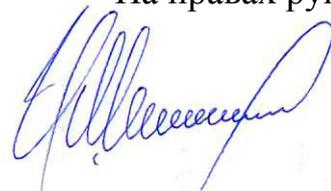


Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет путей сообщения
Императора Николая II»
МГУПС (МИИТ)

На правах рукописи



МАСЛОВ ИЛЬЯ ГЕННАДЬЕВИЧ

**СОСТОЯНИЕ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОЧАГА
ПЛАМЕНИ В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Беспалько Сергей Валерьевич

Москва – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 КРАТКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИСТЕРН И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОТЁЛ ЦИСТЕРНЫ	13
1.1 Конструктивные особенности котлов цистерн	13
1.2 Обзор исследований напряженно-деформированного состояния котлов цистерн	16
1.3 Методы исследования поведения котлов при тепловых воздействиях.....	22
1.4 Выводы по разделу 1.....	26
2 МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОЧАГЕ ПЛАМЕНИ.....	27
2.1 Постановка задачи и принятые допущения.....	27
2.2 Исходные уравнения	30
2.3 Вариационный метод и аппроксимация	35
2.4 Результаты расчетов котла цистерны в очаге пламени.....	41
2.5 Выводы по разделу 2.....	55
3 МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОТЛА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ СНИЖЕНИИ ЖЕСТКОСТИ В ОЧАГЕ ПЛАМЕНИ	56
3.1 Расчетная схема и принятые допущения	56
3.2 Исходные уравнения теории оболочек	57
3.3 Вариационный метод и аппроксимация	60
3.4 Результаты расчетов котла цистерны под давлением в очаге пламени	67
3.5 Выводы по разделу 3.....	77
4 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	78
4.1 Постановка задачи и принятые допущения.....	78
4.2 Расчет пластины	80
4.2.1 Исходные уравнения.....	80

4.2.2 Вариационный метод и аппроксимация	82
4.2.3 Определение критической температуры	83
4.3 Особенности поведения цилиндрической оболочки котла цистерны	86
4.4 Результаты расчетов по оценке устойчивости	90
4.5 Выводы по разделу 4.....	93
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА.....	
5.1 Схема опытной установки.....	94
5.2 Методика проведения эксперимента.....	100
5.3 Обработка результатов эксперимента.....	102
5.4 Результаты эксперимента	105
5.4.1 Температуры	105
5.4.2 Тепловые деформации	111
5.5 Сравнение результатов расчета и эксперимента.....	114
5.6 Выводы по разделу 5.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Перевозка грузов по железным дорогам в цистернах занимает важнейшее место в общем объеме грузооборота. Это связано, с одной стороны, со значительными потребностями различных отраслей промышленности в подобных грузах, а с другой стороны, с высокой экономической эффективностью применения железнодорожных цистерн.

Наиболее широкое применение в нашей стране имеют нефтебензиновые цистерны. Поэтому они были выбраны в качестве объекта исследования в данной работе. Цистерны должны соответствовать высоким требованиям безопасности движения в условиях интенсивной эксплуатации, а также удовлетворять нормам экологической безопасности. В связи с этим, конструкторы вынуждены уделять повышенное внимание поведению цистерны в аварийных ситуациях и разрабатывать системы защиты.

Чрезвычайно опасный аварийный режим связан с попаданием котла цистерны в очаг действия открытого пламени (пожар), особенно при наличии в котле горючих грузов.

Значительное локальное повышение температуры котла в очаге пламени влияет на состояние оболочки котла в двух аспектах. Во-первых, появляются значительные температурные напряжения, а во-вторых, при нагреве существенно изменяются механические характеристики металла котла, что в условиях действия внутреннего давления приводит к дополнительным, существенным деформациям и напряжениям.

На рисунке 1 показаны фотографии последствий подобных аварийных воздействий. Приведенные фотографии иллюстрируют то, что разрушение котла произошло как вследствие тепловых деформаций в процессе пожара, так и из-за взрыва.

В результате действия на котел открытого пламени весьма вероятен пролив перевозимого продукта, что представляет угрозу экологии окружающей среды.

Таким образом, проблема моделирования состояния и защиты котла железнодорожной цистерны в очаге пламени является актуальной.



Рисунок 1 – Последствия нахождения котла цистерны в очаге пламени

Степень разработанности темы исследования

Направления работ в области оценки состояния котлов цистерн при воздействии очага пламени в аварийной ситуации связаны, во-первых, с исследованием сценариев аварийных ситуаций при воздействии открытого пламени на котел цистерны, во-вторых, с разработкой способов защиты и предотвращения катастрофических последствий аварийных воздействий.

Вопросы, связанные с первым направлением, были детально исследованы в работах, проводимых ВНИИПО совместно с МИИТом, по результатам которых были разработаны дополнения к «Нормам ...», содержащие сценарии аварийных ситуаций.

В результате, наибольший интерес представляет второе направление. Способ защиты котла цистерны путем установки соответствующей сливно-наливной арматуры можно считать достаточно глубоко проработанным.

Другим эффективным способом защиты котла от тепловых воздействий является нанесение огнезащитного покрытия на его поверхность. Главная задача подобного покрытия – в случае возникновения пожара дать время формированиям противопожарной обороны на развертывание и применение средств пожаротушения.

Предотвращение разрушения оболочки в течение гарантированного интервала времени достигается за счет изменения свойств покрытия при повышении температуры и ограничения теплового потока к металлу оболочки котла.

Следует отметить, что данная проблема исследована недостаточно.

Для качественного решения задач в данной области необходимо, с одной стороны, иметь возможность оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) несущей оболочки котла при действии повышенных температур в очаге пламени, а с другой стороны – возможность учета и выбора необходимых характеристик огнезащитного покрытия.

Цель и задачи работы

Целью настоящей диссертационной работы является моделирование напряженно-деформированного состояния несущей оболочки котла нефтебензиновой цистерны, находящейся в очаге пламени, с возможностью учета влияния огнезащитного покрытия.

Реализация вышеуказанной цели требует решения следующих задач:

- разработка методики определения и исследование состояния котла цистерны при воздействии неравномерного температурного поля, обусловленного наличием очага пламени;

- разработка методики определения и исследование состояния котла цистерны, вызванного действием внутреннего давления, при локальном изменении механических свойств материала котла находящегося в очаге пламени;

- разработка методики и оценка устойчивости оболочки котла цистерны при локальном повышении температуры от воздействия пламени;

- оценка эффективности способа защиты котла цистерны при помощи нанесения наружного огнезащитного покрытия СГК-2;

- оценка достоверности разработанной методики определения состояния котла цистерны на основе данных экспериментального исследования специально сконструированных образцов.

Научная новизна

1. Предложена математическая модель, алгоритм и программа определения состояния оболочки котла цистерны, вызванного воздействием неравномерного температурного поля при нахождении вагона в очаге пламени. Математическая модель базируется на нелинейной теории оболочек и принципе Лагранжа. Использована аппроксимация перемещений, близкая к реальной форме, что позволило получить эффективную методику, не требующую применения МКЭ.

2. Предложена математическая модель, алгоритм и программа определения состояния оболочки котла цистерны при действии внутреннего давления с учетом локального снижения жесткости оболочки в очаге пламени. При разработке этой математической модели, как и в предыдущей применены нелинейная теория оболочек и принцип Лагранжа.

3. Разработана методика оценки устойчивости оболочки котла цистерны при локальном повышении температуры и получены расчетные зависимости по оценке термоустойчивости для случаев пластины и оболочки котла цистерны.

4. Теоретически и экспериментально исследована и обоснована эффективность огнезащитного покрытия СГК-2 для защиты котлов цистерн от пожара.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Проведено исследование состояние котла нефтебензиновой цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Оценено влияние различных параметров расчетной схемы на результаты расчетов.

2. Проведено исследование состояние котла нефтебензиновой цистерны при действии внутреннего давления с учетом локального снижения жесткости оболочки, находящегося в очаге пламени.

3. Исследована проблема термоустойчивости для случаев пластины и оболочки котла цистерны.

4. Предложены средства математического моделирования, которые позволяют на стадии проектирования оценивать состояние котлов цистерн при воздействии открытого пламени в аварийных ситуациях, а также разрабатывать средства защиты котлов цистерн от теплового воздействия.

5. На основе теоретического и экспериментального исследований подтверждена высокая эффективность способа защиты котлов цистерн от действия открытого пламени путем нанесения огнезащитного покрытия СГК-2.

Методология и методы исследования

Объектом исследования в данной работе является оболочка котла цистерны с возможным нанесением на нее огнезащитного покрытия СГК-2.

В первом разделе диссертационной работы приведен краткий обзор существующих методов расчета котлов железнодорожных цистерн с учетом особенностей их конструкции.

Во втором разделе представлена методика определения НДС котла от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени. Разрешающая система уравнений составляется с применением вариационного принципа Гамильтона и следствием из него – принципа Лагранжа. При определении радиальных перемещений была введена аппроксимация, отражающая реальный характер выпучивания оболочки, представленная в виде тригонометрического ряда. В виде аналогичного ряда задавалось и температурное поле.

Принятые аппроксимации перемещений и температурного поля были подставлены в выражение потенциальной энергии оболочки, что с применением принципа Лагранжа привело к разрешающей системе уравнений, посредством решения которой можно определить в любой точке исследуемой области перемещения, деформации, внутренние усилия, напряжения, произвести оценку прочности конструкции.

Во третьем разделе представлена методика определения НДС котла под давлением при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени. На основе принципа независимости внешних воздействий, данный режим рассматривается отдельно от других воздействий, в том числе, от неравномерного температурного поля, с последующим суммированием результатов.

В качестве исходных уравнений принимаются геометрические и физические соотношения из нелинейной теории оболочек. Разрешающая система уравнений составляется с применением вариационного принципа Лагранжа.

Для определения перемещений в исследуемой зоне была введена аппроксимация, соответствующая характеру выпучивания. Снижение жесткости

оболочки под действием нагрева представлялось в виде локального снижения модуля упругости материала, для чего была использована аппроксимация в виде аналогичной функции.

Принятые аппроксимации перемещений и снижения модуля упругости были подставлены в выражения для потенциальной энергии деформации и работы внешних сил. С учетом принципа Лагранжа, эта подстановка привела к системе уравнений для определения вектора неизвестных коэффициентов ряда перемещений. Результат вычисления коэффициентов позволяет найти поля перемещений, деформаций, внутренних усилий и напряжений.

В четвертом разделе изложена методика оценки устойчивости (термоустойчивости) при локальном повышении температуры применительно к пластине и оболочке. Для решения задачи применялся вариационный принцип Лагранжа. Геометрические соотношения, связывающие деформации и перемещения выражались через радиальное перемещение, заданное аппроксимацией в виде тригонометрического ряда, с учетом граничных условий. Из решения полученной разрешающей системы уравнений определялось значение повышения температуры, соответствующее началу потери устойчивости.

В пятом разделе приведены результаты экспериментально-теоретического исследования состояния модели пластины, с целью оценки достоверности разработанной методики определения НДС оболочки, находящейся в очаге пламени.

Экспериментальные исследования проводились с применением установки, созданной во ВНИИПО, и включали два эксперимента. В первом испытывалась модель без защиты, во втором – модель с предварительно нанесенным огнезащитным покрытием СГК-2 толщиной 3 мм, разработанным ГП «Московский институт теплотехники» (МИТ).

Положения, выносимые на защиту

1. Методика определения состояния оболочки котла цистерны, вызванного воздействием неравномерного температурного поля при нахождении вагона в очаге пламени, основанная на нелинейной теории оболочек и принципа Лагранжа с применением специально предложенной аппроксимации перемещений.

2. Методика определения состояния оболочки котла цистерны при действии внутреннего давления с учетом локального снижения жесткости оболочки в очаге пламени с применением специально предложенных функций формы перемещений и зависимости модуля упругости.

3. Методика оценки устойчивости оболочки котла цистерны при локальном повышении температуры с применением предложенной аппроксимации перемещений.

4. Теоретическое и экспериментальное обоснование эффективности огнезащитного покрытия СГК-2 для защиты котлов цистерн от пожара.

5. Результаты исследования состояния котла нефтебензиновой цистерны в очаге пламени от воздействия неравномерного температурного поля и локального снижения жесткости оболочки в очаге пламени.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности полученных результатов определяется применением современных, апробированных и соответствующих цели и задачам настоящей работы методов исследования. Достоверность предложенных средств расчетного моделирования подтверждена путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными.

Материалы диссертации апробировались на:

- VIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (2007 г.);

- XIV научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» (2013 г.);

- научно-технических семинарах кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» МИИТ (2010, 2015 гг.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в которых изложены основные результаты научных исследований, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы. Диссертация содержит 132 страницы машинописного текста, 36 рисунков. Список литературы включает 86 наименований источников.

1 КРАТКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИСТЕРН И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА КОТЁЛ ЦИСТЕРНЫ

Необходимость в проведении данного анализа вытекает из поставленных цели и задач диссертационной работы.

Для ясного представления об объекте исследований настоящей диссертационной работы и обоснованного выбора расчетной схемы котла цистерны, в первой части обзора рассмотрены конструктивные особенности котлов цистерн.

Затем, во второй части обзора приведены основные работы, связанные с исследованиями поведения котлов железнодорожных цистерн при различных внешних нагрузках с точки зрения их прочности.

Наконец, третья часть обзора содержит описание работ, рассматривающих преимущественно тепловые воздействия на котлы цистерн.

Основным нормативным документом при расчете и проектировании вагонов является [1], в дальнейшем именуемый «Нормы».

1.1 Конструктивные особенности котлов цистерн

Анализ методов расчета котлов железнодорожных цистерн следует начать с особенностей их конструкции, что влияет на выбор методов расчета. Железнодорожным цистернам свойственно большое разнообразие конструктивного исполнения котла, связанное с характеристиками перевозимого груза, широким диапазоном нагружения в эксплуатации [2]. Отличия касаются геометрических параметров, материала, а также некоторых специальных элементов конструкции. Основное внимание уделим рамным конструкциям цистерн, как доминирующим в парке цистерн.

Для большинства котлов цистерн характерны следующие общие черты в исполнении основных элементов. Цилиндрическая обечайка может

рассматриваться как тонкостенная оболочка вращения. Днища по форме выполняются в виде эллипсоида вращения (в устаревших моделях применялась торосферическая форма). Днище имеет цилиндрический участок в зоне приварки к обечайке. Часто толщина оболочки в днище превышает толщину в цилиндрической части.

В котлах железнодорожных цистерн также часто применяются кольцевые шпангоуты для увеличения жесткости цилиндрической части [3], что важно при восприятии котлом локальных нагрузок. В целом это даёт возможность снизить вес котла.

Крепление котла обеспечивает фиксацию его относительно рамы вагона в направлении всех степеней свободы. Вес котла с грузом и вертикальные динамические нагрузки передаются обычно через четыре опоры, содержащие несколько деревянных брусков. Накладные хомуты прижимают котел к опорам. Продольные нагрузки между котлом и рамой передаются при помощи лап.

Котел обычно имеет дважды симметричную конструкцию: относительно продольной вертикальной плоскости и относительно поперечной плоскости, проходящей через середину.

Помимо названных основных элементов, котлы цистерн могут иметь различные дополнительные детали и особенности, связанные с родом перевозимого продукта и особенностями эксплуатации.

Различие в осности цистерн сказывается и на характеристиках котлов. Восьмиосные цистерны [4], как правило, требуют подкрепления котлов шпангоутами.

Котлы специализированных цистерн могут иметь изоляцию [5]. Например, цистерны для перевозки криогенных продуктов [6] выполняются двухслойными, имеющими в межкотловом пространстве эффективную изоляцию. При этом наружная оболочка (кожух) этих цистерн является несущей конструкцией, а внутренняя оболочка (сосуд) располагается внутри кожуха на стеклотекстолитовых опорах и притягивается несколькими группами цепей в различных направлениях.

С точки зрения проблемы защиты котлов цистерн от аварийных тепловых воздействий следует отметить, что многие разновидности специализированных цистерн уже имеют термоизоляцию. Для подобных цистерн исследование проводить не нужно, так как проблему тепловой защиты котла можно считать решенной. В частности, для газовых цистерн, в которых продукт перевозится при высоком давлении, данные вопросы исследованы и решены достаточно полно. Можно отметить работы В.Н. Филиппова, В.Г. Попова и др. [7, 8].

С точки зрения возможных способов защиты от пожара следует отметить конструкцию крытого вагона для перевозки взрывчатых веществ, бронированная стенка которого оснащена огнезащитным покрытием. Данный способ защиты можно применить и для котлов цистерн.

Из существующих в настоящее время типов огнезащитного покрытия известно СГК-1 (ТУ 7719-162-00000335-95), которое уже исследовалось для защиты газовых цистерн. В последние годы применяется более эффективное покрытие СГК-2 (ТУ 7719-171-21366107-02) для защиты стальных конструкций при действии пламени.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что применительно к нефтебензиновым цистернам вопросы обеспечения безопасности при аварийных тепловых воздействиях практически не проработаны, хотя нефть и нефтепродукты, согласно международной классификации (ООН), относятся к опасным видам груза, и указанные аварийные ситуации в случае разрушения котла могут приводить к весьма серьезным последствиям.

При выборе расчетной схемы котла цистерны необходимо учитывать, что котел представляет собой комбинацию оболочек. При нахождении в очаге пламени наиболее уязвимая зона - это цилиндрическая часть котла между шпангоутами из-за ее пониженной жесткости. Поэтому при определении напряженно-деформированного состояния котла от воздействия температурного поля целесообразно рассматривать именно цилиндрическую оболочку.

1.2 Обзор исследований напряженно-деформированного состояния котлов цистерн

При аварийных воздействиях на котлы цистерн открытого пламени главную опасность для людей и окружающей среды представляет нарушение разрушение котла. Поэтому важнейшая задача состоит в оценке прочности котла и, как основа для этого – определение напряженно-деформированного состояния котла как при аварийном повышении температуры, так и при действии штатных нагрузок.

Рассмотрим работы, посвященные исследованиям прочности котлов как тонкостенных оболочек вращения при действии механических нагрузок. Известно много работ, в которых исследуется нагруженность котлов железнодорожных цистерн, например, [9-12]. В них применяются уравнения теории оболочек и прикладные методы расчёта тонкостенных пространственных систем. Авторы используют в качестве исходных различные уравнения теории оболочек и стержневых систем, пренебрегая теми или иными видами деформаций в зависимости от условий работы конструкции. Общим для большинства работ, посвященных нагруженности котлов цистерн, является предположение о шарнирном опирании цилиндрической части на абсолютно жесткие в плоскости и гибкие из плоскости диафрагмы.

Классические подходы к расчету оболочек разрабатывались многими авторами, например, [13-16].

Обобщение различных подходов к определению напряженно-деформированного состояния оболочек приведено в работе [17]. В ней подробно анализируется основное НДС и краевой эффект в оболочках различной конфигурации, оценивается также влияние отдельных гармоник перемещений в тесной связи с физическим смыслом. Делается важный вывод о необходимости при комбинированном характере напряженно-деформированного состояния рассматривать его составляющие по отдельности и выбирать для каждой задачи специальный метод расчета.

Наличие нерегулярных неровностей на оболочках котлов вносит существенные затруднения при расчете их НДС. В связи с этим следует отметить ряд наиболее важных работ, в которых авторы предлагают методы учета различных нерегулярностей котлов железнодорожных цистерн.

В работе [10] М.М. Болотина для учета выштамповки сливного уклона, представляющей собой нерегулярность котла восьмиосной цистерны, приведен специальный алгоритм, позволяющий оценить НДС котла от действия эксплуатационных нагрузок. Изменение геометрии сливного уклона задается соответствующим уравнением, и полагается, что наличие данной нерегулярности эквивалентно действию некоторой фиктивной самоуравновешенной нагрузки, являющейся результатом изменения кривизн на участке выштамповки и вызывающей появление изгибающих моментов. Расчет производится в два этапа. На первом этапе расчета оболочка рассматривается как безмоментная, напряженное состояние которой определяется нормальными усилиями. На втором этапе расчета, основанном на базе прикладной теории цилиндрических оболочек Кана [18], осуществляется учет действия фиктивной нагрузки, вызывающей появление изгибающих моментов и дополнительных нормальных сил.

Алгоритм расчета котла цистерны, образованного цилиндрическими панелями разной толщины, основанный на уравнениях технической теории оболочек, изложен в работах [19, 20]. Расчетная схема в данном случае предполагает шарнирное опирание панелей на абсолютно жесткие в своей плоскости диафрагмы. За счет такого представления, полная система уравнений, включающая уравнения равновесия и уравнения непрерывности деформаций [21], приводится к разрешающему уравнению в виде тригонометрического ряда. В свою очередь, разрешающее уравнение приводится к системе независимых дифференциальных уравнений восьмого порядка относительно коэффициентов ряда разрешающей функции. Далее, при разбиении цилиндрической части котла на отдельные панели, в соответствии со схемой метода перемещений, принятой при расчете, осуществляется переход от дифференциальных уравнений восьмого порядка к матрицам жесткости каждой панели. Стыковка вышеуказанных панелей

производится исходя из условий неразрывности связей между продольными кромками. Усилия и напряжения в оболочке определяют по перемещениям, полученным из решения канонической системы уравнений.

Решение задачи расчета котла цистерны с учетом таких нерегулярностей, как днища котла, обладающие упругостью, представлено в работе [22]. Авторы В.Н. Котуранов и В.П. Медведев при построении расчетной схемы использовали изометрическую систему координат, позволяющую наиболее просто записывать функциональную связь между параметрами первой квадратичной формы срединной поверхности и меридиональной координатой. Смешанный вектор функций образуется на базе кинематических и статических факторов, выбранных в качестве основных функций, зависящих от граничных условий на криволинейных кромках. Система уравнений формируется с использованием физических соотношений упругости, выражающих продольную и сдвигающую силы, а также изгибающий момент, через производные продольного и тангенциального перемещений и угла поворота, дополненных уравнением зависимости угла от радиального перемещения и уравнений статического равновесия. Решение полученной в результате преобразования разрешающей системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами осуществляется методом Эйлера-Коши с итерационной обработкой.

Методы расчета подкрепленных оболочек изложены в работах [23-31].

В простейшем случае подкрепляющее оболочку кольцо представляется абсолютно жестким на изгиб в своей плоскости, в результате чего под действием внешней нагрузки все его точки получают одинаковое перемещение. В случае учета деформации подкрепляющего кольца, перемещение любой его точки определяется из поступательных перемещений абсолютно жесткого шпангоута, соответствующих сдвигу обшивки, и перемещений, обусловленных изменением его формы, соответствующих сдвигу под действием самоуравновешенных дополнительных касательных сил. Результирующие напряжения в конструкции определяются суммированием напряжений, полученных из расчета оболочки как

тонкостенной балки с неизменяемым контуром, и напряжений, вызванных появлением дополнительных самоуравновешенных сил.

Метод решения задач расчета подкрепленных оболочек вращения на действие сосредоточенных сил, приложенных к шпангоуту в его плоскости, сводящийся к интегрированию дифференциального уравнения упругой линии кольца относительно радиального перемещения, выражающего искомые величины, рассматривается в работах [23, 25, 27].

Методы расчета подкрепленных кольцами (шпангоутами) длинных цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления представлены в работах [13, 16, 30, 31]. Алгоритм расчета включает в себя два этапа. На первом этапе расчета производится определение радиальных перемещений оболочки по безмоментной теории, без учета сил взаимодействия между шпангоутами и оболочкой. На втором, принимая шпангоут упругим или абсолютно жестким, производится вычисление неизвестных реакций и внутренних усилий.

Расчет подкрепленного шпангоутами котла, содержащего волнорезы в плоскости колец, приведен в работе [32].

Расчет оболочек котлов железнодорожных цистерн, подкрепленных кольцевыми шпангоутами, с применением классических методов строительной механики представлен в работе [33]. В принятой в данной работе расчетной схеме, котел шарнирно опирается на диафрагмы, абсолютно жесткие в плоскости и гибкие из плоскости, и разбивается на цилиндрические отсеки и кольцевые элементы жесткости, для которых формируются матрицы жесткости, матрицы податливости и матрицы смешанного вида. Решение разрешающей системы уравнений, полученной при стыковке рассматриваемых элементов, строится в одинарных тригонометрических рядах.

В работе [34] В.Н. Котурановым проанализированы приемы расчета оболочек вращения, сделано обобщение методов статического и динамического расчета котлов железнодорожных цистерн, даны рекомендации по их применению, в зависимости от конструктивных особенностей и видов

нагружения. На базе данной работы происходит дальнейшее совершенствование методик расчета.

Решение задачи расчета котла восьмиосной цистерны, имеющего нерегулярность в виде сливного листа, приваренного внутри оболочки, методом конечных элементов в форме метода сил представлено в работе [35]. Расчет производится в несколько этапов. Изначально оболочка рассчитывается как тонкостенная балка с недеформируемым контуром поперечного сечения. Далее к полученным в результате расчета напряжениям добавляются напряжения от статически неопределимых самоуравновешенных внутренних усилий, обусловленных деформацией контура сечения котла. При решении данной задачи, в качестве основного неизвестного, через которое выражаются все факторы, принимается самоуравновешенное нормальное усилие. Влияние наклонного сливного листа учитывается путем замены его в расчетной схеме стержневым элементом.

В работе [36] рассмотрено решение задачи расчета котла восьмиосной цистерны, предназначенной для перевозки порошкообразных грузов, подкрепленного внутри пространственной стержневой системой. Принятая при расчете модель состоит из цилиндрических отсеков, образованных оболочками, и двухконтурными кольцевыми рамами, внешний контур которых образован шпангоутом, внутренний – трапецеидальной стержневой рамой. Оценка влияния внутренних устройств производится в процессе формирования матрицы податливости двухконтурной рамы. Для решения задачи применяется классическая система метода сил.

Расчет усиленного накладкой внутреннего сосуда цистерны, предназначенной для перевозки криогенных грузов, приведен в работе [37]. Влияние накладки на оболочку сосуда при расчете учитывается путем приложения системы сосредоточенных сил.

Рассматривая работы по оценке нагруженности подкрепленных котлов цистерн, следует отметить работу [38], в которой функции формы перемещений задаются в виде двойных тригонометрических рядов.

Схема расчета оболочки вращения с произвольным меридианом, на базе уравнений теории оболочек с конечной сдвиговой жесткостью, предложена в работе [39].

В настоящее время существует множество подходов расчета оболочечных конструкций на динамические нагрузки. Некоторые из них представлены в работах [40-48].

В работе [46], при решении задачи динамической нагруженности котла четырехосной цистерны, предложен алгоритм учета присоединенных к нему масс тормозного оборудования и сливного прибора.

Алгоритм определения собственных частот колебаний котла восьмиосной цистерны, предложенный Т.А. Осиповым представлен в работе [47].

Решение задачи динамической нагруженности котла цистерны при действии импульса произвольной формы во времени рассматривается в работе [48].

Широкое распространение получили методы расчета подкрепленных оболочек на базе вариационных принципов строительной механики. Некоторые из них представлены в работах [18, 27, 28, 29, 49].

В приведенном выше обзоре работ детально изложены методы расчета оболочек котлов цистерн при действии механических нагрузок. Однако при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с возгоранием, возникает дополнительное термическое воздействие, учет которого необходим для оценки возникающих напряжений в конструкции и поведения конструкции в целом.

1.3 Методы исследования поведения котлов при тепловых воздействиях

В случае возникновения аварийной ситуации с железнодорожными цистернами, предназначенными для перевозки легковоспламеняющихся жидкостей, с последующим проливом продукта велика вероятность возникновения пожара, вследствие испарения паров ЛВЖ и образования парового облака, способного распространяться на большие расстояния, сохраняя горючую концентрацию паров [50].

Причиной возгорания могут служить различные факторы, связанные как с образованием, в результате трения или соударения, фрикционных искр [51, 52], так и с диэлектрическими свойствами ЛВЖ [53], способствующими ее электризации и воспламенению [54, 55].

Искрообразующая способность металла напрямую связана с такими его механическими свойствами как твердость, прочность и сопротивление разрушению. Согласно исследованиям [56, 57, 58], в процессе длительной эксплуатации в низколегированных сталях развиваются процессы деформационного старения, приводящие к деградации их механических свойств, выражающейся в повышении сопротивления деформации и снижении сопротивления разрушения [59, 60], что повышает вероятность образования фрикционных искр.

При нахождении цистерны в очаге пожара котел цистерны с находящимся в нем грузом испытывает термические воздействия, вследствие чего насыщенный пар жидкостей, находящихся в котле, создает повышенное давление, способствующее разрушению конструкции. Взрыв котла цистерны с нефтепродуктами при нахождении ее в очаге пламени, согласно имеющейся статистике, происходит через 15-20 минут [50]. Задержка взрывов котлов цистерн может осуществляться путем применения специальных термоизоляционных покрытий, например, один из способов [53] основан на применении в

многослойном покрытии цистерны тонкоизмельченной фольги, пропитанной вспучивающейся краской, вследствие чего при превышении температуры свыше 120°C в покрытии образуется высокоэффективный углеродистый тепловой барьер. В данной работе ниже будет рассмотрен аналогичный способ термической защиты котла цистерны с применением огнезащитного покрытия СГК-2.

Возникновение пожароопасной ситуации возможно не только при крушении, но и при проведении технологических работ по погрузке и выгрузке ЛВЖ [61]. Оценка размеров взрывоопасных зон при заполнении железнодорожных цистерн нефтепродуктами приведена в работе [62].

При оценке прочности котла цистерны в случаях теплового воздействия обязательным этапом расчета является определение его температурного поля.

В России вопросы определения температурных полей достаточно глубоко отражены в исследованиях НПО «Криогенмаш».

В работе [63] для определения нестационарного температурного поля, при заполнении жидким азотом цилиндрической оболочки, замкнутой плоскими крышками, применяются вариационный метод и метод конечных элементов.

Исследование осесимметричных криогенных конструкций при переменном коэффициенте теплоотдачи проведено в работе [64].

При изменении температурного поля котла возникают тепловые деформации и напряжения. В работах [65, 66] рассмотрено влияние температуры на теплофизические и механические характеристики материалов.

Среди работ в области термоупругости следует отметить труд Б.Е. Гейтвуда [67], в котором рассматриваются задачи определения температурных напряжений в различных элементах конструкций. Результаты исследований, проведенных в данной работе, показали, что эффекты инерции при тепловом воздействии обычно незначительны.

При определении температурных напряжений оболочечных конструкций одного класса для расчета приемлемы классические подходы, а при наличии конструктивных неровностей эффективным инструментом для расчета является метод конечных элементов.

В области цистерностроения постановка задач исследования тепловых воздействий имела место при разработке большегрузных цистерн. Так в работе [68] рассмотрено решение задачи по определению температурного поля котла восьмиосной цистерны при заполнении его при низкой температуре горячим нефтепродуктом.

Методика определения температурных напряжений в котлах восьмиосных цистерн со шпангоутами приведена в работе [69].

В работе [70] предложен метод оценки влияния температурных воздействий на НДС котла цистерны, заключающийся в двухэтапном решении задачи: на первом этапе определяется нестационарное температурное поле, на втором – осуществляется оценка НДС котла.

В связи с возросшими в последнее время требованиями к безопасности движения, исследования в области определения НДС котлов цистерн при тепловом воздействии приобрели еще большую актуальность.

Вопросы поведения котлов цистерн в очаге пожара отражены в работах, проводимых под руководством В.Н. Филиппова, при разработке систем защиты котлов цистерн для перевозки опасных грузов. Типовые сценарии аварийных ситуаций, сформированные по результатам обобщения статистических данных, рассматриваются в ранее упомянутой работе [7]. Результаты экспериментальных исследований поведения котла цистерны, при воздействии на него открытого пламени, отражены в работе [8].

Методики определения температурного поля и температурных напряжений в котлах цистерн, предназначенных для перевозки опасных грузов, рассмотрены в работе [71]. В данной работе определение температурного поля производится путем интегрирования уравнения теплопроводности с применением вариационного метода, метода Адамса и метода конечных элементов, составленного двумерного уравнения теплопроводности. Моделирование температурных напряжений осуществляется с применением моментной теории оболочек, метода конечных элементов и принципа Лагранжа.

Исследование поведения вязких нефтепродуктов в котле цистерны с точки зрения температурного поля, определение коэффициента теплоотдачи на поверхности оболочки котла, а также методика скорости остывания груза приведены в работе [72].

В работе [73] приведены исследования НДС корпусных деталей подвижного состава, таких как автосцепка, колесо, путем решения нелинейных нестационарных задач теплопроводности и термоупругопластичности.

1.4 Выводы по разделу 1

Подводя итоги проделанному анализу, можно отметить следующее.

В очаге пламени в котле возникают существенные градиенты температур, вызывающие значительные тепловые деформации и температурные напряжения, которые могут приводить к разрушению.

Применение тригонометрических рядов для аппроксимации неизвестных перемещений позволяет для определенного класса оболочечных конструкций существенно упростить расчетные зависимости, сделать алгоритм более эффективным.

При исследовании тепловых процессов с котлами железнодорожных цистерн можно пренебрегать эффектами инерции.

Повышение температуры существенно влияет на механические и теплофизические свойства материала котла, и его необходимо учитывать при разработке методики расчета.

При моделировании поведения котла в очаге пламени необходимо учитывать действие внутреннего давления в котле.

При тепловом воздействии в различных исследованиях отмечается существенное влияние условий теплоотдачи на поверхности оболочки. Это обстоятельство может быть использовано применительно к цистернам для опасных грузов при проектировании систем защиты котлов от воздействия открытого пламени путем нанесения специальных покрытий. При этом использование в качестве средства защиты котлов огнезащитного покрытия позволяет существенно ограничить повышение температуры. Влияние подобной защиты на НДС котла цистерны требует глубокого исследования.

В целом можно отметить, что изучению поведения котлов цистерн при тепловых воздействиях, в частности подверженных воздействию открытого огня, в литературе уделяется мало внимания. Без решения этой задачи не представляется возможным прогнозировать их поведение в аварийных ситуациях. Поэтому в диссертации этим вопросам уделено основное внимание.

2 МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕРАВНОМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ОЧАГЕ ПЛАМЕНИ

2.1 Постановка задачи и принятые допущения

При аварийной ситуации, связанной с нахождением котла цистерны в очаге пламени, в котле возникают существенные градиенты температур. Как показал проведенный анализ, в частности, результаты работ [71, 74] в середине зоны действия пламени температура оболочки котла может достигать достаточно высоких значений, причем при удалении от очага пламени температурное поле быстро затухает за счет теплоотдачи окружающей воздушной среде и перевозимому продукту.

Данное неравномерное температурное поле вызывает в оболочке тепловые деформации и температурные напряжения [67]. Последние связаны именно с неравномерностью распределения температур, когда менее нагретые зоны котла препятствуют свободному деформированию более нагретых зон. В результате происходит выпучивание более нагретой области с появлением достаточно высоких напряжений, что, в конце концов, может привести к разрушению котла.

В данном разделе разрабатываются методика, алгоритм и программа моделирования состояния оболочки котла при описанном воздействии.

Методика разрабатывается на основе следующих допущений.

2.1.1. Материал котла полагается сплошным.

2.1.2. Предполагается, что внешнее тепловое воздействие локализовано в середине цилиндрического участка оболочки котла, и его влияние затухает до границ данного участка (до шпангоутов или днищ). Конструктивными нерегулярностями в виде кронштейнов, технологических гаек, опор, накладок и т.п., а также горловины котла пренебрегаем.

Таким образом, рассматривается цилиндрический участок оболочки.

Данное допущение идет в запас прочности, так как данная часть конструкции наименее жесткая.

2.1.3. Толщина оболочки в исследуемой зоне принимается постоянной, не зависящей от температуры.

2.1.4. Состояние оболочки описывается с применением моментной теории оболочек [75] с учетом нелинейных членов при вычислении деформаций растяжения-сжатия [41].

2.1.5. Учитываются только радиальные перемещения оболочки котла. Продольными и окружными перемещениями оболочки пренебрегаем.

2.1.6. Жесткостью огнезащитного покрытия пренебрегаем, что идет в запас прочности.

2.1.7. Предполагаем, что температурное поле воздействует статически, то есть не вызывает колебаний котла.

Основанием для подобного допущения является тот факт, что температурное поле изменяется во времени очень плавно по сравнению с механическими нагрузками. Это выражается в том, что характерное время процесса при изменении температурного поля на несколько порядков превосходит наибольший период собственных колебаний конструкции.

2.1.8. Коэффициент линейного расширения материала котла полагается постоянным и равным среднему значению в исследуемом диапазоне температур.

2.1.9. Перепадами температуры по толщине оболочки пренебрегаем, что обосновано результатами работы [71].

Расчетная схема оболочки котла приведена на рисунке 2.1. Для нее принята цилиндрическая система координат $Ox\beta z$. На рисунке 2.1 примерная зона очага пламени заштрихована. Оболочка является дважды симметричной.

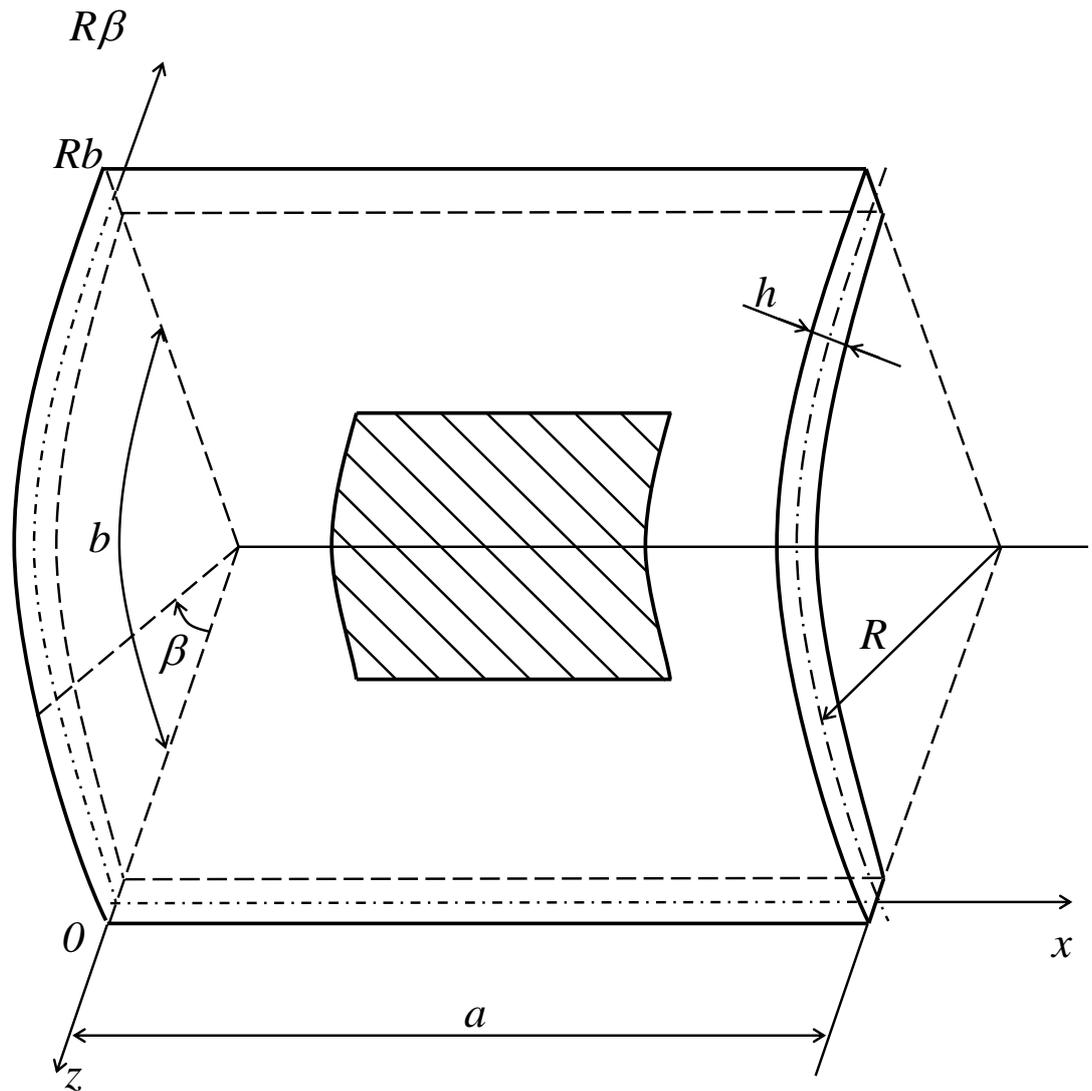


Рисунок 2.1 – Расчетная схема оболочки

Для оболочки котла принята цилиндрическая система координат $Ox\beta z$, связанная с ее срединной поверхностью оболочки. Ось Ox направлена вдоль образующей (для определенности – слева направо); ось $O\beta$ (угловая координата) направлена по окружности, нулевое значение соответствует нижней образующей; ось Oz направлена по нормали к поверхности наружу оболочки. Была рассмотрена область оболочки котла, подвергнутая нагреву. В развернутом виде она ограничена размерами: a – вдоль образующей и Rb – по дуге сечения.

2.2 Исходные уравнения

Исследуемая область выделяется из оболочки котла, исходя из условия, что на ее границах теплопроводность вдоль поверхности практически отсутствует, что соответствует результатам работы [71]. При расчете учитывается только радиальное перемещение w , что соответствует характеру деформации оболочки при тепловом воздействии.

Исходные уравнения устанавливают соотношения между различными параметрами напряженно-деформированного состояния оболочки. С учетом принятых допущений запишем соотношения, связывающие перемещения, деформации и внутренние усилия на основе нелинейной теории оболочек [41].

Связь между деформациями и перемещениями устанавливается при помощи геометрических соотношений, которые для цилиндрической оболочки имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \\ \varepsilon_2 = \frac{w}{R} + \frac{1}{2R^2} \left(\frac{\partial w}{\partial \beta} \right)^2; \\ \omega = \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{R \partial \beta}; \\ \kappa_1 = - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \\ \kappa_2 = - \frac{\partial^2 w}{R^2 \partial \beta^2}; \\ \tau = - \frac{\partial^2 w}{R \partial x \partial \beta}, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

где ε_1 – деформация растяжения-сжатия в направлении образующей (оси Ox);

ε_2 – деформация растяжения-сжатия в окружном направлении (координата β);

ω – деформация сдвига;

κ_1 – деформация изменения кривизны в плоскости образующей ($O'xz$) (O' – данная произвольная точка);

κ_2 – деформации изменения кривизны в плоскости направляющей ($O'\beta z$);

τ – деформация кручения;

w – радиальное перемещение оболочки;

R – радиус срединной поверхности оболочки;

x – продольная координата;

β – окружная (угловая) координата.

Зависимость внутренних усилий от деформаций оболочки выражается посредством физических соотношений теории оболочек, которые имеют вид:

$$\begin{cases} N_1 = B[(\varepsilon_1 - \varepsilon_T) + \mu(\varepsilon_2 - \varepsilon_T)]; \\ N_2 = B[(\varepsilon_2 - \varepsilon_T) + \mu(\varepsilon_1 - \varepsilon_T)]; \\ S = B_c \omega; \\ M_1 = D[(\kappa_1 - \kappa_T) + \mu(\kappa_2 - \kappa_T)]; \\ M_2 = D[(\kappa_2 - \kappa_T) + \mu(\kappa_1 - \kappa_T)]; \\ H = D_c \tau, \end{cases} \quad (2.2)$$

где N_1 – внутреннее усилие растяжения-сжатия в направлении образующей;

N_2 – внутреннее усилие растяжения-сжатия в окружном направлении;

S – сдвигающее усилие;

M_1 – внутренний изгибающий момент, действующий в плоскости $O'xz$;

M_2 – внутренний изгибающий момент, действующий в плоскости $O'\beta z$;

H – крутящие моменты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях $O'xz$ и $O'\beta z$;

ε_T, κ_T – чисто тепловые деформации растяжения-сжатия и изменения кривизны;

$B = \frac{Eh}{1 - \mu^2}$ – цилиндрическая жесткость оболочки на растяжение-сжатие;

$B_c = \frac{Eh}{2(1 + \mu)}$ – сдвиговая жесткость;

$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)}$ – изгибная жесткость;

$D_c = \frac{Eh^3}{12(1 + \mu)}$ – жесткость на кручение;

E – модуль упругости материала, зависящий от температуры;

T – температура оболочки;

h – толщина оболочки;

μ – коэффициент Пуассона.

Так как кручение происходит в двух различных плоскостях, то в соотношениях (2.2) и дальнейшем в потенциальной энергии деформации оно учитывается в виде двойного вклада [75].

К числу исходных уравнений можно также отнести и формулы для вычисления напряжений в оболочке:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11}^{H,B} &= \frac{N_1}{h} \pm \frac{6M_1}{h^2}; \\ \sigma_{22}^{H,B} &= \frac{N_2}{h} \pm \frac{6M_2}{h^2}; \\ \sigma_{21}^{H,B} &= \sigma_{12}^{H,B} = \pm \frac{6H}{h^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где σ_{11} – нормальное напряжение в направлении образующей оболочки;

σ_{22} – нормальное напряжение в окружном направлении;

σ_{12} – касательное напряжение,

верхние индексы « H » и « B » обозначают, что данное напряжение вычисляется на наружной и внутренней поверхности оболочки, соответственно.

Для удобства, геометрические соотношения (2.1) представим в матричной форме:

$$\bar{\varepsilon} = \vec{d}_1 w + \vec{d}_2 w^2. \quad (2.4)$$

При изменении температуры оболочки по сравнению с исходным состоянием в ней появляются чисто тепловые деформации, которые вычисляются по формулам [54, 76, 77]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_T &= \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \alpha_T (T - T_0) dz; \\ \kappa_T &= \frac{12}{h^3} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \alpha_T (T - T_0) z dz, \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где ε_T – чисто тепловая деформация растяжения-сжатия;

κ_T – чисто тепловая деформация изменения кривизны;

α_T – коэффициент линейного расширения материала;

T – температура в точке с координатой z ;

T_0 – начальная температура.

Учитывая допущение 2.1.9, после интегрирования получим следующие выражения для чисто тепловых деформаций:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_T &= \alpha_T (T - T_0); \\ \kappa_T &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Отсутствие тепловой деформации изменения кривизны является прямым следствием постоянства температуры по толщине оболочки.

При отсутствии связей и равномерном нагреве оболочка может свободно расширяться при повышении температуры. В этом случае полная (фактическая) деформация оболочки совпадает с чисто тепловой деформацией, и напряжений в материале не возникает.

Наличие связей, в том числе со стороны менее нагретых частей котла, ограничивает фактические деформации по сравнению с чисто тепловыми и приводит к возникновению внутренних усилий и напряжений в котле.

Физические соотношения (2.2), выражающие внутренние усилия, также представим в матричной форме:

$$\bar{N} = [B](\bar{\varepsilon} - \vec{\varepsilon}_T), \quad (2.7)$$

где $\vec{\varepsilon}_T = \{\varepsilon_T, \varepsilon_T, 0, 0, 0, 0\}$ – вектор чисто тепловых деформаций;

Система уравнений, описывающих деформацию оболочки, замыкается уравнениями равновесия, которые приведены также в работе [75]. В настоящей работе применен вариационный метод, при этом исходным уравнениям равновесия ставится в соответствие функционал, и разрешающая система уравнений составляется из условия его стационарности. Поэтому здесь нет необходимости приводить исходные уравнения равновесия, не используемые в дальнейших выкладках непосредственно.

Исходные уравнения должны быть дополнены заданием граничных условий. Эти условия будем задавать для перемещений оболочки, так как

используется метод перемещений. Граничные условия представляют собой отсутствие перемещений по всей границе исследуемой области котла.

2.3 Вариационный метод и аппроксимация

Для расчета применим вариационный метод, позволяющий упростить исходные уравнения. При этом системе уравнений, описывающих равновесие исследуемого объекта, ставится в соответствие функционал. Вид функционала выбирается таким, чтобы условие его стационарности (уравнение Эйлера) соответствовало исходной системе уравнений равновесия. Подобные энергетические подходы широко применяются в различных задачах механики, в частности, в работе [78].

В предлагаемой методике используем вариационный принцип Гамильтона и следствие из него – принцип Лагранжа [79].

Температурное воздействие рассматривается отдельно от прочих внешних воздействий, что базируется на принципе независимости действия внешних нагрузок. Поэтому при разработке данной методике работа внешних сил приравнивается нулю, а выражение принципа Лагранжа имеет следующий вид:

$$\frac{d\Pi}{dw} = 0, \quad (2.8)$$

где Π – потенциальная энергия деформации.

Потенциальную энергию, с учетом вида физических соотношений, можно выразить следующим образом:

$$\Pi = \int_0^a \int_0^b \left(\frac{1}{2} \vec{\varepsilon}^T [B] \vec{\varepsilon} - \vec{\varepsilon}_T^T [B] \vec{\varepsilon} \right) R d\beta dx, \quad (2.9)$$

где a – координата правой границы исследуемой области котла вдоль образующей;

b – координата конца исследуемой области в окружном направлении.

Подставим в выражение (2.9) для потенциальной энергии деформации геометрические соотношения (2.4)

$$\begin{aligned} \Pi = \int_0^a \int_0^b \left\{ \frac{1}{2} (\vec{d}_1^T w + \vec{d}_2^T w^2) [B] (\vec{d}_1 w + \vec{d}_2 w^2) - \right. \\ \left. - \vec{\varepsilon}_T^T [B] (\vec{d}_1 w + \vec{d}_2 w^2) \right\} R d\beta dx \end{aligned} \quad (2.10)$$

Введем аппроксимацию перемещений в следующей форме:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m w_m, \quad (2.11)$$

где m – номер члена ряда разложения перемещений;

$$\Phi_m = \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi\beta}{b} - \text{функция формы для одного члена ряда;}$$

w_m – амплитуда члена ряда перемещений с номером m .

Вид принятой аппроксимации (2.11) соответствует реальному характеру деформации (выпучивания) оболочки в очаге пламени, а также граничным условиям.

Введем также аппроксимацию температурного поля, вид функций формы выберем исходя из реального характера распределения температур в очаге пламени и на основе данных, приведенных в работах [71, 74, 80]:

$$T = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m T_m, \quad (2.12)$$

где m – номер члена ряда;

$$\Phi_m = \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi\beta}{b} - \text{функция формы для } m\text{-го члена ряда разложения}$$

температур, тождественная соответствующей функции формы для перемещений;

T_m – амплитуда m -го члена ряда разложения температур.

Подставим аппроксимацию температуры (2.12) в выражение (2.6) для чисто тепловых деформаций:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m T_m. \quad (2.13)$$

С учетом (2.13), вектор чисто тепловых деформаций, входящий в физические соотношения (2.7), примет следующий вид:

$$\vec{\varepsilon}_T = \alpha_T \sum_{m=1}^{\infty} (\Phi_m T_m) \vec{K}_T, \quad (2.14)$$

где $\vec{K}_T = \{1, 1, 0, 0, 0\}$.

Подставим принятые аппроксимации перемещений (2.11) и тепловых деформаций (2.14) в выражение (2.10) для потенциальной энергии оболочки:

$$\begin{aligned}
\Pi = & \int_0^a \int_0^b \left[\frac{1}{2} \sum_{m_1} \left(\vec{d}_1^T \Phi_{m_1} w_{m_1} + \vec{d}_2^T \Phi_{m_1} w_{m_1}^2 \right) \times \right. \\
& \times [B] \sum_{m_2} \left(\vec{d}_1 \Phi_{m_2} w_{m_2} + \vec{d}_2 \Phi_{m_2} w_{m_2}^2 \right) - \\
& - \alpha_T \sum_{m_1} \left(\Phi_{m_1} T_{m_1} \vec{K}_T^T \right) [B] \sum_{m_2} \left(\vec{d}_1 \Phi_{m_2} w_{m_2} + \right. \\
& \left. \left. + \vec{d}_2 \Phi_{m_2} w_{m_2}^2 \right) \right] R d\beta dx. \tag{2.15}
\end{aligned}$$

Применим принцип Лагранжа (2.8), взяв производную потенциальной энергии (2.15) по каждой амплитуде w_m ряда перемещений. В результате получим разрешающую систему нелинейных алгебраических уравнений, которую можно представить в следующей матричной форме:

$$\left[r^I \right] \vec{w}_m^I + \left[r^{II} \right] \vec{w}_m^{II} + \left[r^{III} \right] w_m^{III} = \vec{p}, \tag{2.16}$$

где $\left[r^I \right]$, $\left[r^{II} \right]$, $\left[r^{III} \right]$ – матрицы коэффициентов;

$\vec{w}_m^I = \{w_1, w_2, \dots\}$ – вектор амплитуд членов ряда перемещений;

$\vec{w}_m^{II} = \{w_1^2, w_2^2, \dots\}$ – вектор квадратов амплитуд ряда перемещений;

$\vec{w}_m^{III} = \{w_1^3, w_2^3, \dots\}$ – вектор кубов амплитуд ряда перемещений;

\vec{p} – вектор правой части.

Таким образом, каждое уравнение из системы (2.16) представляет собой полином третьей степени относительно каждого неизвестного (w_1 , w_2 и т.д.). Данная нелинейность является прямым следствием учета нелинейных деформаций растяжения-сжатия (допущение 2.1.4).

Выражения для матриц коэффициентов системы уравнений (2.16) имеют вид:

$$\begin{aligned} [r^I] = & \int_0^a \int_0^b \left[\sum_{m_1} (\vec{d}_1^T \Phi_{m_1}) [B] \sum_{m_2} (\vec{d}_1 \Phi_{m_2}) - \right. \\ & \left. - 2\alpha_T \sum_{m_1} (\Phi_{m_1} T_{m_1}) \vec{K}_T^T [B] \sum_{m_2} (\vec{d}_2 \Phi_{m_2}) \right] R d\beta dx; \end{aligned}$$

$$[r^{II}] = \int_0^a \int_0^b 3 \sum_{m_1} (\vec{d}_1^T \Phi_{m_1}) [B] \sum_{m_2} (\vec{d}_2 \Phi_{m_2}) R d\beta dx;$$

$$[r^{III}] = \int_0^a \int_0^b 2 \sum_{m_1} (\vec{d}_2^T \Phi_{m_1}) [B] \sum_{m_2} (\vec{d}_2 \Phi_{m_2}) R d\beta dx.$$

Вектор правой части системы (2.16) выразится следующим образом:

$$\vec{p} = \int_0^a \int_0^b \alpha_T \sum_{m_1} (\Phi_{m_1} T_{m_1}) \vec{K}_T^T [B] \sum_{m_2} (\vec{d}_1 \Phi_{m_2}) R d\beta dx.$$

Каждая из матриц коэффициентов является симметричной. Выражения для ее элементов, полученные после интегрирования, имеют следующий вид.

Для элементов на главной диагонали каждой матрицы ($m_1 = m_2$):

$$\begin{aligned} r_{m_1 m_2}^I = & abR \left[\frac{9B}{64R^2} + \frac{3D\pi^4 m_1^4}{4} \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{R^4 b^4} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{D_c \pi^4 m_1^4}{2R^4 a^2 b^2} - \frac{3B\alpha_T T_{m_1} (1 + \mu) \pi^2 m_1^2}{32} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$r_{m_1 m_2}^{II} = \frac{3abB \pi^2 m_1^2}{64} \left(\frac{\mu}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right);$$

$$r_{m_1 m_2}^{III} = \frac{abRB \pi^4 m_1^4}{32} \left(\frac{15}{32a^4} + \frac{15}{32R^4 b^4} + \frac{\mu}{R^2 a^2 b^2} \right).$$

Для «побочных» элементов каждой матрицы ($m_1 \neq m_2$):

$$r_{m_1 m_2}^I = abR \left[\frac{B}{16R^2} - \frac{3B\alpha_T T_{m_1} (1 + \mu) \pi^2 m_2^2}{64} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) \right];$$

$$r_{m_1 m_2}^{II} = \frac{9abB \pi^2 m_2^2}{128} \left(\frac{\mu}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right);$$

$$r_{m_1 m_2}^{III} = \frac{abRB \pi^4 m_1^2 m_2^2}{512} \left(\frac{5}{a^4} + \frac{5}{R^4 b^4} + \frac{9\mu}{R^2 a^2 b^2} \right).$$

Выражение для элементов вектора правой части имеет вид:

$$p_{m_2} = \frac{Bab}{4} (1 + \mu) \alpha_T T_{m_2}.$$

Из решения системы уравнений (2.16) можно найти вектор амплитуд по каждому члену ряда перемещений (2.11). Это позволяет в любой точке исследуемой области путем суммирования определить перемещение (2.11), деформации (2.4), внутренние усилия (2.7) с учетом (2.6) и напряжения (2.3).

2.4 Результаты расчетов котла цистерны в очаге пламени

Разработанная методика, изложенная также в [81], была применена для расчета деформированного состояния котла при действии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Объектом исследований была выбрана цилиндрическая часть котла нефтебензиновой цистерны. Толщина оболочки составляет 9 мм, внутренний радиус – 1,5 м.

В соответствии с наиболее неблагоприятным сценарием пожара, внешнее воздействие задавалось в виде теплового потока 100 кВт/м^2 , действующего по прямоугольной площадке длиной 2 м вдоль оси и 2,8 м по окружности в средней зоне обечайки котла. Соответствующее температурное поле котла было определено в работе [74]. При этом наибольшая температура имеет место в середине очага пламени и при удалении от середины к краям площадки, как в продольном, так и в кольцевом направлении температура несколько снижается, а вне площадки – быстро убывает, на некотором расстоянии сравниваясь с температурой окружающей среды. Этот характер распределения температур сохраняется во времени, изменяются только уровни температур.

При задании механических и теплофизических свойств материала котла использовался справочник [66].

Расчет выполнялся для двух вариантов котла: типового и имеющего огнезащитное покрытие марки СГК-2.

Результаты расчета котла без покрытия приведены на рисунках 2.2 – 2.7.

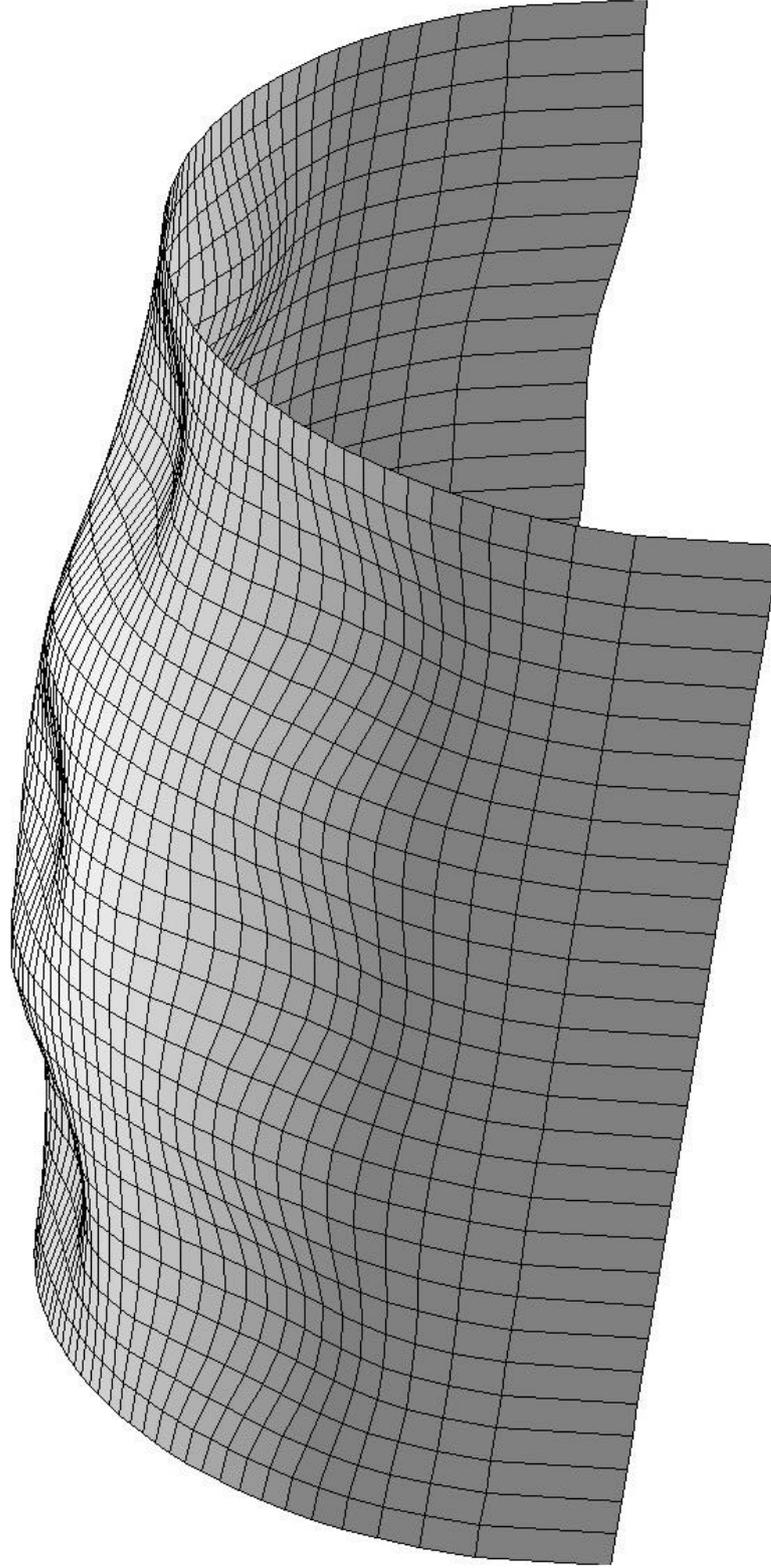


Рисунок 2.2 – Деформация оболочки котла цистерны от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени (учет членов ряда $m = 1, 2, 3$)

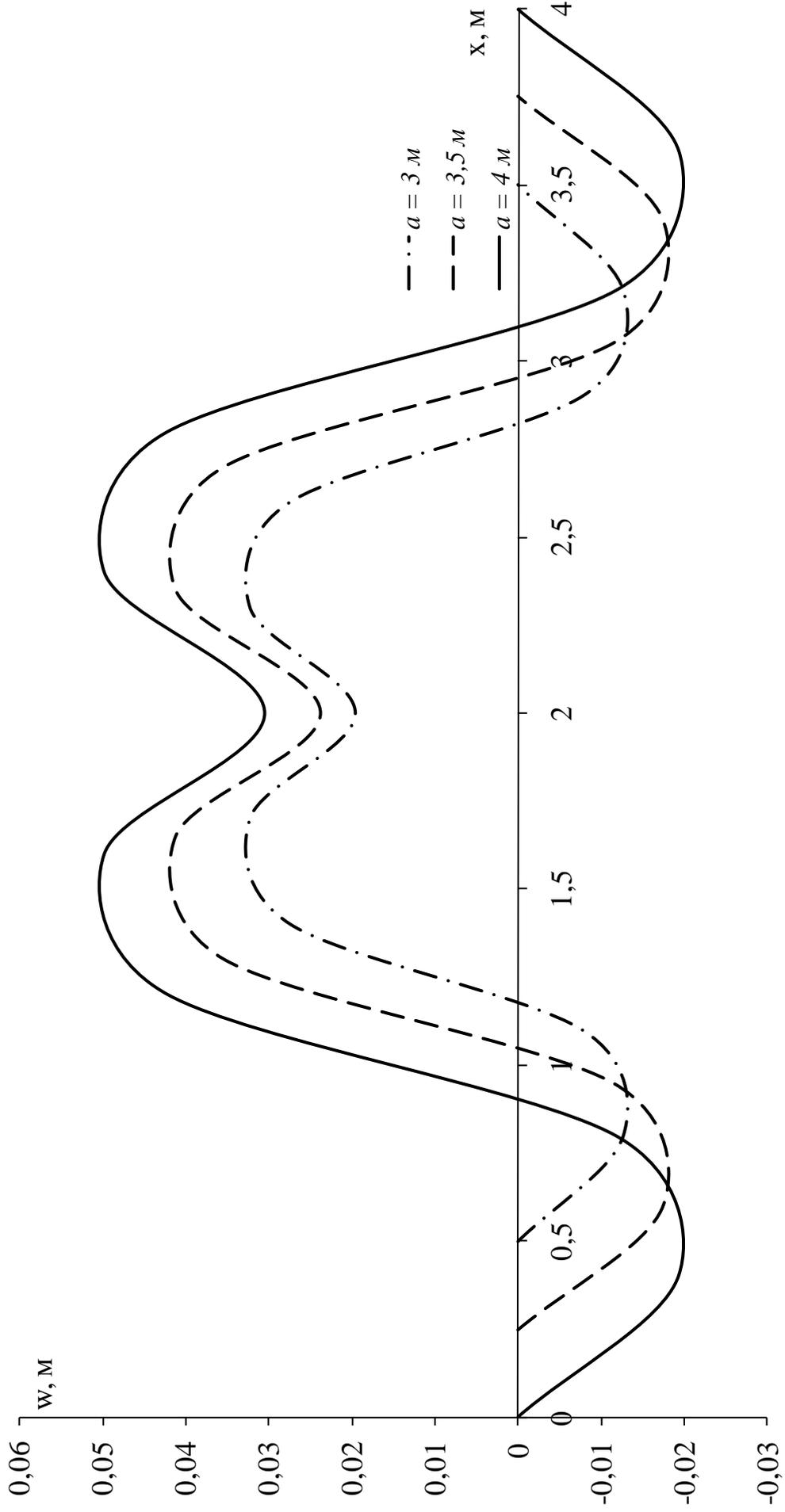


Рисунок 2.3 – Изменение прогиба оболочки по длине котла от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени (при $m = 1, 2, 3$)

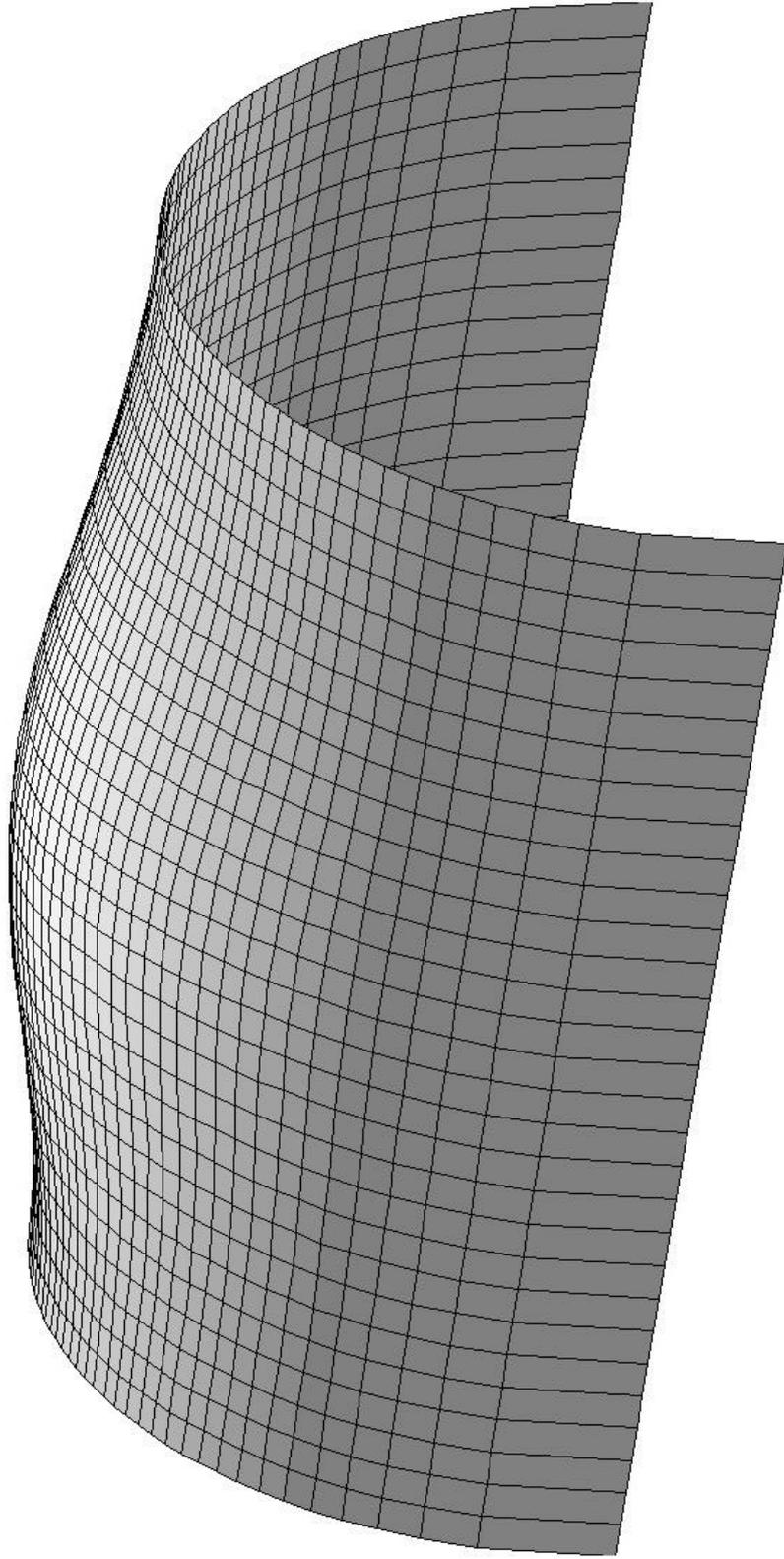


Рисунок 2.4 – Деформация оболочки котла цистерны от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени (учет членов ряда $m = 1, 2$)

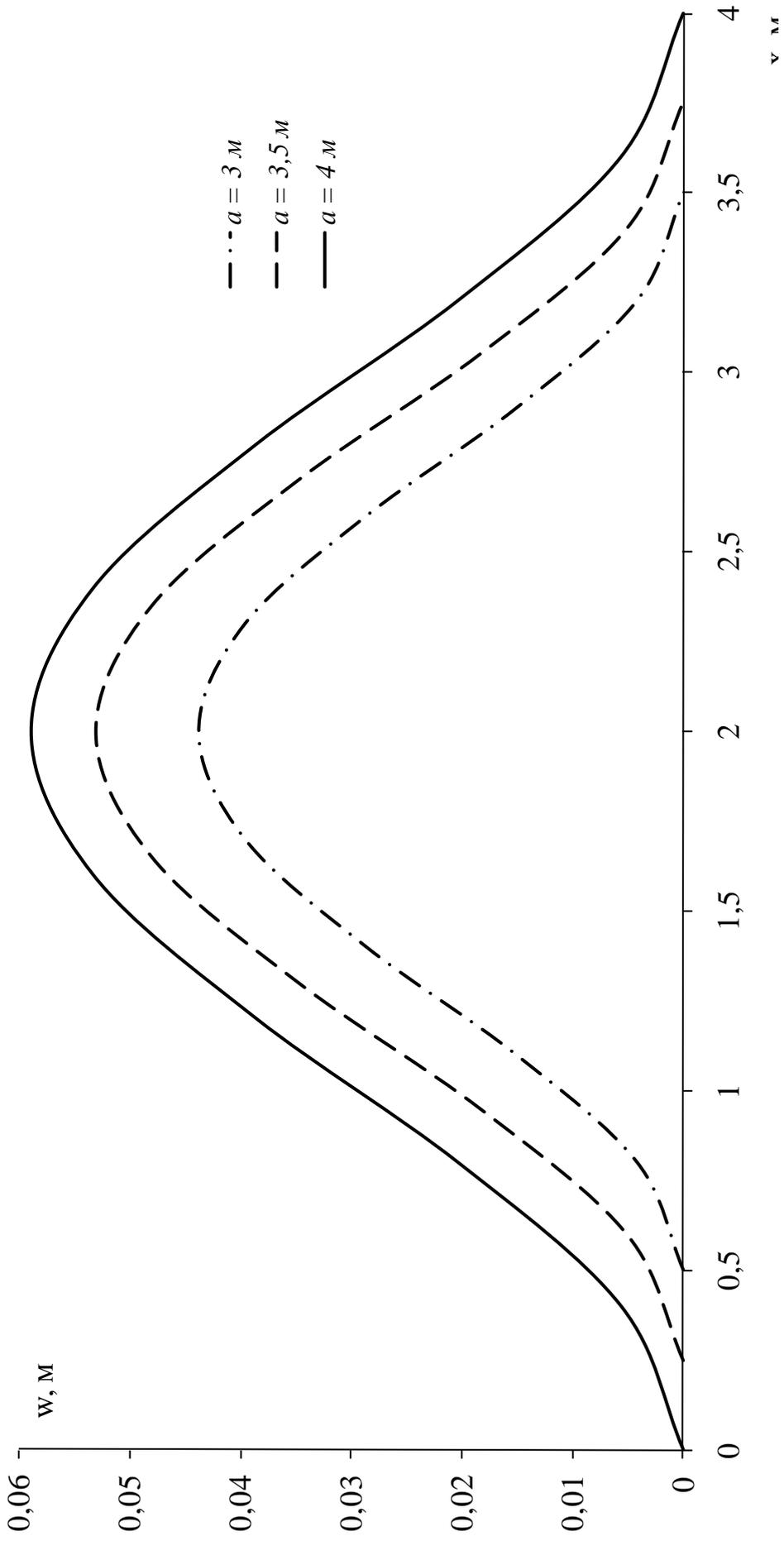


Рисунок 2.5 – Изменение перемещения оболочки по длине котла от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени (при $m = 1, 2$)

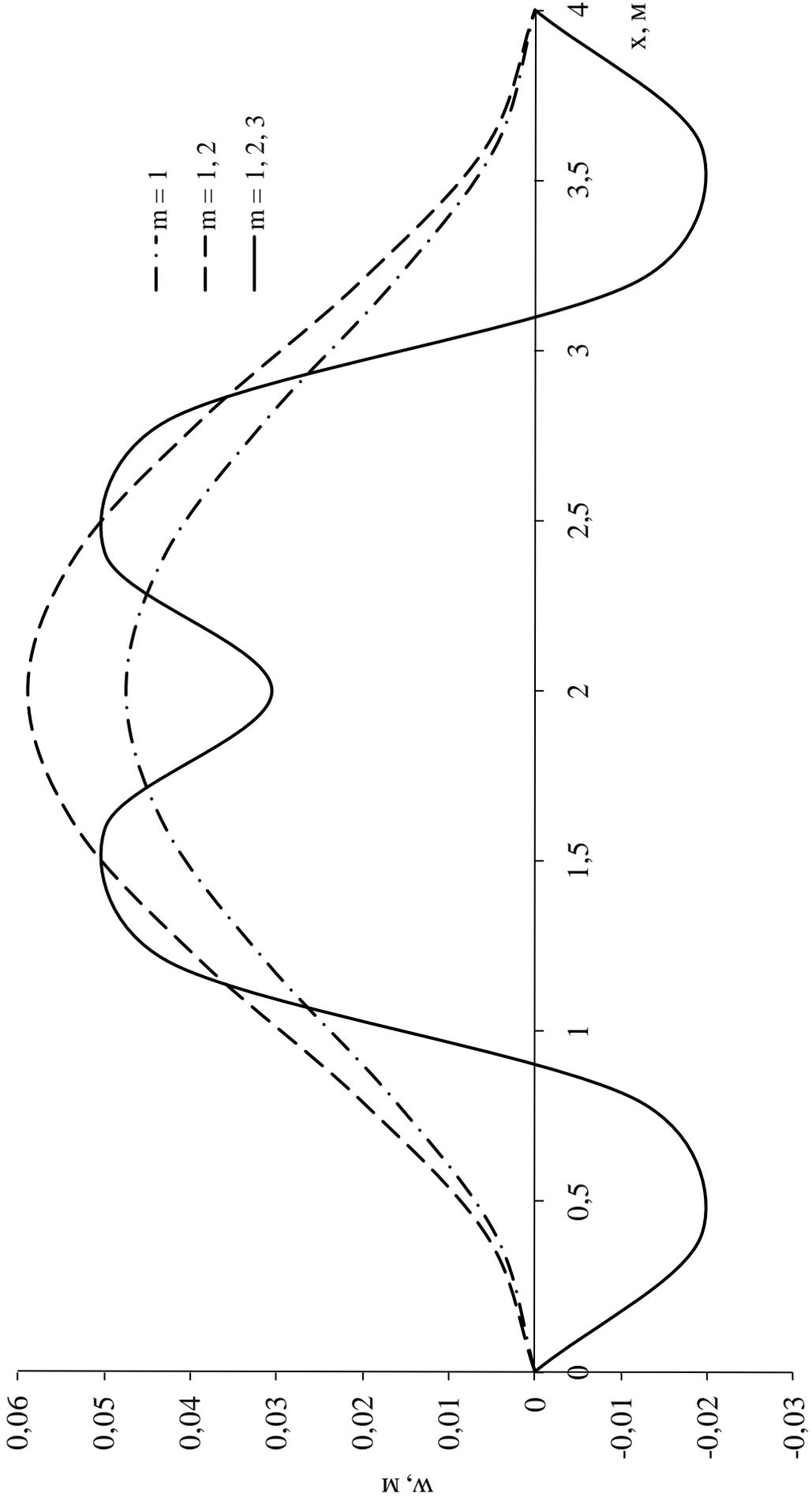


Рисунок 2.6 – Изменение перемещения оболочки по длине котла при разной аппроксимации перемещений

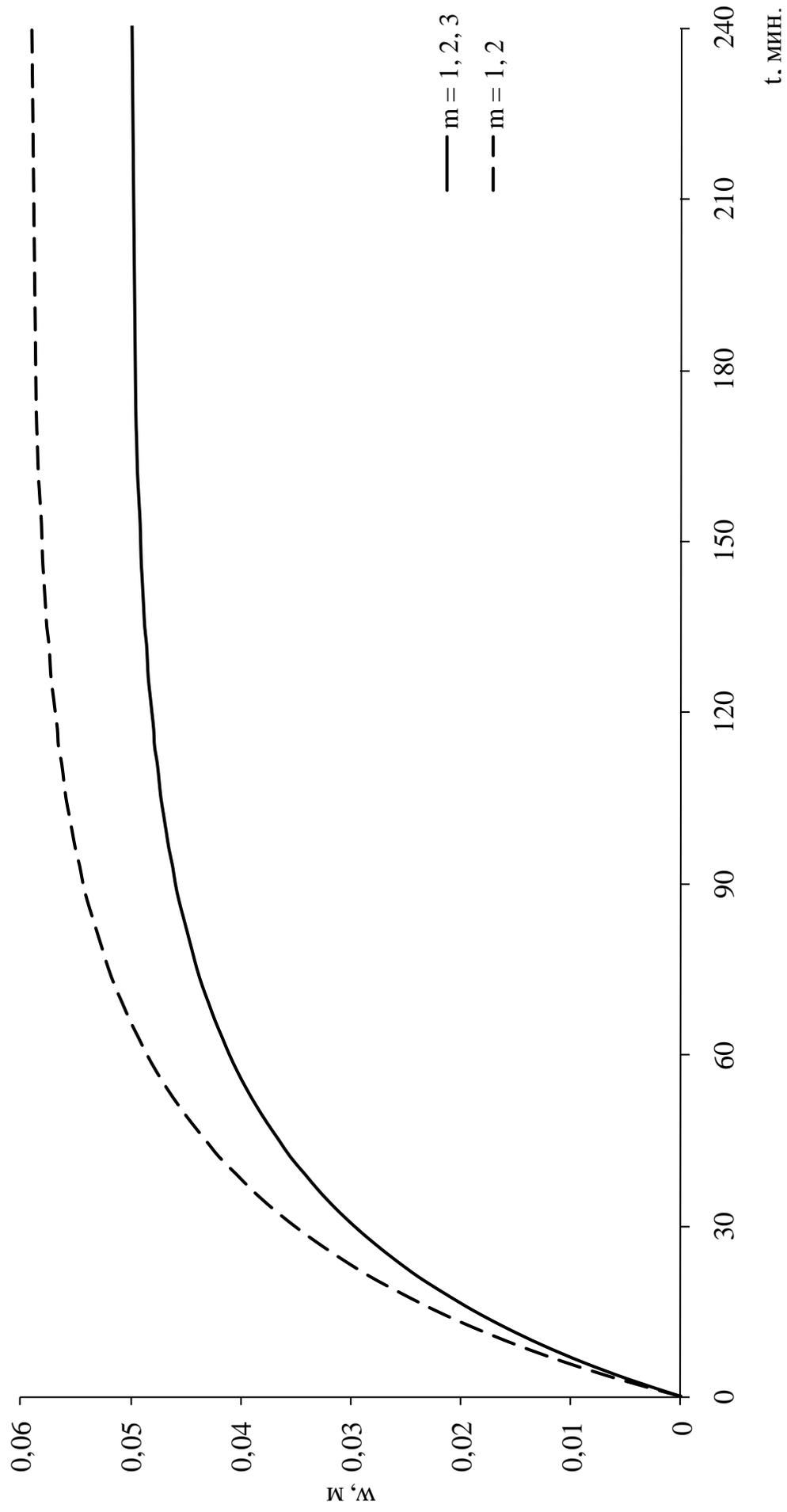


Рисунок 2.7 – Зависимость максимального прогиба оболочки в очаге пламени от времени

На рисунке 2.2 показано деформированное состояние оболочки котла при учете членов ряда перемещений с номерами $m = 1, 2, 3$, что обосновано предварительными расчетами при различных вариантах разложения температурного поля [74] в ряд. Наибольшие радиальные перемещения имеют место в зоне действия повышенной температуры, причем при удалении от середины зоны прогиб резко падает, в некоторых зонах даже меняя знак. Последнее обстоятельство объясняется жесткостью оболочки на изгиб и подтверждается результатами других исследований [71]. Максимальное радиальное перемещение оказалось равным 50 мм.

На рисунке 2.3 приведены графики зависимости радиальных перемещений от продольной координаты. При этом с целью отработки методики производилось варьирование длиной a исследуемого участка оболочки.

Как видно из графиков, неравномерное температурное поле вызывает всплеск радиальных перемещений оболочки в зоне его действия. Аналогичный характер распределения прогиба имеет место и по окружности. Зависимость от длины исследуемой зоны позволяет сделать вывод, что уровень прогибов возрастает с увеличением размеров a и b исследуемой зоны оболочки. Поэтому при выборе расчетной схемы целесообразно ограничивать исследуемую область по окружности – половиной котла, а по длине – наибольшим расстоянием между шпангоутами.

При расчетах также варьировалось количество удерживаемых членов ряда перемещений. На рисунке 2.4 показано деформированное состояние оболочки при $m = 1, 2$. Неучет третьего члена ряда приводит к тому, что несколько изменяется качественная картина распределения радиальных перемещений, в частности, не выявляется обратный прогиб оболочки. При этом максимальный прогиб получается несколько завышенным, равным 58,9 мм. Погрешность вычисления максимального прогиба составляет 18 % и идет в запас прочности.

На рисунке 2.5 приведены графики зависимости радиальных перемещений от продольной координаты для случая $m = 1, 2$ при различных значениях длины L

исследуемого участка. Кривые имеют более сглаженный характер по сравнению с показанными на рисунке 2.3.

Результаты варьирования количеством удерживаемых членов ряда сведены в рисунке 2.6. Из сравнения приведенных графиков можно сделать вывод, что для получения верхней оценки уровня прогибов при выборе расчетной схемы достаточно ограничиваться удержанием членов ряда перемещений $m = 1, 2$, что несколько сглаживает распределение прогибов и идет в запас. Если же требуется получить более точную качественную картину, надо дополнительно учитывать член ряда $m = 3$. Эти выводы можно предложить в качестве рекомендации для выполнения практических расчетов.

На рисунке 2.7 приведены зависимости максимального прогиба от времени (точки максимального прогиба см. на рисунке 2.6). Исходными данными для расчета послужили зависимости температуры от времени, полученные в работе [74]. При этом учитывалось допущение 2.1.7. Сплошной линией показана зависимость для случая $m = 1, 2, 3$, штриховой – для случая $m = 1, 2$. С момента начала воздействия пламени прогиб начинает резко возрастать. Примерно через 120 мин. рост температур практически прекращается и устанавливается режим, когда оболочка сохраняет деформированное состояние.

Результаты расчетов прогиба котла цистерны с защитным покрытием приведены на рисунке 2.8. Зависимость имеет характер, аналогичный описанному выше для варианта без защиты. Однако уровень максимального прогиба составил 11 – 13 мм, то есть оказался в 3,5 раза ниже. Кроме того, время возрастания прогиба до максимального значения при наличии защиты существенно увеличивается (в 1,9 раза). Сопоставление результатов более наглядно на графиках рисунка 2.9.

Все это позволяет сделать вывод о высокой эффективности покрытия СГК-2 как способа защиты котлов цистерн от действия открытого пламени. Эта эффективность выражается, с одной стороны, в снижении уровня температур и НДС, с другой стороны, обеспечивается достаточный промежуток времени для развертывания противопожарных формирований.

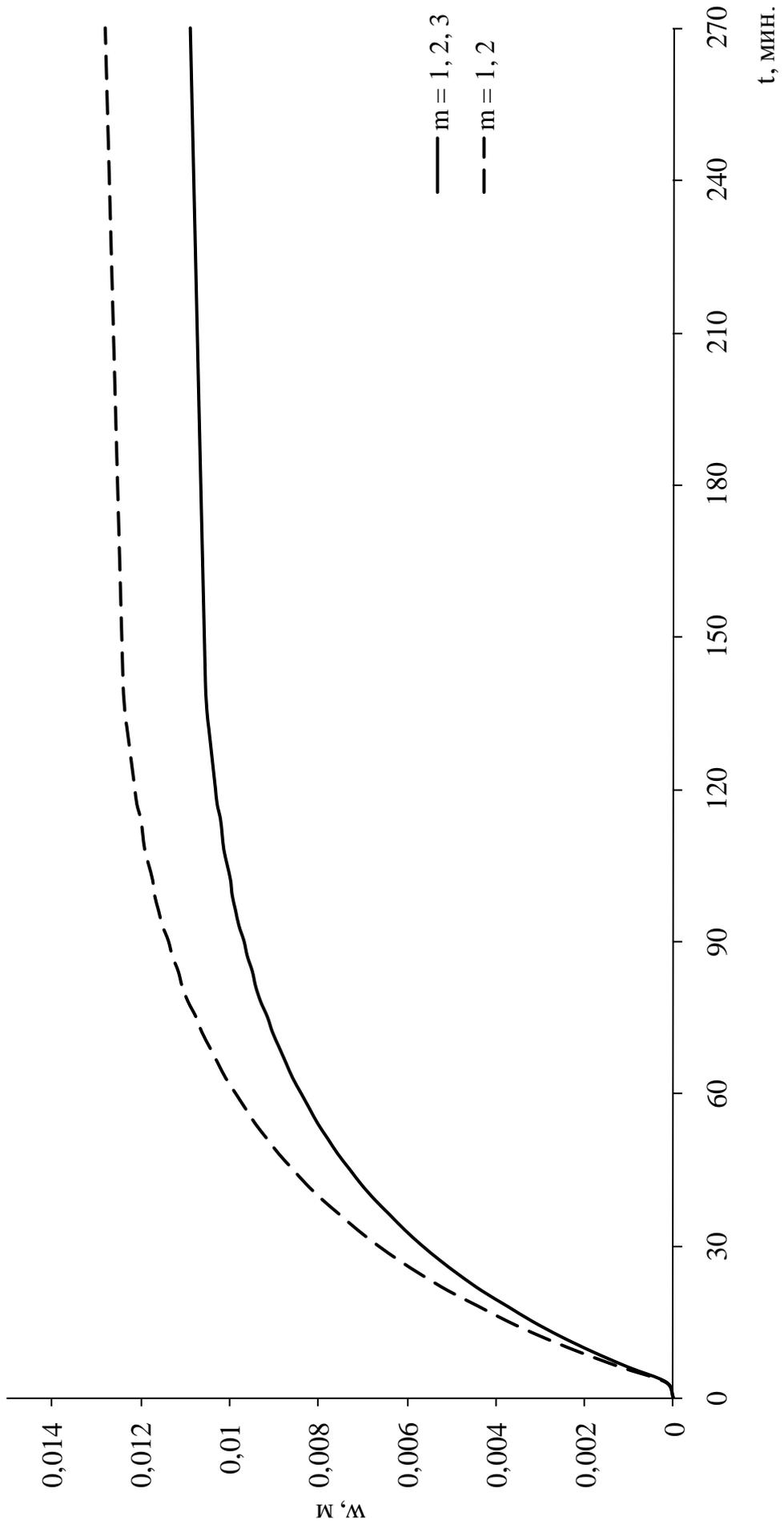


Рисунок 2.8 – Зависимость максимального прогиба оболочки с огнезащитным покрытием СГК-2 от времени

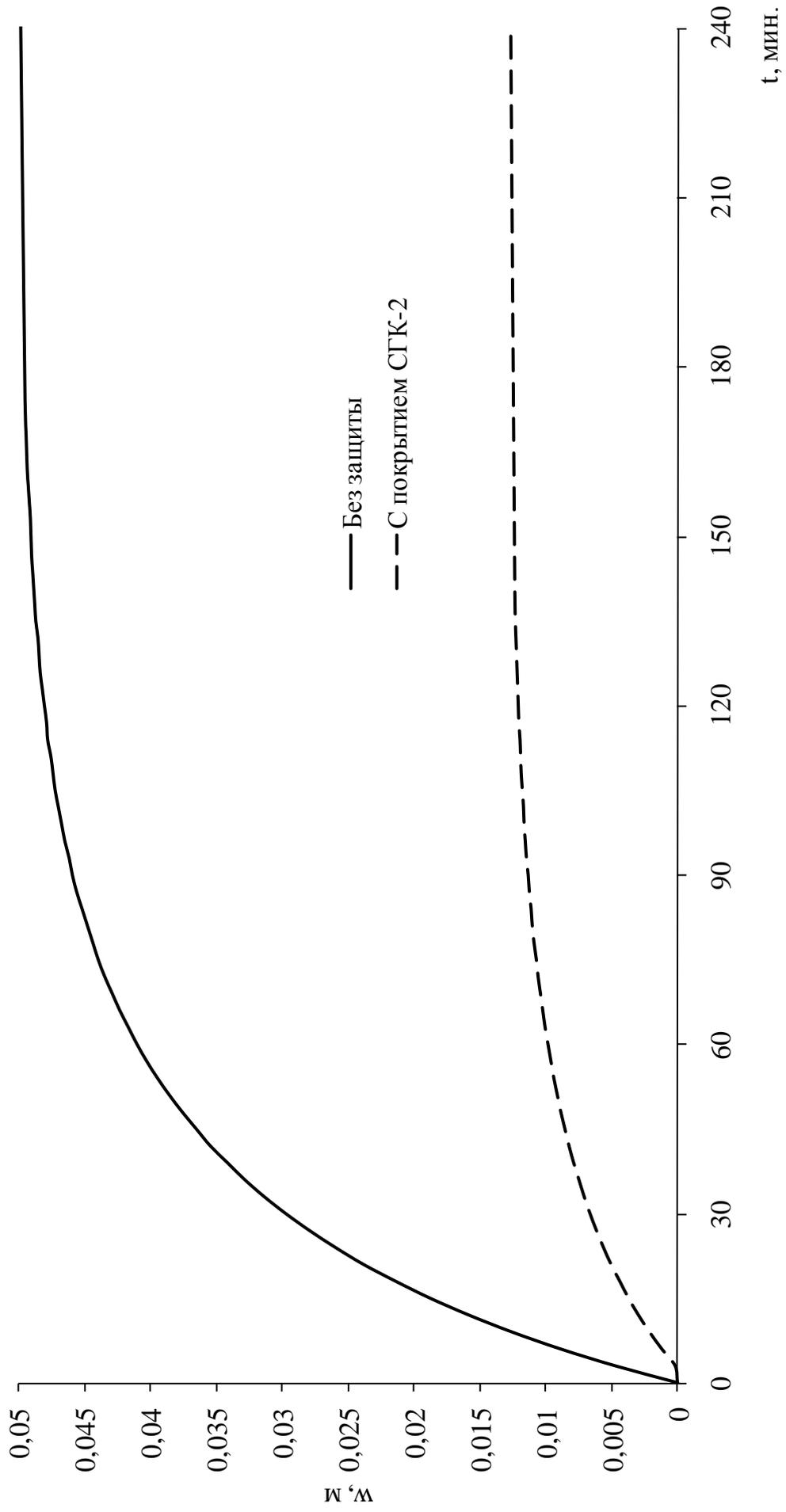


Рисунок 2.9 – Сравнение максимального прогиба во времени без защиты и с огнезащитным покрытием котла

При наличии защитного покрытия мгновенное распределение прогиба вдоль оболочки и в окружном направлении в момент появления установившегося режима аналогично случаю котла без защиты (см. рисунки 2.2 – 2.5). Отличие состоит в снижении уровня прогибов в 3,5 раза.

Для исследования влияния различных параметров расчетной схемы были выполнены расчеты НДС оболочки котла с варьированием толщиной и радиусом оболочки. Расчеты показали, что толщина практически не влияет на деформацию оболочки. Это позволяет сделать вывод, что влияние изгибающих моментов вносит незначительный вклад в деформированное состояние. При этом уровень напряжений при увеличении толщины снижается по зависимости, близкой к гиперболической, что полностью объясняется соотношениями теории оболочек.

На рисунках 2.10, 2.11 приведены результаты варьирования радиусом оболочки. Из графика рисунка 2.11 видно, что уровень прогиба с увеличением радиуса возрастает по закону, близкому к линейному. Точки максимальных прогибов, по результатам расчетов, совпадают.

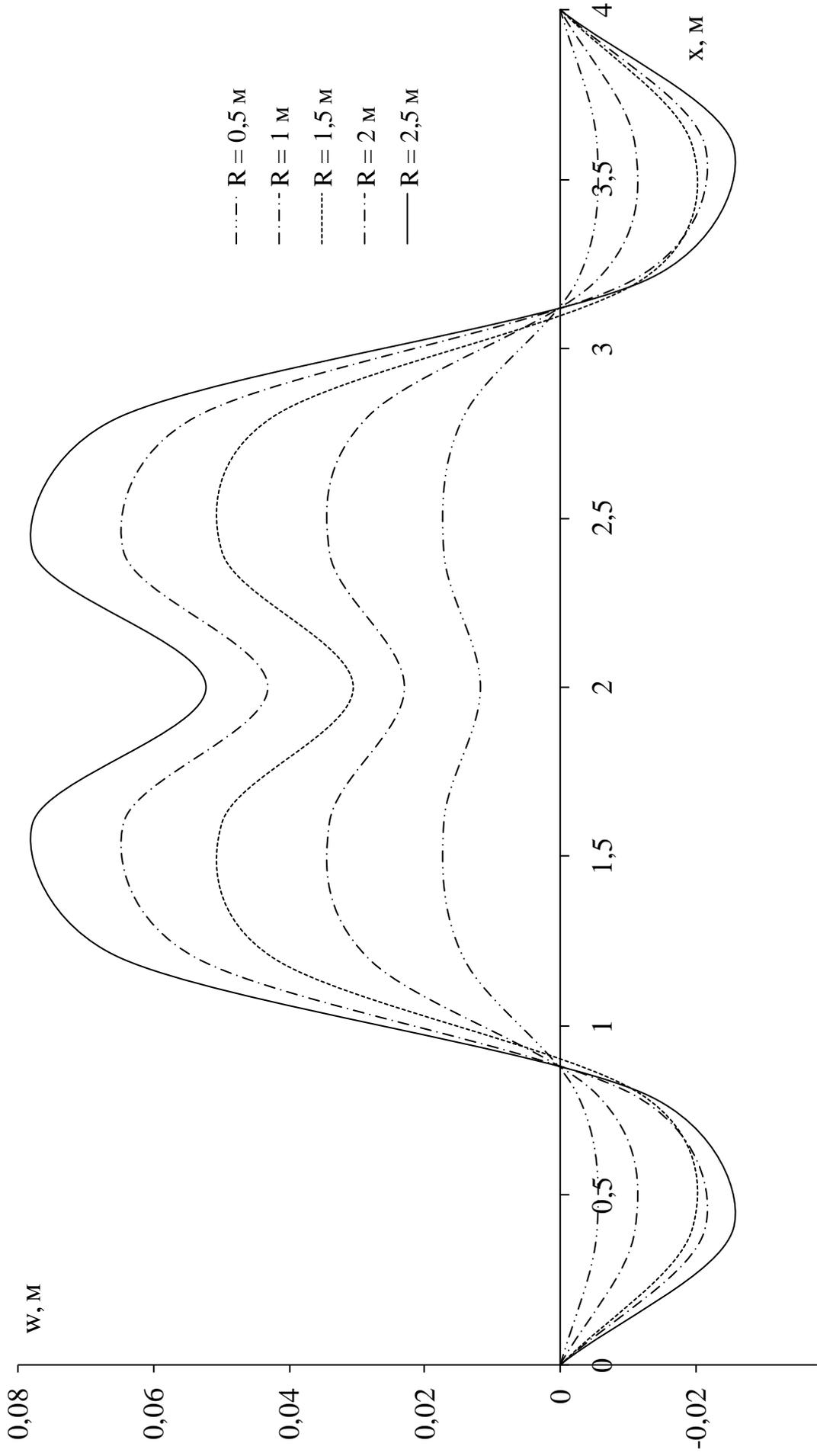


Рисунок 2.10 – Изменение прогиба вдоль оси котла при различных значениях радиуса оболочки

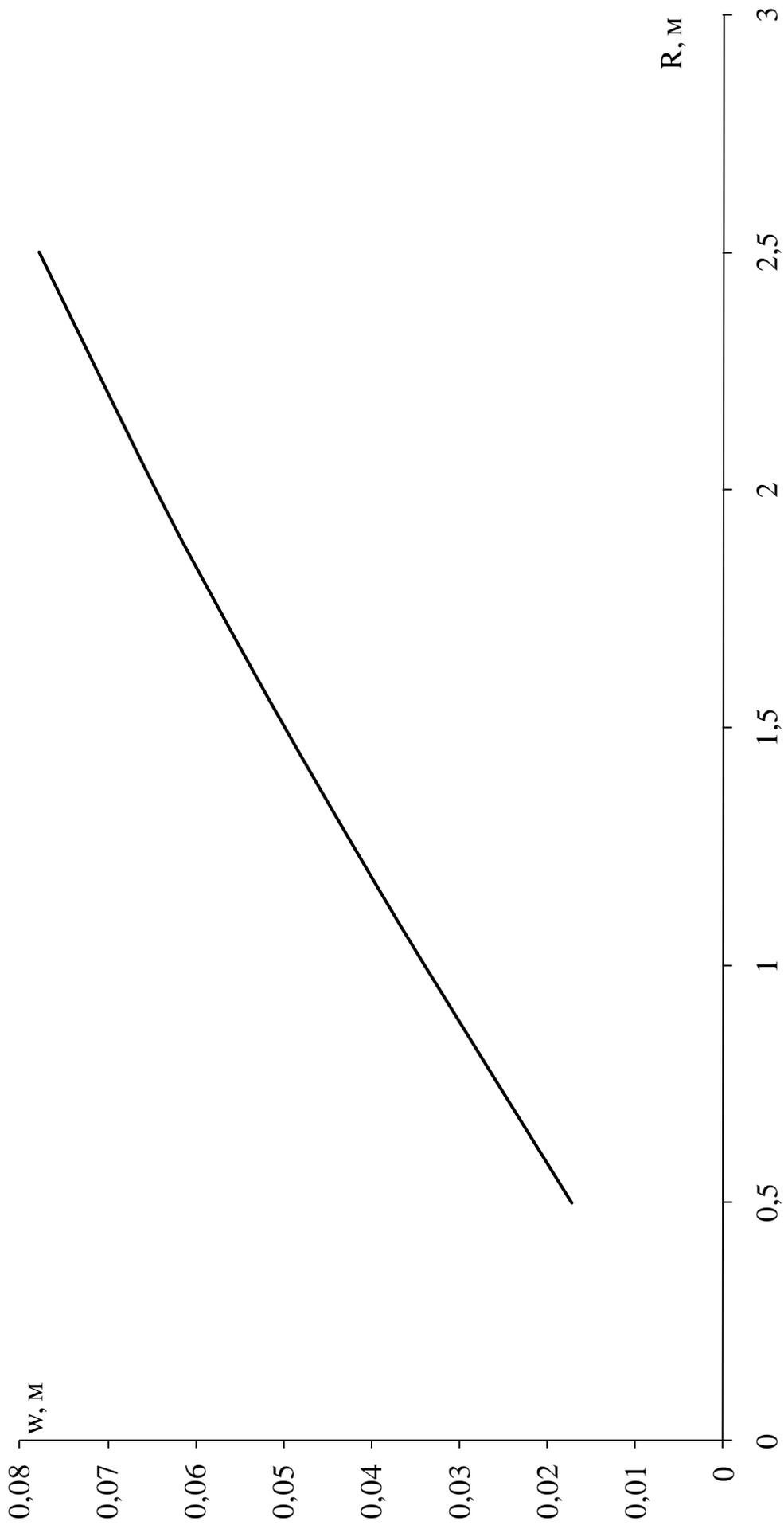


Рисунок 2.11 – Зависимость максимального прогиба от радиуса оболочки

2.5 Выводы по разделу 2

1. В настоящем разделе разработана методика определения состояния котла цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Методика основана на применении нелинейной теории оболочек и вариационного принципа Лагранжа. Расчетные зависимости получены в явном виде.

2. Принятая аппроксимация перемещений, близкая к действительной, позволила для рассматриваемого класса оболочечных конструкций исключить необходимость применения МКЭ.

3. Разработаны алгоритм и программа расчета, эффективные при реализации на ЭВМ.

4. Проведено исследование состояния котла нефтебензиновой цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Максимальный прогиб оболочки в очаге пламени составил 50 мм.

5. Оценено влияние на результаты расчетов различных параметров расчетной схемы: количества членов ряда аппроксимации перемещений, длины исследуемой зоны оболочки.

6. Оценено влияние огнезащитного покрытия марки СГК-2 на состояние оболочки котла в очаге пламени. Уровень прогибов снижается в 3,5 раза, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности данного способа защиты.

3 МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КОТЛА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ СНИЖЕНИИ ЖЕСТКОСТИ В ОЧАГЕ ПЛАМЕНИ

В очаге пламени оболочка, находящаяся под давлением, испытывает дополнительное выпучивание, что связано с локальным изменением механических характеристик. В отличие от исходного состояния (до начала теплового воздействия), в оболочке котла помимо мембранных деформаций появляются деформации изменения кривизны, в чем и выражается явление выпучивания [82].

Кроме того, в очаге пламени радиальные перемещения оболочки могут достигать достаточно высоких значений, что заставляет учитывать при расчете нелинейную составляющую деформаций растяжения-сжатия.

3.1 Расчетная схема и принятые допущения

Расчетная схема оболочки котла приведена на рисунке 2.1.

Расчет базируется на допущениях, описанных в разделе 2.1, в дополнение к которым приняты следующие:

3.1.1. Изменение механических характеристик материала полагается симметричным относительно средних сечений рассматриваемой области цилиндрической оболочки в продольном и окружном направлениях, что связано с симметричностью температурного поля [74].

3.1.2. Изменение механических характеристик в очаге пламени оболочки учитывается в виде локального снижения модуля упругости и допускаемых напряжений в зависимости от температур.

3.1.3. Помимо указанных в п. 3.1.2 локальных изменений материал оболочки полагается однородным.

3.1.4. Температурное поле, влияющее на механические свойства материала, полагается стационарным.

3.2 Исходные уравнения теории оболочек

Исходные соотношения связей между деформациями и перемещениями будут описываться выражениями, аналогичными (2.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2; \\ \varepsilon_2 = \frac{w}{R} + \frac{1}{2R^2} \left(\frac{\partial w}{\partial \beta} \right)^2; \\ \omega = \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{R \partial \beta}; \\ \kappa_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \\ \kappa_2 = -\frac{\partial^2 w}{R^2 \partial \beta^2}; \\ \tau = -\frac{\partial^2 w}{R \partial x \partial \beta}. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Зависимость внутренних усилий от деформаций оболочки выражается посредством физических соотношений теории оболочек:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = B(\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \\ N_2 = B(\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1); \\ S = B_c \omega; \\ M_1 = D(\kappa_1 + \mu \cdot \kappa_2); \\ M_2 = D(\kappa_2 + \mu \cdot \kappa_1); \\ H = 2D_c \tau, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

где N_1 – внутреннее усилие растяжения-сжатия в направлении образующей;

N_2 – внутреннее усилие растяжения-сжатия в окружном направлении;

S – сдвигающее усилие;

M_1 – внутренний изгибающий момент, действующий в плоскости $O'xz$;

M_2 – внутренний изгибающий момент, действующий в плоскости $O'\beta z$;

H – крутящие моменты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях $O'xz$ и $O'\beta z$;

$$B = \frac{Eh}{1 - \mu^2} \text{ – цилиндрическая жесткость оболочки на растяжение-сжатие;}$$

$$B_c = \frac{Eh}{2(1 + \mu)} \text{ – сдвиговая жесткость;}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)} \text{ – изгибная жесткость;}$$

$$D_c = \frac{Eh^3}{12(1 + \mu)} \text{ – жесткость на кручение;}$$

E – модуль упругости материала, зависящий от температуры;

T – температура оболочки;

h – толщина оболочки;

μ – коэффициент Пуассона.

Для удобства последующих выкладок представим (3.1) и (3.2) в матричной форме:

$$\vec{\varepsilon} = \vec{d}_1 w + \vec{d}_2 w^2; \tag{3.3}$$

$$\vec{N} = [B] \vec{\varepsilon}, \tag{3.4}$$

где $\vec{\varepsilon} = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \omega, \kappa_1, \kappa_2, \tau\}$ – вектор деформаций оболочки;

$$\vec{d}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{R} \\ 0 \\ -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2}{R^2 \cdot \partial \beta^2} \\ -\frac{\partial^2}{R \partial \beta dx} \end{bmatrix}; \quad \vec{d}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{dx} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{R \partial \beta} \right)^2 \\ \frac{\partial}{dx} \frac{\partial}{R \partial \beta} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{— векторы-операторы,}$$

преобразующие перемещения оболочки в ее деформации;

$\vec{N} = \{N_1, N_2, S, M_1, M_2, 2H\}$ — вектор внутренних усилий;

$$[B] = \begin{bmatrix} B & B\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B\mu & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D & D\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D\mu & D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_c \end{bmatrix} \quad \text{— матрица жесткостных параметров}$$

оболочки, зависящих от температуры.

3.3 Вариационный метод и аппроксимация

Разрешающую систему уравнений составим с применением вариационного принципа Лагранжа. Это позволяет существенно упростить решение задачи по сравнению с применением исходных уравнений равновесия.

В оболочке, согласно принципу Лагранжа, будут иметь место такие перемещения, при которых полная потенциальная энергия деформации минимальна. Необходимое условие этого состоит в равенстве нулю производной

$$\frac{d\Pi}{dw} - \frac{dA}{dw} = 0, \quad (3.5)$$

где Π – потенциальная энергия деформации оболочки;

A – работа внешних сил над оболочкой, составляющая вместе с энергией Π полную потенциальную энергию деформации.

На основе (3.5) можно получить разрешающую систему уравнений относительно перемещения w , которую можно по физическому смыслу понимать, как систему уравнений равновесия в обобщенных усилиях.

Рассмотрим составляющие уравнения (3.5) с учетом особенностей заданного внешнего воздействия.

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \vec{\varepsilon}^T \vec{N} R d\beta dx; \quad (3.6)$$

$$A = \int_0^a \int_0^b q w R d\beta dx, \quad (3.7)$$

где a, b – координаты границ исследуемой области оболочки в продольном и окружном направлениях, соответственно;

q – значение внутреннего давления в котле.

Выразим потенциальную энергию через перемещение w оболочки, подставив исходные соотношения (3.3), (3.4) в формулу (3.6):

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b (\vec{d}_1^T w + \vec{d}_2^T w^2) [B] (\vec{d}_1 w + \vec{d}_2 w^2) R d\beta dx. \quad (3.8)$$

Введем аппроксимацию перемещений w в пределах исследуемой области, для чего можно использовать такие же функции формы, как и в главе 2:

$$w = \Phi_0 w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m w_m, \quad (3.9)$$

где m – номер члена ряда разложения перемещений, который будем условно называть «номером гармоники»;

w_0 – осесимметричная составляющая перемещения, которую также будем условно называть «нулевой гармоникой»;

w_m – коэффициент члена ряда с номером m , который будем условно именовать «амплитудой гармоники с номером m »;

$\Phi_0 = 1$ – функция формы для нулевой гармоники;

$$\Phi_m = \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi\beta}{b} - \text{функция формы для гармоники с номером } m.$$

Принятый вид аппроксимации (3.9) соответствует характеру выпучивания оболочки для рассматриваемого вида внешнего воздействия, причем нулевая гармоника связана с действием внутреннего давления, а последующие гармоники

появляются вследствие локального снижения жесткости оболочки и описывают ее выпучивание.

Введем также аппроксимацию для модуля упругости материала в виде аналогичных функций:

$$E = E_o - \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m E_m ,$$

где E_o – осесимметричная составляющая ряда, аппроксимирующего модуль упругости;

E_m – коэффициент члена ряда с номером m , который будем называть амплитудой гармоники изменения модуля упругости с номером m .

Отсюда вытекает возможность выразить всю матрицу жесткостных параметров в виде подобной зависимости:

$$[B] = [B_o] - \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m [B_m] \quad (3.10)$$

где $[B_o]$ – матрица осесимметричных составляющих жесткостных параметров;

$[B_m]$ – матрица амплитуд жесткостных параметров для гармоники m .

Подставим принятые аппроксимации перемещений (3.9) и жесткостных параметров (3.10) в выражения для потенциальной энергии деформации (3.8) и работы внешних сил (3.7)

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \int \int_{o \ o}^a \int_{o \ o}^b \left(\vec{d}^T \Phi_o w_o + \sum_{m=1}^{\infty} \vec{d}^T \Phi_m w_m \right) \left([B_o] - \right. \\ \left. - \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m [B_m] \right) \left(\vec{d} \Phi_o w_o + \sum_{m=1}^{\infty} \vec{d} \Phi_m w_m \right) R d\beta dx; \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$A = \int \int_{o \ o}^a \int_{o \ o}^b q \left(\Phi_o w_o + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m w_m \right) R d\beta dx. \quad (3.12)$$

Подставим полученные выражения (3.11) и (3.12) в уравнение (3.5). При этом неизвестными величинами станут амплитуды разложения перемещений w_o , w_m ($m = 1 - \infty$). Поэтому производные полной потенциальной энергии деформации необходимо вычислять по каждой неизвестной, в результате чего получим систему уравнений относительно коэффициентов w_m :

$$\frac{\partial \Pi}{\partial w_m} - \frac{\partial A}{\partial w_m} = 0,$$

которую представим в матричной форме

$$[r^I] \vec{w}_m^I + [r^{II}] \vec{w}_m^{II} + [r^{III}] \vec{w}_m^{III} = \vec{p}, \quad (3.13)$$

где $[r^I]$, $[r^{II}]$, $[r^{III}]$ – матрицы коэффициентов уравнения (3.13) при первой, второй и третьей степени искомых коэффициентов w_m , которые будем условно называть матрицами жесткости;

$\vec{w}_m^I = \{w_o, w_1, \dots, w_m, \dots\}$ – вектор неизвестных коэффициентов ряда перемещений, который будем называть вектором амплитуд разложения перемещений;

$$\vec{w}_m^{II} = \{w_o^2, w_1^2, \dots, w_m^2, \dots\};$$

$$\overrightarrow{w^{III}} = \{w_o^3, w_1^3, \dots, w_m^3, \dots\};$$

$$\overrightarrow{p} = \frac{\partial A}{\partial w_m} - \text{вектор внешних нагрузок.}$$

Матрицы жесткости являются симметричными и имеют следующую структуру:

$$[r] = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} & \dots & r_{0m} & \dots \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} & \dots \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m0} & r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mm} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

Вектор внешних нагрузок имеет следующую структуру:

$$\overrightarrow{p} = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_m, \dots\},$$

где
$$p_0 = \int_0^a \int_0^{\epsilon} qR d\beta dx ;$$

$$p_m = \int_0^a \int_0^{\epsilon} q\Phi_m R d\beta dx .$$

После интегрирования выражения для элементов матрицы жесткости и вектора внешних нагрузок принимают следующий вид:

$$r_{00}^I = \frac{E_{cp} h a a}{R \cdot (1 - \mu^2)};$$

$$r_{0m}^I = \frac{ab}{4R} \left(B_0 - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - \frac{5}{16} B_m \right);$$

$$r_{mn}^I = \frac{ab}{16R} \left(B_0 - \frac{1}{16} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - \frac{9}{16} B_m - \frac{9}{16} B_n \right);$$

$$\begin{aligned} r_{mn}^I &= \frac{ab}{64R} \left(9B_0 - \frac{9}{4} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - 4B_m \right) + \\ &+ \frac{m^4 \pi^4}{4R a a} \left(D_{co} - \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{\infty} D_{ck} + \frac{15}{64} D_{cm} \right) + \\ &+ \frac{m^4 \pi^4}{4R^3 b^3 a^3} (a^4 + R^4 b^4) \left(3D_o - \frac{3}{4} \sum_{k=1}^{\infty} D_k - \frac{1}{2} D_m \right); \end{aligned}$$

$$r_{00}^{II} = 0;$$

$$r_{0m}^{II} = \frac{m^2 \pi^2 (a^2 + \mu^2 R^2 b^2)}{32R^2 ab} \left(B_0 - \frac{3}{4} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - \frac{1}{2} B_m - \frac{3}{4} B_{2m} \right);$$

$$r_{nm}^{II} = \frac{3m^2 \pi^2 a}{512R^2 b} \left(3B_0 - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - \frac{3}{4} B_m - \frac{3}{4} B_n \right);$$

$$r_{mm}^{II} = \frac{3m^2 \pi^2 a}{128R^2 b} \left(5B_0 - \frac{5}{8} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - \frac{85}{32} B_m \right);$$

$$r_{00}^{III} = 0;$$

$$r_{0m}^{III} = 0;$$

$$r_{mn}^{III} = 0;$$

$$\begin{aligned}
r_{mm}^{III} = & \frac{21m^4\pi^4}{2048R^3b^3a^3} \left(R^4b^4 + a^4 \right) \left(5B_0 - \frac{5}{4} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - B_m \right) + \\
& + \frac{m^4\pi^4\mu}{256Rab} \left(9B_0 - \frac{9}{4} \sum_{k=1}^{\infty} B_k - 4B_m \right) + \\
& + \frac{m^4\pi^4}{256Rab} \left(9B_{co} - \frac{9}{4} \sum_{k=1}^{\infty} B_{ck} - 4B_{cm} \right);
\end{aligned}$$

$$p_0 = qRaR;$$

$$p_m = \frac{qRaR}{4},$$

где $m = 1 - \infty$;

$n = 1 - \infty$;

$n \neq m$.

Система уравнений (3.13) является нелинейной, из ее решения определяется вектор \vec{W} , состоящий из амплитуд гармоник разложения радиального перемещения в ряд. Знание их позволяет найти поля перемещений (3.9), деформаций (3.3), внутренних усилий (3.4) и напряжений (2.3).

Полученные результаты расчета необходимо суммировать с результатами расчета от других воздействий, в частности, от неравномерного температурного поля, чему посвящен раздел 2.

Оценка прочности котла может производиться по результирующим напряжениям с применением энергетического критерия прочности, при этом допускаемые напряжения определены «Нормами ...» [1].

3.4 Результаты расчетов котла цистерны под давлением в очаге пламени

Методика определения состояния котла под действием внутреннего давления при локальном снижении жесткости оболочки, изложенная также в работе [83], была применена для расчета котла нефтебензиновой цистерны. Толщина оболочки принималась равной 9 мм, внутренний радиус – 1,5 м. Внутреннее давление полагалось равным 0,5 МПа. В данном разделе приводятся результаты отдельного расчета на внутреннее давление.

На рисунке 3.1 приведено деформированное состояние котла в очаге пламени в момент максимального радиального перемещения (в дальнейшем именуемого также прогибом) (при построении диаграммы прогибы увеличены в масштабе 100:1). Наибольшие прогибы имеют место в центре зоны действия повышенной температуры, причем при удалении от центра прогиб резко падает. При этом основной вклад в НДС вносит первый член ряда ($m = 1$).

На рисунке 3.2 приведены кривые изменения радиальных перемещений вдоль оси в различные моменты времени от начала нагрева. Здесь и далее на графиках приводятся только неосесимметричные составляющие прогиба, которые определяют собственно выпучивание оболочки.

В начальный момент времени имеет место равномерное температурное поле, при этом действие внутреннего давления вызывает осесимметричное напряженно-деформированное состояние. При локальном повышении температуры в очаге пламени в данной зоне происходит возмущение основного НДС, что выражается в выпучивании оболочки под действием давления.

Через 120 мин. режим нагрева можно считать практически установившимся, в результате деформации практически перестают изменяться, что видно из рисунка 3.3. Максимальное значение радиального перемещения (в центре очага пламени) составляет 1,8 мм. Зависимость максимального прогиба от температуры в центре очага пламени показана на рисунке 3.4.

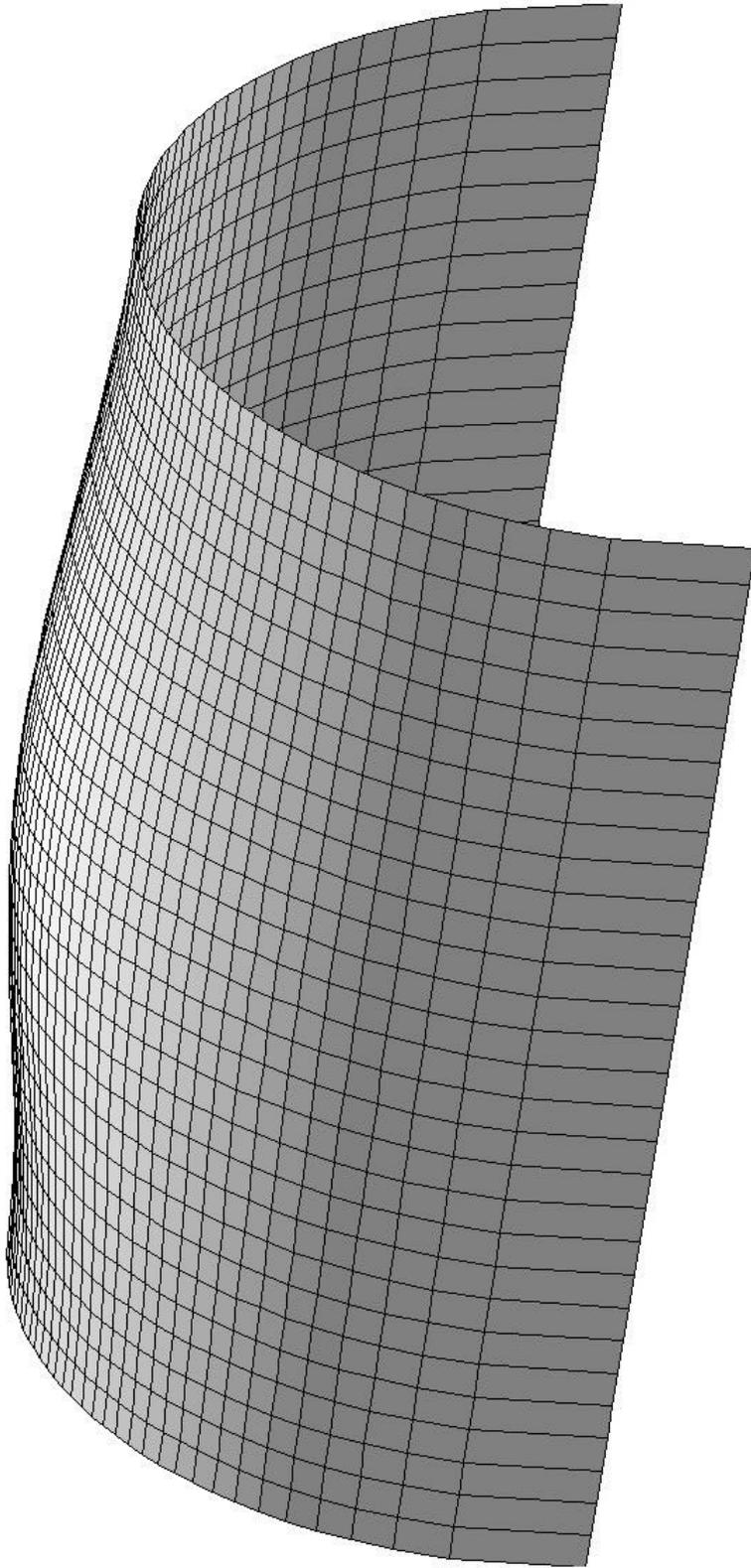


Рисунок 3.1 – Радиальные перемещения оболочки котла цистерны под давлением при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени

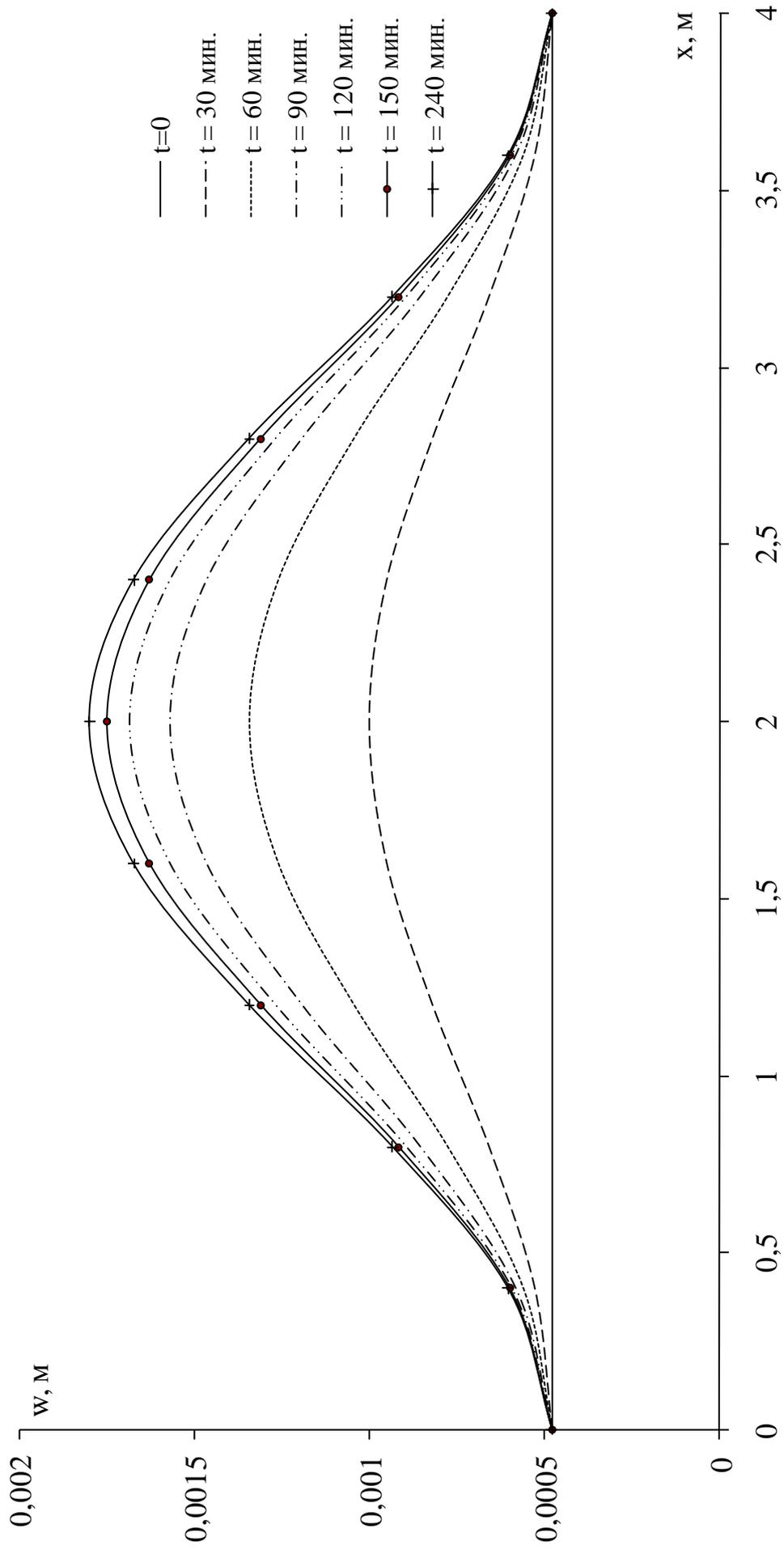


Рисунок 3.2 – Изменение прогиба котла давления по длине при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени в различные моменты времени

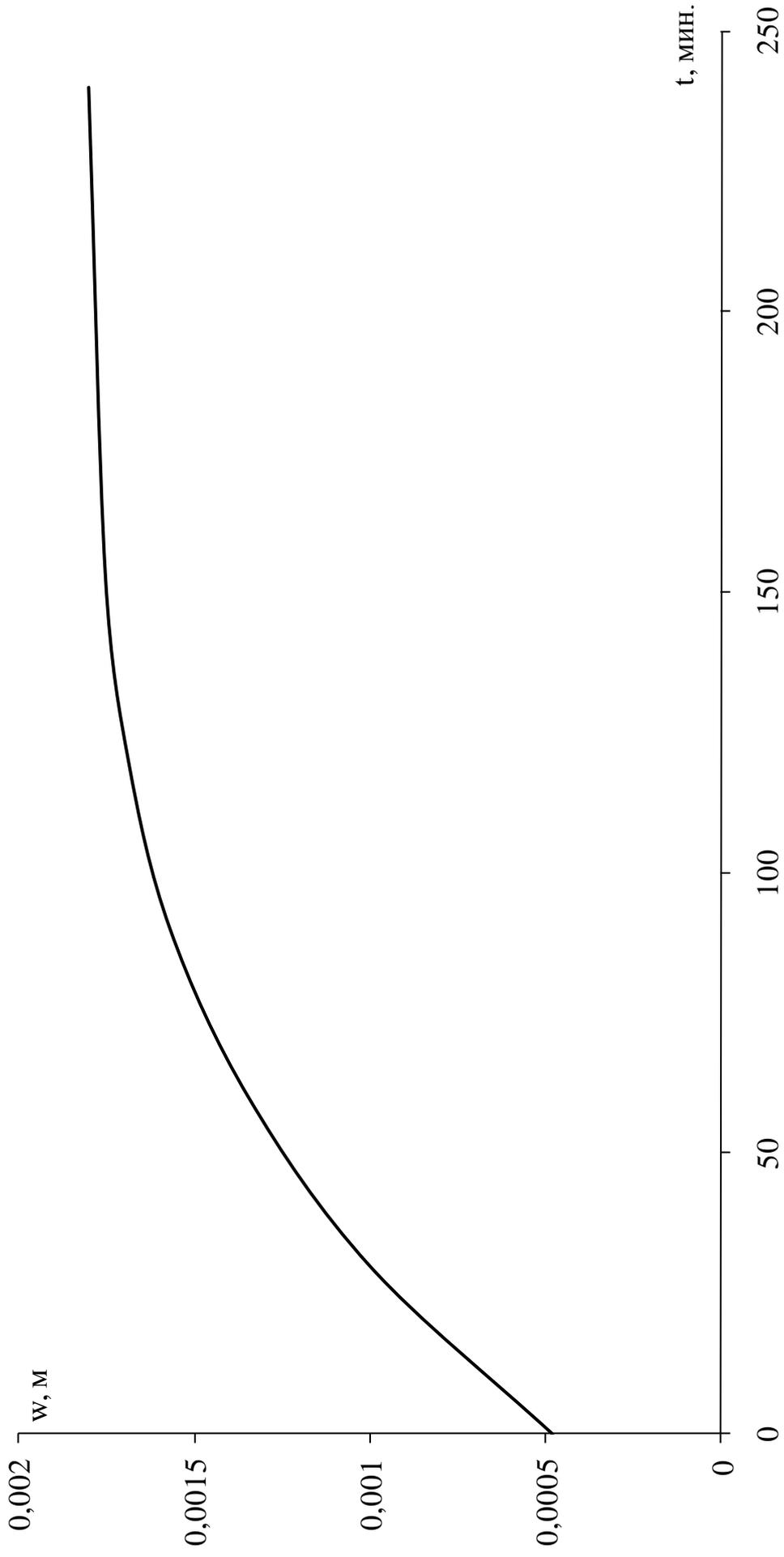


Рисунок 3.3 – Изменение максимального радиального перемещения котла под давлением во времени при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени

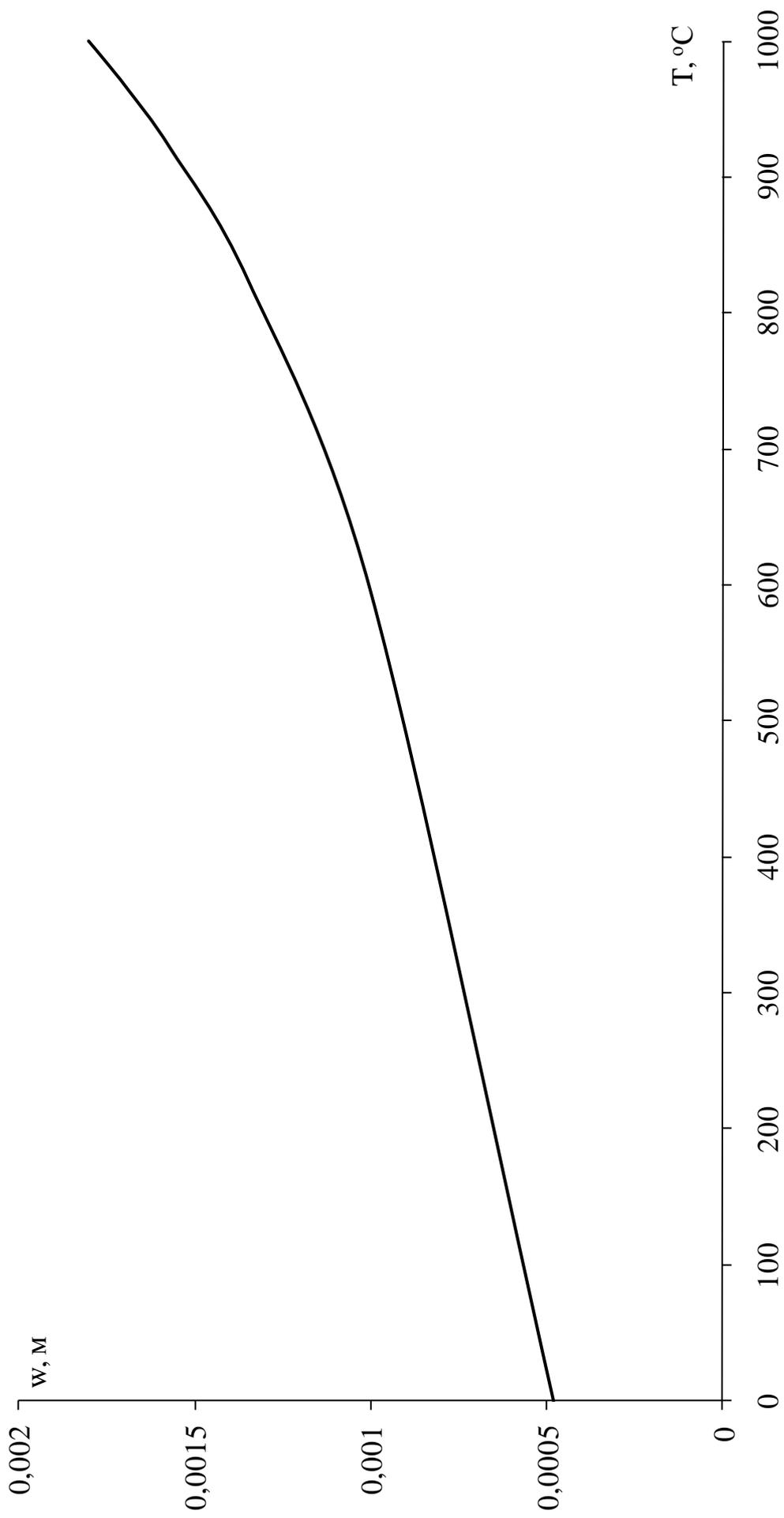


Рисунок 3.4 – Изменение максимального прогиба котла давления во времени при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени

Для оценки влияния параметров расчетной схемы на значение максимального радиального перемещения были выполнены многовариантные расчеты с варьированием толщиной и радиусом оболочки.

На рисунке 3.5 приведены кривые изменения радиальных перемещений вдоль оси при различных значениях толщины оболочки. Зависимость максимального радиального перемещения (в центре очага пламени) от толщины показана на рисунке 3.6. При увеличении толщины уровень прогибов снижается (характер зависимости близок к гиперболическому), что объясняется возрастанием жесткости оболочки.

Аналогичные результаты при варьировании радиусом оболочки приведены на рисунках 3.7, 3.8. На рисунке 3.7 изображены кривые изменения радиальных перемещений вдоль оси при различных значениях радиуса. Зависимость максимального прогиба от радиуса показана на рисунке 3.8. Как видно из графика, при увеличении радиуса уровень прогибов нелинейно возрастает, причем характер зависимости близок к параболическому.

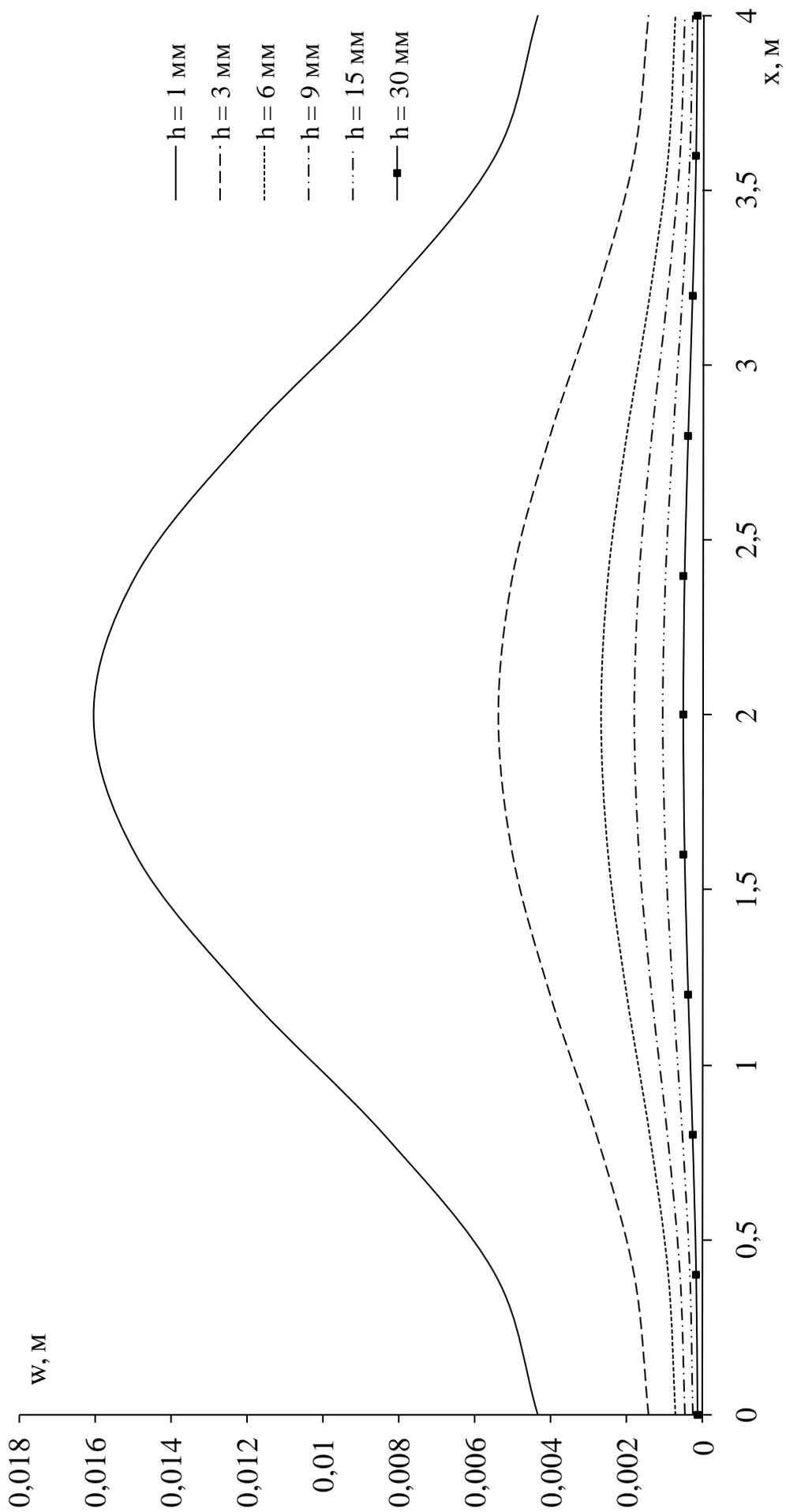


Рисунок 3.5 – Изменение прогиба котла давления по длине при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени. Варьирование толщиной оболочки

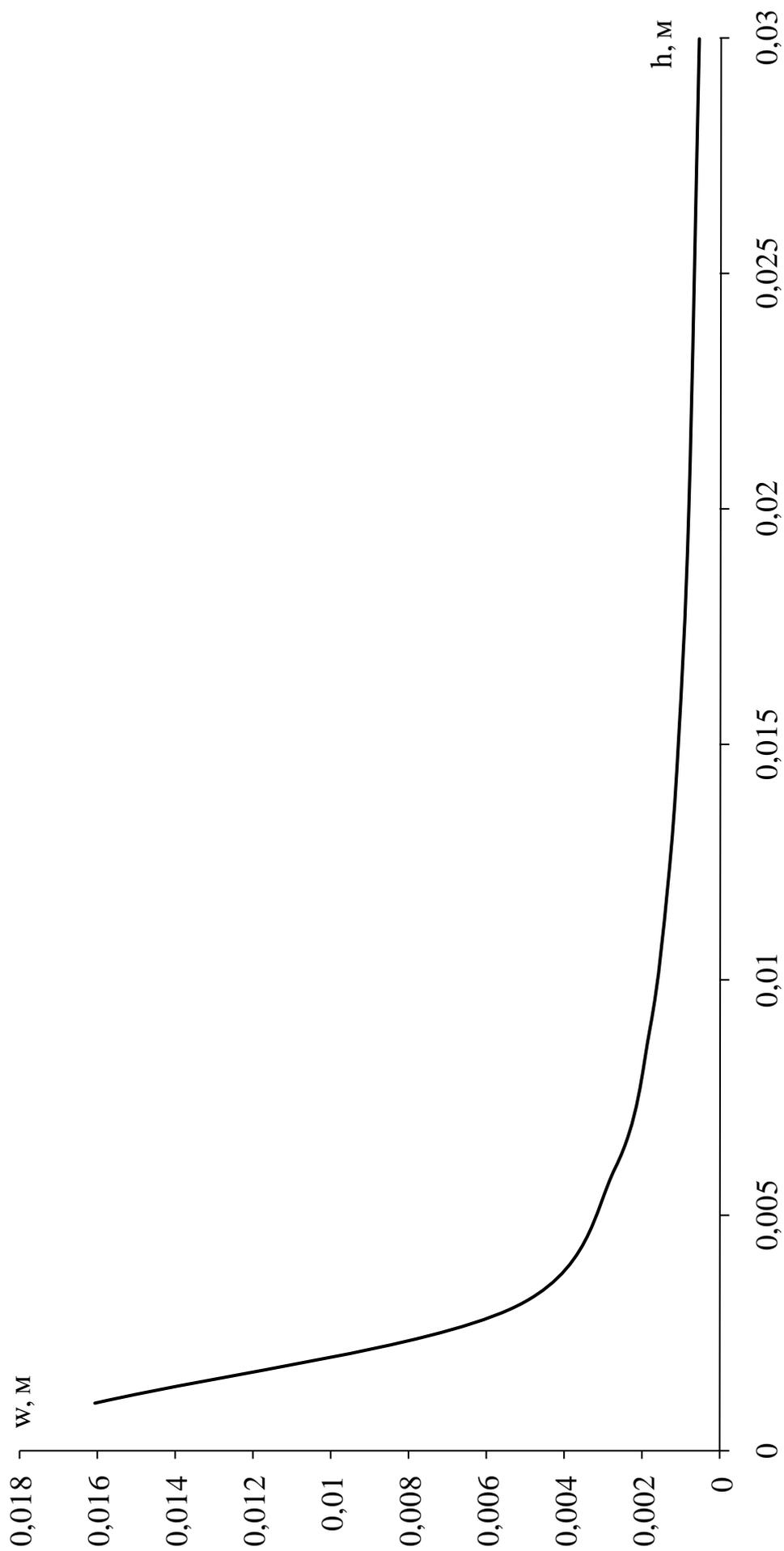


Рисунок 3.6 – Зависимость максимального прогиба котла давления от толщины оболочки при локальном снижении жесткости в очаге пламени

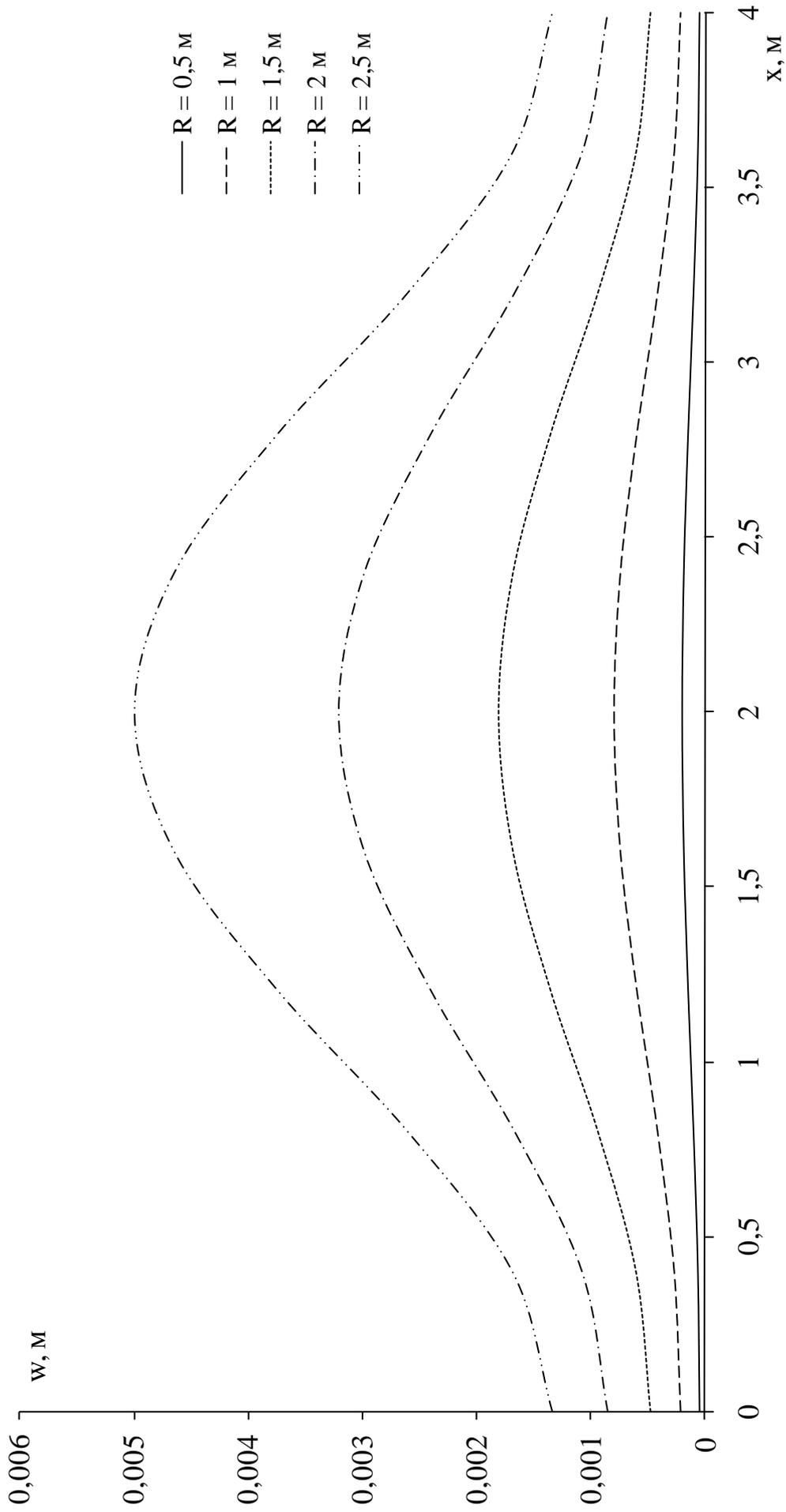


Рисунок 3.7 – Изменение прогиба котла давления по длине при локальном снижении жесткости оболочек в очаге пламени. Варьирование радиусом оболочек

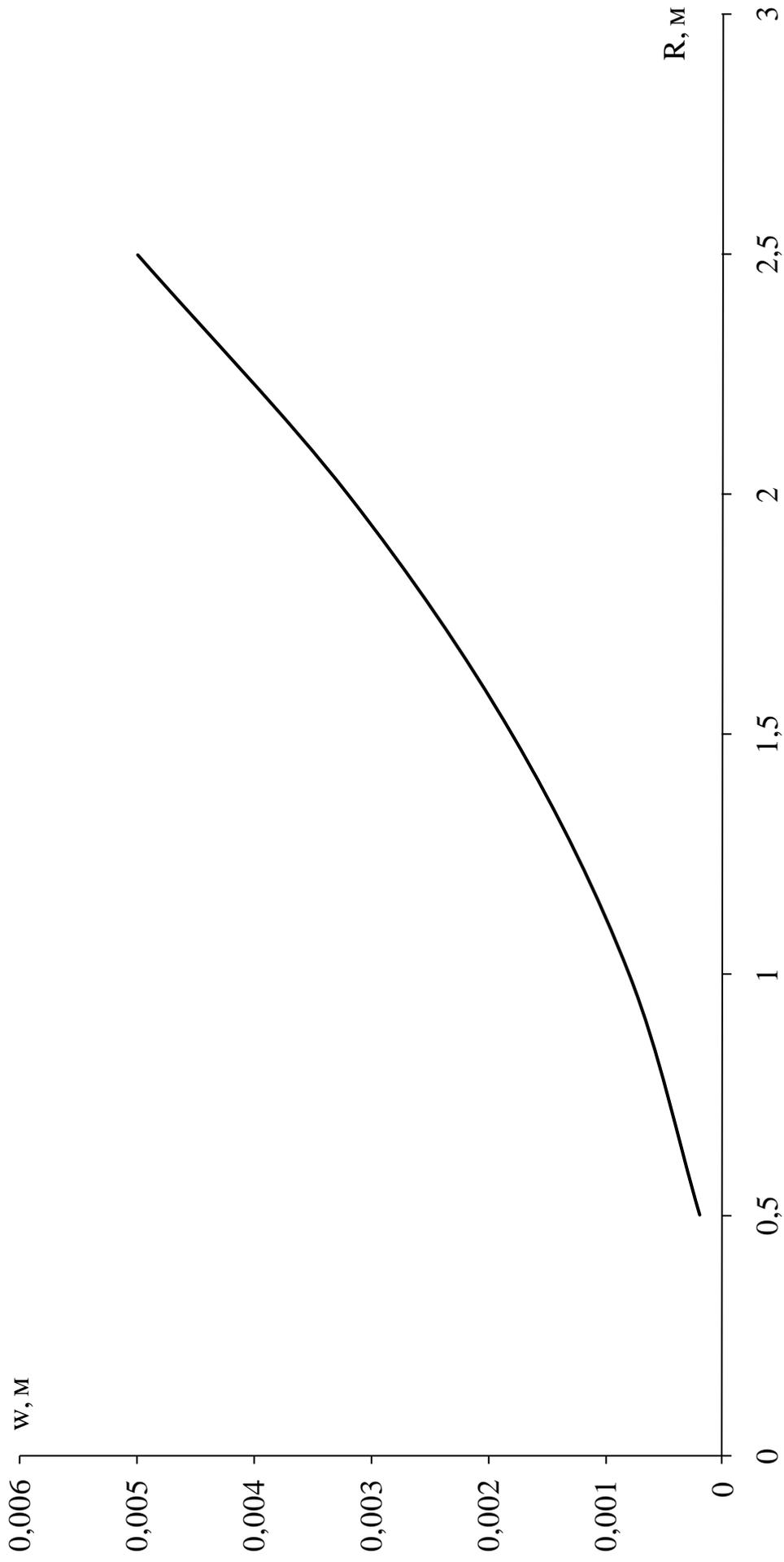


Рисунок 3.8 – Зависимость максимального прогиба котла давления от радиуса оболочки при локальном снижении жесткости в очаге пламени

3.5 Выводы по разделу 3

1. В настоящем разделе разработана методика определения состояния котла цистерны, вызванного действием внутреннего давления, при локальном изменении механических свойств материала котла в очаге пламени.

Методика основана на применении нелинейной теории оболочек и вариационного принципа Лагранжа. Расчетные зависимости получены в явном виде.

2. Принятая аппроксимация перемещений, близкая к действительной, позволила для рассматриваемого класса оболочечных конструкций исключить необходимость применения МКЭ.

3. Разработаны алгоритм и программа определения состояния котла давления при локальном действии пламени, эффективные при реализации на ЭВМ.

4. Проведено исследование состояния котла нефтебензиновой цистерны при действии внутреннего давления в очаге пламени. Максимальное дополнительное радиальное перемещение оболочки от воздействия пламени составляет 1,8 мм и имеет место в середине очага.

5. Исследовано влияние на значение максимального радиального перемещения различных параметров расчетной схемы: температуры, толщины и радиуса оболочки.

4 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧКИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ПОВЫШЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1 Постановка задачи и принятые допущения

Исследовалась проблема устойчивости оболочки котла цистерны при локальном повышении температуры (термоустойчивость). Нагревание тел вызывает их расширение, то есть появление деформаций. В используемой в настоящей работе теории оболочек это выражается в чисто тепловых деформациях в продольном и окружном направлениях. Если, нагрев носит локальный характер, менее нагретые области препятствуют свободному деформированию оболочки, что вызывает появление сжимающих внутренних усилий и напряжений.

Как показали предварительные расчеты, перепады температуры по толщине оболочке незначительны, и ими можно пренебречь. В этом случае в оболочке возникают только внутренние усилия растяжения-сжатия, то есть напряженно-деформированное состояние носит безмоментный характер.

Однако при достаточно высоком уровне сжимающих внутренних усилий состояние объекта скачкообразно изменяется. При этом срединная поверхность оболочки изменяет кривизну и появляются изгибающие моменты. Это явление называется потерей устойчивости.

Задачей расчета является определение критического (минимального по модулю) значения сжимающих сил, при котором происходит потеря устойчивости. В случае воздействия неравномерного температурного поля задача сводится к определению критического значения изменения температуры, соответствующего началу потери устойчивости. Внутренние усилия при этом являются функциями изменения температуры [76, 84, 85].

Было исследовано два варианта конструкции: пластина и оболочка, имеющая начальную кривизну (что характерно для котла цистерны).

В настоящей методике, помимо допущений, принятых в разделах 2 и 3, приняты следующие допущения.

4.1.1. Состояние оболочки при оценке устойчивости описывается с применением моментной теории оболочек [75].

4.1.2. Температурное поле, воздействующее на котел, полагается равномерным и локальным в прямоугольной области оболочки.

4.1.3. Потеря устойчивости характеризуется появлением в оболочке изгибающих моментов, обусловленных действием мембранных сил с плечом, равным радиальному перемещению оболочки.

4.1.4. Границы исследуемой области оболочки (пластины) препятствуют любым перемещениям, что можно представлять, как жесткие заделки.

4.2 Расчет пластины

Рассмотрим пластину как частный случай оболочки, которая имеет нулевую начальную кривизну.

Для пластины примем декартову систему координат $Oxyz$.

4.2.1 Исходные уравнения

Рассмотрим начальную стадию нагрева пластины. При изменении температуры пластины по сравнению с исходным состоянием в ней появляются чисто тепловые деформации (2.5), которые, с учетом допущения 2.1.9, вычисляются по формулам (2.6).

До потери устойчивости другие виды деформаций пластины отсутствуют. Так как на начальной стадии обычные деформации отсутствуют, появление чисто тепловых деформаций приводит к возникновению в пластине внутренних сжимающих усилий:

$$N_1 = N_2 = -B(1 + \mu)\varepsilon_T. \quad (4.1)$$

До потери устойчивости эти усилия направлены по координатным осям срединной поверхности пластины в ее исходном, неискривлённом состоянии, и нагруженность ограничивается наличием сжимающих усилий N_1 , N_2 и соответствующих им напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{N_1}{a}; \\ \sigma_{22} &= \frac{N_2}{b}. \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Рассмотрим далее состояние пластины после потери устойчивости.

В момент потери устойчивости тонкостенный фрагмент пластины получает перемещения w , нормальные к срединной поверхности. В результате появляются деформации изменения кривизны и кручения (4.3):

$$\left. \begin{aligned} \kappa_1 &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \\ \kappa_2 &= -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \\ \tau &= -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

и соответствующие им моменты (4.4):

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= D(\kappa_1 + \mu\kappa_2); \\ M_2 &= D(\kappa_2 + \mu\kappa_1); \\ H &= D_c \tau. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

Кроме того, теперь сжимающие усилия (4.2) в каждой точке получают плечо, равное радиальному перемещению w , и таким образом создают дополнительные изгибающие моменты:

$$\left. \begin{aligned} M_1^* &= N_1 w; \\ M_2^* &= N_2 w, \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

где M_1^* , M_2^* – дополнительные изгибающие моменты, векторы которых направлены по соответствующим осям координат;

w – радиальные перемещения оболочки.

4.2.2 Вариационный метод и аппроксимация

Для решения задачи примем вариационный метод в виде принципа Лагранжа [75], уравнение которого аналогично (3.5):

$$\frac{d\Pi}{dw} - \frac{dA}{dw} = 0. \quad (4.6)$$

Составим уравнение (4.6) для состояния пластины после потери устойчивости как альтернативного неискривленному состоянию начальной стадии нагрева.

Выразим потенциальную энергию деформации Π , входящую в уравнение (4.6), с учетом действующих в пластине при потере устойчивости внутренних усилий:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[(M_1 + M_1^*) \kappa_1 + (M_2 + M_2^*) \kappa_2 + 2H\tau \right] dx dy. \quad (4.7)$$

Так как внешнее воздействие при расчете на устойчивость учитывается уже в потенциальной энергии деформации, то работа внешних сил равна нулю: $A = 0$.

Подставим в выражение (4.7) соотношения (4.4) и (4.5):

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left[D\kappa_1^2 + D\kappa_2^2 + 2D\mu\kappa_1\kappa_2 + 2D_c\tau^2 - \right. \\ \left. - B(1+\mu)\varepsilon_T w\kappa_1 - B(1+\mu)\varepsilon_T w\kappa_2 \right] dx dy.$$

Примем аппроксимацию для радиального перемещения, учитывая граничные условия пластины (допущение 4.1.4):

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} w_m \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi y}{b}, \quad (4.8)$$

где m – номер члена ряда перемещений;

w_m – коэффициент члена ряда с номером m .

4.2.3 Определение критической температуры

Подставим аппроксимацию (4.8) в геометрические соотношения (4.3):

$$\left. \begin{aligned} \kappa_1 &= - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2m^2\pi^2}{a^2} w_m \cos \frac{2m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi y}{b}; \\ \kappa_2 &= - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2m^2\pi^2}{b^2} w_m \sin^2 \frac{2m\pi x}{a} \cos \frac{2m\pi y}{b}; \\ \tau &= \frac{m^2\pi^2}{ab} w_m \sin \frac{2m\pi x}{a} \sin \frac{2m\pi y}{b}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Подставим (4.8) и (4.9) в выражение (4.7) для потенциальной энергии, откуда после интегрирования получим:

$$\begin{aligned} \Pi = \sum \frac{1}{2} \left[4Dm^4 \pi^4 \left(\frac{3ab}{16a^4} + \frac{3ab}{16b^4} + \frac{ab}{8a^2b^2} \right) - \right. \\ \left. - B(1 + \mu)m^2 \pi^2 \frac{3ab}{16} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \alpha_T \Delta T \right] w_m^2. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Таким образом, потенциальная энергия деформации выразилась через коэффициенты w_m ряда аппроксимации перемещений. Поэтому при составлении разрешающей системы уравнений, в соответствии с принципом Лагранжа (4.5), следует вычислять производные потенциальной энергии по w_m $\left(\frac{\partial \Pi}{\partial w_m} = 0 \right)$.

С учетом выражения (4.10) получим систему, состоящую из уравнений, записанных для каждого члена ряда m :

$$\begin{aligned} 4Dm^4 \pi^4 \left(\frac{3ab}{16a^4} + \frac{3ab}{16b^4} + \frac{ab}{8a^2b^2} \right) w_m = \\ = B(1 + \mu)m^2 \pi^2 \frac{3ab}{16} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \alpha_T \Delta T w_m. \end{aligned} \quad (4.11)$$

По физическому смыслу левая часть уравнения (4.11) представляет собой критическое значение обобщенной силы, а правая часть – ее фактическую величину, зависящую от изменения температуры ΔT . Из решения уравнения (4.11) находилось критическое значение ΔT , соответствующее началу потери устойчивости.

ΔT , соответствующее началу потери устойчивости:

$$\Delta T_{кр} = \frac{h^2 m^2 \pi^2}{3(1 + \mu) \alpha_T} \frac{3a^4 + 2a^2 b^2 + 3b^4}{a^2 b^2 (a^2 + b^2)}. \quad (4.12)$$

В результате имеем спектр критических значений температуры, соответствующих каждому члену ряда перемещений с номером m . При этом очевидно, что критическое состояние наступит уже при наименьшем из полученных значений (4.12), то есть для первого члена ряда: $m = 1$:

$$\Delta T_{кр} = \frac{h^2 \pi^2}{3(1 + \mu)\alpha_T} \frac{3a^4 + 2a^2b^2 + 3b^4}{a^2b^2(a^2 + b^2)}. \quad (4.13)$$

4.3 Особенности поведения цилиндрической оболочки котла цистерны

Для оболочки, имеющей начальную кривизну, в дополнение к исходным уравнениям пластины записываются соотношения, связанные с растяжением-сжатием.

Рассмотрим цилиндрическую часть котла цистерны и примем для нее цилиндрическую систему координат (см. рисунок 2.1).

Геометрические соотношения оболочки, помимо уравнений (4.3), включают дополнительное соотношение:

$$\varepsilon_2 = \frac{w}{R}. \quad (4.14)$$

Во всех прочих соотношениях необходимо положить $y = R\beta$.

Физические соотношения, с учетом (4.14), которые должны быть добавлены к уравнениям (4.4), имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= -B(1 + \mu)\varepsilon_T; \\ N_2 &= B[\varepsilon_2 - (1 + \mu)\varepsilon_T]. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Тогда потенциальная энергия деформации в уравнении (4.7) будет иметь дополнительный член:

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [N_2 \varepsilon_2 + (M_1 + M_1^*) \kappa_1 + \\ &+ (M_2 + M_2^*) \kappa_2 + 2H\tau] R d\beta dx, \end{aligned} \quad (4.16)$$

где a – длина исследуемой зоны вдоль образующей;

b – угловой размер исследуемой зоны, в частности, для замкнутой цилиндрической оболочки, характерной для котла цистерны, следует принять $b=2\pi$.

Подставим в потенциальную энергию (4.16) физические соотношения (4.4), (4.5) и (4.15):

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b & \left[B\varepsilon_2^2 - B\varepsilon_2(1+\mu)\varepsilon_T + D\kappa_1^2 + D\kappa_2^2 + \right. \\ & + 2D\mu\kappa_1\kappa_2 + 2D_c\tau^2 + B\mu\varepsilon_2 w\kappa_1 - \\ & \left. - B(1+\mu)\varepsilon_T w\kappa_1 + B\varepsilon_2 w\kappa_2 - B(1+\mu)\varepsilon_T\kappa_2 \right] R d\beta dx \end{aligned} \quad (4.17)$$

Примем аппроксимацию перемещений аналогичную случаю пластины (4.8). С учетом принятой системы координат аппроксимация имеет следующий вид:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} w_m \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi R\beta}{b}. \quad (4.18)$$

Подставим аппроксимацию (4.18) в выражение (4.17) и проинтегрируем:

$$\begin{aligned}
\Pi = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{2} & \left[B\mu 2m^2 \pi^2 \frac{5abR}{64} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) w_m^3 + \right. \\
& + 4Dm^4 \pi^4 \left(\frac{3abR}{16a^4} + \frac{3abR}{16R^4 b^4} + \frac{abR}{8R^2 a^2 b^2} \right) w_m^2 - \\
& - B(1 + \mu)m^2 \pi^2 \frac{3abR}{16} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) \alpha_T \Delta T w_m^2 - \\
& \left. - B(1 + \mu) \frac{abR}{4} \alpha_T \Delta T w_m \right]. \tag{4.19}
\end{aligned}$$

Подставим полученное выражение (4.19) в условие (4.6), в соответствии с принципом Лагранжа, и получим окончательно следующее уравнение:

$$\begin{aligned}
15m^2 \pi^2 & \left(\frac{\mu}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) w_m^2 + \frac{3}{R} w_m + \\
& + 4Rh^2 m^4 \pi^4 \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{R^4 b^4} + \frac{2}{3R^2 a^2 b^2} \right) w_m - \\
& - 12R(1 + \mu)m^2 \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) \alpha_T \Delta T w_m - \\
& - 8(1 + \mu) \alpha_T \Delta T = 0. \tag{4.20}
\end{aligned}$$

Таким образом, для случая цилиндрической оболочки имеем квадратное уравнение относительно каждого коэффициента w_m ряда перемещений. При любом заданном значении температуры оболочка получает перемещение, определяемое из решения уравнения (4.20) для каждого члена ряда с последующим суммированием (4.18).

При этом понятие потери устойчивости для выпуклой оболочки теряет смысл, так как оболочка при повышении температуры сразу получает изменение кривизны.

Это можно также интерпретировать таким образом, что выпуклая оболочка теряет устойчивость сразу, в самом начале повышения температуры.

Следует отметить, что в условиях реальной аварийной ситуации, связанной с пожаром, более адекватное представление о состоянии котла цистерны после потери устойчивости можно получить, учитывая при расчете нелинейные деформации растяжения-сжатия. Соответствующая методика приведена в разделе 2 настоящей работы.

4.4 Результаты расчетов по оценке устойчивости

На основе методики, разработанной в настоящем разделе, были выполнены расчеты по оценке устойчивости пластин. Исследовались стальные пластины (Ст. 3) квадратной формы, имеющие следующие базовые размеры: длины сторон $a=b=2$ м; толщина $h=9$ мм. Было определено критическое значение $\Delta T_{кр}$ повышения температуры, при котором может произойти потеря устойчивости, которое составило $170,6$ °С.

Было также исследовано влияние на $\Delta T_{кр}$ геометрических размеров квадратной пластины: длины a стороны (см. рисунок 4.1) и толщины h (см. рисунок 4.2).

Как видно из графиков, при увеличении размеров пластины критическое значение изменения температуры резко падает, причем зависимость близка к гиперболической. От толщины пластины критическое изменение температуры зависит по квадратичному закону. Полученные результаты соответствуют физической картине потере устойчивости и качественно подтверждаются практическими наблюдениями.

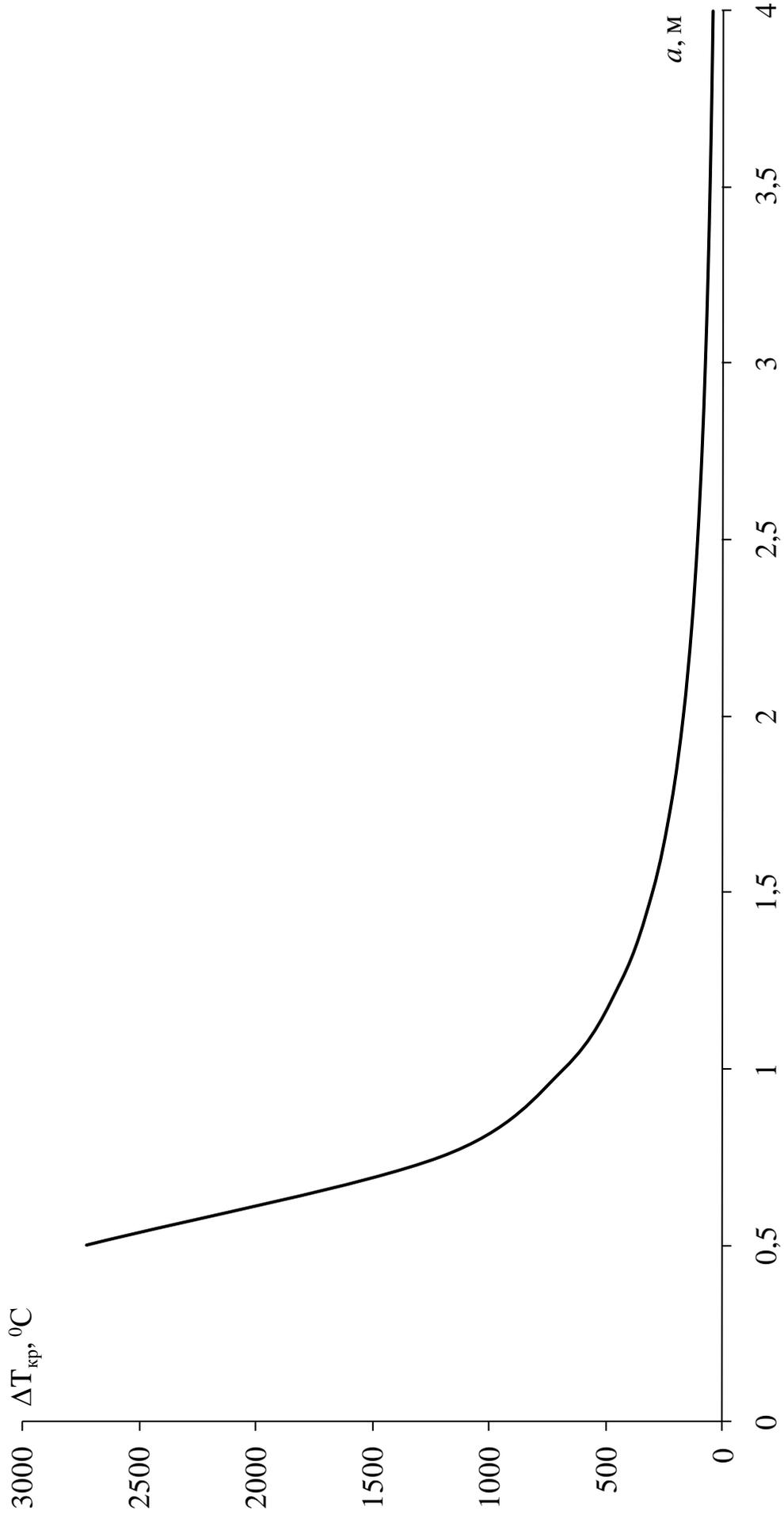


Рисунок 4.1 – Зависимость критического изменения температуры от размеров пластины

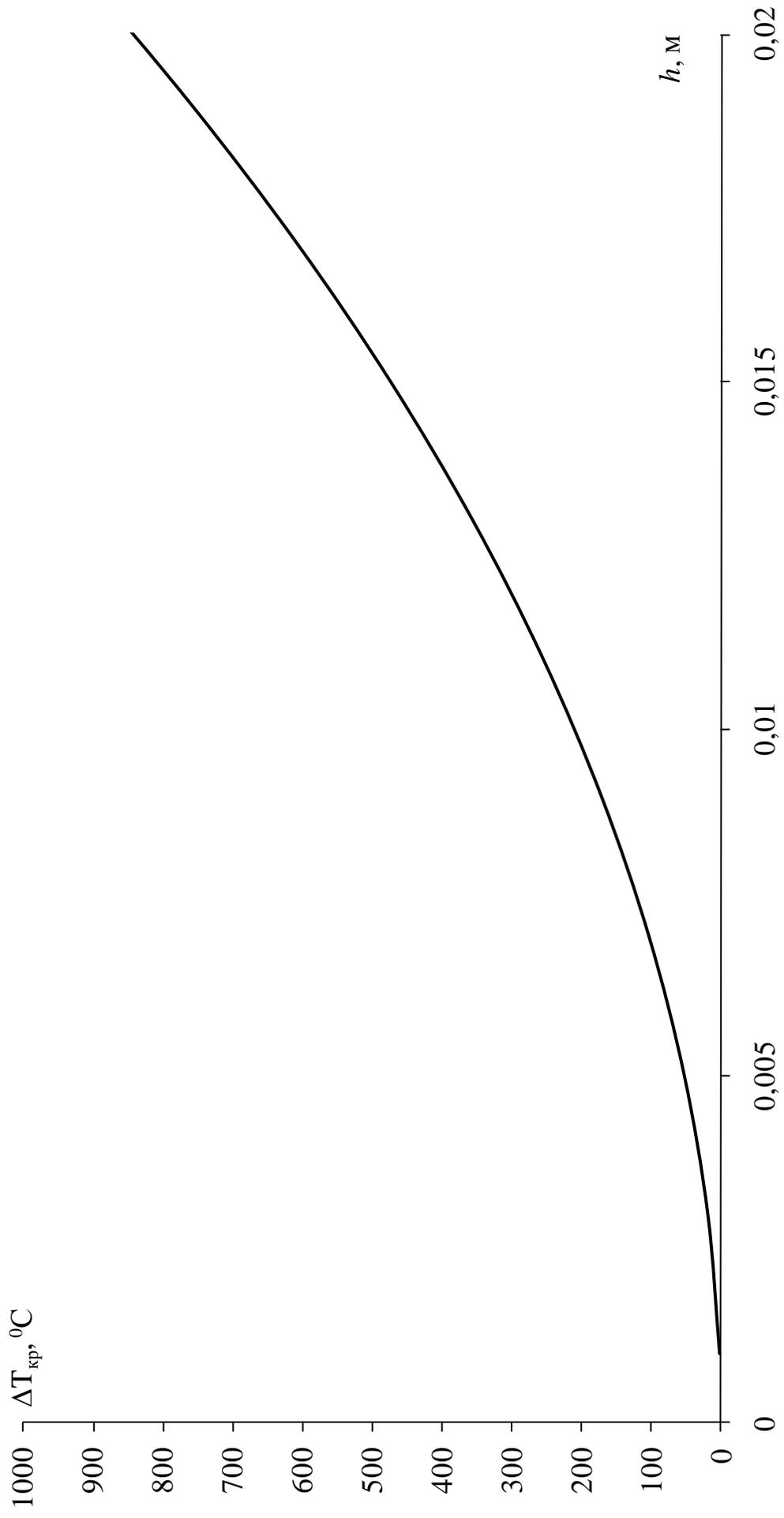


Рисунок 4.2 – Зависимость критического изменения температуры от толщины пластины

4.5 Выводы по разделу 4

1. Разработана методика оценки устойчивости пластины при локальном повышении температуры [82, 86].

2. Исследована проблема термоустойчивости для случаев пластины и оболочки. Критическое изменение температуры для случая пластины при базовом варианте составило 170,6 °С.

3. Для случая выпуклой оболочки котла цистерны сделан вывод о том, что при повышении температуры процесс изменения кривизны происходит непрерывно, а для перехода пластины из плоского состояния срединной поверхности к искривленному происходит скачкообразно (потеря устойчивости).

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕРАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА

Для оценки достоверности разработанной в настоящей диссертации методики определения состояния оболочки, а также свойств огнезащитного покрытия СГК-2, предлагаемого для защиты котла цистерны от действия открытого пламени, был проведен эксперимент по определению состояния моделей тонких пластин.

Идея данного эксперимента принадлежит профессору Филиппову В.Н. Эксперимент проводился параллельно с экспериментальным исследованием температурного поля [74, 80], выполненным при участии Головина В.В. Кроме того, при теоретическом определении состояния оболочки использовались результаты экспериментального определения температурного поля.

5.1 Схема опытной установки

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 5.1. Она была создана на ВНИИПО и включала опытную модель (образец) пластины 1, термопары 2, самопишущие потенциометры 3, газовую горелку 4, расходомер 5, вентиль-регулятор 6 подачи газа и баллон 7 с пропаном.

Испытывались опытные модели 1, изготовленные в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТе). Было проведено два эксперимента. В первом испытывалась модель без защиты, во втором – модель с предварительно нанесенным огнезащитным покрытием СГК-2 толщиной 3 мм, разработанным ГП «Московский институт теплотехники» (МИТ).

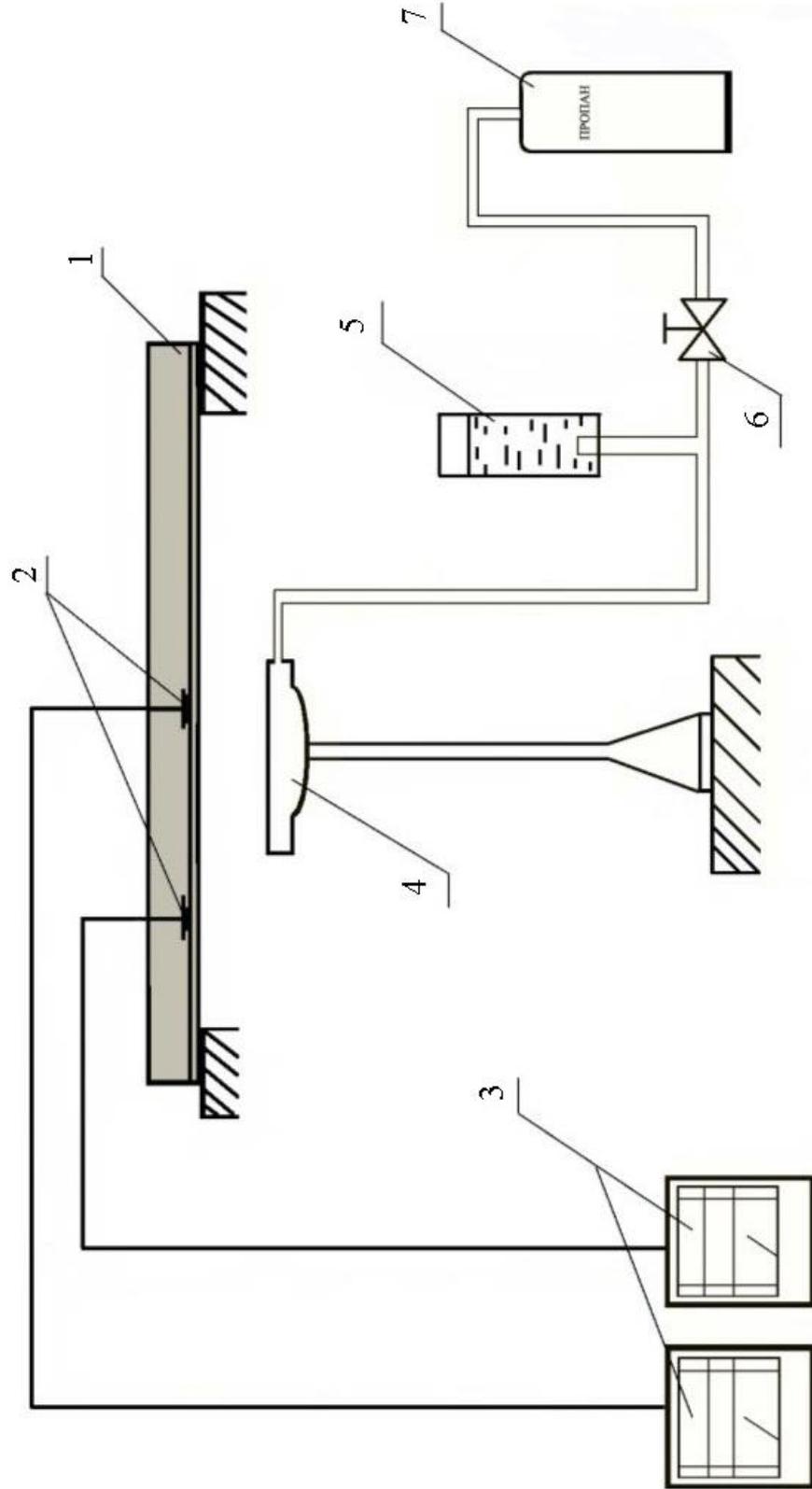


Рисунок 5.1 – Схема опытной установки

Каждая модель представляла собой квадратную пластину (см. схему на рисунке 5.2) из листовой стали (Ст3) толщиной 2 мм, по периметру приваренную к раме из уголка №7. На рисунке 5.2 также показаны координаты точек установки термопар 2а и 2б. В экспериментах модель располагалась горизонтально на опорах.

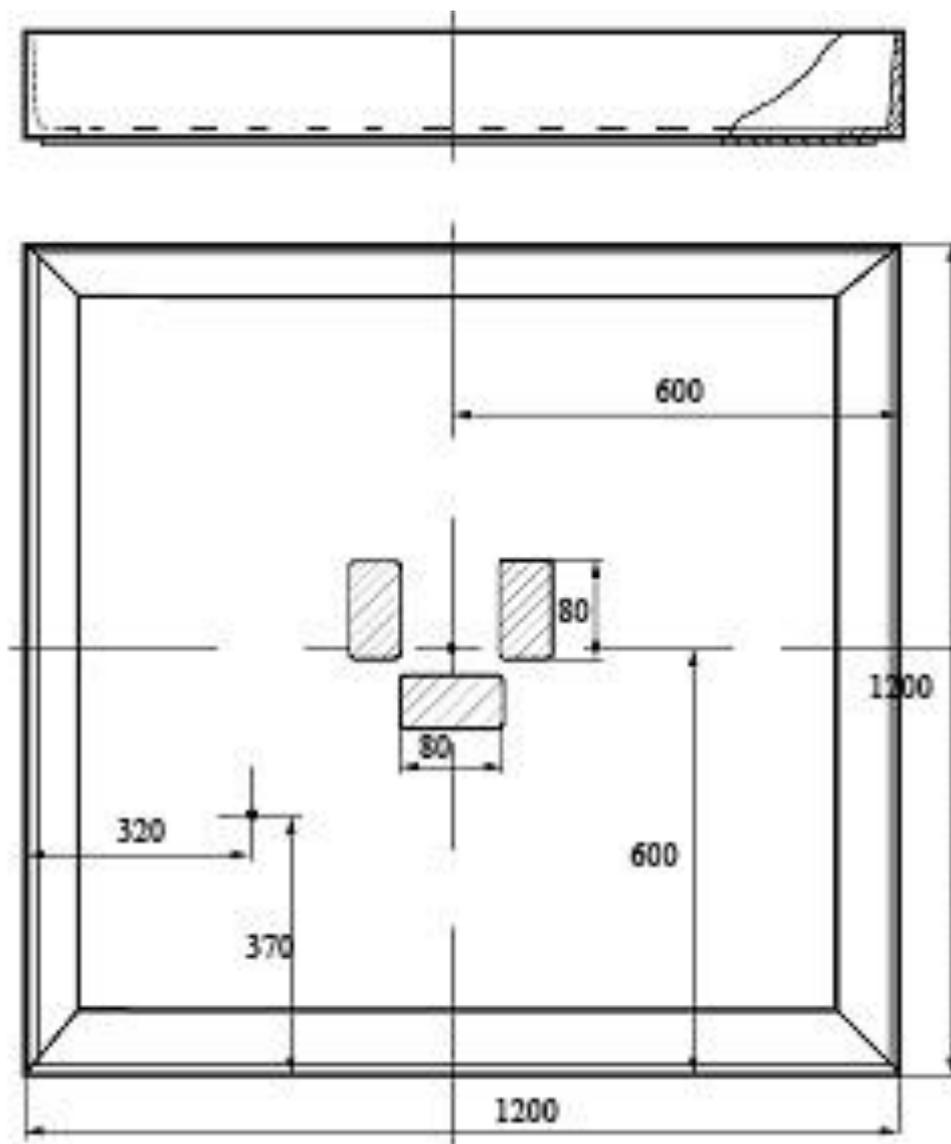


Рисунок 5.2 – Схема модели

Термопары 2 размещались на модели с обратной стороны от горелки, как показано на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Общий вид модели

Каждая термопара плотно фиксировалась на поверхности с помощью пружинного прижимного устройства. Используются термопары двух типов: хромель-алюмель (ХА) (центральная термопара 2а) и хромель-капель (ХК) (боковая термопара 2б).

Показания термопар снимались при помощи самопишущих потенциометров типа КСП-4 (рисунок 5.4).

Пропановая горелка 4 с опорой размещалась под центральной частью опытного образца, как показано на рисунке 5.5. Форма выходной части (собственно горелки) была подобрана так, чтобы обеспечить максимально возможный тепловой поток к испытываемой оболочке. На рисунке 5.2 при помощи штриховки показана зона действия пламени от горелки. До начала экспериментов расстояние от горелки до нижней поверхности образца составляло 40 мм.



Рисунок 5.4 – Самопишущие потенциометры КСП-4

Газ (пропан) подавался к горелке от баллона 7 через вентиль 6, который использовался для задания теплового потока горелки с использованием показаний расходомера 5 (рисунок 5.1).



Рисунок 5.5 – Размещение пропановой горелки

5.2 Методика проведения эксперимента

Включалась протяжка потенциометров 3, открывался запорный вентиль 6 и зажигалась горелка 4 (рисунок 5.1). При помощи вентиля 6 устанавливался расход пропана 7 л/мин, который затем вручную поддерживался постоянным во время эксперимента. Таким образом обеспечивался практически постоянный тепловой поток, создаваемый горелкой.

После появления установившегося теплового режима (через 36 мин у модели без защитного покрытия) эксперименты были прекращены. Отключались приборы 3 и закрывался вентиль 6.

Нагрев моделей в ходе экспериментов сопровождался «выпучиванием» пластины вследствие появления тепловых деформаций.

Деформации моделей замерялись в 49 точках, равномерно распределенных по поверхности. Определялись нормальные перемещения оболочки. Для этого до начала эксперимента на каждый образец были нанесены отметки, в которых были определены начальные отклонения. В качестве базы для отсчета отклонений принята плоскость, образованная вершинами боковых полок уголков рамы. В период максимального разогрева нормальные отклонения оболочки замерялись вновь. Наконец, после остывания были произведены окончательные замеры отклонений каждого образца с целью выявления остаточных деформаций оболочки.

Процесс нагрева образца с покрытием СГК-2 (эксперимент № 2) имел некоторые особенности. В центральной зоне под действие пламени защитный слой существенно увеличился в объеме, приблизился к горелке, что резко снизило интенсивность горения. Для того, чтобы вновь увеличить тепловой поток к оболочке, опытный образец через 14 мин после начала эксперимента был дополнительно поднят над горелкой на 17 мм.

После появления установившегося режима были предприняты дополнительные действия с целью получения максимально возможной

температуры и, потенциально, разрушения защитного слоя. В момент 56 мин от начала нагрева была выключена вентиляция в помещении лаборатории, где проводился эксперимент. Это привело к снижению температуры из-за недостатка кислорода, для горения пропана.

Через 106 мин от начала эксперимента вытяжная вентиляция была включена вновь и обеспечена подача в помещение свежего воздуха через открытую дверь. Кроме того, была увеличена подача пропана к горелке до 9 л/мин. В результате температура лишь несколько повысилась и стабилизировалась на новом значении.

Наконец, в момент 115 мин была предпринята попытка разрушения защитного слоя путем ударов по модели. Однако все описанные действия не привели к сколько-нибудь заметным нарушениям защиты.

Через 137 мин от начала нагрева эксперимент на модели с покрытием был прекращен.

После проведения измерений на образцах была экспериментально определена температура пламени горелки, соответствующая условиям эксперимента, которая составила 1600 °С.

5.3 Обработка результатов эксперимента

Результаты экспериментов представляли собой ленты показаний потенциометров, образец которых приведен на рисунке 5.6.

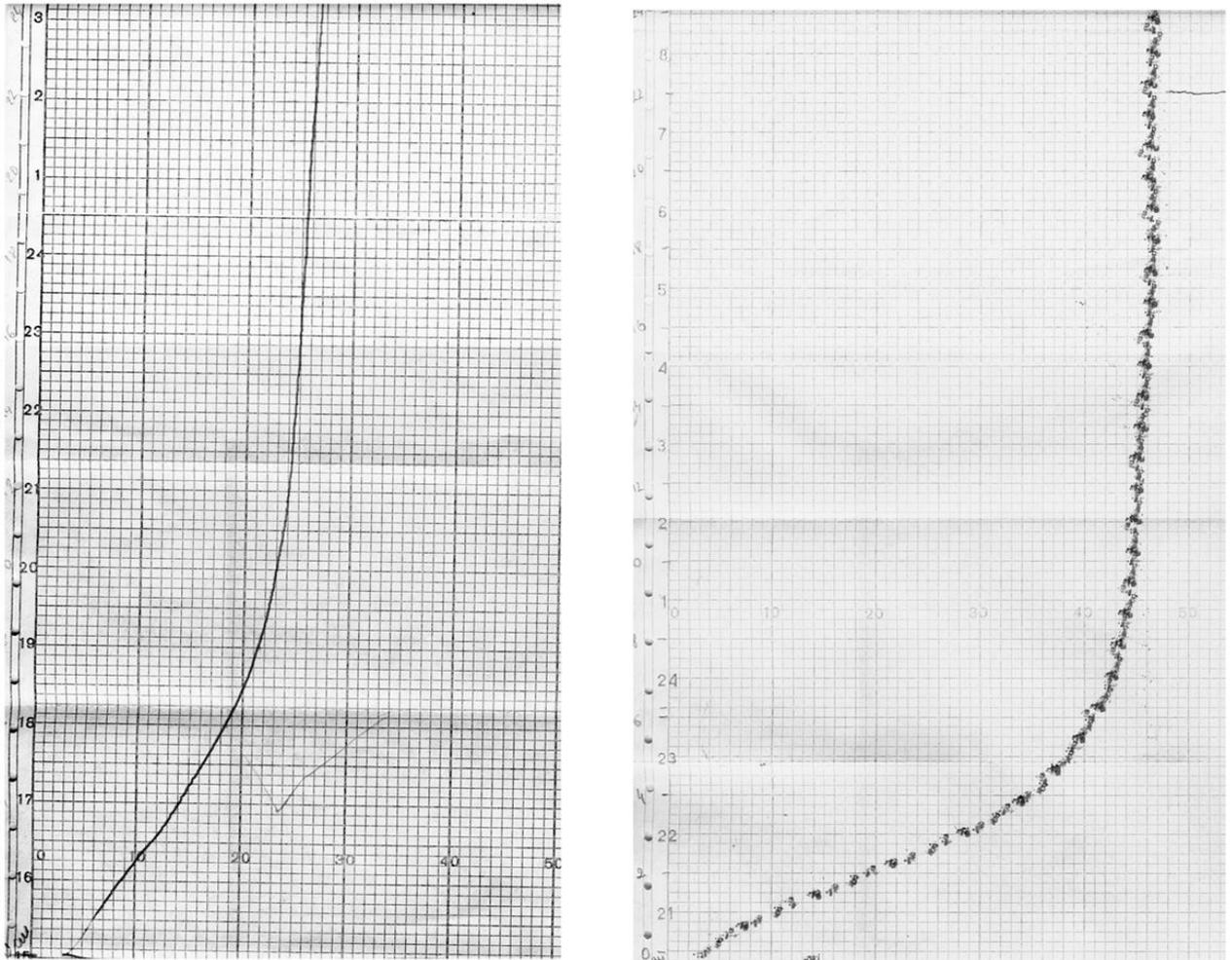


Рисунок 5.6 – Ленты показаний потенциометров

При обработке показаний на диаграммной ленте учитывались следующие характеристики приборов.

Общая ширина ленты (100 делений) соответствовала диапазону температур: у прибора КСП-4 ХА (центральная термопара) – 1300 °С, у прибора КСП-4 ХК (боковая термопара) – 600 °С. Скорость подачи бумажной ленты была

установлена: у прибора КСП-4 ХА (центральная термопара) – 1 см/мин, у прибора КСП-4 ХК (боковая термопара) – 1,2 см/мин. Начало координат при определении температур определялось исходя из начальной температуры 19 °С (начальные показания на ленте).

На основе этих соотношений пересчитывались показания как по температурам, так и по времени.

Температура в любой момент находилась по формуле:

$$T = 20 + (x - x_0) \frac{\Delta T}{100}, \quad (5.1)$$

где T – искомое значение температуры, °С;

x – показание потенциометра на ленте в делениях;

x_0 – начальное показание в делениях;

ΔT – диапазон измеряемых температур, °С.

Время от начала эксперимента для любой точки на ленте определялось по формуле:

$$t = \frac{\Delta y}{k_t}, \quad (5.2)$$

где t – искомое значение времени, мин;

Δy – расстояние от данной точки, до точки, соответствующей началу эксперимента, измеренное вдоль ленты, см;

k_t – скорость протяжки ленты потенциометра: для центральной термопары – 1 см/мин, для боковой термопары – 1,2 см/мин.

По результатам обработки показаний диаграммной ленты строились графики зависимости температуры от времени для центральной и боковой точек модели.

Кроме того, были составлены таблицы нормальных отклонений оболочки в заданных точках. Полученные результаты требовали обработки для того, чтобы получить искомые зависимости.

Тепловая деформация (нормальное перемещение, прогиб) Δw каждой точки образца находилась по формуле:

$$\Delta w = w_t - w_0, \quad (5.3)$$

где w_t – замеренное нормальное отклонение данной точки от базовой плоскости в максимально нагретом состоянии, см;

w_0 – остаточное отклонение данной точки от базовой плоскости, см.

Следует отметить, что модели имели значительные начальные и остаточные деформации, которые фиксировались, соответственно, до и после экспериментов. Уровень этих деформаций сопоставим с величинами тепловых деформаций в экспериментах.

Наличие начальных деформаций обусловлено технологией изготовления сварных моделей. Кроме того, имелись расхождения между начальными и конечными отклонениями, причем уровень отклонений после экспериментов оказался ниже, чем до экспериментов. Очевидно, что модели при их изготовлении приобрели начальные тепловые деформации. После эксперимента в охлажденной модели тепловые деформации, в том числе исходные, исчезали.

Исходя из сказанного, наиболее адекватное представление о тепловых деформациях можно получить, рассматривая процесс остывания моделей.

На основе вычисленных перемещений фиксированных точек образца было получено поле перемещений оболочки под действием теплового потока.

5.4 Результаты эксперимента

5.4.1 Температуры

Результаты измерения температур во времени, приведенные в работе [74], необходимы для расчетного моделирования состояния моделей.

На рисунке 5.7 показаны зависимости температуры от времени при нагреве модели без защитного покрытия. Сплошной линией показано изменение температуры центральной термопары, штриховой линией – боковой термопары.

Общий характер изменения температур на обоих графиках сходен. Выделяются три основных участка изменения температур:

- участок начального возрастания температуры, на котором вид графика близок к линейному;
- переходный (криволинейный) участок;
- участок изменения температуры, по характеру близкий к установившемуся (квазистационарный).

Рассмотрим характер изменения температур более подробно с учетом теплофизических процессов.

Подводимое к центральной части образца тепло идет, во-первых, на нагрев центральной части образца, находящейся в очаге пламени. Во-вторых, вследствие теплопроводности вдоль поверхности пластины происходит, нагрев более удаленных зон. В-третьих, часть тепла от нагретых частей оболочки через их поверхность передается воздуху. В-четвертых, выделяемое горелкой тепло идет на нагрев самой горелки и ее опоры. Наконец, в-пятых, тепло отводится воздухом и непосредственно, от самого пламени горелки.

Последние два фактора вносят искажения при определении теплового потока к модели, так как связаны с тем, что не все выделяемое тепло сообщается опытному образцу.

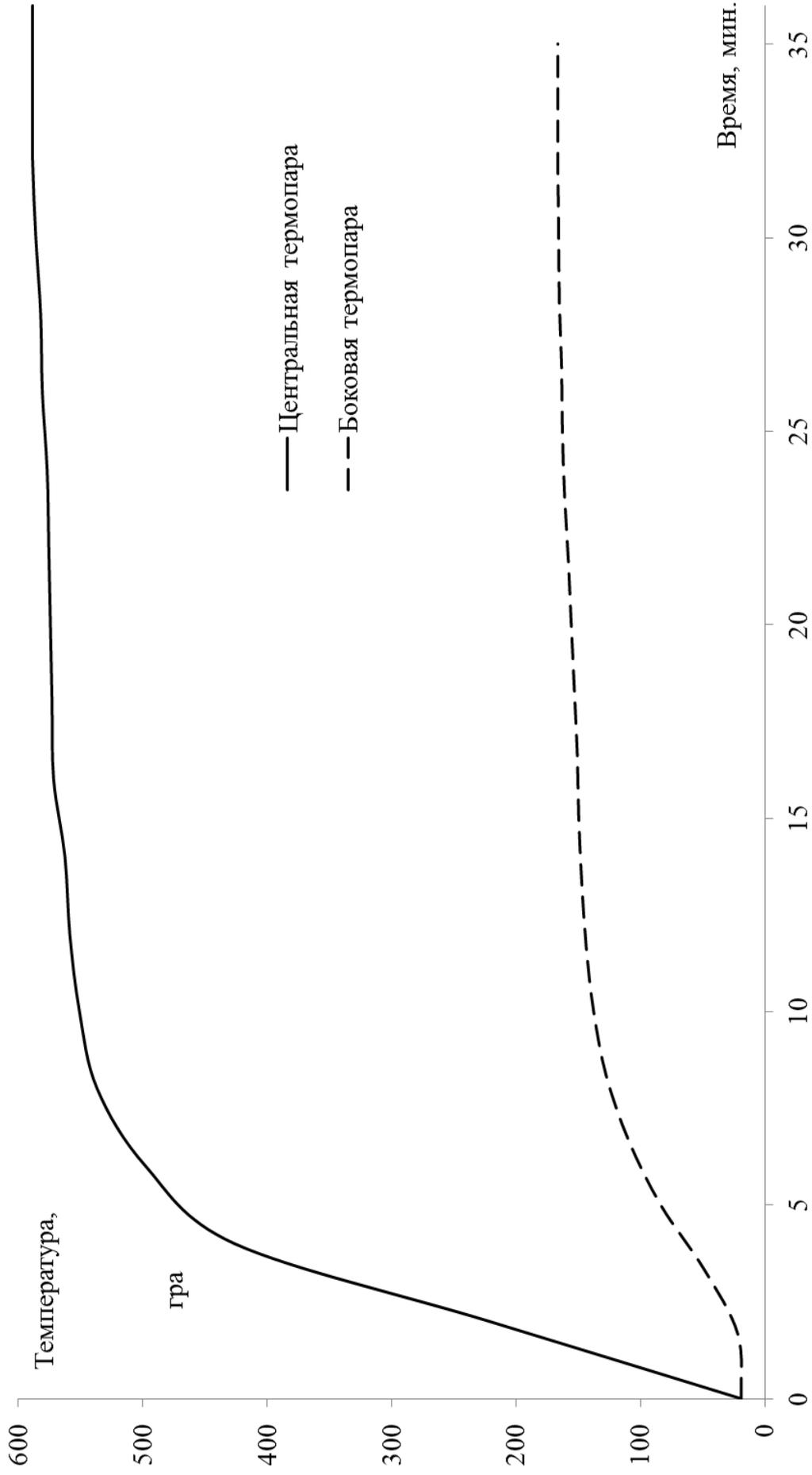


Рисунок 5.7 – Изменение во времени температур в модели без огнезащитного покрытия в очаге пламени

Кроме того, на интенсивность теплового воздействия влияет характер горения пропана. Он зависит от дополнительных факторов, из которых в качестве важнейших следует отметить следующие:

- подача (скорость расхода) пропана к горелке;
- расстояние от горелки до поверхности образца, зависящее от деформации оболочки;
- доступ кислорода (свежего воздуха) в зону горения, что зависит от интенсивности проветривания помещения.

В течение всего эксперимента № 1 подача газа поддерживалась на постоянном уровне 7 л/мин. Параметры вентиляции помещения также не изменялись (вытяжная вентиляция). Поэтому на результаты измерения температур в эксперименте на модели без покрытия влияло, главным образом, расстояние до горелки.

В начальный период теплового воздействия основная часть тепла идет на нагрев образца. Теплоотдача от оболочки к воздуху сравнительно невелика, так как зависит от температурного перепада между ними. Поэтому температура может быстро возрастать. Нагревается не только центральная зона, непосредственно взаимодействующая с очагом пламени, но нагрев распространяется и на прилежащие зоны через явление теплопроводности материала оболочки.

Со временем закон изменения температуры становится нелинейным. Это вызвано тем, что по мере увеличения температуры оболочки возрастает и доля тепла, отводимого от оболочки в окружающую среду, а доля тепла, идущего на разогрев оболочки снижается. В результате рост температуры замедляется.

Нелинейный участок завершается, когда температура перестает повышаться и фиксируется на наибольшем значении. В этот период происходит теплонасыщение, тепловые процессы приобретают установившийся характер. Подводимого тепла уже недостаточно для повышения температуры, и все оно отводится в окружающую среду.

Сравнивая уровни температур в различных точках, можно оценить распределение температуры по оболочке. Из сравнения графиков на рисунке 5.7 видно, что в любой момент температура вблизи очага пламени (сплошная линия) выше, чем температура в более удаленных точках (штриховая линия). Это объясняется направлением распространения тепла в пластине. Зоны, удаленные от очага пламени, получают меньший тепловой поток, чем зоны, на которые он непосредственно воздействует.

С этим связан и различный характер повышения температуры на начальном участке. Для центральной зоны температура повышается более круто, что можно объяснить и большим тепловым потоком, и более высокой теплоемкостью материала, которая зависит от температуры.

Кроме того, установившийся режим в центральной зоне наступает быстрее, чем в удаленной от центра. Температуры достигают уровня 95 % максимальных значений для центральной термопары через 12 мин, а для боковой – через 22 мин.

Максимальные значения температуры составили: для центральной термопары 589 °С, для боковой – 167 °С.

Второй, криволинейный, участок изменения температуры переходит к третьему, горизонтальному, участку (установившейся температуры) через продолжительный интервал незначительного повышения температуры длительностью около 20 мин. Эту особенность можно объяснить, если дополнительно учесть, что тепловая деформация модели оболочки приводит к увеличению расстояния от поверхности до горелки. В результате горение пропана становится несколько более интенсивным, что несколько повышает тепловой поток к образцу. Так как скорость деформации соответствует скорости повышения температуры, рост температуры вследствие описанного повышения теплового потока происходит значительно медленнее, чем в начальные периоды нагрева.

Повышение температуры и деформации оболочки со временем замедляется, и в определенный момент времени температуры устанавливаются на постоянных значениях.

На рисунке 5.8 приведен закон изменения температур при испытании образца с огнезащитным покрытием СГК-2. Сплошная линия соответствует центральной термопаре, штриховая – боковой термопаре.

После начального периода повышения на обеих кривых имеется участок понижения температуры. Это объясняется поведением огнезащитного слоя, который увеличился в объеме и начал затруднять процесс горения. Для восстановления исходных параметров горения модель была поднята на 17 мм.

Максимальные значения температуры составили: для центральной термопары 248 °С, для боковой – 151 °С.

Время достижения температурами значений 95 % от максимальных: 35 мин для центральной термопары и 106 мин – для боковой.

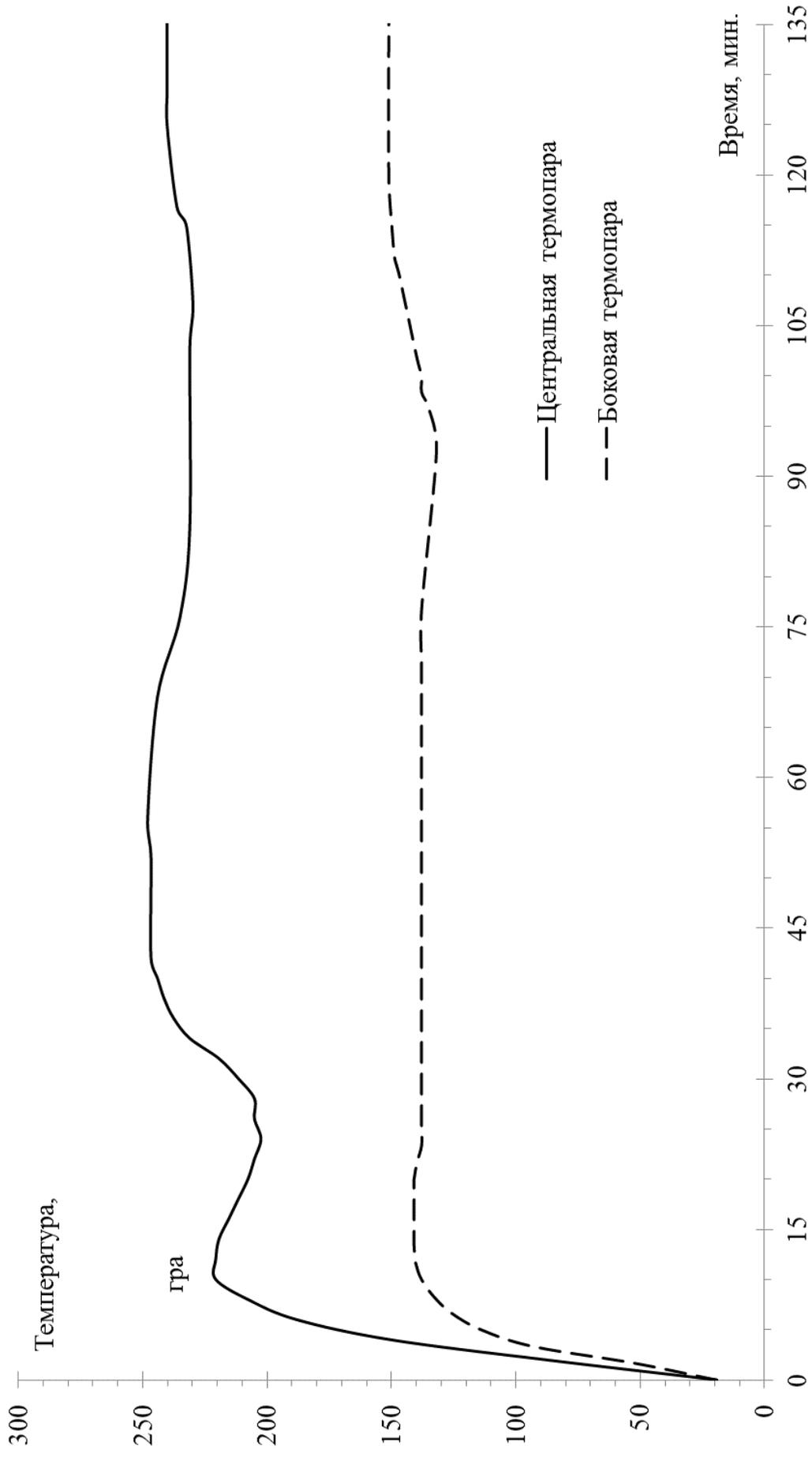


Рисунок 5.8 – Изменение во времени температур в модели с покрытием СГК-2 в очаге пламени

5.4.2 Тепловые деформации

В процессе эксперимента зафиксированы тепловые деформации пластины. Деформация имела характер «выпучивания» вверх, то есть в сторону, обратную расположению горелки. Теоретически, выпучивание при повышении температуры могло произойти в любую сторону. Более того, перепад температур по толщине стремится выгнуть центральную часть вниз. Однако имеет место еще один фактор – поток пламени и поток нагретого воздуха, направленные вверх, что создает определенное давление на нижнюю поверхность оболочки. Этого давления оказалось достаточно, чтобы задать направление деформации оболочки.

Косвенно можно сделать дополнительный вывод о несущественном влиянии температурного перепада по толщине оболочки.

На рисунке 5.9 показано поле прогибов модели без защитного покрытия, полученное как разница нормальных отклонений оболочки в горячем состоянии и после полного остывания. Наибольший прогиб имеет место в центральной зоне и составляет 24,1 мм. При удалении к краям модели прогибы убывают до нуля.

Деформации оболочки, зафиксированные в эксперименте, объясняются явлением теплового расширения материала. Причем зоны с разными температурами деформируются по-разному. Наибольшему расширению подвержена центральная зона, но ее свободному расширению препятствуют менее нагретые области и, в конце концов, рама, точки которой практически не перемещаются. Поэтому расширение оболочки возможно только за счет выпучивания, при котором преодолевается жесткость пластины.

На рисунке 5.10 приведено поле тепловых деформаций модели с огнезащитным покрытием СГК-2. Наибольшие прогибы зафиксированы в зоне действия очага пламени; к краям модели прогибы затухают. Максимальное значение составило 10,8 мм.

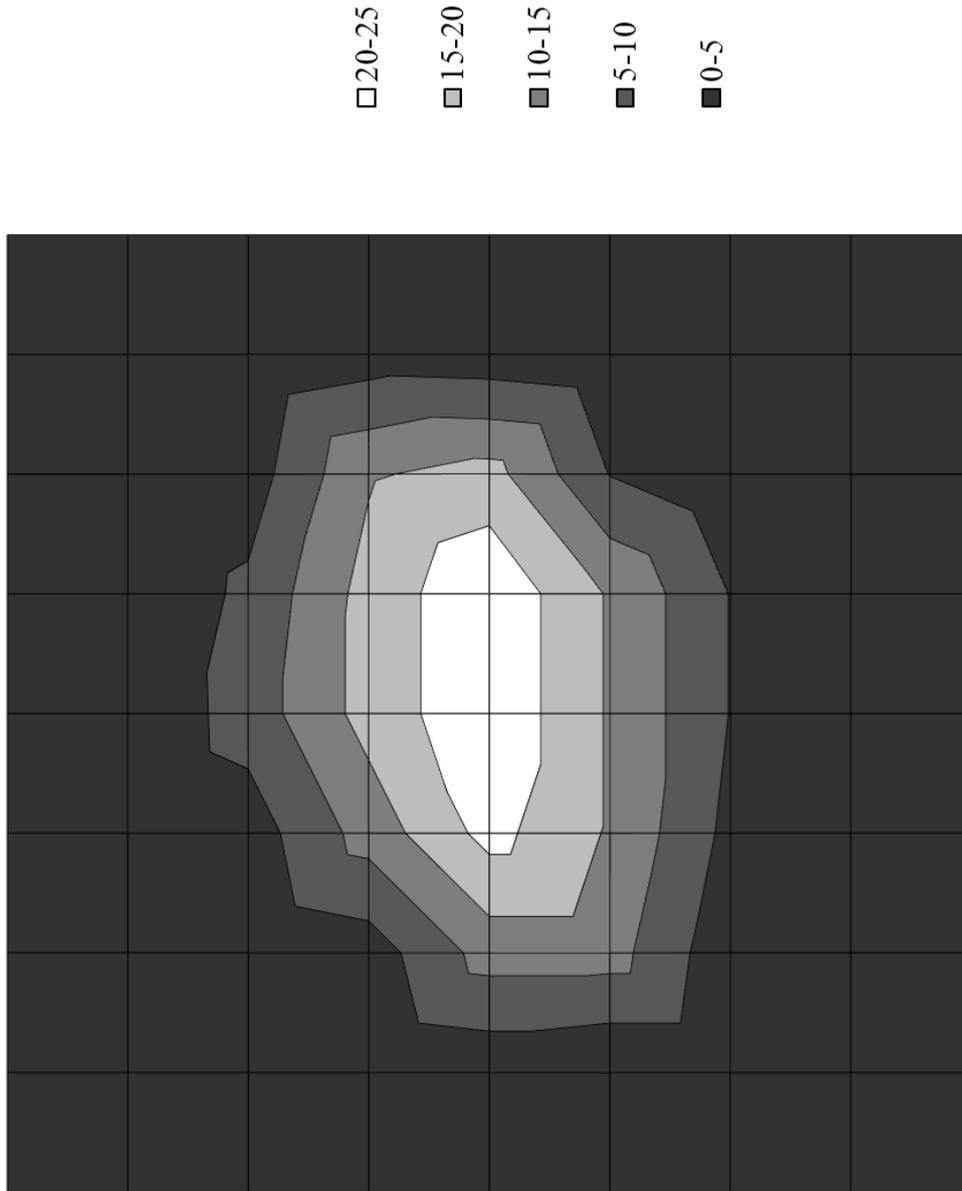


Рисунок 5.9 – Поле тепловых деформаций модели без защитного покрытия при остывании

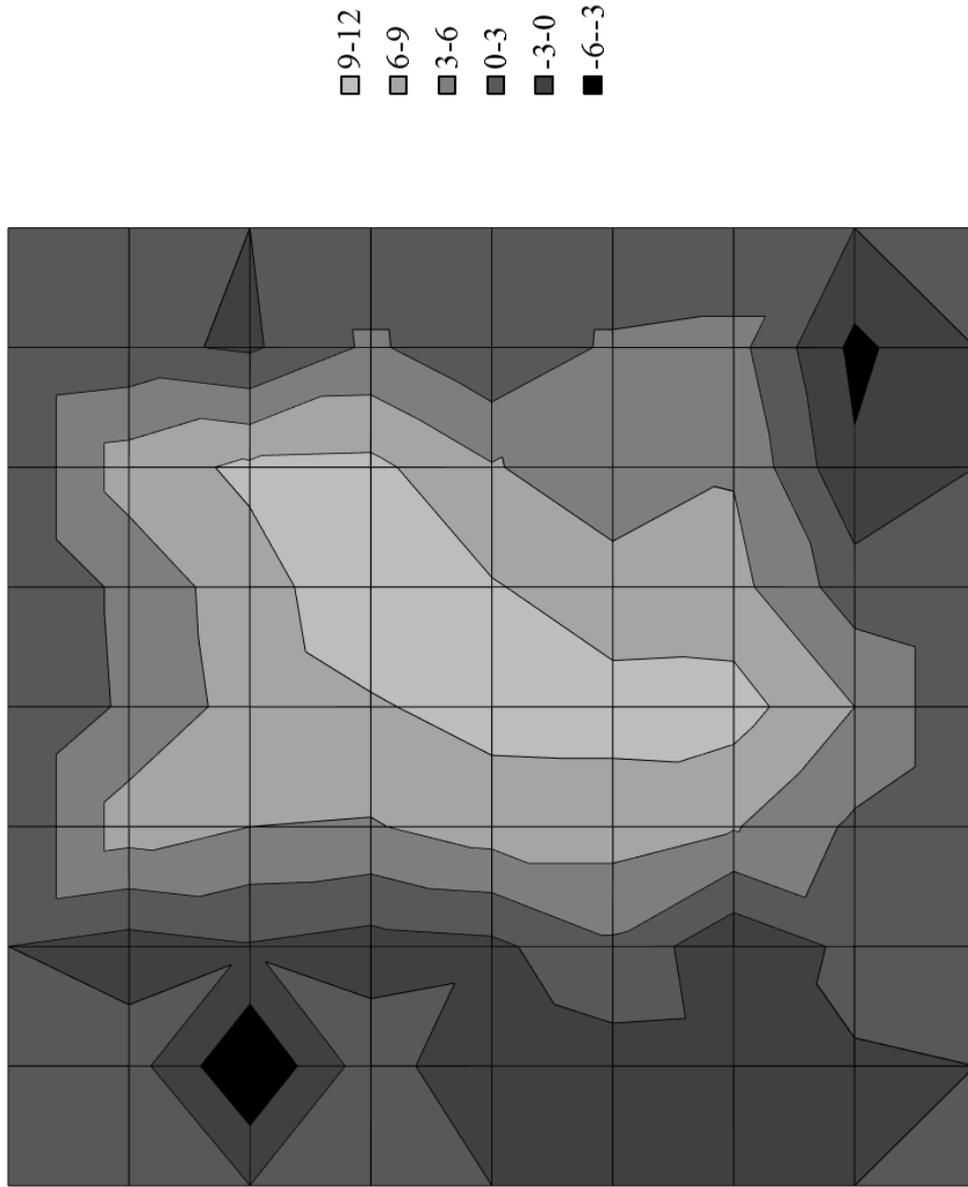


Рисунок 5.10 – Поле тепловых деформаций модели с покрытием СГК-2 при остывании

Сравнивая тепловые деформации в оболочке без защиты и с огнезащитным покрытием СГК-2, можно сделать вывод о том, что наличие защитного слоя существенно снижает уровень прогибов (в 2,2 раза) и других параметров, определяющих состояние объекта.

5.5 Сравнение результатов расчета и эксперимента

Сравнение результатов расчета и эксперимента для модели без защитного покрытия приведено на рисунках 5.11 – 5.12, а для модели с покрытием СГК-2 – на рисунках 5.13 – 5.14. Сплошной линией изображены экспериментальные данные, штриховой линией – данные расчета.

Из графиков видно общее соответствие результатов. Нерегулярность изменения прогиба в эксперименте объясняется характером распределения температур, вызванного реальной формой очагов пламени от горелки. Кроме того, неучет начальных сварочных деформаций мог вызвать дополнительную погрешность результатов расчета.

Относительное расхождение результатов расчета по сравнению с экспериментом по средней величине прогиба оказалось не более 19,5 %. Это говорит об удовлетворительном соответствии результатов, то есть о достаточной достоверности расчетных данных, получаемых на основе предложенной методики.

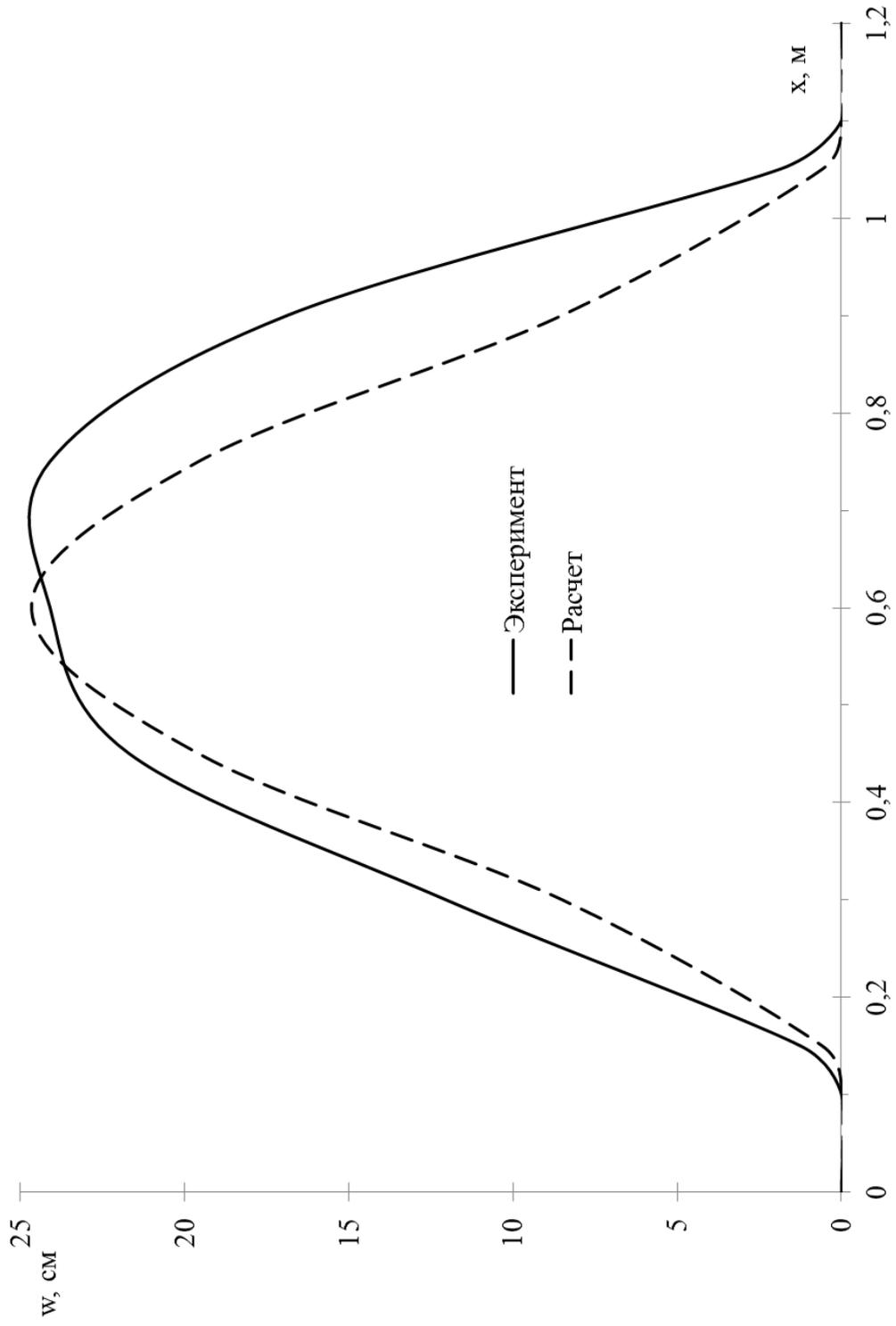


Рисунок 5.11 – Изменение деформаций модели без защитного покрытия по длине

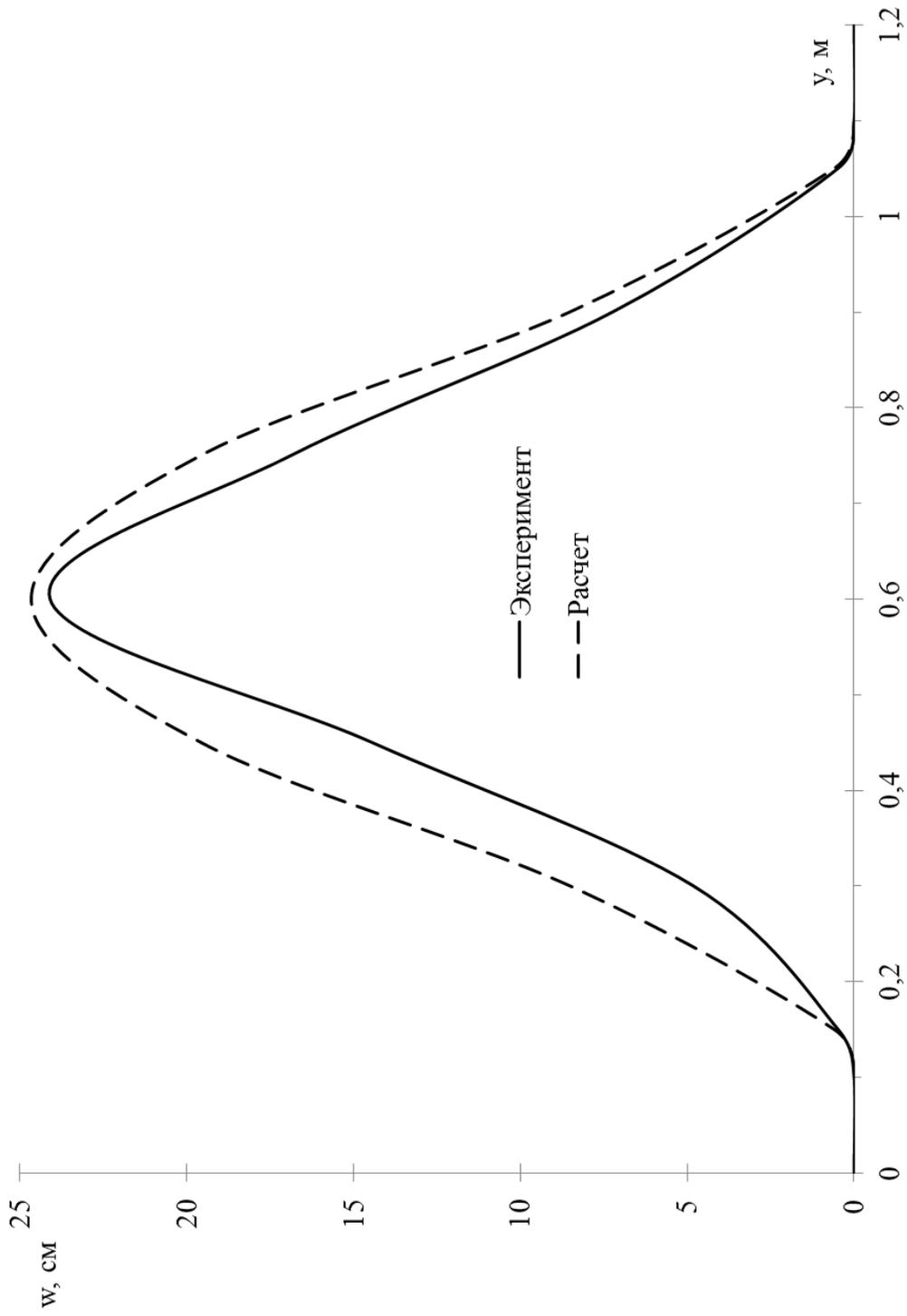


Рисунок 5.12 – Изменение деформаций модели без защитного покрытия по ширине

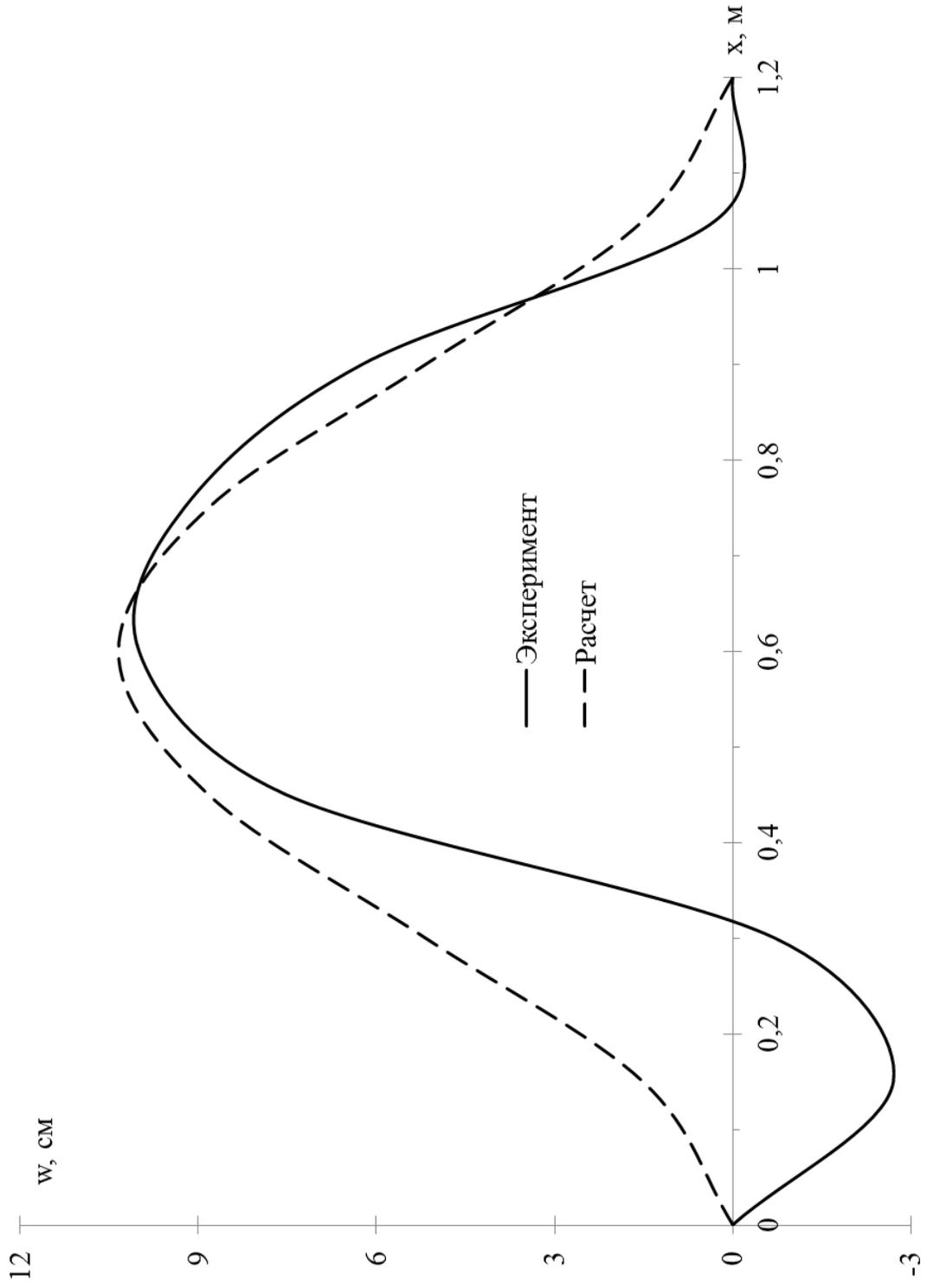


Рисунок 5.13 – Изменение деформаций модели с покрытием СГК-2 по ширине

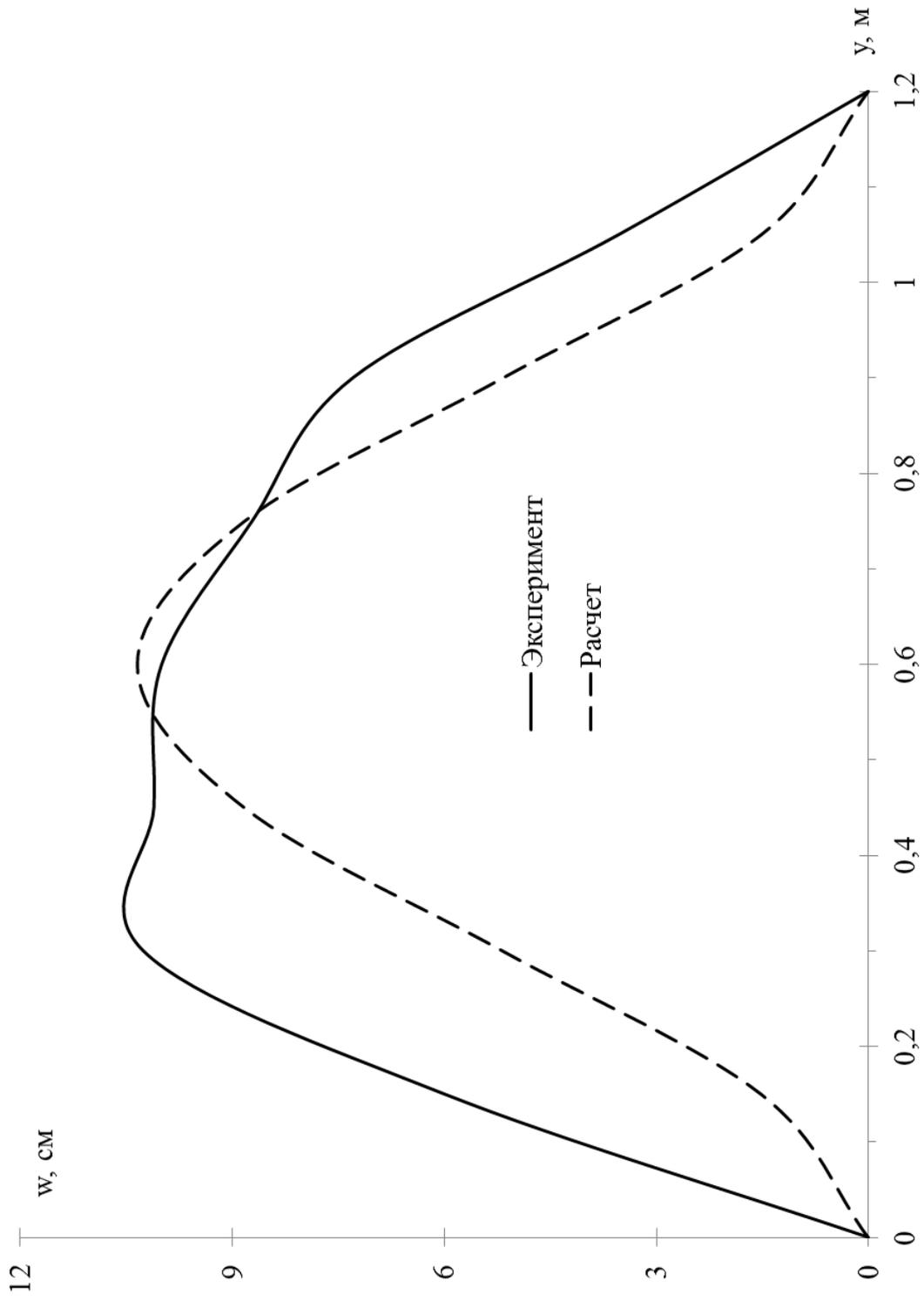


Рисунок 5.14 – Изменение деформаций модели с покрытием СГК-2 по длине

5.6 Выводы по разделу 5

5.6.1. Проведено экспериментальное исследование тепловых деформаций моделей оболочки в очаге пламени.

5.6.2. Эксперименты подтвердили достоверность разработанной методики определения состояния оболочки. Относительное расхождение результатов расчета по сравнению с экспериментом по значениям максимального прогиба оказалось не более 4,6 %, а по средней величине прогиба – не более 19,5 %.

5.6.3. Оценена эффективность способа защиты котла цистерны при помощи нанесения наружного огнезащитного покрытия СГК-2. Установлено, наличие защитного слоя снижает уровень прогибов оболочки в 2,2 раза. Кроме того, время достижения наибольшего уровня прогиба увеличивается в 2,9 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги выполненной работы состоят в следующем.

1. Разработана методика определения состояния котла цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Расчетные зависимости получены в явном виде. Принятая аппроксимация перемещений позволила для рассматриваемого класса оболочечных конструкций снизить потребность в применении метода конечных элементов, что сделало алгоритм и программу расчета эффективными при реализации на ЭВМ. Программа требует малого объема памяти и машинного времени.

2. Проведено исследование состояния котла нефтебензиновой цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Максимальный прогиб оболочки в очаге пламени составил 50 мм. Оценено влияние различных параметров расчетной схемы на результаты расчетов.

3. Разработана методика определения состояния котла цистерны, вызванного действием внутреннего давления, при локальном изменении механических свойств материала котла в очаге пламени.

4. Проведено исследование состояния котла нефтебензиновой цистерны при действии внутреннего давления с учетом локального снижения жесткости оболочки в очаге пламени. Максимальный прогиб оболочки в очаге пламени составил 1,8 мм.

5. Разработана методика оценки устойчивости оболочки при локальном повышении температуры (термоустойчивость), что позволило исследовать проблему термоустойчивости пластины и оболочки.

6. Исследована проблема термоустойчивости. Для случая выпуклой оболочки котла цистерны сделан вывод о том, что при повышении температуры процесс изменения кривизны происходит непрерывно, а переход пластины из плоского состояния срединной поверхности к искривленному происходит скачкообразно (потеря устойчивости).

Критическое изменение температуры для случая пластины составило 170,6 °С.

7. Оценена эффективность способа защиты котла цистерны при помощи нанесения наружного огнезащитного покрытия СГК-2. Установлено, что наличие защитного слоя снижает уровень прогибов оболочки в 2,2 раза. Кроме того, время достижения наибольшего уровня прогибов увеличивается в 2,9 раза.

Это свидетельствует о высокой эффективности данного способа защиты котлов цистерн от действия открытого пламени, так как обеспечивает необходимый промежуток времени для тушения пожара без разрушения котла цистерны и взрыва перевозимого продукта.

8. Достоверность разработанных методик подтверждена путем сравнения результатов расчета с данными эксперимента. Относительное расхождение результатов по средней величине прогиба оказалось не более 19,5 %.

По итогам проведенных исследований можно дать следующие рекомендации.

1. При проектировании котлов железнодорожных цистерн необходимо учитывать возможные аварийные воздействия открытого пламени, так как это вызывает значительные деформации и напряжения в оболочке.

2. Предложенные средства математического моделирования предлагается использовать на стадии проектирования цистерн для оценки поведения их котлов при аварийных воздействиях открытого пламени.

3. Разработанные методики и программные средства рекомендуется применять для оценки и выбора параметров средств защиты котлов цистерн в очаге пламени.

4. Необходимо разрабатывать средства защиты котлов от воздействия открытого пламени.

5. Для защиты котлов нефтебензиновых цистерн от воздействия открытого пламени целесообразно применять огнезащитное покрытие в виде

СГК-2, эффективность которого была подтверждена в проведенных исследованиях.

6. Применение предложенных методик позволяет снизить потребность в проведении дорогостоящих экспериментов по выбору защитных покрытий для оболочек котлов железнодорожных цистерн, обеспечивающих повышение безопасности их эксплуатации.

Перспективы дальнейшей разработки темы представляются возможными в следующих направлениях.

1. Возможен более подробный учет конструктивных особенностей котлов цистерн, а именно: днищ, шпангоутов и т.п. Для этого можно применить метод конечных элементов, сохранив общий подход к решению задачи, в том числе применение нелинейной теории оболочек, принципа Лагранжа.

2. В случае появления более эффективных огнезащитных покрытий предложенные методики без каких-либо изменений целесообразно применить для выбора параметров защиты и для теоретического обоснования их применения.

3. Разработанные методики могут получить развитие в виде их обобщения на другие виды подвижного состава, транспортных средств и сооружений.

4. В дальнейшем возможен более широкий спектр режимов исследуемых тепловых воздействий.

5. Программные средства, реализующие предложенные методики расчета, могут совершенствоваться, приобретая более удобный интерфейс и учитывая возможные изменения требований к ним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). Изменения и дополнения [Текст]. – М.: Изд-во ГосНИИВ - ВНИИЖТ, 2000. – 26 с.
2. 002И – 2009 ПКБ ЦВ. Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм: альбом-справочник [Текст]. – М.: ПКБ ЦВ, 2009. – 804 с.
3. Железнодорожная цистерна [Текст]: а.с. 287090 СССР: МКИЗ В 61 С 9/50 / МИИТ (СССР); заявл. 20.09.70. – 2 с.
4. Филиппов, В.Н. Восьмиосные вагоны [Текст] / В.Н. Филиппов, М.П. Козлов, В.А. Котуранов, И.Г. Маслов // Железнодорожный транспорт. – 2011. – №7. – С. 64 - 65.
5. Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов [Текст]: справочное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 215 с.
6. Каганер, М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур [Текст] / М.Г. Каганер. – М.: Машиностроение, 1966. – 275 с.
7. Филиппов, В.Н. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом [Текст] / В.Н. Филиппов, А.П. Шевчук [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 6. – С. 35 - 39.
8. Шебеко, Ю.Н. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами [Текст] / Ю.Н. Шебеко, В.Н. Филиппов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1999. – № 4. – С. 33 - 42.
9. Котуранов, В.Н. Уточненный расчет напряжений в цилиндрических частях котлов [Текст] / В.Н. Котуранов // Вагоны: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский, В.Н. Котуранов [и др.]; под ред. Л. А. Шадура. – 3-е изд., перераб. и доп. – М., Транспорт, 1980. – Разд. XII.6. – С. 367 - 377.
10. Болотин, М.М. Исследование напряжённого состояния котлов цистерн с учётом основных конструктивных особенностей их оболочек и узлов [Текст]:

автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.182 / Болотин Михаил Михайлович. – М., 1971. – 23 с.

11. Анализ напряжённого состояния и других качеств восьмиосной цистерны [Текст]: отчет о НИР: Ч. II / МИИТ; рук. Л.А. Шадур; исполн.: В.Н. Котуранов. – М., 1964. – 136 с.

12. Анализ напряжённого состояния и других качеств восьмиосной цистерны [Текст]: отчет о НИР: Ч. V / МИИТ, ЦНИИ МПС, ВНИИВ; рук. Л.А. Шадур; исполн.: О.Г. Бойчевский, Н.В. Дородницына, В.Н. Котуранов, М.Л. Каменомост, Г.М. Чернявский. – М., 1965. – 143 с.

13. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С.М. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 635 с.

14. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов. – М.: Судпромгиз, 1962. – 344 с.

15. Черных, К.Ф. Линейная теория оболочек [Текст]. В 2 ч. Ч. 1. Общая теория оболочек / К.Ф. Черных. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1962. – 274 с.

16. Лурье, А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек [Текст] / А.И. Лурье. – М.: Гостехиз-дат, 1947. – 252 с.

17. Гольденвейзер, А.Л. Теория упругих тонких оболочек [Текст] / А.Л. Гольденвейзер. – М.: Наука, 1976. – 512 с.

18. Кан, С.Н. Строительная механика оболочек [Текст] / С.Н. Кан. – М.: Машиностроение, 1966. – 508 с.

19. Котуранов, В.Н. Исследование напряжений в котлах железнодорожных цистерн с учётом ступенчатого изменения толщины их оболочек [Текст] / В.Н. Котуранов, С.И. Пашарин // Сб. науч. тр. / МИИТ. – М., 1971. – Вып. 368: Колебания и прочность большегрузных вагонов. – С. 128 - 142.

20. Шадур, Л.А. Применение моментной теории оболочек для расчета котла цистерны [Текст] / Л.А. Шадур, В.Н. Котуранов // Вагоны. Конструкция, теория и расчет: учебник для вузов ж.-д. трансп. / Л.А. Шадур, И.И. Челноков, Л.Н. Никольский, В.Н. Котуранов [и др.]; под ред. Л.А. Шадура. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 1973. – Разд. 107. – Гл. XII. – С. 374 - 383.

21. Власов, В.З. Контактные задачи по теории цилиндрических оболочек, подкрепленных продольными ребрами [Текст] / В.З. Власов, А.К. Мроцинский // Исследования по вопросам теории и проектирования тонкостенных конструкций. Сборник статей под ред. В.З. Власова. – М. Л., 1950. – С. 76 - 92.

22. Котуранов, В.Н. Исследование напряжённого состояния оболочек котлов железнодорожных цистерн с учётом упругости днищ [Текст] / В.Н. Котуранов, В.П. Медведев // Сб. науч. тр. / МИИТ. – М., 1971. – Вып. 368: Колебания и прочность большегрузных вагонов. – С. 143 - 166.

23. Кан, С.Н. Расчёт самолета на прочность [Текст]: учебник для авиационных вузов / С.Н. Кан, И.А. Сверлов. – М.: Машиностроение, 1966. – 519 с.

24. Кан, С.Н. Влияние упругости шпангоутов на их прочность [Текст] / С.Н. Кан // Сб. науч. тр. / ВВИА им. Жуковского. – М., 1950. – Вып. 390. – С. 55 - 68.

25. Ростовцев, Г.Г. Изгиб чистого кольца [Текст] / Г.Г. Ростовцев // Сб. науч. тр. / Машиностроение. – М., 1967. – Вып. 2: Прочность и устойчивость элементов тонкостенных конструкций. – С. 42 - 49.

26. Иммерман, А.Г. Расчёт ортотропной круговой цилиндрической оболочки на поперечную нагрузку [Текст] / А.Г. Иммерман // Сб. науч. тр. / Госстройиздат. – М., 1955. – Вып. 3: Расчёт пространственных конструкций. – С. 112 - 127.

27. Лизин, В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций [Текст] / В.Т. Лизин, В.А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 1976, – 408 с.

28. Балабух, Л.И. Контактные задачи сопряжения без-моментных оболочек вращения с упругими кольцами [Текст] / Л.И. Балабух, Л.А. Шаповалов // Изв. АН СССР. – 1962. – № 4. – С. 52 - 67

29. Балабух, Л.И. Прочность и устойчивость шпангоутов, связанных тонкой обшивкой [Текст] / Л.И. Балабух // Сб. науч. тр. / ЦАГИ. – М., 1949. – Вып. 681. – С. 70 - 81.

30. Искрицкий, Д.Е. Строительная механика элементов машин [Текст] / Д.Е. Искрицкий. – Л.: Судостроение, 1970. – 448 с.

31. Захарова, А.П. Изгиб консольной цилиндрической оболочки, подкрепленной жестким кольцом, нагруженным радиальной силой [Текст] / А.П. Захарова // Прочность цилиндрических оболочек. Сборник статей под ред. Даревского В.М. – М., 1959. – С. 17 - 36.

32. Агапов, А.Ю. Напряженно-деформированное состояние котлов специализированных цистерн, имеющих конструктивные нерегулярности [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Агапов Александр Юльевич. – М., 1987. – 24 с.

33. Чугунов, Г.Ф. Теоретическое и экспериментальное исследование напряжённого состояния котла безрамной цистерны, подкрепленного кольцевыми элементами жёсткости [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.182 / Чугунов Геннадий Федосович. – М., 1971. – 22 с.

34. Котуранов, В.Н. Методы исследования напряженно-деформированного состояния котлов железнодорожных цистерн [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.02 / Котуранов Владимир Николаевич. – М., 1973. – 46 с.

35. Алексюткин, Б.А. Исследование напряжённого состояния и выбор рациональных конструктивных схем котлов цистерн для перспективных габаритов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.01 / Алексюткин Борис Алексеевич. – М., 1977. – 20 с.

36. Котуранов, В.Н. К вопросу формирования матрицы податливости упругой цилиндрической оболочки, подкрепленной пространственной стержневой системой [Текст] / В.Н. Котуранов, Е.А. Лалуев, Г.Ф. Чугунов // Сб. науч. тр. / МИИТ. – М., 1978. – Вып. 610: Конструкция, динамика и прочность большегрузных вагонов. – С. 145 - 152.

37. Павленко, С.Т. Экспериментально-теоретическое изучение напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки сосуда с накладками [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.03 / Павленко Станислав Трофимович. – Свердловск, 1987. – 22 с.

38. Овечников, М.Н. Выбор рациональных параметров оболочки и подкрепляющих элементов котла железнодорожной цистерны [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Овечников Михаил Николаевич. – М., 1986. – 24 с.

39. Чугунов, Г.Ф. К вопросу формирования матрицы жесткости оболочки вращения с произвольным меридианом [Текст] / Г.Ф. Чугунов, Е.А. Лалуев, Л.Н. Миклашевская // Сб. науч. тр. / Тульский политехнический ин-т. – Тула, 1977. – Вып.: Вопросы строительной механики кузовов вагонов. – С. 33 - 47.

40. Огибалов, П.М. Вопросы динамики и устойчивости оболочек [Текст] / П.М. Огибалов. – М.: Изд-во МГУ, 1963. – 420 с.

41. Вольмир, А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1972. – 432 с.

42. Флюгге, В. Статика и динамика оболочек [Текст] / В. Флюгге. – М.: Госстройиздат, 1961. – 306 с.

43. Справочник по динамике сооружений [Текст] / Под ред. Б. Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.

44. Филиппов, А.П. Колебания деформированных систем [Текст] / А.П. Филиппов. – М.: Машиностроение, 1970. – 734 с.

45. Сытник, И.Ф. Динамика пластин и оболочек под действием ударных нагрузок с учетом поперечных сдвигов и инерции вращения [Текст]: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Сытник Ирина Федоровна. – Саратов, 1994. – 18 с.

46. Морзинова, Т.Г. Колебания оболочек котлов цистерн с учётом их конструктивных особенностей [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.01 / Морзинова Татьяна Георгиевна. – М., 1983. – 24 с.

47. Осипов, Т.А. Исследование динамических характеристик котлов большегрузных цистерн и напряжённого состояния их подкрепленных конструкций [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.182 / Осипов Тимофей Александрович. – М., 1968. – 23 с.

48. Корниенко, Н.А. Динамическая нагруженность котлов железнодорожных цистерн при импульсных воздействиях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Корниенко Нина Амосовна. – М., 1994. – 22 с.

49. Антоненко, Э.В. Напряжённое состояние цилиндрических оболочек с упругими шпангоутами [Текст] / Э.В. Антоненко // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника. – 1964. – № 3. – С. 63 - 74.

50. Федотов, А.И. Пожарно-техническая экспертиза [Текст] / А.И. Федотов, А.П. Ливчиков, Л.Н. Ульянов. – М.: Стройиздат, 1986. – 271 с.

51. Бондарь, В.А. Взрывобезопасность электрических разрядов фрикционных искр [Текст] / В.А. Бондарь, В.Н. Веревкин, А.И. Гескин, В.С. Кравченко, А.Е. Погорельский. – М.: Недра, 1976. – 304 с.

52. Шебеко, Ю.Н. Методы исследования искробезопасности материалов [Текст] / Ю.Н. Шебеко, В.Ю. Навценя, А.К. Костюхин, Э.Д. Замышевский, С.Н. Копылов, Д.Ю. Шебеко. – ФГУП ВНИИПО, 2000. – 5 с.

53. Обеспечение пожарной безопасности установок по ликвидации проливов нефти и нефтепродуктов [Текст]: Рекомендации. – Москва: ВНИИПО, 2008. – 82 с.

54. Баратов, А.Н. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность [Текст]: справ. изд. / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко [и др.]. – М.: Химия, 1987. – 272 с.

55. Баратов, А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: справ. изд.: в 2-х книгах / А.Н. Баратов; А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук [и др.]. – М.: Химия, 1990. – 496 с.

56. Филиппов, Г.А. Взаимодействие дефектов структуры и деградация свойств конструкционных материалов [Текст] / Г.А. Филиппов, О.В. Ливанова // Материаловедение. – 2002. – №10 – С. 17 - 21.

57. Навценя, В.Ю. Влияние длительной эксплуатации и деформационного старения конструкционной стали 09Г2С на сопротивление разрушению и искрообразующую способность [Текст] / В.Ю. Навценя, В.Г. Стручалин,

Н.О. Ливанова, Г.А. Филиппов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – №1. – С. 87 - 92.

58. Зимакова, М.В. Продление срока службы вагонов-цистерн с учётом изменения физико-механических свойств металлоконструкций базовых узлов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Зимакова Мария Викторовна. – СПб., 2012. – 16 с.

59. Филиппов, Г.А. Деградационные процессы и их влияние на трещиностойкость трубных сталей после длительной эксплуатации [Текст] / Г.А. Филиппов, О.В. Ливанова // Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов: сб. трудов научно-практической конференции / НИФТИ. – Н. Новгород: Университетская книга, 2006. – С. 164 - 177.

60. Одесский, П.Д., Малоуглеродистые стали для металлических конструкций [Текст] / П.Д. Одесский, И.И. Ведяков. – М.: «Интермет Инжиниринг», 1999. – 224 с.

61. Стручалин, В.Г. Возможность возникновения аварийных ситуаций при заполнении железнодорожных цистерн легковоспламеняющимися жидкостями [Текст] / В.Г. Стручалин, В.М. Пономарёв, В.Ю. Навценя // Наука и техника транспорта. – 2014. – №4. – С. 85 - 90.

62. Стручалин, В.Г. Анализ взрывоопасных зон при заполнении цистерн нефтегрузами [Текст] / В.Г. Стручалин, В.М. Пономарёв, В.Ю. Навценя // Мир транспорта. – 2014. – №3. – С. 184 - 190.

63. Нестационарные температурные поля в замкнутых оболочках вращения [Текст]: отчет предприятия / НПО «Криогенмаш»; рук А.М. Макаров; исполнит: М.Р. Романовский. – Балашиха, 1979. – 33 с.

64. Агупова Т.А. Исследование нестационарных температурных полей в элементах криогенных резервуаров в режиме заполнения их криопродуктом [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.03 / Агупова Татьяна Алексеевна. – М., 1990. – 18 с.

65. Малков, М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники [Текст] / М.П. Мальков [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

66. Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах [Текст]: справочник / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.

67. Гейтвуд, Б.Е. Температурные напряжения применительно к самолетам, снарядам, турбинам и ядерным реакторам [Текст] / Б.Е. Гейтвуд; перевод с англ. М.Ф. Диментберга, В.К. Житомирского, Ю.Ф. Красонтовича. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. – 349 с.

68. Чугунов, Г.Ф., Определение температурного поля котла цистерны от неравномерного нагрева [Текст] / Г.Ф. Чугунов, А.П. Азовский // Сб. науч. тр. / МИИТ. – М., 1976. – Вып. 530: Динамика, прочность, экономика и ремонт восьмиосных вагонов. – С. 11 - 18.

69. Чугунов, Г.Ф., Исследование температурного воздействия на напряженно-деформированное состояние котлов цистерн для БАМа [Текст] / Г.Ф. Чугунов, В.Н. Котуранов, Р.С. Глазкова // Сб. науч. тр. / МИИТ. – М., 1977. – Вып. 518: Научные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации Байкало-Амурской магистрали. – С. 25 - 29.

70. Лагута, В.С. Исследование влияния температурных воздействий на напряженное состояние котла восьмиосной железнодорожной цистерны, проектируемой для климатических условий Байкало-Амурской магистрали [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.01 / Лагута Виктор Степанович. – М., 1979. – 19 с.

71. Беспалько, С.В. Разработка и анализ моделей повреждающих воздействий на котлы цистерн для перевозки криогенных продуктов [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Беспалько Сергей Валерьевич. – М., 2000. – 47 с.

72. Комарова, Т.А. Повышение эффективности слива вязких нефтепродуктов из железнодорожных цистерн [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07, 01.04.07 / Комарова Татьяна Александровна. – СПб., 2003. – 22 с.

73. Саврухин, А.В. Совершенствование конструкций массивный несущих деталей подвижного состава на основе анализа напряженно-деформированного

состояния при эксплуатационных и технологических воздействиях [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Саврухин Андрей Викторович. – М., 2005. – 47 с.

74. Головин, В.В. Моделирование поведения котла цистерны в очаге пламени [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Головин Виталий Владимирович. – М., 2005. – 22 с.

75. Филин, А.П. Элементы теории оболочек [Текст] / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 384 с.

76. Огибалов, П.М. Термоустойчивость пластин и оболочек [Текст] / П.М. Огибалов, В.Ф. Грибанов. – М.: Изд-во Московского университета, 1968. – 520 с.

77. Меланин, В.М. Вариационные методы решения задач исследования температурных напряжений в твердом теле и их применение к колесу вагона при торможении [Текст] / В.М. Меланин, Н.А. Корниенко, С.В. Беспалько, И.Г. Маслов; Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ). – М., 2005. – 11 с. – Библиогр.: 1 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ РАН 31.05.2005, №139-B2005.

78. Корольков, Е.П. О вкатывании колеса на головку рельса [Текст] / Е.П. Корольков, М.П. Козлов, И.Г. Маслов // Мир транспорта. – 2010. – №4. – С. 26 - 28.

79. Клаф, Р. Динамика сооружений [Текст] / Р. Клаф, Дж. Пензиен. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

80. Шебеко, Ю.Н. Экспериментальное исследование поведения тонкостенных оболочек в очаге пламени [Текст] / Ю.Н. Шебеко, В.А. Назаренко, В.Н. Филиппов [и др.] // Пожарная безопасность. – 2004. – № 2. – С. 64 - 71.

81. Беспалько, С.В. Методика моделирования напряженно-деформированного состояния котла цистерны от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени [Текст] / С.В. Беспалько, И.Г. Маслов // Безопасность движения поездов. Труды VII Научно-практической конференции / МИИТ. – М., 2007. – С. IX-26 - IX-27.

82. Маслов, И.Г. О новой методике определения напряженно-деформированного состояния котла цистерны [Текст] / И.Г. Маслов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – №7. – С. 51.

83. Беспалько, С.В. Методика определения напряженно-деформированного состояния котла под давлением при локальном снижении жесткости в очаге пламени [Текст] / С.В. Беспалько, И.Г. Маслов, Е.С. Перникоз // Безопасность движения поездов. Труды XIV Научно-практической конференции / МИИТ. – М., 2013. – С. VII-69 - VII-70.

84. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.

85. Коваленко, А.Д. Основы термоупругости [Текст] / А.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1970. – 239 с.

86. Корниенко, Н.А. Методика оценки устойчивости оболочки при локальном повышении температуры в очаге пламени [Текст] / Н.А. Корниенко, С.В. Беспалько, И.Г. Маслов, М.В. Козлов; Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ). – М., 2009. – 9 с. – Библиогр.: 2 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ РАН 22.05.09, № 329-В2009.