярск	суглинок	+5,8	+6,4	1,2	0,43	
В Центральных и Южных районах						
Москва	супесь	+10,0	+8,3	7,8	4,9	равномерный
Полтава	чернозем	+16,0	+13,0	12,9	16,9	неравномерный
Краснодар	чернозем	+19,3	+15,8	18,2	17,3	неравномерный
В Средней Азии						
Ташкент	суглинок	+19,0	+18,3	22,4	19,3	равномерный
Самарканд	супесь	+19,8	+21,1	22,9	18,7	равномерный
Бухара	известняк	+24,3	+22,0	25,6	16,9	неравномерный
Каган	супесь	+26,0	+17,8	29,6	28,3	неравномерный
Угреч	суглинок	+28,4	+22,3	26,2	25,3	равномерный

Примечания:

1. Температуры измерялись: на Крайнем Севере, в Западной Сибири и Восточной Сибири – в летний период, в Средней Азии – в осенний.
2. Образцы извлекались ровно через год.

Анализ данных в этой таблице показывает, что величина коррозии стали увеличивается по мере перехода из северных районов в южные. В условиях Средней Азии коррозия наибольшая. В северных районах при температуре ниже 0°C коррозия стали не происходит.

Скорость коррозии стали в естественных условиях находится в прямой зависимости от температуры почвенно-грунтовой среды. На рисунке 5.4 приведена зависимость скорости коррозии стали от среднегодовой температуры на глубине заложения оболочечной конструкции (1 – в песчаном грунте, 2 – в глинистом грунте). В таблице 5.3 приведены экспериментальные данные по скорости почвенной коррозии стали при различной температуре в интервале 40-120 °C.

На рисунке 5.5 приведены зависимости скорости коррозии стали 17Г1С от

температуры и концентрации NaCl. Как видно, скорость почвенной коррозии сильно зависит от температуры, причем в интервале температур от 40 до 80 °С проявляется практически линейная зависимость. Максимальная скорость коррозии достигается при температуре около 80 °С. При дальнейшем повышении температуры скорость коррозии значительно снижается, что можно объяснить быстрым высыханием почвенной среды. При такой высокой температуре коррозионный процесс протекает неравномерно, с образованием каверн, причем скорость их образования может достигать 2,5 мм/год. Очевидно, что в таких условиях за 5-7 лет стенка оболочки толщиной 10-12 мм может прородировать насквозь.

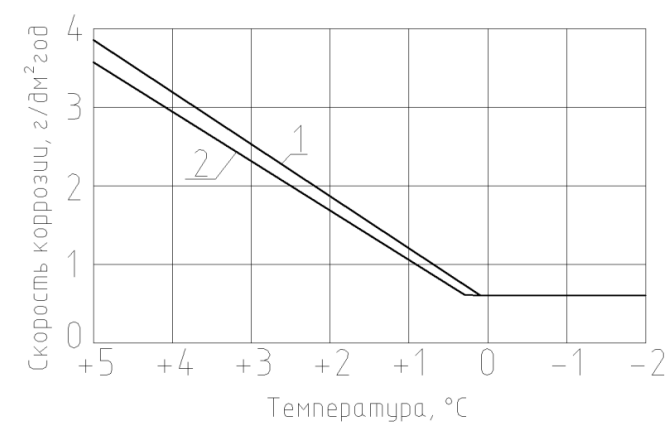


Рисунок 5.4 – Скорость коррозии трубостальной стали в зависимости от типа грунта и среднегодовой температуры:
1 – в песчаном грунте; 2 – в глинистом грунте

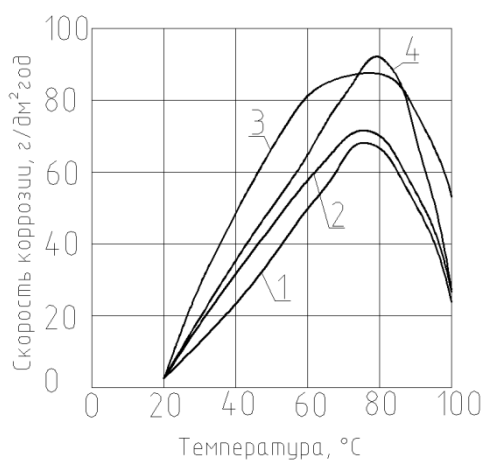


Рисунок 5.5 – Скорость коррозии стали 17Г1С в зависимости от температуры и агрессивной среды:
1 – в мягкой воде; 2 – в 1%-ном растворе NaCl;
3 – в 3%-ном растворе NaCl; 4 – в 6%-ном растворе NaCl

Таблица 5.3 – Скорость почвенной коррозии трубопроводной стали при различной температуре

Температура, °С	Тип стали	Коррозионная среда	Влажность коррозионной среды	Коррозионные потери, г/дм ² в год	Среднее значение из трех образцов, г/дм ² в год	Глубина коррозионных каверн, мм/год
40±2	17Г1С Ст 3 Швеция	60% песка, 40% глины	21,3-15,8	24,8 25,9 26,0	25,6	0,7
60±2	17Г1С Ст 3 Германия	60% песка, 40% глины	29,7-17,0	46,9 41,6 41,6	44,5	0,9
80±2	17Г1С Ст 3 Япония		19,6-13,7	74,5 85,0 80,3	79,9	1,2
100±2	17Г1С Ст 3 Швеция		15,4-9,1	53,4 69,6 65,2	62,7	1,8
120±2	17Г1С Ст 3 Германия		23,7-1,0	20,4 19,6 19,2	19,7	2,6

Данные по отказам трубопроводов в США позволяют утверждать, что среди причин аварий почвенная коррозия стоит на первом месте. Тот факт, что применение изоляции не предотвращает коррозии трубопроводов, подтверждается и данными о скорости коррозии трубопроводов, изолированных битумными покрытиями, приведенными в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Скорость коррозии трубопроводной стали в зависимости от типа покрытия

Трубопровод	Тип изоляции	Вид коррозии	Скорость коррозии, мм/год
Газопровод Саратов – Москва	усиленная битумная	почвенная	0,9
Нефтепродуктопровод Астрахань – Москва	битумная	почвенная	0,42-0,5
Задунайский нефтепровод, Венгрия	грунтовка и битумная мастика	почвенная	0,6-1,3
Распределительные газовые сети Москвы	нормальная битумная	электрокоррозия	18-30

5.2 Моделирование коррозионного повреждения металлических конструкций при отсутствии и наличии антикоррозионных покрытий

5.2.1 Модели коррозионного износа при отсутствии защитных покрытий и их идентификация

Несмотря на то, что фактически МГК являются оболочечными конструкциями, с точки зрения практики проектирования, строительства и эксплуатации данного типа сооружений интересно рассмотреть металлические гофрированные листы в качестве стержней. Данный подход заключается в том, что гофрированный лист рассматривается как стержень, имеющий поперечное сечений, соответствующее форме гофрирования листа, но рассматривается только единичная ширина листа, равная 1 м. Изменение геометрических характеристик сечений разных типов выполнено в книге [71]. В данной части будет рассмотрено изменение геометрических характеристик гофрированного листа под действием агрессивной среды, причем в сравнении с динамикой аналогичных процессов для других типов сечений, описанных в книге [71].

Основными геометрическими параметрами, влияющими на величину напряжений в стержневом элементе, будут соответственно: площадь поперечного сечения элемента A , величины моментов инерции J_x , J_y и момента сопротивления W_{xy} . Выбрав в качестве параметра коррозионной поврежденности δ – глубину коррозионного слоя элемента, введем предположение, что сечение ослабляется коррозией равномерно, т.е. элемент «погружен в среду».

Для выполнения предстоящего прочностного расчета необходимо выявить зависимость, по которой происходит во времени уменьшение площади поперечного сечения (вследствие коррозионного износа), изменение моментов инерции и моментов сопротивления для различных форм поперечного сечения

стержневых элементов.

Предварительно рассмотрим подверженное коррозии сечение произвольной формы, положения центра тяжести и центральных главных осей которого вследствие принятой математической модели коррозионного разрушения изменяются в течение времени от влияния агрессивной среды. Для рассматриваемого сечения в произвольный момент времени t от начала воздействия на конструкцию агрессивной среды необходимо определить положение главных центральных осей и главные моменты инерции приведенного сечения.

При использовании произвольной ортогональной системы координат (x, y) считается, что в любой точке сечения задана функция сплошности материала $\varphi(x, y, t)$ (учитывающая свойства материала и агрессивной среды, форму сечения и т.п.), удовлетворяющая неравенству $0 \leq \varphi(x, y, t) \leq 1$. Геометрические характеристики сечения (площадь поперечного сечения, статические моменты, осевые и центробежные моменты инерции) в начальной системе координат в момент времени $t = 0$ вычисляются по известным формулам:

$$\begin{aligned} A_{(t)} &= \int_F dA; \quad S_{x(t)} = \int_A y dA; \quad S_{y(t)} = \int_A x dA; \\ J_{x(t)} &= \int_A y^2 dA; \quad J_{y(t)} = \int_A x^2 dA; \quad J_{x(t)y(t)} = \int_A xy dA. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Положения центра тяжести изменяющегося в процессе коррозии сечения, его центральных главных осей и главных моментов инерции для момента времени t от начала воздействия агрессивной среды определяются из следующих соотношений с использованием численного интегрирования:

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_A \varphi(x, y, t) dA; \quad S_{x_0(t)} = \int_A \varphi(x, y, t) y dA; \quad S_{y_0(t)} = \int_A \varphi(x, y, t) x dA; \\ J_{x_0(t)} &= \int_A \varphi(x, y, t) y^2 dA; \quad J_{y_0(t)} = \int_A \varphi(x, y, t) x^2 dA; \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$J_{x_0(t)y_0(t)} = \int_A \varphi(x, y, t) y x dA;$$

$$a_x(t) = \frac{S_{y_0(t)}}{A_1} = \frac{\int_A \varphi(x, y, t) x dA}{\int_A \varphi(x, y, t) dA}; \quad a_y(t) = \frac{S_{x_0(t)}}{A_1} = \frac{\int_A \varphi(x, y, t) y dA}{\int_A \varphi(x, y, t) dA}. \quad (5.3)$$

При разбиении сечения сеткой, составленной (в случае декартовой системы координат) прямыми линиями, параллельными координатным осям, выделим из множества Θ_Σ всех элементарных участков подмножество Θ_1 , координат, примыкающих к контуру сечения, и подмножество Θ_Σ , координат, лежащих внутри сечения. Для корродирующего сечения в момент времени t площадь и статические моменты относительно осей (x, y) вычисляются с использованием численного интегрирования:

$$A_t = \int_A \varphi(x, y, t) dA = \sum_{ij \in \Theta_\Sigma} \varphi(x_{ij}, y_{ij}, t) \Delta A; \quad (5.4)$$

$$S_{xt} = \int_A \varphi(x, y, t) y dA = \sum_{ij \in \Theta_\Sigma} \varphi(x_{ij}, y_{ij}, t) y_{ij} \Delta A_{ij}; \quad (5.5)$$

$$S_{yt} = \int_A \varphi(x, y, t) x dA = \sum_{ij \in \Theta_\Sigma} \varphi(x_{ij}, y_{ij}, t) x_{ij} \Delta A_{ij}, \quad (5.6)$$

где
$$\begin{cases} \Delta A_1 = \Delta x \Delta y, (i, j) \in \Theta_1, \\ \Delta A_2 = \frac{1}{2} \Delta x \Delta y, (i, j) \in \Theta_2. \end{cases}$$

В соответствии с (5.3) вычислим координаты приведенного центра тяжести корродирующего сечения в момент времени t в начальных координатных осях (x, y) :

$$a_{xt} = \frac{S_{yt}}{A_t}; \quad a_{yt} = \frac{S_{xt}}{A_t}. \quad (5.7)$$

Центральные (вообще говоря, не главные) моменты инерции корродирующего сечения вычисляются с использованием соотношения между моментами инерции при параллельном переносе осей, имеется в виду переход от произвольно выбранных осей (x, y) к параллельным им центральным

осям (x_n, y_n) :

$$J_{xnt} = J_{xt} - (a_{yt})^2 A_t; J_{ynt} = J_{yt} - (a_{xt})^2 A_t; J_{xynt} = J_{xyt} - x a_{xt} a_{yt} A_t. \quad (5.8)$$

Угол $a_c(t)$ между главными x_{ct}, y_{ct} и центральными (x, y) осями определяется зависимостью:

$$a_c(t) = \frac{1}{2} \arctg \left(-\frac{2J_{x_1 y_1 t}}{J_{x_1 t} - J_{y_1 t}} \right). \quad (5.9)$$

Главные центральные моменты инерции корродирующего сечения в момент времени t находятся по формулам:

$$J_{\frac{max}{min}} = J^{(+)} \pm \sqrt{(J^{(-)})^2 + J_{xyt}^2}; J^{(+)} = \frac{1}{2} (J_{xt} + J_{yt}); J^{(-)} = \frac{1}{2} (J_{xt} - J_{yt}). \quad (5.10)$$

В случае изменения во времени положения главных центральных осей корродирующего сечения первоначальное состояние чистого изгиба балок регулярной стержневой системы переходит в состояние косоугольного изгиба.

При вычислении жесткости при изгибе и продольной деформации функцию сплошности обозначим $\varphi(x, y, t)$. С целью максимально полного учета особенностей материала регулярной стержневой системы (определенных в результате экспериментальных исследований) функцию сплошности материала при кручении считаем отличной от $\varphi(x, y, t)$ и обозначаем $\hat{\varphi}(x, y, t)$.

Полярный момент инерции определяется по формуле:

$$J_p = \int_{A_0} p^2 dA. \quad (5.11)$$

С использованием введенной функции сплошности материала при кручении установим связь между модулем сдвига $G(x, y, t)$ в произвольной точке с координатами x, y сечения корродирующего стержня и модулем сдвига G_0 того же материала, не подвергшегося коррозионному разрушению:

$$G(x, y, t) = G_0 \hat{\varphi}(x, y, t). \quad (5.12)$$

Соответственно касательные напряжения в произвольной точке корродирующего сечения могут быть выражены через соответствующее напряжение в некорродирующей балке:

$$\tau(x, y, t) = \tau_0 \hat{\varphi}(x, y, t). \quad (5.13)$$

Итак, на основе соотношений (5.12), (5.13) можно описывать работу материала коррозионного слоя, полностью потерявшего несущую способность $\{\varphi(x, y, t) = 0\}$, частично его сохранившего $\{0 < \varphi(x, y, t) < 1\}$ и материала вне коррозионного слоя $\{\varphi(x, y, t) = 1\}$.

Для сплошного круглого и трубчатого сечений полярные моменты инерции определяются выражениями:

$$J_p^{\text{спл}} = \frac{1}{2} \pi R_0^4; J_p^{\text{труб}} = \frac{1}{2} \pi (R_0^4 - r_0^4). \quad (5.14)$$

где R_0, r_0 – соответственно наружный и внутренний радиусы сечений.

Для решения задачи о кручении балки прямоугольного сечения на практике при расчетах используют понятие «момент инерции при кручении», определяемый методами теории упругости. Обозначая высоту и ширину прямоугольного сечения соответственно через h и b , момент инерции при кручении можно вычислить из следующего соотношения:

$$J_k = \frac{b}{2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{4}{a^3} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\frac{1}{2}(n-1)} ch(a_n y)}{a_n^3 ch(\lambda_n)} \cos(a_n x) \right] dx dy, \quad (5.15)$$

где $\lambda_n = \frac{n\pi h}{2b}$; $a_n = \frac{n\pi}{b}$.

После интегрирования последнее соотношение принимает вид:

$$J_k = \frac{bh^3}{3} \left[1 - \frac{192b}{\pi^5 h} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{\pi^5} th\left(\frac{n\pi h}{2b}\right) \right] \quad (5.16)$$

Исследование изменения площади поперечного сечения стержневых элементов с учетом коррозионного износа

Используя предположение о равномерном износе, запишем выражение для

площади поперечного сечения элемента на текущий момент времени в виде:

$$A_t = A_0 - \Delta A, \quad (5.17)$$

где A_0 – площадь поперечного сечения элемента до начала коррозионного процесса;

ΔA – изменение площади за счет коррозии.

Рассмотрим стержневые элементы, площади поперечных сечений которых выполнены из основных типов прокатных профилей: двутавра, уголка, швеллера, простого прямоугольного сечения, а также гофрированного листа. С некоторой долей приближения площади прокатных профилей можно рассматривать как суммарные площади отдельных прямоугольных элементов (рисунок 5.6). В случае с гофрированным листом, площадь его поперечного сечения представляется суммой полукруговых элементов. Если A_0 – площадь поперечного сечения элемента до начала коррозионного процесса, то, следуя введенному предположению о равномерности коррозионного износа сечения, площадь поперечного сечения $A_{\delta(t)}$ в момент времени t_i будет определяться выражением:

$$A_{\delta(t)} = A_0 - L_{\delta(t)}\delta, \quad (5.18)$$

где $L_{\delta(t)}$ – периметр поперечного сечения в момент времени t_i .

Например, для двутавра:

$$A_{\delta} = 4A_1 + A_2 + 2A_3 = 4\left(\frac{1}{2}(b - t - 2\delta)(t - 2\delta)\right) + \\ + (h - 2t)(d - 2\delta) + 2(t - \delta)d$$

или после упрощения:

$$A_{\delta} = A_0 - L_0\delta - 8\delta_2,$$

Здесь приняты обозначения: $A_0 = 2bt + 2St + Sh$, $L_0 = 2b + 2h - 2S$.

Аналогично получаем выражения для площадей поперечного сечения стержневого элемента из других профилей. Проведенные исследования показали,

что изменение площади поперечного сечения элемента с учетом происшедших коррозионных повреждений на момент времени t может быть описано через начальные значения периметра и площади:

$$A_{\delta(t)} = k\delta_{(t)}^2 - L_0\delta_{(t)} + A_0, \quad (5.19)$$

где k – коэффициент, отражающий тип профиля (см. табл. 5.5);

L_0 – начальный периметр; A_0 – начальная площадь.

Таблица 5.5 – Значения коэффициентов функции изменения площади поперечного сечения (5.19) для основных типов профилей

Тип профиля	Значения коэффициентов		
	A_0	L_0	k
Уголок	$Bt-St-Sh$	$2b+2h$	5
Швеллер	$2bt-2St+Sh$	$4b+2h-2S$	8
Двутавр	$2bt-2St+Sh$	$4b+2h-2S$	8
Прямоугольное сечение	bh	$2b+2h$	4
Сплошное круглое сечение	πR^2	$2\pi R$	π
Кольцевое сечение	$\pi (R^2-r^2)$	$2\pi R$	π
Гофрированный лист	$(\pi (R^2-r^2) n)/2$	$(\pi R n) + (\pi r n)$	2π
Гофрированный лист (любой формы гофрировки)	lt	$2l$	2π

В качестве моделей коррозионного износа могут быть использованы следующие:

- экспоненциальная модель:

$$\delta_{(t)} = \delta_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{R}}\right), \quad (5.20)$$

где $\delta_0 = 2,24$ мм, $R = 0,52$ года;

- дробно-линейная модель:

$$\delta_{(t)} = \frac{\delta_0 t}{t+S}, \quad (5.21)$$

где $\delta_0 = 2,3713 \text{ мм}$, $S = 0,2172 \text{ года}$;

- логистическая модель:

$$\frac{d\delta}{dt} = k\delta(b - \delta), \quad \delta(0) = \delta_0, \quad (5.22)$$

$$\text{или } \delta_t = \frac{\delta_0}{1 + e^{-K\delta_0 t}},$$

где $K = 117,1 \frac{\text{мм}}{\text{месяц}}$, $b = 0,57 \text{ мм}$, $\delta_0 = 0,014 \text{ мм}$.

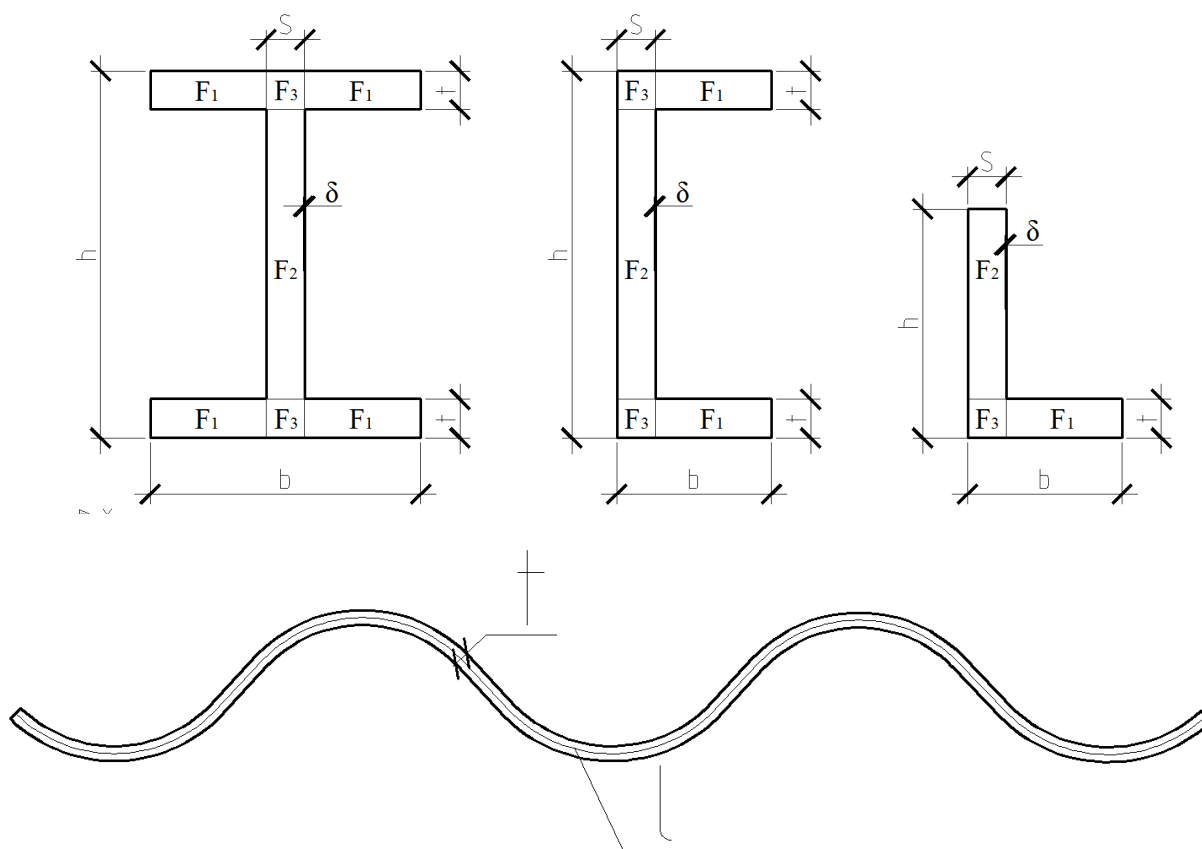


Рисунок 5.6 – Схема для определения площади поперечного сечения некоторых прокатных профилей

Приведенные значения идентифицирующих среду коэффициентов в моделях (5.20), (5.21), (5.22) были получены в [60] по методике проведения численных экспериментов, позволяющей хорошо описывать экспериментальные данные и наиболее полно учитывать условия эксплуатации, что дает возможность получать более полную и разностороннюю картину происходящих в конструкции

процессов.

На рисунках 5.7, 5.8 приведены графики изменения площадей поперечных сечений $A_{(t)}^i$ для гофрированного листа и двутавра соответственно. С начала момента действия коррозии потеря площади поперечного сечения, вычисленная по логистической модели, значительно меньше результатов, полученных по экспоненциальной и дробно-линейной. Однако со временем эти расхождения нивелируются.

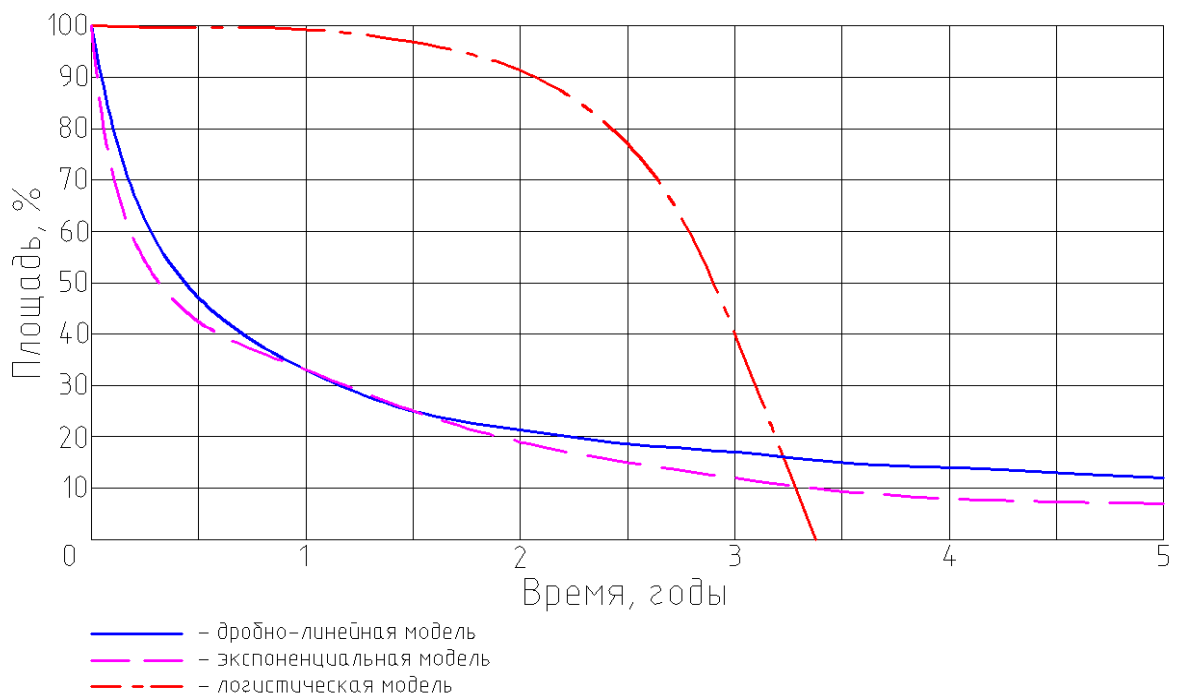


Рисунок 5.7 – Изменение площади поперечного сечения гофрированного листа вследствие действия коррозионной среды

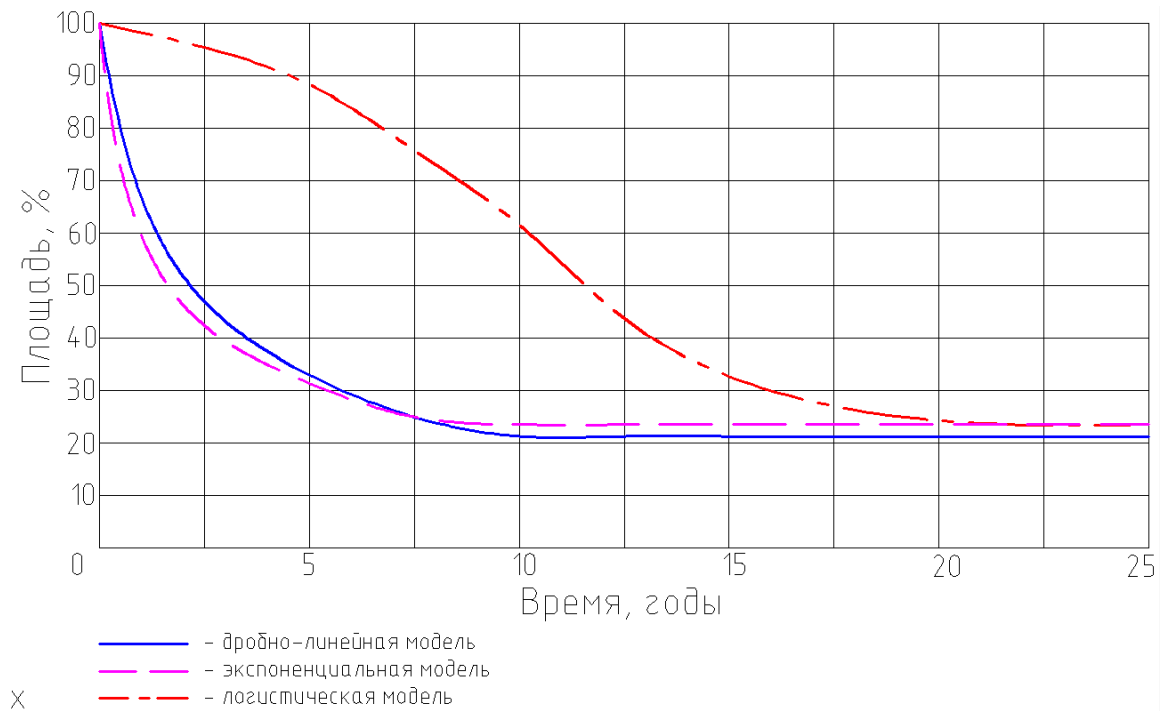


Рисунок 5.8 – Изменение площади поперечного сечения двутавра вследствие действия коррозионной среды

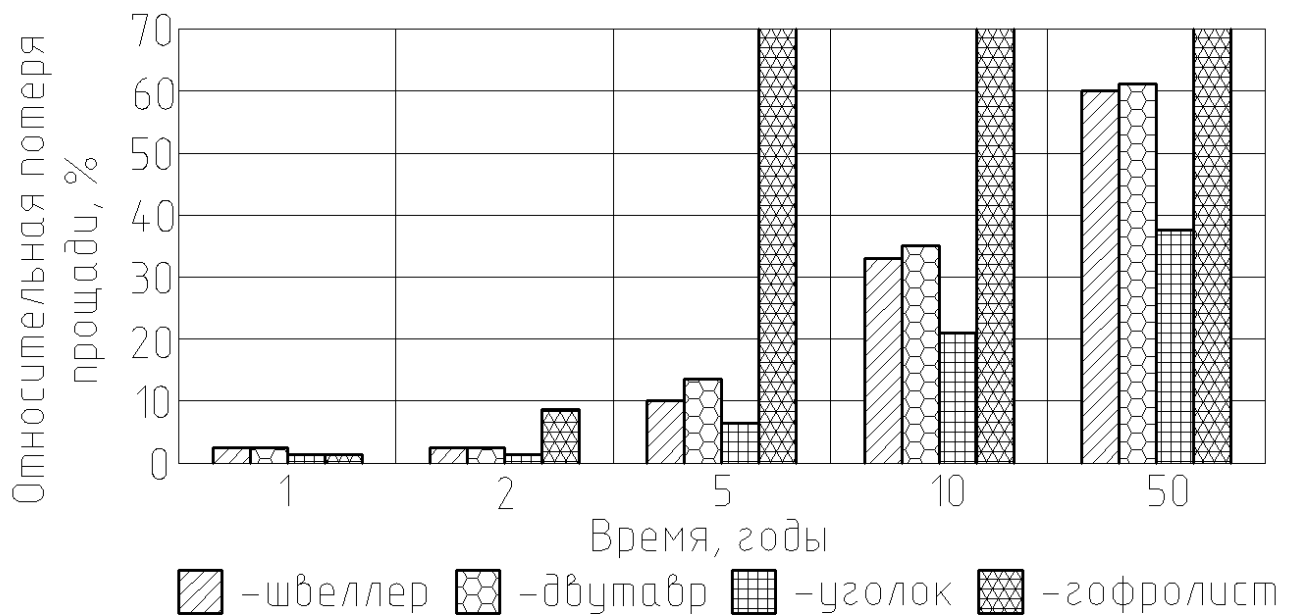


Рисунок 5.9 – Диаграмма потери площади для некоторых сечений

Фактическое различие в кинетике происходящих процессов для различных профилей сводится к скорости коррозионного разрушения. Так, в соответствии логистической моделью за первые полгода работы в определенной агрессивной среде поперечное сечение элемента в виде уголка теряет 1,33% своей площади; двутавра – 2,18%; швеллера – 2,08% [71], в то время как гофрированный лист

теряет до 55% площади поперечного сечения.

На графике (рисунок 5.9) видно, что при подобранных примерно одинаковых величинах площадей поперечных сечений уголка, двутавра, швеллера процентное соотношение потери площади поперечного сечения двутавра, швеллера и уголка в 20-30 раз меньше, чем у гофрированного листа. Аналогичные результаты получены и при использовании других моделей. Можно сделать вывод, что форма поперечного сечения, его профиль существенным образом влияют на скорость протекания коррозии. Так, например, стандартные прокатные профили гораздо более устойчивы к воздействию агрессивной среды, что объясняется в разы меньшей площадью, контактирующей с агрессивной средой.

5.2.2 Модели коррозионного износа при наличии защитных покрытий и их идентификация

Учитывая тот факт, что МГК, являются конструкциями, антикоррозионная защита которых предусмотрена нормами на проектирование [22, 82]. Весьма актуальной задачей является расчет долговечности конструкций, не просто выполненных из стали и взаимодействующих с агрессивной грунтовой средой, но и учитывающий степень влияния антикоррозионных покрытий на кинетику коррозионного износа. В связи с тем, что данных о взаимодействии с агрессивными средами собственно МГК, как уже отмечалось выше, недостаточно, в настоящей главе используются экспериментальные данные, полученные при наблюдениях за схожими конструкциями – трубопроводами, которые также как и МГК являются оболочечными стальными конструкциями, эксплуатируемыми в грунтовой среде.

Математические модели, описывающие кинетику снижения защитных свойств антикоррозионного покрытия

Нормами проектирования предусмотрено обязательное выполнение антикоррозионной защиты металлоконструкций в зависимости от степени агрессивности эксплуатационной среды [13, 99]. Поэтому при расчете напряженно-деформированного состояния и долговечности конструкций с защитными покрытиями необходимо учитывать и срок службы защитных покрытий, то есть моделировать кинетику изменения коррозионной стойкости защитных покрытий.

Обзор подходов, используемых при прогнозировании работоспособности защитных покрытий, содержится в работе [69]. В таблице 5.6 приведены некоторые модели, используемые для описания экспериментальных данных по коррозионной стойкости защитных покрытий металлоконструкций.

Таблица 5.6 – Модели, описывающие поведение защитных покрытий металлоконструкций

Вид модели	Источник	Номер формулы
$\Delta = a_1(1 - \exp(-a_2 t)), (\frac{\Gamma}{\text{мм}^2})$	[5]	(7.1)
$\tau_F = \frac{\delta_0}{V} (1 + U_F(W\sigma V)), (\Gamma)$	[26]	(7.2)
$M = a + Kt, K = K_0 e^{-\frac{a}{t}}, (\frac{\Gamma}{\text{мм}^2})$	[27]	(7.3)
$y = 2,75 + 0,75x_1 + 0,25x_2 + 0,25x_3 - 0,5x_2x_3 - 0,25x_1x_3 - 0,25x_1x_2x_3$	[10]	(7.4)
$\delta = at^2, (\text{мм})$	[6]	(7.5)
$\Delta_k = bl \left(C^2 + \sqrt{C^2 + 1} + m\Delta_0 \right), (\text{мм})$	[19]	(7.6)
$\Delta_k = D \frac{t^2}{n^3}, (\text{мм})$	[19]	(7.7)

Для оценки долговечности защитных покрытий можно использовать различные подходы. Анализ экспериментальных данных и исследований по работе защитных покрытий [69] показывает, что потеря работоспособности покрытия может произойти вследствие нарушения сплошности покрытия, вследствие достижения напряжениями в покрытии предельных значений, или же вследствие потери адгезии между защитным покрытием и поверхностью защищаемой конструкции.

Рассмотрим задачу построения и анализа моделей снижения защитных свойств покрытий для некоторых механизмов потери работоспособности защитного покрытия.

5.2.3 Модели долговечности защитных покрытий в агрессивной среде эксплуатации

Модели снижения защитных свойств покрытия путем нарушения их сплошности

Для описания сплошности защитного покрытия введем специальный параметр сплошности Ψ , изменяющийся от 1 в начальном состоянии до некоторого предельного значения в конечном состоянии. От известного параметра сплошности в теории длительной прочности, предложенного Л.М. Качановым [67, 89], данный параметр отличается тем, что «Качановский» параметр сплошности относился к точке материала, а предлагаемый параметр сплошности относится к точке поверхности защитного покрытия и характеризует сплошность покрытия в данной точке по всей ее толщине.

Кинетические зависимости, описывающие изменение сплошности защитных покрытий, могут быть приняты в следующем виде.

Зависимость 1:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\alpha(1 + k\sigma^m), \Psi(0) = 1, \quad (5.23)$$

где α – коэффициент, учитывающий влияние вида и толщины защитного покрытия и характер агрессивной среды;

k, m – коэффициенты, учитывающие влияние уровня напряженного состояния на кинетику снижения защитных свойств покрытия;

σ – эквивалентное напряжение.

При постоянном напряжении интеграл уравнения будет:

$$\Psi = 1 - \alpha(1 + k\sigma^m). \quad (5.24)$$

Зависимость 2:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\alpha(1 + k\sigma^m)t^b, \Psi(0) = 1. \quad (5.25)$$

При постоянном напряжении интеграл уравнения будет:

$$\Psi = 1 - \frac{\alpha(1+k\sigma^m)t^{b+1}}{b+1}, \quad (5.26)$$

где α, b, k, m – коэффициенты.

Зависимость 3:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\alpha(1+k\sigma^m)t^{b-1}}{\left(1+\frac{\alpha t^b}{b}\right)^2}, \Psi(0) = 1. \quad (5.27)$$

При постоянном напряжении интеграл уравнения будет:

$$\Psi = \frac{1}{1+\alpha(1+k\sigma^m)\frac{t^b}{b}}. \quad (5.28)$$

Модели потери работоспособности покрытия вследствие достижения напряжениями в покрытии предельных значений

При построении моделей будем предполагать возможность образования очага коррозии под покрытием. В процессе коррозии образуются продукты коррозии, которые, оказывая давление на покрытие в месте расположения очага коррозии, вызывают его отслаивание, что приводит к появлению напряжений в покрытии, которые, увеличиваясь по мере увеличения давления продуктов коррозии, вызывают разрушение покрытия.

Определим связь между напряжениями в покрытии с величиной или скоростью коррозии под покрытием. Для этого участок отслоившегося в результате коррозии покрытия будем моделировать круглой пластинкой, шарнирно-опертой либо жестко заземленной по контуру и нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q , обусловленной давлением продуктов

коррозии.

Рассмотрим сначала случай, когда очаг коррозии моделируется круглой пластинкой с шарнирным опиранием (геометрически линейная модель). В этом случае уравнение равновесия пластинки имеет вид:

$$D \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] = \frac{1}{r} \int_0^r q r dr. \quad (5.29)$$

$$\text{Граничные условия: } w=0, M_r = D \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{dw}{dr} \right] = 0.$$

Выражения для моментов:

$$M_r = D \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{dw}{dr} \right], \quad M_f = D \left[\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + v \frac{d^2 w}{dr^2} \right]. \quad (5.30)$$

Выражение для прогиба имеет вид [72]:

$$w = \frac{q(R^2 - r^2)}{64D} \left(\frac{(5+v)R^2}{1+v} - r^2 \right), \quad (5.31)$$

где R – радиус очага коррозии под покрытием;

q – интенсивность давления продуктов коррозии на антикоррозионное покрытие;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^3)}$ – цилиндрическая жесткость покрытия;

h – толщина антикоррозионного покрытия.

С учетом этого выражения для прогиба моменты примут вид:

$$M_r = \frac{q(3+v)}{16} (R^2 - r^2), \quad M_f = \frac{q}{16} (R^2(3+v) - r^2(1+3v)). \quad (5.32)$$

Прогиб в центре отслаивающегося участка покрытия равен:

$$w_{max} = \frac{qR^4(5+v)}{64D(1+v)}, \quad (5.33)$$

а моменты в центре отслоения:

$$M_{rmax} = M_{fmax} = \frac{qR^2}{16} (3+v). \quad (5.34)$$

Максимальные напряжения:

$$\sigma_{rmax} = \sigma_{fmax} = \frac{6M_r}{h^2} = \frac{3qR^2}{8h^2} (3 + \nu). \quad (5.35)$$

Учитывая, что под влиянием коррозии объем продуктов коррозии больше объема прородировавшего металла, можно связать высоту слоя продуктов коррозии $\Delta_{кор}$ с глубиной коррозионного износа δ соотношением:

$$\Delta_{кор} = \lambda \delta. \quad (5.36)$$

где λ – коэффициент, показывающий, во сколько раз высота слоя продуктов коррозии больше глубины коррозионного разрушения металла.

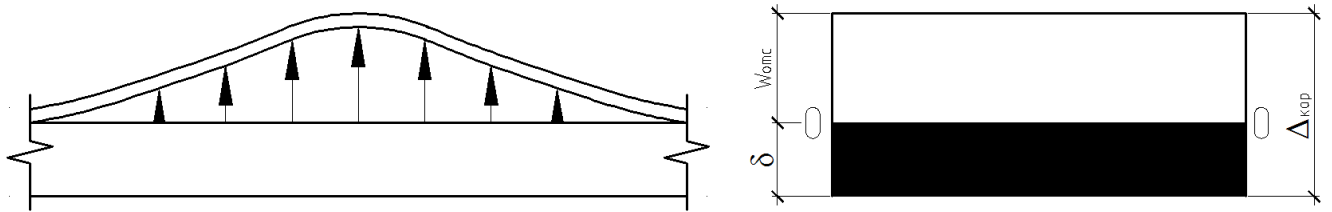


Рисунок 5.10. Схема к определению амплитуды отслаивания покрытия

В соответствии с рисунком 5.10 величина амплитуды отслаивания защитного покрытия над поверхностью металла определится из выражения:

$$w_{отс} = \Delta_{кор} - \delta = \lambda \delta - \delta = \delta(\lambda - 1). \quad (5.37)$$

Приравнявая $w_{отс}$ к w_{max} , получим:

$$q = \frac{64D\delta(\lambda-1)(1+\nu)}{(5+\nu)R^4}. \quad (5.38)$$

Полагая, что разрушение покрытия произойдет, когда напряжения в нем достигнут предела прочности $\sigma_{разр}$ запишем:

$$\sigma_{rmax} = \frac{3(3+\nu)qR^2}{8h^2} = \sigma_{разр}. \quad (5.39)$$

Подставляя сюда выражение для q , получим соотношение, связывающее

предельную глубину коррозионного износа $\delta_{\text{пред}}$, при которой происходит разрушение покрытия, с механическими характеристиками материала защитного покрытия и размерами очага коррозии под покрытием:

$$\delta_{\text{пред}} = \frac{(5+\nu)R^2 h^2 \sigma_{\text{разр}}}{24D(1+\nu)(3+\nu)(\lambda-1)}. \quad (5.40)$$

Теперь для используемой модели коррозии под слоем защитного покрытия можно определить продолжительность инкубационного периода. Например, если $\delta = k_1 t^{n_1}$, то подставляя эту зависимость в вышеприведенную, легко найдем:

$$t_{\text{п}} = \frac{1}{k_1} \left[\frac{(5+\nu)R^2 h^2 \sigma_{\text{разр}}}{24D(1+\nu)(3+\nu)(\lambda-1)} \right]^{\frac{1}{n_1}}. \quad (5.41)$$

Рассмотрим теперь случай, когда очаг коррозии моделируется круглой пластинкой, заземленной по контуру (геометрически линейная модель). В этом случае уравнение равновесия пластинки имеет тот же вид, что и для шарнирно-опертой пластинки, но граничные условия записываются иначе:

$$w = 0, \frac{dw}{dr} = 0. \quad (5.42)$$

Выражение для прогиба имеет вид:

$$w = \frac{q}{64D} (R^2 - r^2)^2. \quad (5.43)$$

где R – радиус очага коррозии под покрытием;

q – интенсивность давления продуктов коррозии на антикоррозионное покрытие;

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^3)}$ – цилиндрическая жесткость покрытия;

h – толщина антикоррозионного покрытия.

С учетом этого, выражения для моментов примут вид:

$$M_r = \frac{q}{16} (R^2(1+\nu) - r^2(3+\nu)), \quad M_f = \frac{q}{16} (R^2(1+\nu) - r^2(1+3\nu)). \quad (5.44)$$

Прогиб в центре отслаивающегося участка покрытия равен:

$$w_{max} = \frac{qR^4}{64D}. \quad (5.45)$$

Напряжения в центре отслаивающегося участка:

$$\sigma_r = \sigma_f = 0,49q \left(\frac{R}{h}\right)^2. \quad (5.46)$$

Напряжения у контура отслаивающегося участка:

$$\sigma_r = 0,75q \left(\frac{R}{h}\right)^2 \sigma_f = \nu \sigma_r. \quad (5.47)$$

Как и выше, величину амплитуды отслаивания защитного покрытия над поверхностью металла определим из выражения:

$$w_{отс} = \Delta_{кор} - \delta = \lambda\delta - \delta = \delta(\lambda - 1). \quad (5.48)$$

Приравнивая $w_{отс}$ к w_{max} , получим:

$$q = \frac{64D\delta}{R^4} (\lambda - 1). \quad (5.49)$$

Из условия, что разрушение покрытия произойдет, когда напряжения в нем достигнут предела прочности $\sigma_{разр}$ (что произойдет на контуре очага коррозии), запишем:

$$|\sigma_r| = 0,75q \left(\frac{R}{h}\right)^2 = \sigma_{разр}. \quad (5.50)$$

Подставляя сюда выражение для q , получим соотношение, связывающее предельную глубину коррозионного износа $\delta_{пред}$, при которой происходит разрушение покрытия, с механическими характеристиками материала защитного покрытия и размерами очага коррозии под покрытием:

$$\delta_{пред} = \frac{R^2 h^2 \sigma_{разр}}{48D(\lambda - 1)}, \quad (5.51)$$

где λ – коэффициент, показывающий, во сколько раз высота слоя продуктов коррозии больше глубины коррозионного разрушения металла.

В случае если коррозионный износ под слоем защитного покрытия происходит в соответствии с моделью $\delta = k_1 t^{n_1}$, то подставляя эту зависимость в вышеприведенную, найдем:

$$t_{\Pi} = \left[\frac{R^2 h^2 \sigma_{\text{разр}}}{48 D k_1 (\lambda - 1)} \right]^{\frac{1}{n_1}}. \quad (5.52)$$

Рассмотрим случай, когда очаг коррозии моделируется гибкой круглой пластинкой, то есть учитывается геометрическая нелинейность. Так как толщина защитного антикоррозионного покрытия достаточно мала, то в процессе его отслаивания вполне вероятно появление таких деформаций и перемещений, при которых геометрически линейная теория изгиба пластинок окажется некорректной. В этом случае следует использовать геометрически нелинейную теорию. Получим основные соотношения и для этого случая.

Основная система дифференциальных уравнений изгиба круглой гибкой пластинки:

$$\begin{aligned} D \frac{d}{dr} (\Omega^2 w) &= \Psi + \frac{h}{r} \frac{d\Phi}{dr} \frac{dw}{dr}, \\ \frac{d}{dr} (\Omega^2 w) &= -\frac{E}{2r} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2, \end{aligned} \quad (5.53)$$

Здесь оператор Ω^2 соответствует формуле:

$$\Omega^2 \Phi = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Phi}{dr} \right). \quad (5.54)$$

Ψ является функцией нагрузки, определяемой выражением:

$$\Psi = \frac{1}{r} \int_0^r q r dr. \quad (5.55)$$

При шарнирном опирании по контуру пластинки радиуса R :

$$w|_{r=R} = 0, \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{v}{r} \frac{dw}{dr} \right]_{r=R} = 0. \quad (5.56)$$

При жесткой заделке пластинки по контуру:

$$w|_{r=R} = 0, \left. \frac{dw}{dr} \right|_{r=R} = 0. \quad (5.57)$$

Для круглой равномерно нагруженной по всей площади пластинки нагрузкой интенсивностью q имеем следующее уравнение для определения стрелы прогиба f (в центре):

$$C_1 f^3 + C_2 f = \frac{q}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^4. \quad (5.58)$$

Напряжения изгиба σ_r и σ_f и напряжения в срединной поверхности σ_r^0 и σ_f^0 находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= C_3 E h \frac{f}{R^2}, \sigma_f = C_4 E h \frac{f}{R^2}; \\ \sigma_r^0 &= C_5 E \left(\frac{f}{R} \right)^2, \sigma_f^0 = C_6 E \left(\frac{f}{R} \right)^2. \end{aligned} \quad (5.59)$$

Полные напряжения:

$$\sigma_r^{\text{полн}} = \sigma_r + \sigma_r^0, \sigma_f^{\text{полн}} = \sigma_f + \sigma_f^0. \quad (5.60)$$

Значения коэффициентов $C_1 \div C_6$ приведены в таблице 5.7, в которой знак минус относится к сжимающим напряжениям.

Таблица 5.7 – Значения коэффициентов $C_1 \div C_6$ при $\nu=0,3$

Граничные условия		C_1	C_2	В центре		У контура			
				$C_3 = C_4$	$C_5 = C_6$	C_3	C_4	C_5	C_6
Шарнирное опирание по контуре	Контур свободно скользит	0,376	1,436	1,778	0,295	0	0,755	0	-0,427
	Контур не смещается	2,660	1,436	1,778	0,905	0	0,755	0,610	0,183
Защемление по контуру	Контур свободно скользит	0,857	5,862	2,860	0,500	4,400	1,320	0	-0,333
	Контур не смещается	2,762	5,862	2,860	0,976	4,400	1,320	0,476	0,145

Наконец, рассмотрим случай, когда очаг коррозии моделируется абсолютно гибкой круглой пластинкой, то есть изгибная жесткость не учитывается. В этом случае в уравнениях деформирования гибкой круглой пластинки можно пренебречь членом, содержащим D , и тогда они примут вид:

$$\frac{h}{r} \frac{d\Phi}{dr} \frac{dw}{dr} = -\Psi;$$

$$\frac{d}{dr} (\Omega^2 w) = -\frac{E}{2r} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2. \quad (5.61)$$

В случае, когда очаг коррозии представляет собой круглую мембрану радиуса R , нагруженную равномерно распределенным поперечным давлением, а контур мембраны не смещается, то величина прогиба в ее центре составит:

$$w_{max} = 0,662 \left[\frac{q}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^4 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5.62)$$

Максимальное напряжение в центре:

$$\sigma_{max} = 0,423 \left[E \left(\frac{qR}{h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (5.63)$$

Описанным выше способом не составляет труда определить продолжительность инкубационного периода для заданного закона коррозионного износа конструкции под антикоррозионным покрытием.

Идентификация и верификация моделей изменения сплошности защитных покрытий

В работе [28] приведены некоторые экспериментальные данные по снижению защитной способности ряда защитных покрытий при испытании в различных агрессивных средах. При этом в качестве параметра, характеризующего снижение защитных свойств покрытия, принимался обобщенный показатель качества защитного покрытия (K_z). Исследования защитных свойств покрытий проводились в соответствии с ГОСТ 9.042-75 и ГОСТ 9.074-77, в процессе испытаний учитывалось образование пузырей, растрескивание покрытий, отслаивание, наличие коррозионных пятен, размеры повреждения. Оценка защитных свойств покрытий проводилась по методике М.И. Карякиной [46], согласно которой обобщенный показатель качества K_z определяется по формуле:

$$K_z = 0,1a_n + 0,1a_p + 0,3a_k + 0,3a_k + 0,1a_{om}, \quad (5.64)$$

где a_n, a_p, a_k, a_k – относительные оценки степени разрушения в результате пузырей, растрескивания, коррозии, отслаивания;

a_{om} – относительная оценка размера повреждения.

Полученные в эксперименте значения обобщенного показателя качества защитного покрытия K_z , в разные моменты времени для разных покрытий и сред приведены ниже в таблицах 5.8 – 5.11.

Таблица 5.8 – Изменение обобщенного показателя K_z , защитного покрытия с течением времени при испытаниях в промышленной атмосфере

Время, сутки	ХС-068	ГФ-0119	Сурик	Сурик + БТ-577	Сост. 1	Сост. 1 + БТ-577
12	0,481	0,531	0,823	0,820	0,887	0,884
34	0,206	0,226	0,378	0,732	0,536	0,809
66	0,178	0,125	0,251	0,653	0,471	0,749

Таблица 5.9 – Изменение обобщенного показателя K_z , защитного покрытия с течением времени при испытаниях в растворе NaCl

Время, сутки	ФЛ-03К	ФЛ-03К +2% сост.2	ФЛ-03К +5% сост. 2	ГФ- 0119	ГФ- 0119 +2% сост. 2	ГФ- 0119 +5% сост.2	БТ-577	БТ-577 +2% сост. 2	БТ-577 +5% сост.2
16	0,877	0,981	0,981	0,917	0,967	0,967	0,901	0,703	0,730
24	0,871	0,935	0,881	0,917	0,796	0,967	0,841	0,523	0,712
40	0,691	0,857	0,745	0,851	0,785	0,691	0,512	0,505	0,671
60	0,659	0,857	0,655	0,785	0,701	0,581	0,391	0,401	0,671
76	0,647	0,851	0,631	0,555	0,669	0,581	0,259	0,236	0,585

Таблица 5.10 – Значение коэффициентов зависимостей 1,2 и 3 снижения защитных свойств для первой группы покрытий

Покрытие	Зависимость 1		Зависимость 2			Зависимость 3		
	$\alpha \cdot 10^{-3}$	k	$\alpha \cdot 10^{-3}$	b	k	$\alpha \cdot 10^{-3}$	b	k
ХС-068	15,5	0	7,53	-0,718	0	11,7	0,89	0
ГФ-0119	15,9	0	7,15	-0,624	0	5,28	1,22	0
Сурик	12,9	0	1,92	-0,122	0	0,751	1,58	0
Сурик +	6,0	0	2,66	-0,615	0	3,13	0,52	0
Состав 1	9,2	0	1,15	-0,055	0	0,726	1,33	0
Состав 1	4,3	0	1,71	-0,545	0	1,84	0,55	0

Таблица 5.11 – Значение коэффициентов зависимостей 1,2 и 3 снижения защитных свойств для второй группы покрытий

Покрытие	Зависимость 1		Зависимость 2			Зависимость 3		
	$\alpha \cdot 10^{-3}$	k	$\alpha \cdot 10^{-3}$	b	k	$\alpha \cdot 10^{-3}$	b	k
ФЛ-ОЗК	5,5	0	12,2	-0,1	0	7,45	1,0	0
ФЛ-ОЗК + 2% сост. 2	2,3	0	1,18	0,3	0	0,946	1,4	0
ФЛ-ОЗК + 5% сост. 2	5,3	0	0,447	0,8	0	0,234	2,1	0
ГФ-0119	4,7	0	3,70	0	0	239	1,3	0
ГФ-0119 + 2% сост. 2	4,8	0	2,39	0,3	0	1,67	1,5	0
ГФ-0119 + 5% сост. 2	6,0	0	0,247	1,0	0	0,0945	2,3	0
БТ-577	10,0	0	3,47	0,4	0	0,547	2,2	0
БТ-577 + 2% сост. 2	11,0	0	41,0	-0,5	0	24,6	1,1	0
БТ-577 + 2% сост. 2	6,4	0	27,1	-0,8	0	54,1	0,4	0

Как видно, в экспериментах в качестве агрессивных сред использовались «промышленная атмосфера» и 3%-ный раствор NaCl. Для проверки применимости вышеприведенных зависимостей для описания снижения защитных свойств покрытий была проведена идентификация моделей (без учета влияния

напряженного состояния, так как в экспериментах этот эффект не анализировался) по экспериментальным данным из вышеприведенных таблиц. Результаты идентификации предложенных зависимостей для первой группы покрытий, испытываемых в условиях промышленной атмосферы, приведены в таблице 5.10, а для второй группы покрытий, испытанных в 3%-ном растворе NaCl – в таблице 5.11.

Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета с использованием предложенных моделей с найденными значениями коэффициентов показало, что отличие во всех случаях не превышает 7,3%.

5.3 Применение полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова к расчету гофрированных металлических конструкций с учетом коррозионного износа при отсутствии и наличии защитных покрытий

5.3.1 Основные гипотезы и соотношения

Модель конструктивного элемента

В качестве модели конструктивного элемента, учитывая характерные соотношения размеров водопропускной трубы, а также характер ее деформирования под действием нагрузки, будем рассматривать полубезмоментную модель круговой цилиндрической оболочки. Отнесем эту оболочку радиусом R и длиной L к цилиндрической системе координат x, y, z ; где z – координата, нормальная к срединной поверхности оболочки, а x и y – линии главных кривизн (рисунок 5.10). Введем безразмерные координаты:

$$\alpha = \frac{x}{R}; \beta = \frac{y}{R}. \quad (5.65)$$

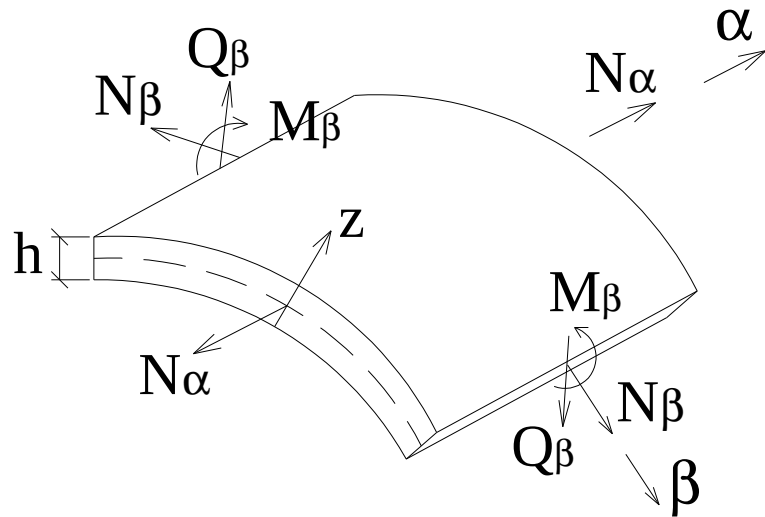


Рисунок 5.10 – Схема участка оболочки по полубезмоментной модели с координатами и усилиями

Уравнения, описывающие равновесие оболочки в предположении, что равны нулю моменты M_α , $M_{\alpha\beta}$, $M_{\beta\alpha}$, перерезывающая сила Q_α и сдвигающее усилие $N_{\alpha\beta}$, имеют вид [78]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\alpha}{\partial \alpha} + R \cdot P_\alpha &= 0; \quad \frac{\partial N_\beta}{\partial \beta} + Q_\beta + R \cdot P_\beta = 0; \\ \frac{\partial Q_\beta}{\partial \beta} - N_\beta + R \cdot P_z &= 0; \quad \frac{\partial M_\beta}{\partial \beta} - R \cdot Q_\beta = 0, \end{aligned} \quad (5.66)$$

Если выразить Q_β через производную от M_β и подставить это выражение во второе и третье уравнения, то получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_\alpha}{\partial \alpha} + R \cdot P_\alpha &= 0; \quad \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M_\beta}{\partial \beta^2} - N_\beta + R \cdot P_z = 0; \\ R \frac{\partial N_\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial M_\beta}{\partial \beta} + R^2 \cdot P_\beta &= 0, \end{aligned} \quad (5.67)$$

где P_α , P_β , P_z – составляющие нагрузки, действующей на оболочку соответственно в направлении осей α , β , z .

Используя геометрические гипотезы В.З. Власова, выражения для деформаций любой точки на расстоянии z от срединной поверхности оболочки запишем в виде:

$$e_{\alpha}(z) = \varepsilon_{\alpha}; e_{\beta}(z) = z \cdot \chi_{\beta}; e_{\alpha\beta} = 0; \quad (5.68)$$

$$\varepsilon_{\alpha} = \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial \alpha}; \chi_{\beta} = -\frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} - \frac{\partial v}{\partial \beta} \right), \quad (5.69)$$

где $u(\alpha, \beta)$, $v(\alpha, \beta)$, $W(\alpha, \beta)$ – перемещения точек срединной поверхности по направлению координат α , β , z ;

χ_{β} – изменение кривизны;

ε_{α} – линейная деформация срединной поверхности.

Модель нагружения

Особенность металлических гофрированных конструкций состоит в их совместной работе с окружающим грунтом. Грунт создает нагрузку, является основанием для трубы и средой, передающей надземные нагрузки. МГК обычно рассчитывают по недеформированной схеме, то есть без учета бокового отпора грунта. Поэтому, допуская, что конструкция не изменяет предельного напряженного состояния окружающего грунта, рассматриваемого как сыпучее тело, можно получить следующие выражения для составляющих нагрузки в точке верхней конструкции, лежащей на глубине y от поверхности насыпи [78]:

$$P_z = \gamma y (\cos^2 \theta + \xi \sin^2 \theta), P_{\alpha} = 0;$$

$$P_{\beta} = \gamma y (1 - \xi) \cos \theta \sin \theta, \quad (5.70)$$

где $\xi = \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)}$;

φ – угол внутреннего трения грунта;

γ – объемный вес грунта;

θ – угол между касательной в рассматриваемой точке и горизонталью (рисунок 5.11).

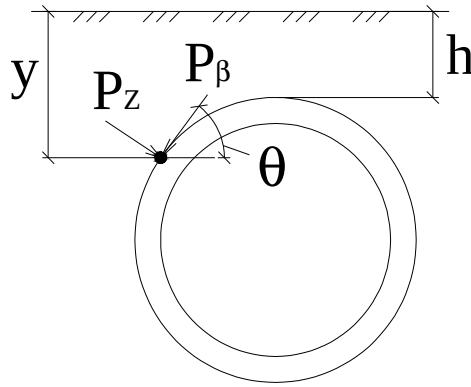


Рисунок 5.11 – Нагрузки, действующие на оболочку в поперечном направлении

Для описания поведения стали МГК в данном случае применяется модель однородного линейно упругого материала, соотношения которой для плоского напряженного состояния, в котором находится материал трубы (при отсутствии сдвигающих напряжений) имеют вид:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{E}{1-\nu^2} (e_{\alpha} + \nu e_{\beta}); \sigma_{\beta} = \frac{E}{1-\nu^2} (e_{\beta} + \nu e_{\alpha}), \quad (5.71)$$

где $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta}$, – компоненты тензора напряжений;

ν – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Физические соотношения для усилий и деформаций, возникающих в оболочке МГК

Выражения для усилий и момента в оболочке трубы имеют вид:

$$N_{\alpha} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\alpha} dz; N_{\beta} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\beta} dz; M_{\beta} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\beta} z dz. \quad (5.72)$$

С учетом (5.68) и (5.71) получим:

$$\begin{aligned} N_{\alpha} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\alpha} dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_{\alpha} + \nu e_{\beta}) dz = \frac{E \varepsilon_{\alpha} h}{1-\nu^2} 4; \\ N_{\beta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\beta} dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_{\beta} + \nu e_{\alpha}) dz = \frac{E \nu \varepsilon_{\alpha} \bar{h}}{1-\nu^2}; \\ M_{\beta} &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\beta} z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_{\beta} + \nu e_{\alpha}) z dz = \frac{E \chi_{\beta} \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)}, \end{aligned} \quad (5.73)$$

где h – толщина гофрированного листа;

$\bar{h}$ – приведенная толщина гофрированного листа в поперечном направлении (из условия, что цилиндрическая жесткость гофрированного листа в сечении поперек гофров равна цилиндрической жесткости гладкого листа толщиной $\bar{h}$).

5.3.2 Разрешающее уравнение полубезмоментной теории оболочек В.З. Власова, учитывающее коррозионный износ металлической гофрированной конструкции

Принимая во внимание соотношения [16]:

$$W = \frac{\partial v}{\partial \beta}, \frac{\partial v}{\partial \beta} = -\frac{\partial v}{\partial \alpha}, \quad (5.74)$$

и исключив из (5.67) перемещения, получим следующее уравнение неразрывности деформаций:

$$\Omega \varepsilon_\alpha + R \frac{\partial^2 \chi_\beta}{\partial \alpha^2} = 0, \quad (5.75)$$

где $\Omega = \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2}$ – дифференциальный оператор В.З.Власова.

Уравнение (5.75) удовлетворяется тождественно, если ввести функцию перемещений $\Phi(\alpha, \beta)$ формулам:

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}; v = \frac{\partial \Phi}{\partial \beta}. \quad (5.76)$$

Тогда из (5.74) и (5.69) следует:

$$W = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2}; \varepsilon_\alpha = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2}; \chi_\beta = -\frac{1}{R^2} \Omega \Phi. \quad (5.77)$$

Уравнения равновесия (5.72) сводятся к следующему разрешающему уравнению:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial^2 N_\alpha}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{R} \Omega M_\beta = q, \quad (5.78)$$

$$q = -\frac{\partial P_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_\beta}{\partial \beta} - \frac{\partial^2 P_z}{\partial \beta^2}. \quad (5.79)$$

Подставляя в (5.78) выражения (5.79) с учетом (5.73), получим окончательное уравнение:

$$\left[\Omega \left(\frac{E \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)} \right) \Omega \Phi \right] - \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\left(\frac{ERh}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2} \right] = R^3 \cdot q. \quad (5.80)$$

5.3.3 Исследование совместного влияния нагрузки и коррозионного износа на поведение металлической гофрированной конструкции

Учитывая, что:

$$\begin{aligned} \bar{h} &= \bar{h}(\beta, \alpha, t); \\ h &= h(\beta, \alpha, t), \end{aligned} \quad (5.81)$$

раскроем уравнение (5.80):

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{E}{12(1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^4} \right) \right] - \\ & - \left[\left(\frac{ER}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^4 \Phi \cdot h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \right] = R^3 \cdot q. \end{aligned} \quad (5.82)$$

Введем обозначение:

$$\left[\left(\frac{E}{12(1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^4} \right) \right] -$$

$$- \left[\left(\frac{ER}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^4 \Phi \cdot h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \right] = L(\Phi), \quad (5.83)$$

Следовательно:

$$L(\Phi) = R^3 q. \quad (5.84)$$

Для решения уравнения (5.83) применим вариационный метод В.З. Власова, согласно которому искомую функцию $\Phi(\alpha, \beta)$ представим в виде разложения:

$$\Phi = \sum_{i=0}^n F_1(\alpha) \cdot \sin \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_\kappa - \beta_0} \right) + F_2(\alpha) \cdot \sin 2\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_\kappa - \beta_0} \right) +$$

$$+ F_n(\alpha) \cdot \sin n\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_\kappa - \beta_0} \right), \quad (5.85)$$

где $\sin n\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_\kappa - \beta_0} \right)$ – аппроксимирующие функции в окружном направлении;
 $F_n(\alpha)$ – функции, подлежащие определению.

В дальнейшем, полагая $\beta_0 = 0$, а $\beta_\kappa = \pi$, что соответствует полукруговой арке, и, ограничиваясь первыми тремя членами ряда, запишем:

$$\Phi = F_1(\alpha) \cdot \sin \beta + F_2(\alpha) \cdot \sin 2\beta + F_3(\alpha) \cdot \sin 3\beta, \quad (5.86)$$

Вариационное уравнение метода В.З. Власова в нашем случае имеет вид:

$$\int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \Phi d\beta = 0,$$

$$\begin{cases} \int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \sin \beta d\beta = 0, \\ \int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \sin 2\beta d\beta = 0, \\ \int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \sin 3\beta d\beta = 0. \end{cases} \quad (5.87)$$

Рассмотрим первое уравнение

Учитывая (5.83) получим:

$$\int_0^\pi \left(\left[\left(\frac{ER}{1-v^2} \right) \frac{\partial^4 \Phi \cdot h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \right] - \left[\left(\frac{E}{12(1-v^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{\partial \beta^4} \right) \right] + R^3 q \right) \sin \beta d\beta = 0. \quad (5.88)$$

Введем обозначения:

$$\left(\frac{ER}{1-v^2} \right) = A_1; \quad \left(\frac{E}{12(1-v^2)} \right) = A_2. \quad (5.89)$$

Принимая во внимание (5.89) и (5.86) получим:

$$\int_0^\pi \left(\left[A_1 \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \sin \beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[A_2 \cdot 144 (F_2(\alpha) \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t) \sin 2\beta + 36 F_3 \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)(\alpha) \sin 3\beta) \right] + \right. \\ \left. + R^3 q \right) \sin \beta d\beta = 0, \quad (5.90)$$

Учитывая (5.89) получим:

$$\int_0^\pi \left(\left[\frac{ER}{1-v^2} \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \sin \beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{E}{12(1-v^2)} \cdot 144 (F_2(\alpha) \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t) \sin 2\beta + 36 F_3 \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)(\alpha) \sin 3\beta) \right] + \right. \\ \left. + R^3 q \right) \sin \beta d\beta = 0, \quad (5.91)$$

Рассмотрим член уравнения (5.90) $R^3 q$, учитывая соотношения (5.70) и (5.79):

$$q = -\frac{\partial P_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_\beta}{\partial \beta} - \frac{\partial^2 P_z}{\partial \beta^2}.$$

При этом:

$$\begin{aligned} P_\alpha &= 0; \\ P_\beta &= \gamma y (1 - \xi) \sin \theta \cos \theta; \\ P_z &= \gamma y (\cos^2 \theta + \xi \sin^2 \theta), \end{aligned}$$

где γ – объемный вес грунта;

$\xi = \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}$, причем φ – угол внутреннего трения грунта.

Необходимо отметить, что углы θ и β равны, что соответствует полукруговой арке. Учитывая сказанное выше можно записать:

$$q = \frac{\partial}{\partial\beta} [\gamma y(1 - \xi)\sin\beta\cos\beta] - \frac{\partial^2}{\partial\beta^2} [\gamma y(\cos^2\beta + \xi\sin^2\beta)]. \quad (5.92)$$

Принимая во внимание, что $y = H + R\cos\beta$ можно записать выражение (5.92) следующим образом:

$$\begin{aligned} q = & \frac{\partial}{\partial\beta} [\gamma(H + R\cos\beta)(1 - \xi)\sin\beta\cos\beta] - \\ & - \frac{\partial^2}{\partial\beta^2} [\gamma(H + R\cos\beta)(\cos^2\beta + \xi\sin^2\beta)]. \end{aligned} \quad (5.93)$$

Выполнив операции дифференцирования, получим:

$$q = 3\gamma H(1 - \xi)\cos 2\beta + \gamma R\cos\beta - 5,25\gamma R\xi\cos 3\beta. \quad (5.94)$$

Подставим значение q в выражение (5.91) получим:

$$\begin{aligned} \int_0^\pi \left(\left[\frac{ER}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial^4 F_1(\alpha)h(\beta,\alpha,t)}{\partial\alpha^4} \sin\beta + \frac{\partial^4 F_2(\alpha)h(\beta,\alpha,t)}{\partial\alpha^4} \sin 2\beta + \frac{\partial^4 F_3(\alpha)h(\beta,\alpha,t)}{\partial\alpha^4} \sin 3\beta \right) \right] - \right. \\ \left. - \left[\frac{E}{12(1-\nu^2)} \cdot 144(F_2(\alpha) \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)\sin 2\beta + 36F_3 \cdot \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)(\alpha)\sin 3\beta) \right] + \right. \\ \left. + R^3[3\gamma H(1 - \xi)\cos 2\beta + \gamma R\cos\beta - 5,25\gamma R\xi\cos 3\beta] \right) \sin\beta d\beta = 0. \end{aligned} \quad (5.94)$$

Выполним операции интегрирования:

$$\begin{aligned} \left(\frac{E\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{\partial^4 F_1(\alpha)h(\beta,\alpha,t)}{\partial\alpha^4} - 2R^2\gamma H(1 - \xi) = \\ = \frac{\partial^4 F_1(\alpha)h(\beta,\alpha,t)}{\partial\alpha^4} - \frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-\nu^2)}{E\pi} = 0. \end{aligned} \quad (5.95)$$

Получили дифференциальное уравнение четвертого порядка, из которого можно получить функцию $F_1(\alpha)$.

Перед началом решения дифференциального уравнения введем следующее обозначение:

$$\frac{4R^2\gamma H(\xi-1)(1-v^2)}{E\pi} = \text{Ч}. \quad (5.96)$$

Итак, получим:

$$\frac{\partial^4 F_1(\alpha)h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} - \text{Ч} = 0. \quad (5.97)$$

Решением неоднородного дифференциального уравнения (5.97) является:

$$F_1(\alpha)h(\beta, \alpha, t) = \frac{\text{Ч}}{24}\alpha^4 + C_1\alpha^3 + C_2\alpha^2 + C_3\alpha + C_4, \quad (5.98)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования.

Для поиска произвольных постоянных введем граничные условия, соответствующие свободному краю оболочки:

$$u\left(0, \frac{l}{R}\right) = 0 \text{ и } N_\alpha\left(0, \frac{l}{R}\right) = 0, \quad (5.99)$$

Учитывая, что $N_\alpha = -\frac{E \sin \beta}{(1-v^2)R} \frac{\partial^2 F_1(\alpha)h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^2}$, а $u = -\sin \beta \frac{\partial F_1(\alpha)}{\partial \alpha}$, можно переписать граничные условия следующим образом:

$$\text{При } \alpha = 0, \alpha = \frac{l}{R};$$

$$\frac{\partial^2 F_1(\alpha)h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^2} = 0, \frac{\partial F_1(\alpha)}{\partial \alpha} = 0. \quad (5.100)$$

Выполнив дифференцирование, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_3 = 0, \\ C_2 = 0, \\ \frac{\text{Ч}}{6}\alpha^3 + 3C_1\alpha^2 = 0, \\ \frac{\text{Ч}}{2}\alpha^2 + 6C_1\alpha = 0. \end{cases} \quad (5.101)$$

В итоге получим: $C_1 = -\frac{\text{Ч}l}{12R}, C_2 = 0, C_3 = 0.$

Подставим полученные значения произвольных постоянных в уравнение (5.98):

$$F_1(\alpha) = \frac{\mathcal{C}}{24h(\beta, \alpha, t)} \alpha^4 - \frac{\mathcal{C}l}{12Rh(\beta, \alpha, t)} \alpha^3 + \frac{\mathcal{C}_4}{h(\beta, \alpha, t)}. \quad (5.102)$$

Выполним операции, аналогичные проделанным в уравнениях (5.87) – (5.96) для второго и третьего уравнений системы (5.86).

Второе уравнение будет после завершения операций будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{E\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{\partial^4 F_2(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} - \frac{6E\pi}{(1-\nu^2)} \cdot F_2(\alpha) \bar{h}^3(\beta, \alpha, t) - 2R^2 \gamma H(1 - \xi) = \\ & = \frac{\partial^4 F_2(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} - 12 \cdot F_2(\alpha) \bar{h}^3(\beta, \alpha, t) - \frac{4R^2 \gamma H(\xi - 1)(1 - \nu^2)}{E\pi} = 0. \end{aligned} \quad (5.103)$$

Третье уравнение будет после завершения операций будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{E\pi}{2(1-\nu^2)} \right) \cdot \frac{\partial^4 F_3(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} - \frac{3E\pi}{2(1-\nu^2)} \cdot F_3(\alpha) \bar{h}^3(\beta, \alpha, t) - 2R^2 \gamma H(1 - \xi) = \\ & = \frac{\partial^4 F_3(\alpha) h(\beta, \alpha, t)}{\partial \alpha^4} - 3 \cdot F_3(\alpha) \bar{h}^3(\beta, \alpha, t) - \frac{4R^2 \gamma H(\xi - 1)(1 - \nu^2)}{E\pi} = 0. \end{aligned} \quad (5.104)$$

Как видим, второе и третье уравнения имеют одинаковый вид, который в общем виде можно записать следующим образом:

$$y(x) = y'''' - B \cdot y - \mathcal{C} = 0, \quad (5.105)$$

Решением неоднородного дифференциального уравнения (5.102) является:

$$y(x) = C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot x} + C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot x} + C_3 \sin(\sqrt[4]{B} \cdot x) + C_4 \cos(\sqrt[4]{B} \cdot x) + \frac{\mathcal{C}}{B_1}, \quad (5.106)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования.

Для поиска произвольных постоянных введем граничные условия, аналогичные условиям (5.100), соответствующим свободному краю оболочки:

$$\text{При } x = 0, x = \frac{l}{R};$$

$$y(x)'' = 0, y(x)' = 0. \quad (5.107)$$

Выполнив дифференцирование, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} C_1 - C_2 + C_3 = 0, \\ C_1 + C_2 - C_3 = 0, \\ C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} - C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} + C_3 \cos\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) - C_4 \sin\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) = 0, \\ C_1 e^{\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} + C_2 e^{-\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}} - C_3 \sin\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) - C_4 \cos\left(\sqrt[4]{B} \cdot \frac{l}{R}\right) = 0. \end{cases} \quad (5.108)$$

В итоге получим: $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 0$.

Подставим полученные значения произвольных постоянных в уравнение (5.106):

$$y(x) = \frac{q}{B}. \quad (5.109)$$

Учитывая уравнения (5.105) – (5.109) получим значения $F_2(\alpha)$ и $F_3(\alpha)$:

$$F_2(\alpha) = \frac{R^2 \gamma H (\xi - 1) (1 - v^2)}{3 E \pi \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}, \quad (5.110)$$

$$F_3(\alpha) = \frac{4 R^2 \gamma H (\xi - 1) (1 - v^2)}{3 E \pi \bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}. \quad (5.111)$$

Зная $F_1(\alpha), F_2(\alpha), F_3(\alpha)$, можно получить формулы, позволяющие рассчитать значения усилий в оболочке N_α, N_β и M_β :

$$\begin{aligned} N_\alpha &= -\frac{Eh}{(1-v^2)R} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} [F_1(\alpha) \sin \beta + F_2(\alpha) \sin 2\beta + F_3(\alpha) \sin 3\beta] = \\ &= \frac{\gamma H (1-\xi) h(\beta, \alpha, t)}{3\pi} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\alpha^2}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + l \left(\frac{\alpha^3}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{C_4 3\pi E}{\gamma H R (1-v^2)(\xi-1)} \left(\frac{1}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 2\beta + 4 \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 3\beta \right]; \\ N_\alpha &= \frac{\gamma H (1-\xi) h(\beta, \alpha, t)}{3\pi} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\alpha^2}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + l \left(\frac{\alpha^3}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{C_4 3\pi E}{\gamma H R (1-v^2)(\xi-1)} \left(\frac{1}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 2\beta + 4 \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 3\beta \right]; \end{aligned} \quad (5.112)$$

$$\begin{aligned}
N_\beta &= -\frac{E\bar{h}\nu}{(1-\nu^2)R} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} [F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta] = \\
&= \frac{\gamma H(1-\xi)\bar{h}(\beta, \alpha, t)\nu}{3\pi} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\alpha^2}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + l \left(\frac{\alpha^3}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{C_4 3\pi E}{\gamma H R(1-\nu^2)(\xi-1)} \left(\frac{1}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 2\beta + 4 \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 3\beta \right]; \\
N_\beta &= \frac{\gamma H(1-\xi)\bar{h}(\beta, \alpha, t)\nu}{3\pi} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\alpha^2}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + l \left(\frac{\alpha^3}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{C_4 3\pi E}{\gamma H R(1-\nu^2)(\xi-1)} \left(\frac{1}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 2\beta + 4 \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 3\beta \right] \quad (5.113)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_\beta &= -\frac{E\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{12(1-\nu^2)R^2} \left[\frac{\partial^4}{\partial \beta^4} (F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} (F_1(\alpha)\sin\beta + F_2(\alpha)\sin 2\beta + F_3(\alpha)\sin 3\beta) \right]; \\
M_\beta &= -\frac{\gamma H(\xi-1)\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)}{9\pi} \left[\frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \left(\left(\frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^3 l}{4R} + \frac{3E\pi}{4\gamma H R^2(\xi-1)(1-\nu^2)} \right) \left(\frac{\sin\beta}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{\sin 2\beta}{4\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{\sin 3\beta}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left(\left(\frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^3 l}{4R} + \frac{3E\pi}{4\gamma H R^2(\xi-1)(1-\nu^2)} \right) \left(\frac{\sin\beta}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{\sin 2\beta}{4\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} + \frac{\sin 3\beta}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \right]. \quad (5.114)
\end{aligned}$$

В конечном итоге получаем следующие уравнения для получения усилий, действующих в полукруглой МГК с учетом возможных коррозионных повреждений:

$$\begin{aligned}
N_\alpha &= \frac{\gamma H(1-\xi)h(\beta, \alpha, t)}{3\pi} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\alpha^2}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + l \left(\frac{\alpha^3}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{C_4 3\pi E}{\gamma H R(1-\nu^2)(\xi-1)} \left(\frac{1}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 2\beta + 4 \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 3\beta \right] \quad (5.115)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_\beta &= \frac{\gamma H(1-\xi)\bar{h}(\beta, \alpha, t)\nu}{3\pi} \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\alpha^2}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + l \left(\frac{\alpha^3}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{C_4 3\pi E}{\gamma H R(1-\nu^2)(\xi-1)} \left(\frac{1}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 2\beta + 4 \left(\frac{1}{\bar{h}^3(\beta, \alpha, t)} \right) \sin 3\beta \right] \quad (5.116)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_{\beta} = & -\frac{\gamma H(\xi-1)\overline{h^3}(\beta, \alpha, t)}{9\pi} \left[\frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \left(\left(\frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^3 l}{4R} + \frac{3E\pi}{4\gamma H R^2 (\xi-1)(1-v^2)} \right) \left(\frac{\sin \beta}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{\sin 2\beta}{4\overline{h^3}(\beta, \alpha, t)} + \right. \right. \\
& + \left. \frac{\sin 3\beta}{\overline{h^3}(\beta, \alpha, t)} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left(\left(\frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^3 l}{4R} + \frac{3E\pi}{4\gamma H R^2 (\xi-1)(1-v^2)} \right) \left(\frac{\sin \beta}{h(\beta, \alpha, t)} \right) + \right. \\
& \left. \left. + \frac{\sin 2\beta}{4\overline{h^3}(\beta, \alpha, t)} + \frac{\sin 3\beta}{\overline{h^3}(\beta, \alpha, t)} \right) \right] \quad (5.117)
\end{aligned}$$

С помощью полученных соотношений можно рассчитывать МГК, находящиеся в условиях поражениями агрессивных сред, причем в самом сложном (и общем) случае, когда поражение агрессивными средами протекает неравномерно по длине сооружения, в окружном направлении и во времени. Иллюстрацией такого поражения может служить водопропускная труба под насыпью автомобильной дороги, которая подвергается воздействию агрессивной среды грунта с внешней стороны по всей площади; агрессивной среды отводимой воды в лотковой части; агрессивной среды реагентов для обработки автомобильной дороги, просачивающихся сквозь обочины в грунт насыпи и воздействующих на оголовки трубы (рисунок 5.12).

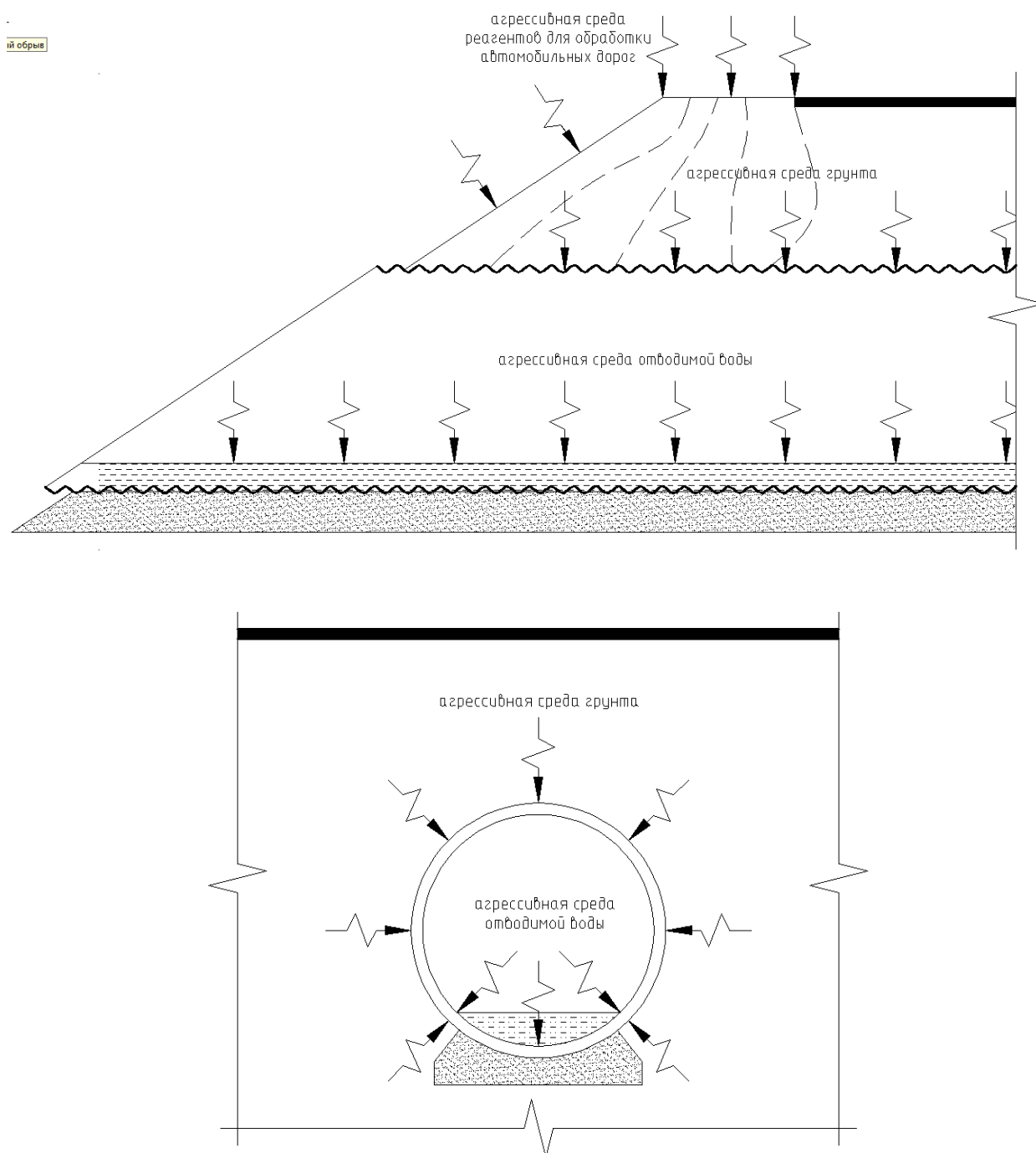


Рисунок 5.12 – Схема поражения МГК со стороны агрессивных сред грунта, отводимой воды и реагентов для обработки дорог

Рассмотрим также варианты задач, встречающихся на практике, при которых можно упростить полученные уравнения общего случая. Например, предположим, что коррозионные процессы протекают в МГК равномерно по длине, но неравномерно в окружном направлении, что является весьма распространенным случаем на практике. Примером может служить

водопропускное сооружение с постоянным водотоком, которое подвергается коррозии со стороны грунта равномерно и по длине и в окружном направлении, но в лотковой части также подвергается воздействию воды (рисунок 5.13).

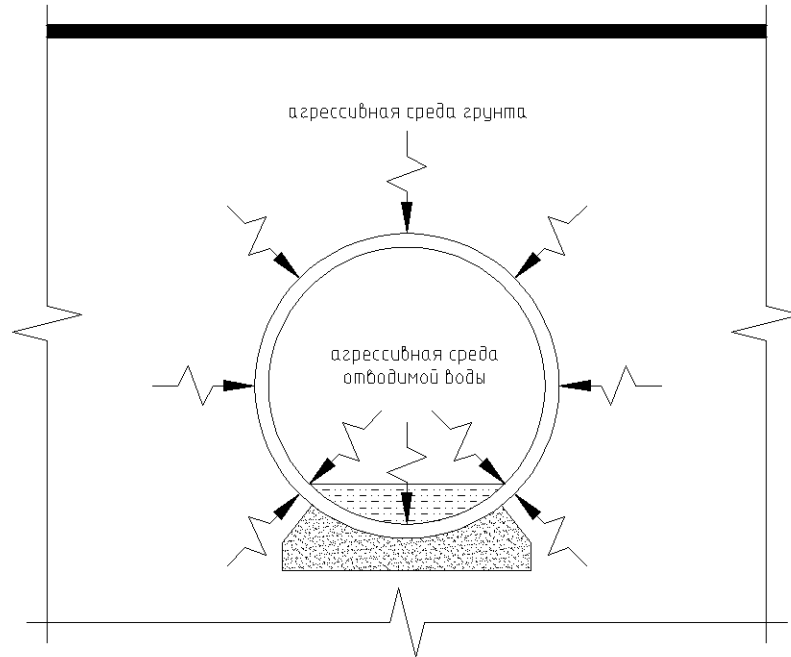


Рисунок 5.13 – Схема поражения МГК со стороны агрессивных сред грунта и отводимой воды

В данном случае соотношение (5.81) примет вид:

$$\bar{h} = \bar{h}(\beta, t);$$

$$h = h(\beta, t). \quad (5.118)$$

В таком случае, уравнения для получения усилий, действующих в полукруглой МГК с учетом возможных коррозионных повреждений примут вид:

$$N_{\alpha} = -\frac{2(1-\xi)\gamma H \sin \beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha] \quad (5.119)$$

$$N_{\beta} = -\frac{2(1-\xi)\bar{h}(\beta, t)\gamma H \sin \beta}{h(\beta, t)\pi} [R\alpha^2 - l\alpha] \quad (5.120)$$

$$M_{\beta} = -\frac{\gamma H(\xi-1)\bar{h}^3(\beta,t)}{9\pi} \left[\frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \left(\left(\frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^3 l}{4R} + \frac{3E\pi}{4\gamma H R^2(\xi-1)(1-\nu^2)} \right) \left(\frac{\sin \beta}{h(\beta,t)} \right) + \frac{\sin 2\beta}{4\bar{h}^3(\beta,t)} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\sin 3\beta}{\bar{h}^3(\beta,\alpha,t)} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left(\left(\frac{\alpha^2}{8} + \frac{\alpha^3 l}{4R} + \frac{3E\pi}{4\gamma H R^2(\xi-1)(1-\nu^2)} \right) \left(\frac{\sin \beta}{h(\beta,t)} \right) + \frac{\sin 2\beta}{4\bar{h}^3(\beta,t)} + \frac{\sin 3\beta}{\bar{h}^3(\beta,t)} \right) \right], (5.121)$$

Наконец, самым простым, но тем не менее распространенным случаем является равномерная коррозия МГК по всей поверхности. Примером может служить водопропускная гофрированная труба, расположенная на суходоле и подвергающаяся воздействию агрессивной среды только со стороны грунта (рисунок 5.14).

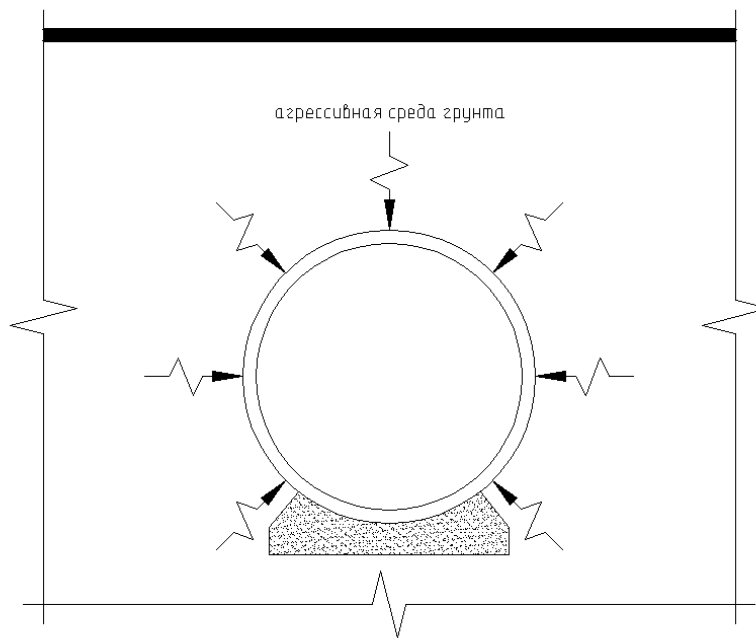


Рисунок 5.14 – Схематическое изображение поразжения МГК со стороны агрессивной среды грунта

При таком случае соотношение (5.81) примет вид:

$$\bar{h} = \bar{h}(t);$$

$$h = h(t). \quad (5.122)$$

Уравнения для получения усилий примут вид:

$$N_{\alpha} = -\frac{2(1-\xi)\gamma H \sin \beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]; \quad (5.123)$$

$$N_{\beta} = -\frac{2(1-\xi)\bar{h}(t)\nu\gamma H \sin \beta}{h(t)\pi} [R\alpha^2 - l\alpha]; \quad (5.124)$$

$$M_{\beta} = -\frac{\gamma H(\xi-1)}{\pi} \left[\frac{1}{3} \sin 2\beta + 8 \sin 3\beta \right]. \quad (5.125)$$

Для того чтобы продемонстрировать возможные последствия коррозионного поражения МГК, а также проиллюстрировать предложенные методики расчета, выполним расчет на совместное действие нагрузки и воздействия эксплуатационной среды для последнего предложенного случая, используя уравнения (5.123 – 5.125).

Результаты расчета

Расчет выполнен для конструкции, описанной в главах 2 – 4 настоящей диссертации (полукруговая арка пролетом 5,0 м), для первого случая загрузки, соответствующего высоте засыпки грунтом 12,5 м. Расчет выполнен в 4 этапа. На первоначальном этапе толщина гофрированного листа составляет 4,00 мм, что соответствует первоначальному состоянию конструкции до начала коррозионных процессов. Последующие 3 этапа расчета подразумевают уменьшение толщины стенки гофрированного листа на 1 мм на каждом этапе до достижения толщиной стенки значения в 1,00 мм. На рисунках 5.15 – 5.18 представлены эпюры напряжений в вершине и впадине гофра.

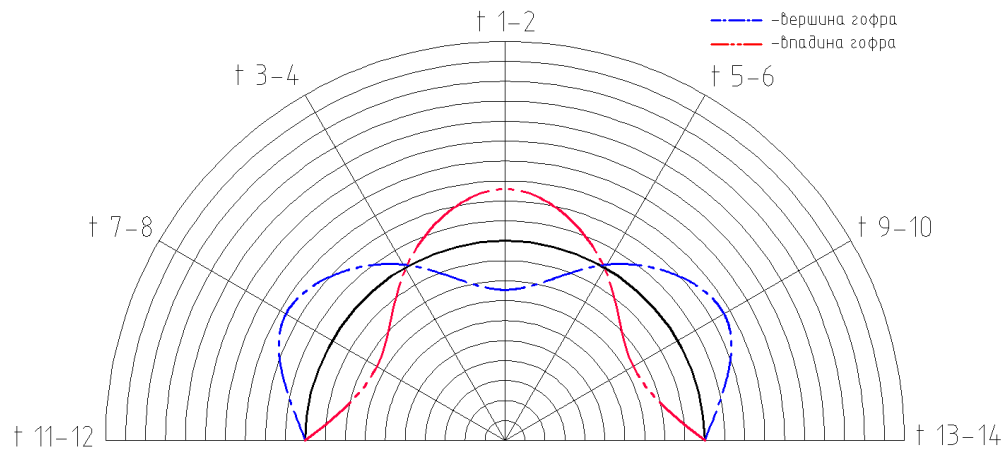


Рисунок 5.15 – Расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК при толщине гофрированного листа 4,00 мм (1 радиальное деление – 100 МПа)

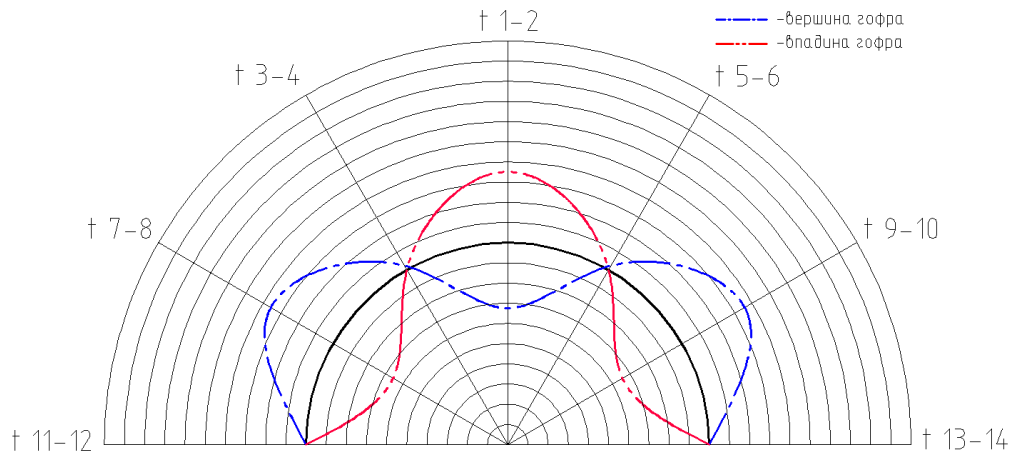


Рисунок 5.16 – Расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК при толщине гофрированного листа 3,00 мм (1 радиальное деление – 100 МПа)

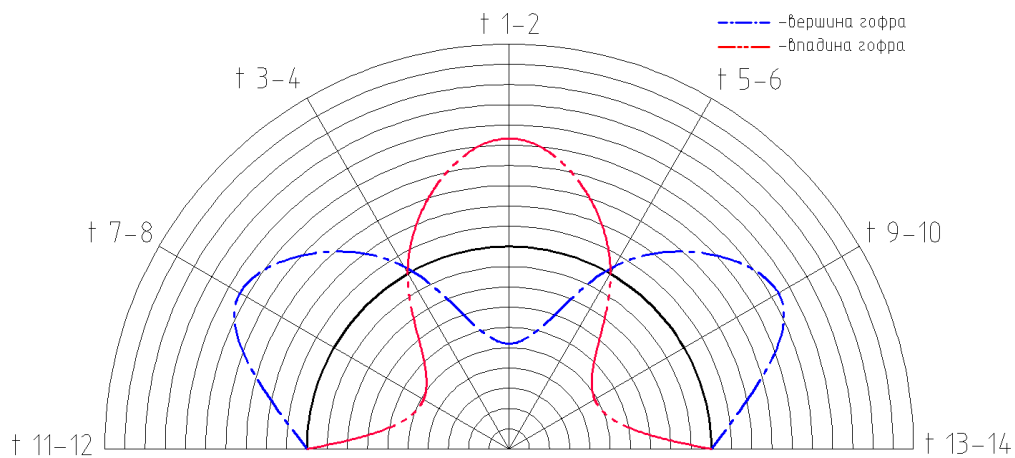


Рисунок 5.17 – Расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК при толщине гофрированного листа 2,00 мм (1 радиальное деление – 100 МПа)

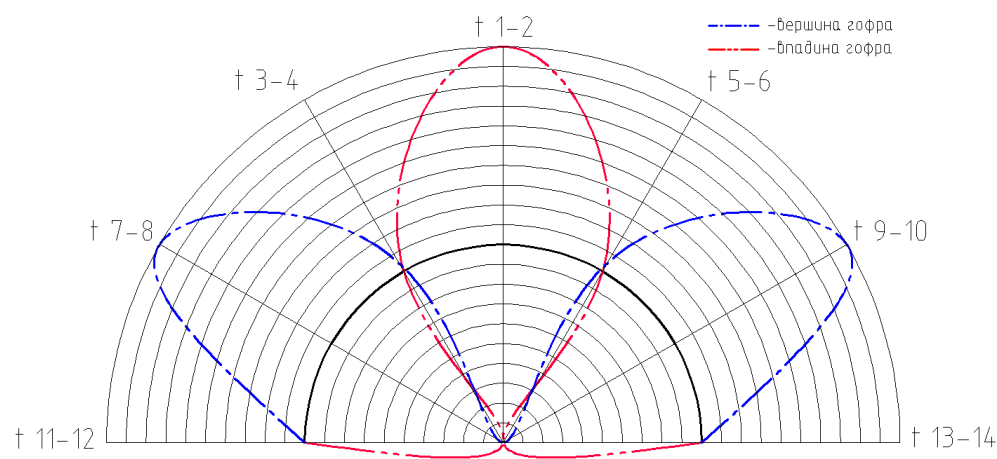


Рисунок 5.18 – Расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК при толщине гофрированного листа 1,00 мм (1 радиальное деление – 100 МПа)

Как видно из результатов расчета, под воздействием коррозионного поражения, напряжения в элементах конструкции увеличились в 4 (!!!) раза даже без увеличения действующей на сооружение нагрузки. Особенно опасным является то, что по результатам наблюдений и экспериментальных исследований, представленных в настоящей главе, подобная ситуация, связанная с уменьшением толщины стенки гофрированного листа с 4,0 мм до 1,0 мм может развиваться в течение нескольких лет. Особенно большому риску подвергаются сооружения, смонтированные без антикоррозионной защиты, либо с повреждением антикоррозионной защиты (особенно, антикоррозионной защиты катодного типа) в агрессивной среде, которой являются некоторые грунты в естественном состоянии, а также грунты, насыщенные агрессивными реагентами, присутствующими на автомобильных дорогах и в грунтах промышленных площадок различных предприятий. По результатам проведенного исследования становится очевидным, что разработка методик, позволяющих прогнозировать показатели напряженно-деформированного состояния конструкций под воздействием агрессивных сред во времени и разработка эффективных антикоррозионных покрытий являются одними из самых актуальных задач в проблеме применения металлических гофрированных конструкций.

Выводы по главе 5

1. Рассмотрены характерные повреждения МГК, а также стальных труб, эксплуатируемых в грунтовой среде, вследствие воздействия агрессивных сред. Сделан вывод о том, что экспериментальные данные, полученные для стальных оболочечных конструкций, эксплуатируемых в грунтовой среде, могут быть использованы для моделирования коррозионных повреждений МГК. Представлены экспериментальные данные динамики коррозионных повреждений стальных трубопроводов.

2. Приведены модели описывающих кинетику коррозионного износа стальных конструкций при отсутствии антикоррозионных покрытий. Подробно рассмотрены три распространенных типа моделей коррозионного износа. В соответствии с данными моделями построены графики изменения поперечного сечения гофрированного листа вследствие воздействия эксплуатационной среды.

3. Подробно рассмотрен вопрос поражения агрессивными средами МГК, защищенных антикоррозионными покрытиями. Приведены модели коррозионного износа металлоконструкций, защищенных антикоррозионными покрытиями, а также отдельно рассмотрена работа антикоррозионных покрытий в условиях поражения покрытия и защищаемого материала агрессивной средой. Представлена методика расчета долговечности антикоррозионных покрытий.

4. Представлена разработанная автором методика расчета МГК на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова с учетом переменной толщины гофрированного листа конструкции. Получены формулы, позволяющие рассчитывать МГК с учетом коррозионных повреждений при применении различных моделей кинетики коррозионного износа.

5. Выполнен расчет МГК, описанной в главах 2 – 4 настоящей диссертации (полукруговая арка пролетом 5,0 м) с помощью предложенной методики на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова с учетом уменьшения толщины гофрированного листа конструкции вследствие

воздействия агрессивной среды. По результатам расчета, под воздействием коррозионного поражения, напряжения в элементах конструкции увеличились в 4 (!!!) раза даже увеличения действующей на сооружение нагрузки. Данные выводы в целом подтверждают результаты обследований, представленные в главах 1,2 и 5 настоящей диссертации, где показано, что зачастую за значительными коррозионными повреждениями следуют механические повреждения и даже обрушения МГК, причем данный сценарий в некоторых условиях реализуется в течение нескольких лет. По результатам проведенного исследования становится очевидным, что коррозионные повреждения являются одними из наиболее опасных повреждений для МГК и разработка методик, позволяющих прогнозировать показатели напряженно-деформированного состояния конструкций под воздействием агрессивных сред во времени и разработка эффективных антикоррозионных покрытий являются одними из самых актуальных задач в проблеме применения металлических гофрированных конструкций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Конструкции из металлических гофрированных листов представляют собой большой практический интерес для транспортного, промышленного и гражданского строительства. Они могут применяться в качестве водопропускных сооружений, путепроводов, тоннелей различного назначения, галерей и т.д. МГК экономичны как в строительстве (в некоторых случаях их возведение обходится в несколько раз дешевле чем строительство аналогичных мостовых сооружений), так и в эксплуатации (при высоком качестве строительно-монтажных работ при возведении эксплуатационные затраты минимальны). Несмотря на очевидные плюсы сооружений данного типа, опыт применения сооружений данного типа в России, хотя и имеет давнюю историю, отстает от общемирового.

2. Существенным препятствием для освоения данного типа сооружений представляет несовершенство методов расчета МГК. На настоящий момент для расчета МГК применяются в основном методы, разработанные для расчета подземных сооружений (тоннелей и т.д.), либо МКЭ, который является универсальным методом по решению задач механики деформируемых твердых тел. Учитывая этот факт актуальность приобретает задача определения достоверности результатов, которые были получены при применении данных методов к расчету МГК, а также разработка новых методик, позволяющих достоверно рассчитывать гофрированные конструкции.

3. Представленные в главе 2 экспериментальные данные свидетельствуют о том, что поведение экспериментальной модели металлической гофрированной конструкции под нагрузкой довольно сильно зависит от степени уплотнения грунта в засыпке, через который нагрузка от батареи домкратов передается на испытываемую конструкцию, поэтому при подготовке испытаний следует особое внимание уделять обеспечению одинакового уровня уплотнения грунта с тем, чтобы обеспечить

симметричную работу гофрированной конструкции при симметричном нагружении.

4. Так как идеальную симметрию и модели конструкции и уплотнения грунта и характера нагружения в процессе экспериментального моделирования обеспечить невозможно, а моделируемая конструкция весьма чувствительна к несимметричным нагружениям (особенно при нагрузках, близких к критическим), то следует и впредь ожидать не симметричного, а несимметричного (или даже кососимметричного) деформирования конструкции. Учитывая это, следует рекомендовать при строительстве реальных металлических гофрированных конструкций, засыпаемых грунтом, уделять весьма большое внимание однородности грунта засыпки, одинаковой и симметричной степени его уплотнения над конструкцией с тем, чтобы исключить, или хотя бы уменьшить вероятность проявления несимметричного характера деформирования конструкций. Кстати, имеющийся у автора опыт наблюдения в реальных условиях за поведением гофрированных конструкций в случае несимметричного их нагружения в процессе присыпки грунтом подтверждает правильность этого заключения.

5. В ходе динамических испытаний было доказано, что МГК хорошо переносят сейсмические и другие динамические нагрузки, тем самым подтверждаются предположения, что МГК, являясь гибкими конструкциями, могут достаточно широко применяться в сейсмически опасных районах.

6. Интересно, то, что при сравнении расчетных и экспериментальных эпюр напряжений можно сделать вывод о том, что использование арочной модели и метода сил для расчета дает более близкие к экспериментальным данным результаты, чем использование конечно-элементной модели. Отмечая данный факт можно сказать, что метод конечных элементов, широко используемый в современной практике проектирования, не является самым точным методом. Можно предположить, что применение для расчета металлической гофрированной конструкции,

взаимодействующей с грунтом под нагрузкой, оболочечной модели (в форме полубезмоментной модели В.З. Власова, или даже уравнений более полной моментной теории оболочек) может оказаться весьма эффективным, так как позволит учесть возможные случаи неустойчивого деформирования конструкции.

7. Применение аппарата полной моментной теории оболочек к расчету металлических гофрированных конструкций возможно, однако имеет свои недостатки. К наиболее значительному недостатку относится громоздкость и сложность расчетов, что приведет к сложности внедрения обозначенных в главе методик в практику проектирования. Однако, существуют частные теории, например, теория «полубезмоментных» оболочек В.З. Власова, которая предлагает существенно менее громоздкий расчетный аппарат.

8. Используя аппарат теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова можно получить довольно простые уравнения для получения усилий в металлических гофрированных конструкциях. Простота полученных уравнений позволяет легко рассчитывать усилия в конструкциях и позволяет внедрить данный аппарат в практику проектирования в короткие сроки (для расчета с применением теории требуется ввод около 10 исходных данных и использование 3 формул). Применение теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова позволяет учитывать продольную силу, действующую вдоль оболочки, а также учитывать распределение продольной силы, действующей в поперечном направлении оболочки по длине сооружения. Данные компоненты напряженно-деформированного состояния МГК ранее учитывались только при применении пространственных моделей в программных комплексах, использующих МГК. Теория полубезмоментных оболочек В.З. Власова позволяет рассчитывать МГК, находящиеся при симметричном и несимметричном нагружении, что позволит учитывать реальные условия, возникающие при строительстве и эксплуатации МГК. С

помощью аппарата теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова можно создать банк готовых методик расчета для разного типа конструкций (замкнутых и незамкнутых круговых и эллиптических МГК), что позволит создать простые и понятные в использовании программы для расчета МГК.

9. Сопоставление результатов расчета разными методами с данными эксперимента показывает, что расчеты, выполненные с применением теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова, отличаются большей точностью, чем расчеты, выполненные с помощью метода конечных элементов и значительно более точны, чем расчеты, выполненные с помощью приближенных методик, представленных в нормативной базе РФ. Учитывая перечисленные преимущества, можно говорить о большой перспективе применения методики расчета на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова в области расчета МГК.

10. Проведенный анализ условий работы сооружений, а также дефектов и повреждений, наблюдаемых на МГК, эксплуатируемых в составе автомобильных и железных дорог показал, что, степень воздействия агрессивных сред на сооружения велика. Без принятия специальных мер по обеспечению защиты конструкций от воздействия агрессивных сред, значительно (до нескольких раз) сокращается срок эксплуатации сооружений, возрастает риск возникновения аварийных ситуаций и обрушений.

11. В главе 5 настоящей диссертации рассмотрены модели коррозионного износа МГК, эксплуатируемых в агрессивной среде. Рассмотрены модели как защищенных антикоррозионными покрытиями конструкций, так и конструкций, не имеющих защиты от агрессивных сред. В итоге сделан вывод о том, что в некоторых случаях, под воздействием агрессивных сред может произойти сквозное коррозионное поражение конструкции в течении 5 лет и менее. Данный вывод хорошо сопоставляется с результатами обследований эксплуатируемых сооружений.

12. В главе 5 выполнен расчет МГК, описанной в главах 2-4 настоящей диссертации (полукруговая арка пролетом 5,0 м) с помощью предложенной методики на основе теории полубезмоментных оболочек В.З.Власова с учетом уменьшения толщины гофрированного листа конструкции вследствие воздействия агрессивной среды. По результатам расчета, под воздействием коррозионного поражения, напряжения в элементах конструкции увеличились в 4 (!!!) раза даже без увеличения действующей на сооружение нагрузки. Данные выводы в целом подтверждают результаты обследований, представленные в главах 1, 2 и 5 настоящей диссертации, где показано, что зачастую за значительными коррозионными повреждениями следуют механические повреждения и даже обрушения МГК, причем данный сценарий в некоторых условиях реализуется в течении нескольких лет. По результатам проведенного исследования становится очевидно, что коррозионные повреждения являются одними из наиболее опасных повреждений для МГК и разработка методик, позволяющих прогнозировать показатели напряженно-деформированного состояния конструкций под воздействием агрессивных сред во времени и разработка эффективных антикоррозионных покрытий являются одними из самых актуальных задач в проблеме применения металлических гофрированных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин А.С. Прикладные методы расчета оболочек и тонкостенных конструкций / А.С. Авдонин. – М.: Машиностроение, 1969. – 401 с.
2. Аксельрад Э.Л. Гибкие оболочки / Э.Л. Аксельрад – М.: Наука, 1976. – 376 с.
3. Амиро И.Я. Ребристые цилиндрические оболочки / И.Я. Амиро, В.А. Заруцкий, П. С. Поляков. – Киев: Наукова думка, 1973. – 157 с.
4. Антоненко Э.В. Влияние деформации оси на напряженное состояние тонкостенной цилиндрической оболочки / Э.В. Антоненко, А.А. Иванов // Математика. Механика. Сб. науч. тр. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2012. – Вып. 14. – С. 98-101.
5. Асратян М.Г. Смешанные краевые задачи термоупругости для анизотропных в плане неоднородных тороидальных оболочек / М.Г. Асратян, Р.С. Геворкян // М.: ПММ АН РФ. – 2010. Том. 74. Вып. 3. С.433-440.
6. Барбакадзе В.Ш. Расчет и проектирование строительных конструкций и сооружений в деформируемых средах / В.Ш. Барбакадзе, С.М. Мураками. – М.: Стройиздат, 1989. – 472 с.
7. Беляев В.С. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом. Часть 2. Обзор отечественных экспериментальных исследований. Сопоставление результатов эксперимента с результатами расчетов по разным методикам / В.С. Беляев, Л.С. Яковлев, И.Г. Овчинников, И.А. Осокин // Интернет-журнал «Науковедение». 2013 №6 (19) [Электронный ресурс]. М-2013.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
8. Беляев В.С. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом.

Часть 3. Отечественные экспериментальные исследования. Динамические испытания / В.С. Беляев, Л.С. Яковлев, И.Г. Овчинников, И.А. Осокин // Интернет-журнал «Науковедение». 2014 №1(20) [Электронный ресурс]. М-2014.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN114.pdf>, свободный – Загл. с экрана.

9. Бугаева О.Е. Проектирование обделок транспортных тоннелей / О.Е. Бугаева. – Л.: ЛИИЖТ, 1966. – 75 с.

10. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – 270 с.

11. Бурлаков А.В. Ползучесть тонких оболочек / А.В. Бурлаков, Г.И. Львов, О.К. Морачковский. – Харьков: Вища школа, 1977. – 1124 с.

12. Вайнберг Д.В. Расчет оболочек / Д.В. Вайнберг, А.Л. Синявский. – Киев: Гос-стройиздат УССР, 1961. – 119 с.

13. Ведомственные строительные нормы "Проектирование промышленных стальных трубопроводов" (ВСН 51-3-85 Мингазпром, ВСН 2.38-85 Миннефтепром). – М, 1985. – 97 с.

14. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике / В.З. Власов. – М.: Л. ГИТТЛ, 1949, 784 с.

15. Власов В.З. Основные дифференциальные уравнения общей теории упругих оболочек / В.З. Власов // М.: Прикл. матем. и мех. – 1944. Том. 8. Вып. 2. С.109-140.

16. Власов В.З. Тонкостенные пространственные системы / В.З. Власов. – М.: Госстройиздат, 1958. – 502 с.

17. Власов В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. – М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1960 г. – 490 с.

18. Волков С.И. Математическая модель процесса коррозии стеклоэмалевых покрытий / С.И. Волков и др. // Защита металлов. – 1979. Том. XV. № 6. С. 750-754.

19. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир. – М.: Гостехиздат, 1956. – 419 с.

20. Вольмир А. С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи гидроупругости / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
21. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М., 1967 – 984 с.
22. ВСН 176-78 Инструкция по проектированию и постройке металлических гофрированных водопропускных труб.– М.: Изд-во стандартов, 2003. – 195 с.
23. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного нагружения / А. А. Гвоздев. – М.: Стройиздат, 1949. – 280 с.
24. Герсеванов М.Н. Основы динамики грунтовой массы / М.Н. Герсеванов. – М.: ОНТИ, 1937. – 242 с.
25. Герцог А.А. Гофрированные трубы на автомобильных дорогах / А.А.Герцог. – М.: Гушосдор, 1939. – 112 с.
26. Гольденвейзер А.Л. К вопросу о расчете оболочек на сосредоточенные силы / А.Л. Гольденвейзер // М.: ПММ. – 1954. Том. 18, Вып. 2. С. 181-186.
27. Гольденвейзер А.Л. Теория тонких упругих оболочек / А.Л. Гольденвейзер. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
28. Горохов Е.В. О прогнозировании времени жизни антикоррозионных покрытий по стали Ст3 / Е.В. Горохов, Ю.Б. Высоцкий, А.П. Доня и др. // Защита металлов. – 1994. – Т. 30. – №2. – С. 191-195.
29. Гуляев В.И. Неклассическая теория оболочек и ее приложение к решению инженерных задач / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, П.П. Лизунов. – Львов: Вища школа, 1978. – 192 с.
30. Гутман Э.М. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа / Э.М. Гутман, Р.С. Зайнуллин, А.Т. Шаталов и др. – М.: Недра, 1984. – 76 с.
31. Дубовик А.А. Уточнение математического описания кинетики коррозии сталей, эксплуатирующихся под защитными лакокрасочными покрытиями в агрессивных средах промышленных предприятий / А.А. Дубовик // Научн. техн. реф. сб. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР. Серия Б, 1974. – Вып. 3. – С. 1-4.

32. Емельянов И.Г. Контактное взаимодействие оболочек вращения по неизвестным двумерным областям / И. Г. Емельянов // Киев: Прикл. мех. – 1997, № 7. – С. 43-51.

33. Емельянов И. Г. Контактное взаимодействие оболочек вращения с основаниями / И. Г. Емельянов // Киев: Доп. Нац. АН Украина Докл. АН Украины. – 1998, № 3. – С. 52-57.

34. Енджиевский Л.В. Нелинейные деформации ребристых оболочек / Л.В. Енджиевский – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1982. – 295 с.

35. Жинкин А. Проблемы и перспективы типового проектирования металлических гофрированных конструкций / А. Жинкин // Транспорт Российской Федерации. – 2006, №5, – С. 53-54.

36. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю.К. Зарецкий. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.

37. Иванов А.В., Овчинников И.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния осесимметрично загруженной железобетонной цилиндрической оболочки в условиях хлоридной коррозии // Региональная архитектура и строительство. – 2007. – №1(2). – С. 43 - 52.

38. Иващенко Ю.Г. Работы, влияющие на безопасность объектов капитального строительства: технические вопросы, экономика, риск, менеджмент. Часть 3 Учебное пособие: в 3 ч. / Ю.Г. Иващенко, А.Н. Плотников, С.Л. Аборин, и [др.]. – М.: Аквариус, 2010. – 744 с.

39. Ильин В.П. Устойчивость ребристых оболочек при больших перемещениях / В.П. Ильин, В.В. Карпов – Л.: Стройиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 168 с.

40. Ильюшин А.А. Труды (1946-1966). Том 2. Пластичность / А.А. Ильюшин. – М.: Физматлит, 2004. – 480 с.

41. Калиновский М.И. Напряженно деформированное состояние и долговечность прямоугольной железобетонной трубы при действии карбонизации и хлоридсодержащей среды / М.И. Калиновский, И.Г. Овчинников // Строительные материалы. – 2010. – №10. – С.15-17.

42. Калиновский М.И., Овчинников И.И. Построение модели деформирования сталефибробетона в плоском напряженном состоянии применительно к расчету водопропускных дорожных труб / М.И. Калиновский, И.Г. Овчинников // Транспортное строительство. – 2009. – №6. – С.28-30

43. Кан С.Н. Прочность, устойчивость и несущая способность конструктивно-ортотропных цилиндрических оболочек / С.Н. Кан // Расчет пространственных конструкций: сб. вып. VIII - Госстройиздат, 1962. – С.85-106.

44. Кантор Б.Я. Контактные задачи нелинейной теории оболочек вращения / Б.Я. Кантор. – Киев: Наукова думка, 1990. – 136 с.

45. Карпов В.В. Различные схемы конструктивно-ортотропных оболочек и их применение к расчету оболочек дискретно-переменной толщины / В.В. Карпов – Исследования по механике строительных конструкций и материалов: Межвуз. темат. сб. тр.-Л.: ЛИСИ, 1988

46. Карякина М.И. Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий / М.И. Карякина – М.: Химия, 1980. – 198 с.

47. Клейн Т.К. Проблемы строительной механики подземных трубопроводов / Т.К. Клейн // Строительная механика и расчет сооружений. – 1967. – №4 (52). – С. 26-31.

48. Клейн Г.К. Расчет труб, уложенных в земле / Г.К. Клейн – М.: Госстройиздат, 1957. – 272 с.

49. Комиссарова И.И. Осесимметричный изгиб составных цилиндрических оболочек / И.И. Комиссарова. Вологда: ВГТУ, 2001. – 43 с. Деп.в ВИНТИ № 1225 - В2001.

50. Корнишин М.С. Вычислительная геометрия в задачах механики оболочек / М.С. Корнишин, В.Н. Паймушин, В.Ф. Снегирев. – М.: Наука, 1989. – 209 с.

51. Королев В.И. Упруго-пластические деформации оболочек / В.И. Королев – М.: Машиностроение, 1970. – 304 с.

52. Колоколов Н.М. Металлические гофрированные трубы под насыпями / Н.М. Колоколов, О.А. Янковский, К.Б. Щербина, С.Э. Черняховская. – М.: Транспорт, 1973. – 117 с.
53. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек / Н.В. Колкунов. – М.: Высшая школа, 1972. – 296 с.
54. Коррозия. Справ, изд. / Под ред. Л.Л. Шрайера. – М.: Металлургия, 1981. – 632 с.
55. Крупномасштабные сейсмические испытания фрагмента галереи с арочной конструкцией из МГК (гофр 381*140 мм) производства ЗАО «Гофросталь»: технический отчет / В.С. Беляев. – Санкт-Петербург: НПФ «Строй-Динамика», 2011. – 98 с.
56. Крысько В.А. Нелинейная статика и динамика неоднородных оболочек / В.А. Крысько – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1976. - 216 с.
57. Лазарева И. В. Расчет методом конечных элементов гибкой стенки, погруженной в грунт / И. В. Лазарева // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1976. – № 2. – С. 27-29.
58. Лебедева Т.Б. Практика применения металлических гофрированных конструкций в хабаровском филиале ОАО «ГИПРОДОРНИИ» / Т.Б. Лебедева, Т.Л. Селина, В.С. Беляев. и др – Сб. науч. тр. Вопросы проектирования и строительства автомобильных дорог: опыт и инновации. – Екатеринбург: – 2010. – №1. – С . 162-175.
59. Лурье А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек / А.И. Лурье. - М.-Л.: Гостехиздат, 1947. – 252 с.
60. Магомедов Р.М. К оценке надежности подводного магистрального трубопровода, находящегося в условиях коррозионного износа / Р.М. Магомедов. – Сб. науч. тр. Исследования по строительным конструкциям. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1984. – С. 98-102.
61. Мальцева Т.А. Прогнозирование разрушения лакокрасочных покрытий в атмосферных условиях / Т.А. Мальцева, А.И. Голубев // Промышленное строительство. – 1981. – № 3. – С. 30-31.

62. Марченко А.Ф. Почвенная коррозия трубопроводной стали и магистральных трубопроводов / А.Ф. Марченко // Строительство трубопроводов. – 1995. – № 1. – С. 29-34.

63. Милейковский И.Е. Метод расчета сборных ребристых оболочек покрытий с ломаной формой поверхности / И.Е. Милейковский, О.Н. Золотов. – Сб. Расчет пространственных конструкций. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 5-43.

64. Муштари Х.М. Нелинейная теория упругих оболочек/ Х.М. Муштари, К.З. Галимов. – Казань: Таткнигоиздат, 1957. – 432 с.

65. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек / В.В. Новожилов. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 431 с.

66. Овчинников И.Г. Анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических и динамических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом
Часть 1. Обзор и анализ зарубежных статических экспериментальных исследований / И.Г. Овчинников, В.С. Беляев, Л.С. Яковлев, И.А. Осокин // Интернет-журнал «Наукоеведение». 2013 №6 (19) [Электронный ресурс]. М-2013.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf>, свободный – Загл. с экрана.

67. Овчинников И.Г. Механика пластинок и оболочек, подвергающихся коррозионному износу / И. Г. Овчинников. – Саратов: Сарат. политехи, ин-т, 1991. – 115 с. Деп. в ВИНТИ № 3251-B91.

68. Овчинников И.Г. Инженерные методы расчета конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах: учебное пособие / И.Г. Овчинников, А.И. Айнабсков, Н.Б. Кудайбергенов. – Алматы: РИК, 1994. – 132 с.

69 Овчинников И.Г. Прогнозирование работоспособности защитных покрытий и элементов конструкций с защитными покрытиями. Обзор. Ч. 1 / И.Г. Овчинников, Н.Б. Кудайбергенов, И.Г. Гатауллин. – Саратов: Сарат. политехи, ин-т, 1992. – 38 с. Деп. в ВИНТИ № 3257-B92.

70. Овчинников И.Г. Прочность и долговечность элементов трубопроводных конструкций с повреждениями коррозионного характера /

И.Г. Овчинников, Г.А. Наумова, В.В. Кабанин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1999. – 164 с. Деп. в ВИНТИ № 373-B99.

71. Овчинников И.Г., Наумова Г.А. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений / И.Г. Овчинников, Г.А. Наумова – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2000. – 227 с.

72. Овчинников И.Г. Расчет и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу (обзор) / И.Г. Овчинников, Ю.М. Почтман // Физико-химическая механика материалов. – 1991. – № 2. – С. 7-19.

73. Овчинников И.Г. Анализ причин аварий и повреждений транспортных сооружений / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников // Транспортное строительство. – 2010. – №7. – С.2-5.

74. Овчинников И.Г. К расчету нелинейно-упругой цилиндрической оболочки с учетом коррозионного износа / И.Г. Овчинников, Х.А. Сабитов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1984. – № 6. – С. 38-41.

75. Овчинников И.Г. Механика пластинок и оболочек, подвергающихся коррозионному износу / И.Г. Овчинников. – Саратов: Сарат. политехи, ин-т. Саратов, 1991. – 115 с. Деп. в ВИНТИ № 3251-B91.

76. Овчинников И.И. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами / И.И. Овчинников, Г.А. Наумова. – Волгоград: Волгогр. гос. архит. строит. ун-т. Изд-во ВолгГАСУ, 2007. – 272 с.

77. Овчинников И.И. Модель деформирования железобетонной водопропускной трубы при действии на нее произвольной нагрузки и агрессивной хлоридсодержащей среды / И.И. Овчинников, М.И. Калиновский // Дороги и мосты. Сборник статей ФГУП РосдорНИИ. – 2009. – Вып. 2(22). – С. 186-200.

78. Овчинников И.И. Применение полубезмоментной теории В.З. Власова к расчету круглых фибробетонных труб / И.И. Овчинников, М.И. Калиновский. – Сб. науч. тр. по материалам международного научно-практического симпозиума

«Социально-экономические проблемы жилищного строительства и пути их решения в период выхода из кризиса». Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – С. 227 -232.

79. Овчинников И.И. Цилиндрический изгиб железобетонной пластины на упругом основании в условиях хлоридной агрессии / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов, И.Г. Овчинников // Жилищное строительство. – 2012. – № 10. – С. 6-8

80. Овчинникова А. И. Механика поврежденных армированных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / А.И. Овчинникова. – Волгоград, 2004. – 330 с.

81. Овчинникова Г.Н. Расчет сложных стержневых конструкций с учетом кинетики развития распределения и локальных коррозионных повреждений: автореф. дисс ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Г.Н. Овчинникова. – Волгоград, 1996. – 24 с.

82. ОДМ 218.2.001-2009. Рекомендации по проектированию и строительству водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур на автомобильных дорогах общего пользования с учетом региональных условий (дорожно-климатических зон). - М.: Изд-во стандартов, 2009. - 201 с.

83. Орешкин С. В. Статическое исследование надежности антикоррозионной защиты стальных конструкций / С.В. Орешкин // Промышленное строительство. – 1973. – №1. – С. 12-19.

84. Осокин. И.А. Анализ методики расчета предельных деформаций поперечного сечения на примере эксплуатации гофрированных водопропускных труб уральского региона / И.А. Осокин, А.С. Пермикин // Дороги и мосты. Сборник статей ФГУП РосдорНИИ. – 2013. – Вып. 2(30). – С. 224-234

85. Осокин И.А. О проблемах эксплуатации гофрированных водопропускных труб под насыпями автомобильных и железных дорог уральского региона: материалы международной конференции «Сучасні методи проектування, будівництва та експлуатації систем водовідводу на автомобільних дорогах» (1 – 2 березня 2012 року) / И.А. Осокин, А.С. Пермикин. – Киев: НТУ, 2012. – С. 78-83.

86. Осокин И.А. Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб / И.А. Осокин // Интернет-журнал «Науковедение». 2013 №2(15) [Электронный ресурс]. М-2013.-Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/40tvn213.pdf>, свободный – Загл. с экрана.

87. Павлов П.А. Прочность сталей в коррозионных средах / П.А. Павлов, Б.А. Кадырбеков, В.А Колесников. - Алма-Ата: Наука, 1987. – 272 с.

88. Петров В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек / В.В. Петров. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 119 с.

89. Петров В.В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 288 с.

90. Петрова Е.Н. Проектирование и строительство транспортных сооружений изметаллических гофрированных элементов: учеб.пособие / Е.Н. Петрова. – М. : МАДИ, 2012.– 56 с.

91. Работнов Ю.Н. Локальная устойчивость оболочек / Ю.Н. Работнов // Докл. АН СССР. – 1946. – Т.52. – №2. – С.111-112.

92. Родичев Л.В. Физическое моделирование процессов коррозии металла, протекающих под слоем антикоррозионной защиты /Л.В. Родичев, З.Ф. Каримов // Строительство трубопроводов. – 1993. – № 6. – С. 29-32.

93. Ржаницын А.Р. Расчет металлических двутавровых балок, получивших начальное искривление в горизонтальной плоскости / А.Р. Ржаницин. – М.: Стройиздат, 1946. – 32 с.

94. Ржаницын А.Р. Расчет упругих оболочек произвольного очертания в прямоугольных координатах / А.Р. Ржаницин // Строит, механика и расчет сооружений. – 1977. – №1. – С. 21-28.

95. Ржаницын А.Р. О расчете упругих тонких оболочек произвольной формы на основе моментной теории оболочек в прямоугольных координатах / А.Р. Ржаницин, В.В. Эм // Статика сооружений. – 1978. – С.88-91.

96. Соколовский В.В. О расчете сферической оболочки / В.В. Соколовский // Доклады АН СССР. Новая серия. – 1937. – Т.16. – №1. – С.19-24.

97. Статические испытания арочной конструкции из МГК (гофр 381*140 мм) производства ЗАО «Гофросталь» в том числе в условиях предельного нагружения: технический отчет / В.С. Беляев. – Санкт-Петербург: НПФ «Атом-Динамик», 2012. – 49 с.

98. СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства, 1985. – 196 с.

99. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.

100. Ухов С.Б. Расчет сооружений и оснований методом конечных элементов / С.Б. Ухов. – М.: МИСИ, 1973. – 118 с.

101. Филин А. П. Элементы теории оболочек / А. П. Филин. – Л.: Стройиздат, 1987. – 384 с.

102. Флакс В.Я. Коррозия стальных конструкций предприятий черной металлургии / В.Я. Флакс // Промышленное строительство. – 1966. – № 4. – С. 21-22.

103. Флюгге В. Статика и динамика оболочек / Флюгге В. – М.: Госстройиздат, 1961. – 307 с.

104. Шварцман И.С. Прогнозирование защитного действия атмосферостойких лакокрасочных покрытий / И.С. Шварцман // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1983. – №1. – С. 30-32.

105. Экспериментальные исследования фрагмента искусственного сооружения из гофролиста производства предприятия ООО «Гофра-2001» на действие статических и временных нагрузок: технический отчет / В.С. Беляев. – Санкт-Петербург: НПФ «Атом-Динамик», 2007. – 57 с. (2.16)

106 ARMTEC/Cons auction Products, 15 Campbell Road, P.O. Box3000, Ontario, N1H6P2

107 Ault, J.P. Durability analysis of aluminized type 2 corrugated metal pipe / J. Peter Ault, P.E., and James A. Ellor, P.E. – NJ.: Ocean City Research Corp, 2000. – 104 p.

108. Axelrad E. L. Shell theory and its specialized branches / E. L. Axclrad // Int. J. Solids and struct, 2000. – 37. – № 10. – P. 1425-1451.
109. Borowicka, H. Principles of Grain-Mechanics / H. Borowicka, L. Martak // Vienna. – 1988. – p. 10.
110. Beben. D. Numerical analisis of a soil-steel bridge structure / D. Beben // The Baltic journal of road and bridge engeineering. – 2009. – № 4 (1). – P. 13-21.
111. Drainage handbook. Optional pipe materials. - Department of transportation. Florida, 1999.
112. Catalogo Generale. - Metalmeccanica Fracasso SpA. Italy, 2001.
113. Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products. Published by American Iron and Steel Institute, 1994.
114. Law M. T. C. Numerical modeling of tight fitting flexible liner in damaged sewer under earth loads / T. C. Michael Law, Ian D. Moore // Journal Tunnelling and Underground Space Technology, 2007. – No. 5. – P. 655-665
115. Maday, A. "In situ" testing of a long span, corrugated steel culvert used to rehabilitate a concrete frame: railway viaduct / A. Maday, J. Vaslestad, L. Janusz // ViaCon, 1998.
116. Mair R. J. Centrifuge modelling of the effects of soil loading on flexible sewer liners / R. J. Mair, J. E. Gumbel, A. D. Spasojevic. // Journal Geotechnique. 2007. – No. 4. – P. 331-341
117. Mak, A.C. Measured response of a deeply corrugated box culvert to three dimensional surface loads: Transportation Research Board Annual Conference / A.C. Mak, R.W.I. Brachman and I.D. Moore // Washington D.C., 2009. - Paper No 09-3016. - 14 p.
118. Mathews J. C. Decision analysis guide for corrugated metal culvert rehabilitation and replacement using trenchless technology / John C. Mathews, Jadranka Simicevic, Maureen A. Kestler, Rob Piehl // Washington D.C. United States Department of Agriculture. Forest Service, 2012.

119. McVay M.C. Long-term behavior of large-span culverts in cohesive soils / M.C. McVay, P Papadopoulos, D. Bloomquist, F.C. Townsend // Transportation Research Record 1415. – Washington D.C. – 1993. P. 40-46.
120. Modern sewer design, 2 nd: ed., American Iron and Steel Institute. - Washington D.C. – 1990. – 306 p.
121. Moore I. D. Sewer and culvert deterioration and its implications for design of liners / I. D. Moore // GeoEngineering Centre at Queen's-RMC. Queen's University, Kingston, Canada, 2009. - P.1-11.
122. NCSPA, CSP Durability Guide - NW Washington D.C. – 2003
123. Sharma,. S. Evaluation of culvert deformations using the finite element method / S. Sharma, J.H. Hardcastle // Transportation Research. Record 1415, Washington D.C. 1993: 32-39.
124. Tunnel liner plate. Armtec Limited, 2000. - 15 p.
125. Underground Structures. Design and Instrumentation / Edited by R.S.Sinha. Elsevier, 1989.

**РАСЧЕТ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ГОФРИРОВАННОЙ ТРУБЫ,
РАСПОЛОЖЕННОЙ ПОД НАСЫПЬЮ Ж.Д. ПУТИ НА
СТ. СТРИГАНОВО СВЕРДЛОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

Ж.д. насыпь выполнена из тугопластичного суглинка, залегающего в районе местных карьеров. В качестве грунта засыпки был принят тугопластичный суглинок (модуль деформации $E = 8$ Мпа, угол внутреннего трения $\varphi = 15$ рад, удельный вес грунта $\gamma_n = 16 \text{ кН/м}^3$). Размеры трубы и характеристики гофрированного листа принимаем по результатам измерений: шаг между волнами 135 мм, высота листа 35 мм, толщина 2,5 мм, диаметр – 1,5 м.

По результатам расчета конструкции по предельному равновесию было выявлено, что расчетная несущая способность трубы составляет:

$$q = q_{1.p} \cdot K_{y.g} = 0,33 \cdot 4,42 = 1,4586 \text{ кгс/см}^2 = 0,0143 \text{ кН/м}^2 \quad (1)$$

где $q_{1.p}$ – расчетная несущая способность гофрированной трубы вне грунта для рекомендуемых сталей;

$K_{y.g}$ – коэффициент увеличения несущей способности гофрированной трубы за счет упругого отпора окружающего грунта.

$$q_{1.p} = 0,032 \cdot 10^6 \cdot \frac{W}{D^2} = 0,032 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,23}{150^2} = 0,33 \text{ кгс/см}^2 \quad (2)$$

где W – момент сопротивления продольного (вдоль трубы) сечения брутто стенки на единицу длины;

D – диаметр трубы по средней линии гофров.

$$K_{y.g} = 1 + \frac{12,1 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{G}} = 1 + \frac{12,1 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{1,25 \cdot 10^{-7}}} = 4,42 \quad (3)$$

где G – обобщенный показатель жесткости взаимодействующей системы "конструкция-грунт".

$$G = \frac{W}{D^2 \cdot E_{cp}} = \frac{0,23}{150^2 \cdot 81,55} = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг} \quad (4)$$

где E_{cp} – компрессионный модуль деформации грунта засыпки.

Интенсивность нагрузки, действующей на конструкцию, составляет:

$$P_n = P_\gamma + P_v = 0,395 + 0,576 = 0,972 \text{ кгс/см}^2 = 0,0096 \text{ кН/м}^2 \quad (5)$$

где P_γ – интенсивность постоянной нагрузки;

P_v – интенсивность временной нагрузки.

$$P_\gamma = C_\gamma \cdot \gamma_n \cdot h = 1 \cdot 16 \cdot 3,6 = 57,60 \text{ кН/м}^2 \quad (6)$$

где C_γ – коэффициент вертикального давления грунта (при расчете гибких (из гофрированного металла и др.) звеньев (секций) труб $C_\gamma = 1$);

γ_n – нормативный удельный вес грунта;

h – высота засыпки трубы.

$$P_v = \frac{v}{2,7 + h} = \frac{249,48}{2,7 + 3,6} = 39,6 \text{ кН/м}^2 \quad (7)$$

где $v = 17,82 \cdot K = 17,82 \cdot 14 = 249,48 \text{ кН/м}$ – равномерно распределенная нагрузка от подвижного состава железных дорог.

Как видно из результатов расчета, интенсивность действующих нагрузок на конструкции гофрированной трубы не превышает предельно-допустимую.

Проверка общей устойчивости формы поперечного сечения гофрированной трубы:

$$\frac{N}{\varphi \cdot F} = \frac{93}{0,74 \cdot 0,29} = 433,4 \text{ кгс/см}^2 \leq m_2 \cdot R_0 = 0,7 \cdot 1900 = 1330 \text{ кгс/см}^2 \quad (8)$$

где N – расчетное осевое сжимающее усилие на единицу длины стенки трубы;

F – площадь продольного сечения стенки на единицу длины трубы;

m_2 – коэффициент условий работы, учитывающий условность расчетной схемы и начальные несовершенства конструкции, принимается равным 0,7;

R_0 – основное расчетное сопротивление стали при действии осевых сил;

φ – коэффициент понижения несущей способности, вводимый для предотвращения потери устойчивой формы равновесия гибкой гофрированной трубы в упругой грунтовой среде.

По результатам расчета условие устойчивости обеспечено.

Определение предельных деформаций поперечного сечения металлической гофрированной трубы.

$$\Delta \cdot D_{пред} = \frac{q_{пред} \cdot D^3}{0,96EI + 0,0053E_{зп} D^3} = \frac{1,1 \cdot 0,893 \cdot 150^3}{0,96 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 0,4025 + 0,0053 \cdot 81,5 \cdot 150^3} = 1,48 \text{ см} \quad (9)$$

где $q_{пред} = 1,1 \cdot q_{л.р}$ – нормативная несущая способность металлической трубы;

$E = 2,1 \cdot 10^6$ кгс/см² – модуль упругости стали;

I – момент инерции продольного сечения стенки на единицу длины металлической трубы.

Условие предельных деформаций:

$$\Delta \cdot D'_{пред} \leq \frac{M_{пл} \cdot D^2}{6EI} = 2,45 \text{ см} \quad (10)$$

где $M_{пл}$ – изгибающий момент в стенке МГТ, соответствующий образованию пластического шарнира.

Уменьшение вертикального диаметра определяется по формуле:

$$\Delta \cdot D_{пред} = \Delta \cdot D'_{пред} \left(\frac{2,43 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{G}} \right) = 2,50 \text{ см} \quad (11)$$

По результатам расчета деформации составляют:

- в горизонтальном направлении 1,48 см;
- в вертикальном направлении 2,50 см.

Как видно эти величины не превышают предельных значений [82].

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый проректор Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.,
д.т.н., профессор А.А. Сытник А.А.

2014

АКТ

Результаты диссертационной работы соискателя кафедры «Транспортное строительство» Осокина Ильи Александровича «Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями (применительно к водопропускным и канализационным трубам)», выполненной в соответствии с проблемой университета 12В.04 «Разработка теории и методов расчета конструкций транспортных сооружений при комплексном воздействии эксплуатационных нагрузок, температур и агрессивных сред» программы 12В «Разработка методов расчета, конструирование и компьютерное моделирование уникальных строительных и транспортных сооружений» использованы при подготовке отчета по этой проблеме, используются при написании статей по плановой тематике университета, а также используются в лекционных курсах и практических занятиях со студентами и магистрантами по проектированию, прогнозированию поведения, строительству и эксплуатации транспортных сооружений. С использованием результатов работы готовится учебное пособие «Прогнозирование работоспособности металлических гофрированных водопропускных труб в реальных условиях эксплуатации».

Заведующий кафедрой «Транспортное строительство»
СГТУ имени Гагарина Ю.А., д.т.н., профессор

В.В. Столяров

Научный руководитель, профессор кафедры
«Транспортное строительство» СГТУ имени Гагарина Ю.А.,
д.т.н., профессор

И.Г. Овчинников

"УТВЕРЖДАЮ"
Технический директор



№ « » от « » июля 2014 г.

А К Т
об использовании результатов
кандидатской диссертационной работы
Осокина Ильи Александровича

Представленные в диссертационной работе "Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями (применительно к водопропускным и канализационным трубам)" методики моделирования, расчета и прогнозирования поведения металлических гофрированных конструкций с учетом воздействия реальных условий эксплуатации приняты к использованию в ЗАО «Гофросталь» в следующем виде:

1. Анализ существующих методик расчета металлических гофрированных конструкций;
2. Анализ и обработка экспериментальных данных по испытаниям модели полукруговой гофрированной конструкции;
3. Практически-ориентированная методика расчета металлических гофрированных конструкций на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова;
4. Методика расчета металлических гофрированных конструкций на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова с учетом воздействия агрессивных эксплуатационных сред.

Использованием указанных результатов позволит повысить качество и надежность расчетов при проектировании, расчетным путем моделировать наступление аварийных ситуаций с целью не допускать их в дальнейшем путем разработки защитных или превентивных инженерных решений.

Технический директор

Л.С. Яковлев

«Утверждаю»
Генеральный директор
ООО «Институт
«Проектмостореконструкция»
В.Н. Морозов
«___» мая 2014 г.



СПРАВКА

о принятии к использованию результатов диссертационной работы
Осокина И.А. «Совершенствование методов расчета металлических
гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями
(применительно к водопропускным и канализационным трубам)»

Методики моделирования, расчета и прогнозирования поведения водопропускных труб из металлических гофрированных конструкций с учетом воздействия реальных условий эксплуатации, разработанные в диссертационной работе Осокина Ильи Александровича «Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями (применительно к водопропускным и канализационным трубам)» приняты к использованию в институте «Проектмостореконструкция» при диагностике, прогнозировании поведения, оценке долговечности металлических гофрированных конструкций водопропускных труб, работающих в агрессивных условиях эксплуатации.

Прогнозирование поведения металлических гофрированных конструкций с использованием разработанных подходов позволяет расчетным путем исследовать возможные сценарии снижения несущей способности и уменьшения долговечности, тем самым прогнозировать наступление аварийных ситуаций с целью не допускать их в дальнейшем путем разработки соответствующих мер дополнительной защиты.

Главный инженер проектов



С.В. Ситников



ООО «Инженер»
620102, Россия, г. Екатеринбург,
ул. Московская, 70, оф. 206
тел./факс (343) 370-82-76, 370-82-78, 8-800-2000-155
E-mail: ekat@gpi-e.ru, www.gpi-e.ru,
ОКПО 75758252, ОГРН 1056603980278,
ИНН 6671160204, КПП 665801001

ИНЖЕНЕР 

от доверия к уверенности

ISO 9001:2008
ISO 14001:2004
OHSAS 18001:2007

№ «1098» от «10» июля 2014 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Генеральный директор

Ковалев С.С.

« 10 » июля 2014 г.



А К Т

об использовании результатов
кандидатской диссертационной работы
Осокина Ильи Александровича

Комиссия в составе: председатель Ковалев С.С., члены комиссии: Феофанов С.В., Никифоров К.А. составили настоящий акт о том, что представленные в диссертационной работе "Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями (применительно к водопропускным и канализационным трубам)" методики моделирования, расчета и прогнозирования поведения металлических гофрированных конструкций с учетом воздействия реальных условий эксплуатации приняты к использованию в ООО «Инженер» при диагностике, прогнозировании поведения, оценке долговечности и остаточного ресурса конструкций из гофрированного металла, предназначенных для работы или уже работающих в агрессивных условиях эксплуатации.

Прогнозирование поведения конструкций с использованием разработанных методик позволяет расчетным путем моделировать наступление аварийных ситуаций с целью не допускать их в дальнейшем путем разработки защитных или превентивных инженерных мероприятий.

Председатель комиссии
Генеральный директор

С.С. Ковалев

Начальник отдела
ОТС и ЭПБ

К.А. Никифоров



Закрытое акционерное общество

ЗАО «Форпроект»

Юридический адрес: 620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Московская, 195, оф. 45-52
Фактический адрес: 620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Московская, 195, оф. 474
Почтовый адрес: 620086, Свердловская обл., г. Екатеринбург, а/я 2
Тел./факс: (343) 344-95-74
Электронная почта: office@forpr.ru Сайт: www.forpr.ru
Р/сч. 40702810816000030054 в доп. офисе № 9016/0448 Уральского банка Сбербанка России
К/сч. 30101810500000000674 БИК 046577674
ИНН 6658309991 КПП 667201001 ОГРН 1086658013045

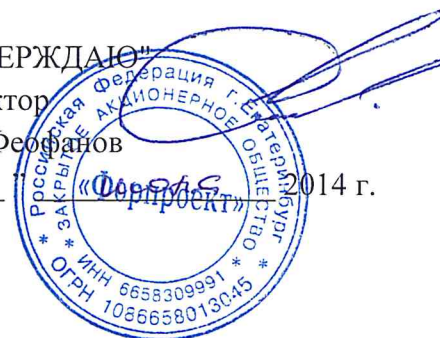
№ «71» от «14» июля 2014 г.

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор

С.В. Феофанов

«14»



2014 г.

А К Т

об использовании результатов
кандидатской диссертационной работы
Осокина Ильи Александровича

Комиссия в составе: председатель С.В. Феофанов, А.В. Бондарь составили настоящий акт о том, что представленные в диссертационной работе "Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями (применительно к водопропускным и канализационным трубам)" методики моделирования, расчета и прогнозирования поведения металлических гофрированных конструкций с учетом воздействия реальных условий эксплуатации приняты к использованию в ЗАО «Форпроект» при обследовании конструкций из гофрированного металла. Материалы изложенные в диссертации позволяют производить более объективную оценку долговечности и остаточного ресурса конструкций работающих в агрессивных условиях эксплуатации. Кроме того, в диссертационной работе представлены методики, позволяющие рассчитывать конструкции с высокой степенью точности, при этом методики весьма простые и пригодные к использованию в инженерной практике.

Использование материалов диссертации "Совершенствование методов расчета металлических гофрированных конструкций с эксплуатационными повреждениями (применительно к водопропускным и канализационным трубам)" позволяет повысить качество работ по обследованию и проектированию металлических гофрированных конструкций.

Председатель комиссии
Директор

Главный специалист

С.В. Феофанов

А.В. Бондарь