

На правах рукописи

Осокин Илья Александрович



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

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный университет путей сообщения» и в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

- Научный руководитель – Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор
Овчинников Игорь Георгиевич
- Официальные оппоненты – **Землянский Анатолий Андреевич**, доктор технических наук, профессор, ЗАО «ИНЭСС», советник директора
Мигунов Виктор Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», доцент кафедры «Городское строительство и архитектура»
- Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»

Защита состоится 20 февраля 2015 года в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства» и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01>

Автореферат разослан 19 декабря 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.184.01



Бакушев
Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема корректного расчета и проектирования металлических гофрированных конструкций (МГК), возводимых и эксплуатируемых в грунтовой среде, 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 УрГУПСе, 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.), «Проблемы сучасного будівництва» (Украина, г. Полтава, 2012 г.), «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво» (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 опубликована 21 работа, в том числе в журналах по перечню ВАК РФ – 6 работ. Получены 2 патента РФ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследования, сформулированы цель и задачи исследования, показана его научная новизна и практическая ценность.

В первой главе диссертации проведен краткий обзор истории применения металлических гофрированных конструкций в России, рассмотрены область применения МГК и основные типы конструкций, применяемы в России и в мире.

Рассмотрены условия эксплуатации водопропускных труб и проанализированы нагрузки и воздействия, действующие на сооружения в условиях реальной эксплуатации. Сформулированы условия, при выполнении которых станет возможным обеспечение безопасной эксплуатации сооружений и повышение срока их службы.

Выполнен обзор существующих методов расчета МГК. Выделено три основных типа методов расчета МГК, используемых в настоящее время: методы, изначально разработанные для проектирования тоннелей и впоследствии адаптированные для расчета МГК; методы механики сплошной среды; численные методы (в частности метод конечных элементов). Также подробно рассмотрен метод расчета, представленный в нормативной базе РФ. По методике,

представленной в нормативной базе РФ, выполнен расчет сооружения, эксплуатируемого на Свердловской железной дороге (получены значения напряжений и деформаций). Результаты расчета сопоставлены с результатами обследования данного сооружения. По результатам сопоставления, фактические деформации сооружения на два порядка превосходят расчетные. Сделан вывод о том, что возможной причиной столь больших расхождений является, в том числе и несовершенство методики расчета.

Приведены характерные дефекты и повреждения МГК на основе выполненных автором осмотров фактически эксплуатируемых объектов из МГК, расположенных на территории Свердловской области. Во всех объектах обнаружены сходные дефекты, основными из которых являются значительные деформации (на порядок - два порядка превосходящие расчетные), а также коррозионные повреждения.

На основании выполненного анализа существующих методик расчета, нагрузок и воздействий, фактически действующих на конструкции, и их фактического состояния на сети автомобильных и железных дорог формулируются цель и задачи исследования.

В начале второй главы проведен обзор и анализ зарубежных статических экспериментальных исследований МГК. Проанализированы результаты экспериментов, поставленных на территории Польши и Канады. По результатам анализа зарубежных экспериментов были сделаны следующие выводы:

- конструкции, выполненные из металлических гофрированных листов (МГК) обладают высокой надежностью. По результатам анализа экспериментов, поставленных за рубежом, конструкции сохраняют свои эксплуатационные качества при нагрузках, которые превосходят расчетные до 2,5 раз.

- расчетные модели, учитывающие пространственную работу конструкций, являются более корректными чем «плоские» модели и расчетные схемы и потому при расчете МГК следует применять именно их.

Помимо двух зарубежных экспериментов во второй главе очень подробно рассмотрен отечественный эксперимент, поставленный на полномасштабной модели полукруговой арочной МГК. В анализе результатов и корректировке программы этого эксперимента принимал участие автор. Объектом исследования являлась арочная МГК кругового очертания, с углом кругового сектора $\varphi=180^\circ$ (полукруговая арка). МГК выполнена из гофрированных листов профилем 381x140 мм, толщиной 4 мм. Испытания проводились в камере объемного нагружения. Общий вид камеры объемного нагружения и смонтированной внутри нее модели МГК представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Общий вид камеры объемного нагружения и модели МГК

При проведении экспериментальных исследований модели МГК полукруглого 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); нормальные напряжения, возникающие в материале оболочки на гребне и впадине гофра в этом сечении; давление грунта в ряде точек грунтовой среды.

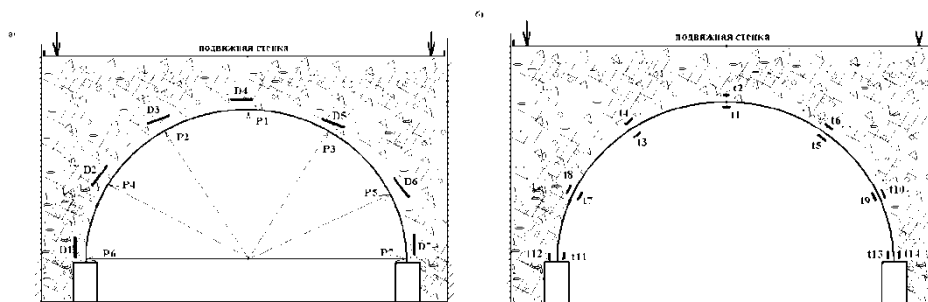


Рисунок 2 – Схема расположения датчиков: а) перемещения и давления, б) относительных деформаций

Испытания проводились при трех вариантах приложения распределенной по всей площади подвижной стенки нагрузки. При первом нагружении высота эквивалентной насыпи принята равной 12,5 м; при втором нагружении высота эквивалентной насыпи принята равной 20 м; при третьем нагружении высота эквивалентной насыпи принята равной 30 м. Результаты эксперимента (показания датчиков) представлены в таблицах 1 – 3.

По результатам анализа отечественных и зарубежных экспериментов сделаны следующие выводы:

- 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;

- проведенный анализ показал, что применение и метода сил и конечно-элементной модели к расчету гофрированной металлической конструкции без учета несимметричности ее поведения в процессе нагружения, дает результаты, сильно отличающиеся от экспериментальных данных, особенно при больших нагрузках. Это объяснимо, так как в расчетных моделях не закладывалась возможность несимметричного поведения, то она не отразилась на результатах расчета;

- при сравнении расчетных и экспериментальных эпюр прогибов 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;

- 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;

- проведенный выше анализ позволяет заключить, что при моделировании 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.

В третьей главе рассмотрены предпосылки к использованию теории оболочек для расчета металлических гофрированных конструкций. Автором предлагается методика расчета круглых цилиндрических оболочек, адаптированная для расчета гофрированных конструкций; методика расчета МГК, основанная на применении теории оболочек ступенчато-переменной толщины (геометрические характеристики стенки оболочки ступенчато-переменной толщины эквивалентны по своим жесткостям гофрированным листам).

В начале третьей главы рассмотрена методика расчета МГК, основанная на применении теории оболочек вращения. Для адаптации уравнений к расчету цилиндрических гофрированных оболочек, введены следующие предположения:

- в продольном направлении оболочка считается условно-гладкой. При этом кривизна образующей не учитывается, следовательно, радиус в продольном направлении равен бесконечности ($R_1 = \infty$, $1/R_1 = 0$);

- 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;

- жесткость оболочки в поперечном направлении учитывается с помощью увеличенной приведенной толщины оболочки \bar{h} (из условия равенства цилиндрических жесткостей гофрированной и гладкой оболочек), жесткость оболочки в продольном направлении принимается равной жесткости гладкой оболочки фактической толщины.

В итоге получены три разрешающих уравнения оболочек вращения:

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

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

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

где E – модуль упругости; \bar{h} – приведенная толщина обшивки оболочки в поперечном направлении; h – толщина обшивки оболочки; r – радиус цилиндрической оболочки; μ – коэффициент Пуассона;

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

Таблица 1 – 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 – 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 3 – 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	

С использованием предлагаемой методики решена задача расчета вертикального колодца, выполненного из металлических гофрированных элементов.

Далее рассмотрена методика расчета МГК на основе теории оболочек ступенчато-переменной толщины. Для его реализации применяется переход от гофрированной оболочки к эквивалентной ей оболочке ступенчато-переменной толщины, основанный на равенстве цилиндрических жесткостей.

В итоге получены три разрешающих уравнения для цилиндрических оболочек ступенчато-переменной толщины:

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

$$\begin{aligned} & \frac{E(h+t)}{r(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right] + \frac{Eh(h+t)}{2r^2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right] + \\ & + \frac{E(h+t)}{r(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \frac{Eh(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \right. \\ & + \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \frac{Eh \left(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4} \right)}{3r^3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 \right] + \\ & + \frac{Eh \left(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4} \right)}{3r^3(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right] + q_1 r = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{Eh(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^3 u_1}{\partial \xi^3} + u_2 \left(\frac{\partial u_2}{\partial \varphi \partial \xi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \right) + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} u_2 \right] + \\ & + \frac{Eh \left(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4} \right)}{3r^3(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial^3 u_2}{\partial \varphi \partial \xi^2} - u_2 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} \right) + \frac{\partial^2 u_2}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} u_2 \right] + \\ & + \frac{Eh(h+t)}{r(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial \xi \partial \varphi} \right] + \frac{2Eh \left(h^2 + \frac{3ht}{2} + \frac{3t^2}{4} \right)}{3r^2(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^2 \partial \varphi} \right] - \frac{E(h+t)}{r(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} + w + \right. \\ & + \left. \frac{\partial u_1}{\partial \xi} u_2 \right] + \frac{Eh(h+t)}{2r^2(1-\mu^2)} \left[\frac{\partial u_2}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} u_2 \right] + q_n r = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где E_c - секущий модуль упругости; h - высота ребра оболочки ступенчато-переменной толщины; t - толщина обшивки оболочки ступенчато-переменной толщины; r - радиус цилиндрической оболочки ступенчато-переменной толщины; μ - коэффициент Пуассона;

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

В четвертой главе рассмотрено применение частного случая теории оболочек вращения - «полубезмоментной» теории оболочек В.З. Власова.

Данная теория представляет наибольший интерес для расчета металлических гофрированных конструкций. К ее преимуществам относятся ее относительная простота и понятность, и в то же время точность описания поведения гофрированной конструкции. В данной главе также рассмотрено практическое применение теории и решена задача, соответствующая условиям отечественного эксперимента, описанного в главе 2.

Разрешающее уравнение по теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова имеет вид:

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial^2 N_\alpha}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{R} \cdot \Omega \cdot M_\beta = q, \quad (7)$$

где R – радиус оболочки; N_α – продольное усилие, действующее вдоль оболочки; M_β – изгибающий момент, действующий поперек оболочки; Ω – дифференциальный оператор Власова; q – внешняя нагрузка.

Физические соотношения, связывающие усилия и деформации для линейно упругого случая:

$$\begin{aligned} N_\alpha &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\alpha dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_\alpha + \nu e_\beta) dz = \frac{E \varepsilon_\alpha h}{1-\nu^2}; \\ N_\beta &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\beta dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_\beta + \nu e_\alpha) dz = \frac{E \nu \varepsilon_\alpha \bar{h}}{1-\nu^2}; \\ M_\beta &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\beta z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E}{1-\nu^2} (e_\beta + \nu e_\alpha) z dz = \frac{E \chi_\beta \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; \bar{h} – приведенная толщина металлического гофрированного листа (исходя из условия равенства изгибных жесткостей гофрированного листа в поперечном направлении и гладкого листа); h – толщина металлического гофрированного листа; ε_α – линейная деформация срединной поверхности в продольном направлении оболочки; χ_β – изменение кривизны оболочки в поперечном направлении.

Введем функцию перемещений $\Phi(\alpha, \beta)$ в формулы:

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha}; \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial \beta}; \quad W = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \beta^2}; \quad \varepsilon_\alpha = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \alpha^2}; \quad \chi_\beta = -\frac{1}{R^2} \Omega \Phi, \quad (9)$$

Уравнение (7) с учетом (8) и (9) можно записать:

$$L(\Phi) = R^3 q, \quad (10)$$

в котором оператор $L(\Phi)$ имеет вид:

$$L(\Phi) = \left[\left(\frac{E \bar{h}^3}{12(1-\nu^2)} \right) \cdot \left(\frac{\partial^8 \Phi}{\partial \beta^8} + 2 \frac{\partial^6 \Phi}{\partial \beta^6} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \beta^4} \right) \right] - \left[\left(\frac{E R h}{1-\nu^2} \right) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial \alpha^4} \right], \quad (11)$$

Для решения уравнения (11) предложено применить вариационный метод В.З. Власова, согласно которому искомая функция $\Phi(\alpha, \beta)$ представляется в виде:

$$\Phi(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n F_n(\alpha) \cdot \sin n\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_k - \beta_0} \right), \quad (12)$$

где $\sin n\pi \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_k - \beta_0} \right)$ – аппроксимирующие функции в окружном направлении; $F_n(\alpha)$ – функции, подлежащие определению.

В дальнейшем, полагая $\beta_0 = 0$, а $\beta_k = \pi$, что соответствует полукруговой арке (рисунок 3), и, ограничиваясь первыми тремя членами ряда, получим:

$$\Phi(\alpha, \beta) = F_1(\alpha) \cdot \sin\beta + F_2(\alpha) \cdot \sin 2\beta + F_3(\alpha) \cdot \sin 3\beta, \quad (13)$$

Вариационное уравнение метода В.З. Власова имеет вид:

$$\int_0^\pi (L(\Phi) - R^3 q) \Phi d\beta = 0, \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражение (13) и выполнив интегрирование, получим три дифференциальных уравнения относительно искомых функций $F_1(\alpha)$, $F_2(\alpha)$, $F_3(\alpha)$. Интенсивность внешней нагрузки q определяется выражением:

$$q = -\frac{\partial P_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_\beta}{\partial \beta} - \frac{\partial^2 P_z}{\partial \beta^2}, \quad (15)$$

где P_α – компонент нагрузки, действующий вдоль оболочки; P_β – в касательном к оболочке направлении; P_z – действующий в радиальном направлении.

С учетом того, что грунт рассматривается как сыпучее тело, получены следующие выражения для составляющих нагрузки:

$$P_z = \gamma y (\cos^2 \beta + \xi \sin^2 \beta); \quad P_\beta = \gamma y (1 - \xi) \sin \beta \cos \beta; \quad P_\alpha = 0. \quad (16)$$

где $\xi = \frac{(1 - \sin \varphi)}{(1 + \sin \varphi)}$; φ – угол внутреннего трения грунта; γ – объемный вес грунта; β – угол между касательной в рассматриваемой точке и горизонталью (рисунок 3).

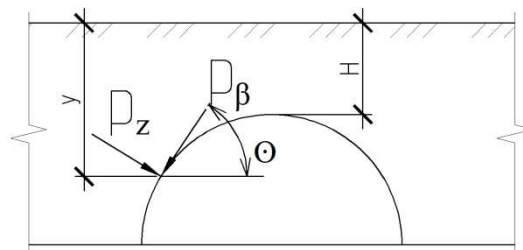


Рисунок 3 – Нагрузки, действующие на оболочку в поперечном направлении

Решая вариационные уравнения В.З. Власова с учетом (15) получим выражения для функций $F_1(\alpha), F_2(\alpha), F_3(\alpha)$, а значит и для $\Phi(\alpha, \beta)$ (12). С учетом этого выражения для усилий, действующих в полукруглой МГК, будут следующими:

$$N_\alpha = -\frac{2(1-\xi)\gamma H \sin\beta}{\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \quad (17)$$

$$N_\beta = -\frac{2(1-\xi)\bar{h}\nu\gamma H \sin\beta}{h\pi} [R\alpha^2 - l\alpha], \quad (18)$$

$$M_\beta = -\frac{\gamma H(\xi-1)}{\pi} \left[\frac{1}{3} \sin 2\beta + 8 \sin 3\beta \right]. \quad (19)$$

Здесь H – высота засыпки конструкции; α – продольная координата; l – длина оболочки.

Был выполнен расчет с использованием формул (17) - (19) и определено напряженно – деформированное состояние, которое сопоставлялось с результатами эксперимента в главе 2.

На рисунке 4 приведено распределение экспериментальных и расчетных нормальных напряжений по сечению МГК при варианте нагружения 2.

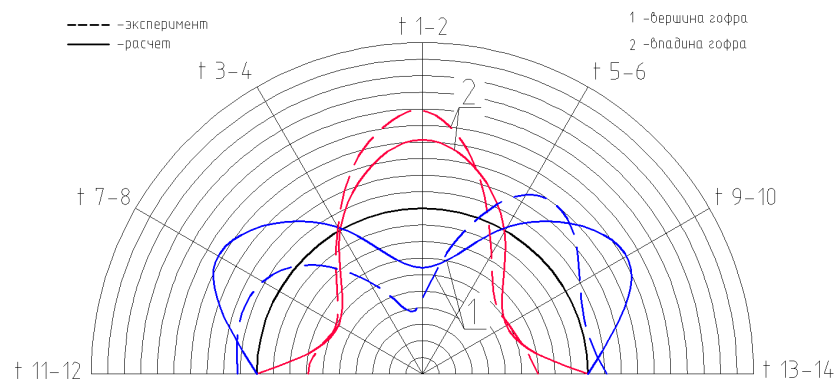


Рисунок 4 – Экспериментальное и расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК для варианта нагружения 2 (1 радиальное деление – 100 МПа)

Анализ приведенных эпюр нормальных напряжений позволяет отметить, что расчет МГК с помощью теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова обеспечивает хорошее качественное совпадение расчетных эпюр с экспериментальными. Количественное расхождение в значениях нормальных напряжений не превышает 30% при всех видах нагружений, в то время как количественное расхождение нормальных напряжений при расчете в программных комплексах с помощью метода конечных элементов составляет до 70%. 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.

В пятой главе рассмотрены проблемы коррозионного износа металлических гофрированных конструкций. Рассмотрены примеры повреждений МГК, эксплуатируемых в России и в мире, которые были вызваны коррозией. Отмечается, что наиболее подвержена коррозии лотковая часть МГК. Также отмечена острая нехватка экспериментальных данных и натуральных наблюдений за коррозионными процессами МГК, в связи с чем в данной части исследования используются данные наблюдений за схожими конструкциями, эксплуатируемыми в грунтовой среде – трубопроводами.

На основе экспериментальных данных рассматриваются подходы к описанию кинетики коррозионного износа оболочечных конструкций, эксплуатируемых в грунтовой среде, защищенных антикоррозионными покрытиями. Учет влияния антикоррозионных покрытий является важной задачей, так как нормами предусматривается наличие антикоррозионной защиты.

Рассмотрены модели коррозионного износа стальных конструкций в условиях агрессивных сред. На основе указанных моделей выполнено исследование изменения площади поперечного сечения ряда элементов (включая гофрированный лист) с учетом коррозионного износа. В результате исследования был выполнен расчет и построены графики изменения площади поперечного сечения гофрированного листа, находящегося в 3%-ном растворе NaCl (рисунок 5) по трем моделям коррозионного износа:

- экспоненциальная модель:

$$\delta_{(t)} = \delta_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{R}}\right); \quad (20)$$

- дробно-линейная модель:

$$\delta_{(t)} = \frac{\delta_0 t}{t+S}; \quad (21)$$

- логистическая модель:

$$\frac{d\delta}{dt} = k\delta(b - \delta), \quad \delta(0) = \delta_0. \quad (22)$$

При анализе результатов расчета отмечено, что коррозия гофрированных листов протекает в одних и тех же условиях гораздо интенсивнее, чем коррозия стандартных прокатных профилей (уголок, швеллер, двутавр), что связано в первую очередь со значительно большей площадью контакта гофрированного листа с агрессивной средой. В связи с

этим, подтверждается актуальность создания эффективной антикоррозионной защиты для МГК.

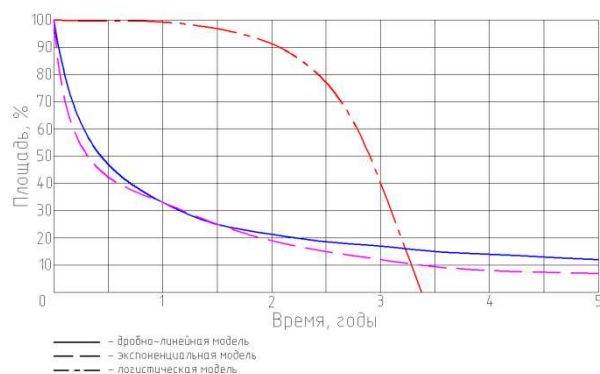


Рисунок 5 – Изменение площади поперечного сечения гофрированного листа вследствие действия коррозионной среды

Далее рассмотрены модели, описывающие процесс отслаивания защитного покрытия под воздействием увеличивающихся в объеме (относительно основного металла) продуктов коррозии.

В заключительной части главы 5 была рассмотрена методика расчета МГКс учетом влияния коррозионной среды, основанная на применении теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова. Эта методика представляет собой модификацию методики, рассмотренной в 4 главе со следующим изменением – введением вместо постоянных величин толщины листа оболочки в поперечном и продольном направлениях \bar{h} и h переменных величин. В результате было получено три семейства формул для расчета усилий, возникающих в оболочке МГК при различных условиях эксплуатации.

Был произведен расчет ранее рассмотренной полукруговой арки, описанной в главах 2-4 настоящей диссертации (полукруговая арка пролетом 5,0 м), для первого случая загрузки, соответствующего высоте засыпки грунтом 12,5 м с учетом воздействия агрессивной среды, равномерно распределенного по длине и окружному направлению конструкции. 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. Эпюры нормальных напряжений на первом и четвертом этапах представлены на рисунках 6 и 7.

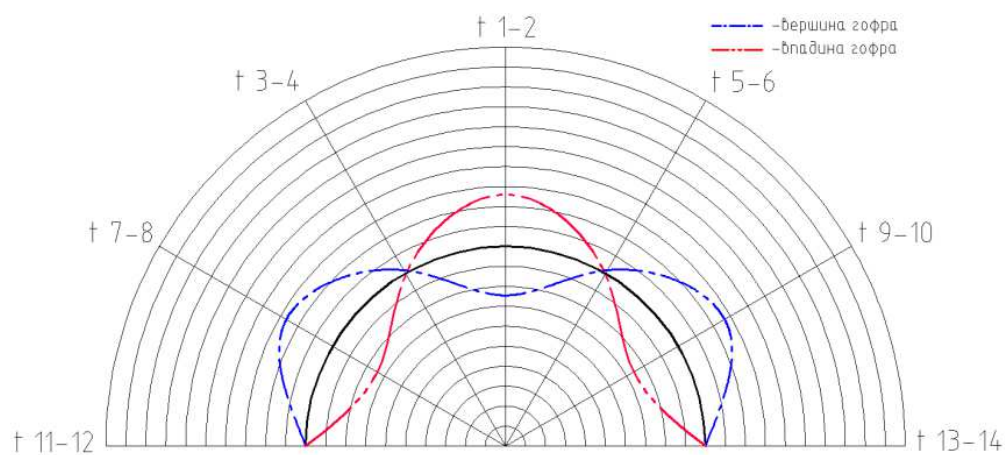


Рисунок 6 – Расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК при толщине гофрированного листа 4,00 мм (1 радиальное деление – 100 МПа)

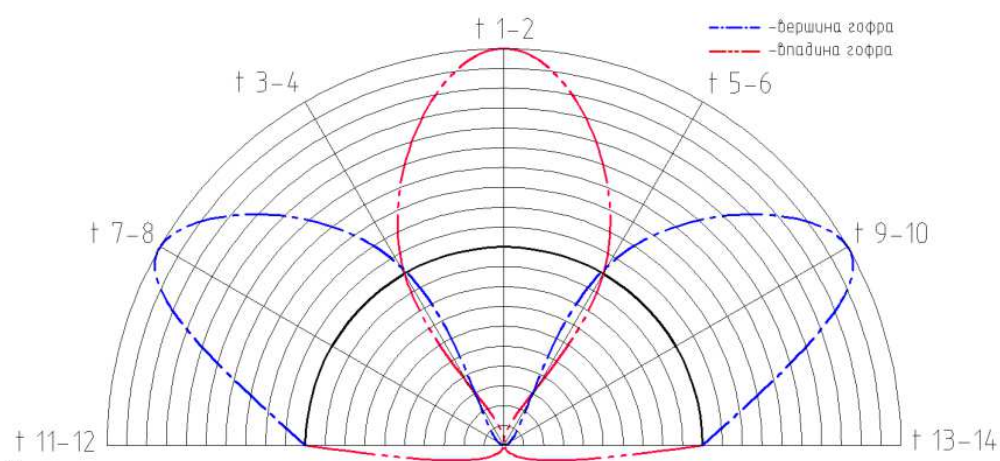


Рисунок 7 – Расчетное распределение нормальных напряжений по сечению модели МГК при толщине гофрированного листа 1,00 мм (1 радиальное деление – 100 МПа)

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. Результаты проведенного расчета подтверждаются результатами обследования эксплуатируемых сооружений во всем мире. Характерные коррозионные повреждения и их последствия представлены на рисунке 8.



Рисунок 8 – Значительные деформации и разрушение МГК со следами коррозионных повреждений

ОБЩИЕ 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 является несовершенство методов расчета МГК. На настоящий момент для расчета МГК применяются в основном методы, разработанные для подземных сооружений (тоннелей и т.д.), либо МКЭ, который является универсальным методом решения задач механики деформируемых твердых тел. Учитывая этот факт, актуальной является 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 которую 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. 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.

5. При сравнении расчетных и экспериментальных эпюр напряжений установлено, 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, в случае МГК 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.

6. 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 их практику проектирования. Однако, теория «полубезмоментных» оболочек В.З. Власова предлагает существенно менее громоздкий расчетный аппарат.

7. С использованием аппарата теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова получены довольно простые выражения для усилий в металлических гофрированных конструкциях, что 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 продольные усилия, действующие вдоль оболочки, а также учитывать распределение продольного усилия, действующего 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.

8. 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.

9. 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.

10. Рассмотренные модели коррозионного износа могут применяться для моделирования коррозионно-механического поведения 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.

11. Выполненный с помощью предложенной методики на основе теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова расчет МГКс учетом уменьшения толщины гофрированного листа конструкции вследствие воздействия агрессивной среды показал, что под воздействием коррозионного поражения, напряжения в элементах конструкции могут возрасти в 4 раза даже без увеличения действующей на сооружение нагрузки. Данные выводы в целом подтверждают результаты обследований,

которые свидетельствуют, 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 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 ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Овчинников И.Г., Беляев В.С., Яковлев Л.С., **Осокин И.А.** 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. // Науковедение (электронный журнал). 2013 №6(19) [Электронный ресурс]. М-2013.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/130TVN613.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
2. Беляев В.С., Яковлев Л.С., Овчинников И.Г., **Осокин И.А.** 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. // Науковедение (электронный журнал). 2013 №6(19) [Электронный ресурс]. М-2013.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/190TVN613.pdf>, свободный – Загл. с экрана.
3. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Анализ методики расчета предельных деформаций поперечного сечения на примере эксплуатации гофрированных водопропускных труб уральского региона. // Дороги и мосты. Сборник статей ФГУП РосдорНИИ. М. 2013. - вып. 30/2. - С. 224-234.
4. **Осокин И.А.** Применение теории оболочек вращения к расчету гофрированных водопропускных труб. // Науковедение (электронный журнал). 2013 №2(15) [Электронный ресурс]. М-2013.- Режим доступа: [http://http://naukovedenie.ru/PDF/40tvn213.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/40tvn213.pdf), свободный – Загл. с экрана.
5. Беляев В.С., Яковлев Л.С., Овчинников И.Г., **Осокин И.А.** 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. // Науковедение (электронный журнал). 2014 №1(20)

[Электронный ресурс]. М-2014.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN114.pdf>, свободный – Загл. с экрана.

6. Овчинников И.Г., **Осокин И.А.** О возможности применения теории полубезмоментных оболочек В.З. Власова к расчету металлических гофрированных конструкций // Наукоедение (электронный журнал). 2014 №4(23) [Электронный ресурс]. М-2014.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/35TVN414.pdf> свободный – Загл. с экрана.

Публикации в других изданиях:

7. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Об одном способе восстановления сплошности элементов металлических мостов. // Перспектива – 2009: сб. научн. тр. студентов. – Екатеринбург: УрГУПС. Вып. 71(154). – С. 152-157.

8. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Устройство для обнаружения трещин и автоматического восстановления сплошности металлоконструкций // Перспектива – 2010: сб. научн. тр. студентов. – Екатеринбург: УрГУПС. Вып. 83(166). – С. 44-55.

9. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Технология применения электромагнитного поля для ориентации металлических дискретно-армирующих элементов в бетоне матрицы. // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. Междунар. науч. – практ. конф. Белгород, 5-8 окт. 2010 г. / Белгор. гос. технолог. Ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – Ч.1. С. 244-247.

10. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Комплекс для осуществления непрерывного мониторинга и экстренного ремонта металлических конструкций. // Современные научные исследования в дорожном и строительном производстве: сб. докл. Всероссийской. науч. – практ. конф. Пермь, 19-20 мая 2011 г. / Пермь. гос. технолог. Ун-т. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2011. – Ч.1. С.137-142.

11. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Мехатронное устройство для осуществления непрерывного мониторинга и экстренного ремонта металлических конструкций. // Проблемы современного строительства: сб. статей. Междунар. науч. – практ. конф. - Пенза. Изд-во Приволжский дом знаний, 2011. С.157-162.

12. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Технология ориентации фибр в бетоне. // Общие вопросы транспорта. Моделирование и оптимизация в логистических системах: сб. научн. трудов // Под научн. ред. Е.Н. Тимухиной, канд. техн. наук. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. Вып. 89(172).2011. С.73-82.

13. **Осокин И.А.** Моделирование работы гофрированных пластин и оболочек. // Матеріали Всеукраїнської Інтернет-конференції молодихучених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (21 – 22 листопада 2012 року). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. С.190-194.

14. Овчинников И.И., **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. Расчетные схемы при моделировании поведения водопропускных труб с учетом реальных условий эксплуатации. // Материалы международной конференции «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво» (1 – 2 березня 2012 року). – Киев: НТУ, 2012. С.72-78.

15. **Осокин И.А.**, Пермикин А.С. О проблемах эксплуатации гофрированных водопропускных труб под насыпями автомобильных и железных дорог уральского региона. // Материалы международной конференции «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво» (1 – 2 березня 2012 року). – Киев: НТУ, 2012. С.78-83.

16. **Осокин И.А.** Об одном способе определения оптимальной формы гофрирования листов для металлических гофрированных конструкций. // Материалы международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (25 – 27 апреля 2013 г.). – Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 361-368.

17. **Осокин И.А.,** Пермикин А.С. Технология применения электромагнитного поля для ориентации металлических дискретно-армирующих элементов в бетоне матрицы. // Технологии бетонов. М: ООО «Композит XXI век». 2013 – вып. №1 (78). – С 44-45.

18. **Осокин И.А.** Об одном из способов расчета металлических гофрированных конструкций. // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве» – Пенза: ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», 2013. С. 117-122.

19. **Осокин И.А.** Применение теории оболочек вращения к расчету металлических гофрированных конструкций. // Материалы межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии в мостостроении и дорожной инфраструктуре» – Санкт-Петербург: ФГК ВОУ ВПО «Военная академия МТО им. А. В. Хрулева», 2014. С. 138-148.

20. Овчинников И.Г., **Осокин И.А.** Обзор и анализ экспериментальных исследований поведения металлических гофрированных конструкций под воздействием статических нагрузок с учетом их совместной работы с окружающим грунтом. // Материалы межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии в мостостроении и дорожной инфраструктуре» – Санкт-Петербург: ФГК ВОУ ВПО «Военная академия МТО им. А. В. Хрулева», 2014. С. 123-134.

21. Овчинников И.Г., **Осокин И.А.** О проблеме коррозионного поражения металлических гофрированных водопропускных труб. // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы водного хозяйства и инженерно коммуникационных систем. Экология» (14 – 15 апреля 2014 г.). – Азербайджан, Баку: АзАСУ, 2014. С. 381-386.

22. **Осокин И.А.,** Пермикин А.С., Котельников А.П., Касимова Р. Ш. Способ ремонта металлоконструкций с открытыми поверхностными трещинами и устройство для его осуществления. // Патент – 2446932 С2 РФ, МПК В23Р 6/04, В23К 23/00; Уральский государственный университет путей сообщения. - № 2010105877/02; Заяв. 18.02.2010; Оpubл. 10.04.2012, Бюл №10.

23. **Осокин И.А.,** Пермикин А.С. Способ ориентации металлических дисперсно-армированных элементов в бетоне. // Патент – 2451647 РФ, МПК С04 В 28/00; Уральский государственный университет путей сообщения. - № 2010144271/03; Заяв. 28.10.2010; Оpubл. 27.05.2012, Бюл №15.

Подписано к печати 02.12.2014 г.

Формат бумаги 60 x 84 1/16

Объем усл. печ. л. 1,4

Тираж 130 экз.

Заказ 253

Издательство УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66