

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
**Беспалько Сергей Валерьевич**

Официальные оппоненты: **Овечников Михаил Николаевич**, доктор технических наук, доцент, Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», ведущий научный сотрудник  
**Вогман Леонид Петрович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны», главный научный сотрудник

Ведущая организация **Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт вагоностроения» (ОАО «НИИ вагоностроения»)**

Защита состоится 15 февраля 2017 г., в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ), [www.miiit.ru](http://www.miiit.ru).

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

## Общая характеристика работы

**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.

**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 для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)», 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.



Рисунок 1 – Последствия нахождения котла цистерны в очаге пламени

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.

**Цели и задачи.** 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 состояния котла нефтебензиновой цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени. Оценено влияние различных параметров расчетной схемы на результаты расчетов.

2. Проведено исследование состояния 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 принципе 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.

### **Основное содержание работы**

В первом разделе «Краткий обзор конструктивных особенностей цистерн и методов исследования тепловых воздействий на котёл цистерны» на основе литературных источников был выполнен обзор конструктивных особенностей и существующих методов расчёта котлов цистерн, в том числе на тепловые воздействия.

Железнодорожным цистернам свойственно большое разнообразие конструктивного исполнения котла, обусловленное особенностями перевозимого груза, характером эксплуатационных видов нагружения. Особенности конструкции восьмиосных цистерн изложены в работе [2], что учитывалось на начальных этапах исследований при расчете на штатные нормативные нагрузки. Это же использовалось в методиках, разработанных в следующих разделах при выборе расчетной схемы для расчетов на аварийное действие открытого пламени. В частности, принималось, что наиболее уязвимая зона, с точки зрения нахождения в очаге пламени, - это цилиндрическая часть котла между шпангоутами.

Вопросы исследования тепловых воздействий на оболочки котлов нашли глубокую проработку в исследованиях, выполняемых ВНИИПО, НПО «Криогенмаш», Московским институтом теплотехники (МИТ).

Применительно к железнодорожному цистерностроению задачи, связанные с тепловыми воздействиями, исследованы недостаточно полно. В частности, для нефтебензиновых цистерн проблемы обеспечения безопасности при аварийных тепловых воздействиях практически не проработаны, хотя нефть и нефтепродукты, согласно классификации ООН, относятся к опасным видам груза, и аварийные ситуации в случае разрушения котла могут приводить к весьма серьезным последствиям.

В последние годы активизировался интерес к исследованиям в области обеспечения безопасности при эксплуатации цистерн. Общим направлением



исследований является разработка систем защиты котлов цистерн для перевозки опасных грузов.

Был проведен анализ существующих литературных источников. В результате были определены следующие предпосылки, которые учитывались в настоящей работе при получении методик расчета котла цистерны:

- применение тригонометрических рядов для аппроксимации перемещений, что позволяет упростить расчетные зависимости;
- возможность пренебрегать эффектами инерции тепловых процессов;
- учет влияния повышения температуры на механические свойства материала котла;
- необходимость учитывать действие внутреннего давления в котле;
- выбор в качестве средства защиты котлов от воздействия открытого пламени огнезащитного покрытия, резко снижающего теплоотдачу на поверхности несущих оболочек котла;
- учет того, что в очаге пламени в котле возникают существенные градиенты температур, вызывающие тепловые деформации и температурные напряжения.

Во **втором разделе** «Методика моделирования состояния котла цистерны от воздействия неравномерного температурного поля в очаге пламени» исследовалось состояние котла цистерны при воздействии неравномерного температурного поля в очаге пламени.

Для моделирования состояния оболочки (рисунок 2) была применена нелинейная теория оболочек.

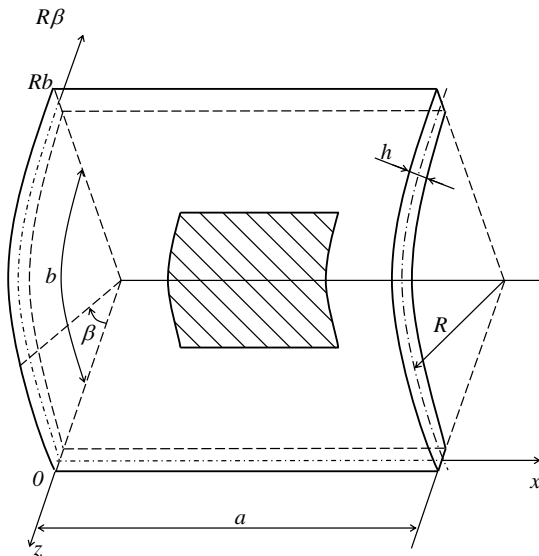


Рисунок 2 – Расчетная схема оболочки

Как известно из упрощенного варианта теории оболочек, учитывающего только радиальные перемещения, геометрические соотношения этой теории имеют вид:

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

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – деформации растяжения-сжатия в направлении образующей и в окружном направлении;  $\omega$  – деформация сдвига;  $\kappa_1, \kappa_2$  – деформации изменения кривизны в плоскости образующей и в плоскости направляющей;  $\tau$  – деформация кручения;  $w$  – радиальное перемещение;  $Ox\beta z$  – цилиндрическая система координат;  $R$  – радиус средней поверхности.

В формулах (1) учтено только радиальное перемещение, т.к. оно доминирует при нагружении котла внутренним давлением.

Физические соотношения:

$$\begin{cases} N_1 = B[(\varepsilon_1 - \varepsilon_T) + \mu(\varepsilon_2 - \varepsilon_T)]; & M_1 = D[(\kappa_1 - \kappa_T) + \mu(\kappa_2 - \kappa_T)]; \\ N_2 = B[(\varepsilon_2 - \varepsilon_T) + \mu(\varepsilon_1 - \varepsilon_T)]; & M_2 = D[(\kappa_2 - \kappa_T) + \mu(\kappa_1 - \kappa_T)]; \\ S = B_c \omega; & H = D_c \tau, \end{cases} \quad (2)$$

где  $N_1, N_2$  – внутренние усилия растяжения-сжатия в направлении образующей и в окружном направлении;  $S$  – сдвигающее усилие;  $M_1, M_2$  – изгибающие моменты, действующие в плоскости образующей и в плоскости направляющей;  $H$  – крутящие моменты, действующие в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и равные по величине;  $\varepsilon_T, \kappa_T$  – чисто тепловые деформации растяжения-сжатия и изменения кривизны;  $E$  – модуль упругости материала оболочки;  $\mu$  – коэффициент Пуассона

материала оболочки;  $B = \frac{Eh}{1-\mu^2}$ ,  $B_c = \frac{Eh}{2(1+\mu)}$ ,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ ,  $D_c = \frac{Eh^3}{12(1+\mu)}$  –

цилиндрические жесткости оболочки на растяжение-сжатие, на сдвиг, на изгиб и на кручение;  $h$  – толщина оболочки.

При отсутствии связей и равномерном нагреве оболочка свободно расширяется. В этом случае фактическая деформация оболочки совпадает с чисто тепловой деформацией, а усилия и напряжения не возникают.

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.

Геометрические и физические соотношения, представленные в матричной форме, будут иметь вид:

$$\bar{\varepsilon} = w\bar{d}_1 + w^2\bar{d}_2; \quad (3)$$

$$\bar{N} = [B](\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_T), \quad (4)$$

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

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

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

$\bar{d}_1, \bar{d}_2$  – векторы, преобразующие перемещения в деформации;

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

Выражения для напряжений в оболочке имеют вид:

$$\sigma_{11} = \frac{N_1}{h} \pm \frac{6M_1}{h^2}; \quad \sigma_{22} = \frac{N_2}{h} \pm \frac{6M_2}{h^2}; \quad \sigma_{21} = \sigma_{12} = \pm \frac{6H}{h^2}. \quad (5)$$

Была рассмотрена область оболочки котла, подвергнутая нагреву. В развернутом виде она ограничена размерами:  $a$  – вдоль образующей и  $Rb$  – по дуге сечения.

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

Разрешающая система уравнений составлялась с применением вариационного принципа Лагранжа, использующего соотношение работы  $A$  внешних сил на перемещениях оболочки и потенциальной энергией деформации  $\Pi$ , вызываемой такими перемещениями:

$$\frac{d\Pi}{dw} - \frac{dA}{dw} = 0. \quad (6)$$

Подобные энергетические подходы широко применяются в различных задачах механики, в частности, в работе [3] для решения динамической задачи, в которой исследуемая цистерна рассчитывалась на штатные нагрузки.

В уравнение (6) входят:

потенциальная энергия деформации

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \varepsilon^T N R d\beta dx \quad (7)$$

и работа внешних сил

$$A = \int_0^a \int_0^b q w R d\beta dx, \quad (8)$$

где  $q$  – величина внутреннего давления в котле.

Потенциальная энергия, с учетом вида физических соотношений, выразилась следующим образом:

$$\Pi = \int_0^a \int_0^b \left( \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}^T [B] \bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_T^T [B] \bar{\varepsilon} \right) R d\beta dx, \quad (9)$$

где  $a, b$  – конечные координаты исследуемой области котла вдоль образующей и в окружном направлении.

Рассматривалось температурное воздействие. Для этого была применена аппроксимация перемещения и температурного поля в таком виде, который соответствует реальному характеру выпучивания оболочки и распределения температур в очаге пламени:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m w_m, \quad (10)$$

$$T = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m T_m, \quad (11)$$

где  $m$  – номер члена ряда разложения перемещений;  $w_m$  – коэффициент  $m$ -го члена ряда перемещений;  $\Phi_m = \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi\beta}{b}$  – функция формы;  $T_m$  – коэффициент  $m$ -го члена ряда температур.

С учетом принятой аппроксимации (10), (11) потенциальная энергия (9) выразилась через коэффициенты  $w_m$  ряда перемещений (10). Поэтому, в соответствии с принципом Лагранжа, находилась производная потенциальной энергии по каждому коэффициенту  $w_m$ . В результате была получена следующая система нелинейных алгебраических уравнений:

$$[r^I] \bar{w}_m^I + [r^{II}] \bar{w}_m^{II} + [r^{III}] \bar{w}_m^{III} = \bar{p}, \quad (12)$$

где  $[r^I], [r^{II}], [r^{III}]$  – матрицы коэффициентов;  $\bar{p}$  – вектор правой части;  $\bar{w}_m^I = \{w_1, w_2, \dots\}$ ,  $\bar{w}_m^{II} = \{w_1^2, w_2^2, \dots\}$ ,  $\bar{w}_m^{III} = \{w_1^3, w_2^3, \dots\}$  – векторы неизвестных коэффициентов ряда перемещений.

Таким образом, каждое уравнение из полученной системы (12) представляет собой полином третьей степени относительно каждого неизвестного ( $w_1, w_2$  и т.д.). Данная нелинейность является следствием учета нелинейных мембранных деформаций.

Из решения системы уравнений (12) можно найти вектор коэффициентов ряда перемещений, что позволяет в любой точке исследуемой оболочки определить перемещение (10), деформации (1), внутренние усилия (2) и напряжения (5).

Разработанная методика была применена для расчета деформированного состояния котла нефтебензиновой цистерны при действии неравномерного температурного поля в очаге пламени. В соответствии с наиболее неблагоприятным сценарием пожара, внешнее воздействие задавалось в виде теплового потока  $100 \text{ кВт/м}^2$  по прямоугольной площадке длиной 2 м вдоль оси и 2,8 м по окружности в средней зоне обечайки котла.

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

Неравномерное температурное поле вызывает выпучивание оболочки в зоне его действия. Наибольшие прогибы возникают в зоне действия повышенной температуры. Максимальный прогиб оказался равным 50 мм при отсутствии огнезащитного покрытия и 12 мм – при наличии покрытия СГК-2.

Для уточнения параметров расчетной схемы и проверки работоспособности методики было исследовано влияние различных параметров на результаты расчетов.

На рисунке 3 приведены графики изменения прогиба во времени при наличии или отсутствии огнезащитного покрытия.

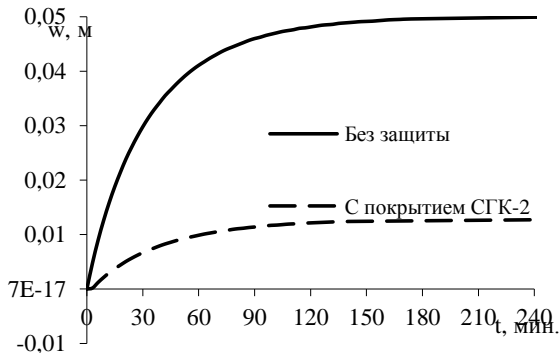


Рисунок 3 – Зависимость максимального прогиба от времени

Для варианта без защиты с момента начала воздействия пламени радиальные перемещения начинают резко возрастать. Примерно через 120 мин. появляется установившийся режим.

Зависимость прогиба котла цистерны с защитным покрытием имеет аналогичный характер. Однако уровень максимального прогиба оказался в 3,5 раза ниже. Кроме того, время возрастания прогиба до максимального значения при наличии защиты существенно увеличивается (в 1,9 раза).

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 выпучивания

оболочки котла в очаге пламени, с другой стороны, обеспечивается достаточный промежуток времени для развертывания противопожарных формирований.

**Третий раздел** «Методика моделирования состояния котла давления при локальном снижении жесткости в очаге пламени» посвящен моделированию состояния котла цистерны от действия внутреннего давления с учетом локального снижения жесткости оболочки в очаге пламени. На основе принципа независимости действия внешних нагрузок данное воздействие рассматривалось отдельно от неравномерного температурного поля с последующим суммированием результатов.

Для моделирования состояния оболочки (рисунок 2) была применена нелинейная теория оболочек. Геометрические соотношения имеют вид (1).

Зависимость внутренних усилий от деформаций оболочки выражается посредством физических соотношений:

$$\begin{cases} N_1 = B(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); & M_1 = D(\kappa_1 + \mu \cdot \kappa_2); \\ N_2 = B(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1); & M_2 = D(\kappa_2 + \mu \cdot \kappa_1); \\ S = B_c \omega; & H = 2D_c \tau, \end{cases} \quad (13)$$

Разрешающая система уравнений составлялась с применением вариационного принципа Лагранжа (6).

Потенциальная энергия была выражена через перемещение  $w$  оболочки путем подстановки исходных соотношений (3), (4) в формулу (7):

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b d^T w [B] dw R d\beta dx \quad (14)$$

Была введена аппроксимация  $w$ , соответствующая характеру выпучивания:

$$w = w_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m w_m, \quad (15)$$

где  $w_0$  – осесимметричная составляющая перемещения;  $m$  – номер члена ряда разложения перемещений;  $w_m$  – коэффициент  $m$ -го члена ряда перемещений;

$\Phi_m = \sin^2 \frac{m\pi x}{a} \sin^2 \frac{m\pi\beta}{b}$  – функция формы.

Снижение жесткости оболочки под действием нагрева представлялось в виде локального снижения модуля упругости материала, для чего была использована аппроксимация в виде аналогичных (15) функций:

$$E = E_0 - \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m E_m,$$

где  $E_0$  – осесимметричная составляющая ряда, аппроксимирующего модуль упругости (исходный модуль упругости);  $E_m$  – коэффициенты членов ряда с номерами  $m$ .

Отсюда стало возможным выразить матрицу жесткостных параметров в виде подобной зависимости:

$$[B] = [B_o] - \sum_{m=1}^{\infty} \Phi_m [B_m]. \quad (16)$$

Принятые аппроксимации (15) и (16) были подставлены в выражения для потенциальной энергии деформации (14) и работы внешних сил (8), что с учетом уравнения (6) принципа Лагранжа привело к следующей системе уравнений относительно коэффициентов  $w_m$ :

$$[r^I] \vec{w} + [r^{II}] \vec{w}^{II} + [r^{III}] \vec{w}^{III} = \vec{p}, \quad (17)$$

где  $[r^I]$ ,  $[r^{II}]$ ,  $[r^{III}]$  – матрицы коэффициентов уравнения (17) при первой, второй и третьей степени искомых коэффициентов  $w_m$ ;  $\vec{p}$  – вектор внешних нагрузок;  $\vec{w} = \{w_o, w_1, \dots, w_m, \dots\}$ ,  $\vec{w}^{II} = \{w_o^2, w_1^2, \dots, w_m^2, \dots\}$ ,  $\vec{w}^{III} = \{w_o^3, w_1^3, \dots, w_m^3, \dots\}$  – вектор неизвестных коэффициентов ряда перемещений.

Из решения системы уравнений (17) определялся вектор  $\vec{w}$ , состоящий из коэффициентов ряда разложения радиального перемещения. Знание их позволяет найти поля перемещений (15), деформаций (3), внутренних усилий (13) и напряжений (5).

Методика определения состояния котла под действием внутреннего давления при локальном снижении жесткости оболочки была применена для расчета котла нефтебензиновой цистерны, внутреннее давление в котором составляло 0,5 МПа.

Характер НДС был близок к изображению на рисунке 4, максимальное значение прогиба (в центре очага пламени) составило 1,8 мм.

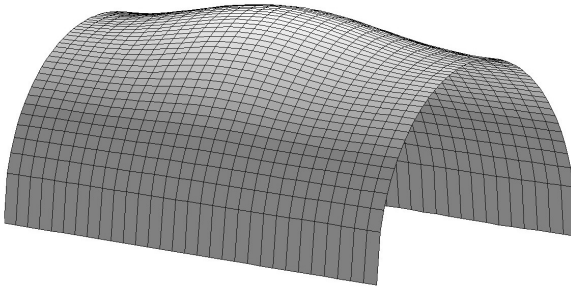


Рисунок 4 – Радиальные перемещения  $w$  оболочки котла цистерны в очаге пламени

На рисунке 5 приведена зависимость максимального прогиба от времени. В начальный момент действие внутреннего давления вызывает осесимметричное состояние.

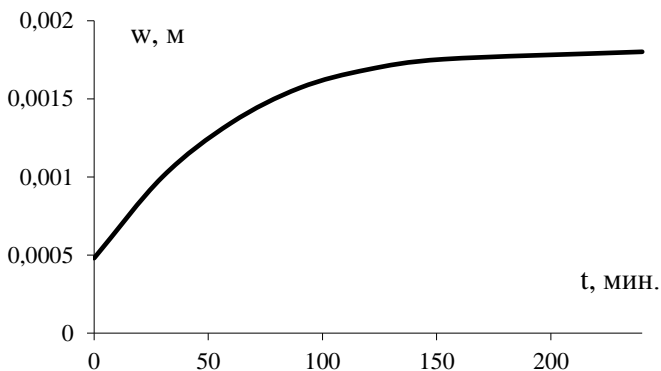


Рисунок 5 – Изменение максимального радиального перемещения котла под давлением во времени при локальном снижении жесткости оболочки в очаге пламени

При локальном повышении температуры в очаге пламени происходит возмущение в виде выпучивания оболочки.

Для оценки влияния параметров расчетной схемы были выполнены многовариантные расчеты с различными геометрическими размерами оболочки.

В четвертом разделе «Методика оценки устойчивости оболочки при локальном повышении температуры» исследовалась проблема устойчивости оболочки котла цистерны при локальном повышении температуры (термоустойчивость).

Нагревание тел вызывает их расширение, то есть появление чисто тепловых деформаций 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, иными словами, напряженно-деформированное состояние носит безмоментный характер. Однако при достаточно высоком уровне сжимающих внутренних усилий срединная поверхность оболочки скачкообразно изменяет свою форму. Изменяется ее кривизна, и появляются изгибающие моменты – происходит потеря устойчивости.

Вообще 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.

Было исследовано два варианта конструкции: пластина и цилиндрическая оболочка, (входящая в конструкцию котла цистерны).

Пластина. Пластины – частный случай оболочки. Это фрагменты кузовов других типов вагонов, и поэтому полезно рассмотреть эту задачу. При изменении



температуры пластины по сравнению с исходным состоянием в ней появляются чисто тепловые деформации. Без учета перепада температуры по толщине будут иметь место только деформации растяжения-сжатия:

$$\varepsilon_T = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} \alpha_T (T - T_0) dz = \alpha_T (T - T_0). \quad (18)$$

До потери устойчивости другие виды деформаций пластины отсутствуют. Появление чисто тепловых деформаций при ограничении перемещений фрагмента конструкции приводит к возникновению сжимающих усилий:

$$N_1 = -B(1 + \mu)\varepsilon_T; \quad N_2 = -B(1 + \mu)\varepsilon_T. \quad (19)$$

Эти усилия направлены по координатным осям срединной поверхности пластины в ее исходном, неискривлённом состоянии, и нагруженность ограничивается наличием сжимающих усилий  $N_1, N_2$ .

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

$$\kappa_1 = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \kappa_2 = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \tau = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (20)$$

и соответствующие им моменты:

$$M_1 = D(\kappa_1 + \mu\kappa_2); \quad M_2 = D(\kappa_2 + \mu\kappa_1); \quad H = D_c \tau. \quad (21)$$

Кроме того, температурные усилия растяжения-сжатия вызывают дополнительные изгибающие моменты:

$$M_1^* = N_1 w; \quad M_2^* = N_2 w, \quad (22)$$

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

Для решения задачи был применен принцип Лагранжа (6).

Рассматривалась потенциальная энергия деформации для случая потери устойчивости:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b [(M_1 + M_1^*)\kappa_1 + (M_2 + M_2^*)\kappa_2 + 2H\tau] dx dy. \quad (23)$$

Работа внешних сил при расчете на устойчивость равна нулю:  $A=0$ .

Соотношения (21) и (22) подставлялись в выражение (23), а также была принята аппроксимация (10) перемещений ( $y=R\beta$ ). В результате потенциальная энергия деформации выражалась через коэффициенты  $w_m$  ряда перемещений. По

условию минимума энергии  $\left( \frac{\partial \Pi}{\partial w_m} = 0 \right)$  для каждого члена ряда было получено

уравнение:

$$4Dm^4 \pi^4 \left( \frac{3ab}{16a^4} + \frac{3ab}{16b^4} + \frac{ab}{8a^2b^2} \right) w_m = B(1 + \mu)m^2 \pi^2 \frac{3ab}{16} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \alpha_T \Delta T w_m. \quad (24)$$

По физическому смыслу левая часть уравнения (24) представляет собой критическое значение обобщенной силы, а правая часть – ее фактическую величину, зависящую от изменения температуры  $\Delta T$ . Из решения уравнения (24) находилось критическое значение  $\Delta T$ , соответствующее началу потери устойчивости:

$$\Delta T_{кр} = \frac{h^2 m^2 \pi^2}{3(1 + \mu)\alpha_T} \frac{3a^4 + 2a^2b^2 + 3b^4}{a^2b^2(a^2 + b^2)}. \quad (25)$$

В результате по этой формуле был получен спектр критических значений (25), соответствующих каждому члену ряда перемещений с номером  $m$ . При этом очевидно, что критическое состояние наступит уже при наименьшем из полученных значений (25), то есть для первого члена ряда:  $m = 1$ .

Критическое изменение температуры для случая квадратной (2м×2м) стальной пластины (Ст. 3) толщиной 9 мм составило 170,6 °С.

Цилиндрическая оболочка. Была также исследована цилиндрическая часть котла цистерны. Принималась цилиндрическая система координат (рисунок 2).

Для оболочки, в дополнение к исходным уравнениям пластины, записывались соотношения, связанные с растяжением-сжатием. Геометрические соотношения включают дополнительное уравнение:

$$\varepsilon_2 = \frac{w}{R}. \quad (26)$$

В остальных соотношениях необходимо было положить  $y = R\beta$ .

Соответствующее физическое соотношение имеет вид:

$$N_2 = B[\varepsilon_2 - (1 + \mu)\varepsilon_T]. \quad (27)$$

в результате потенциальная энергия деформации выразилась так:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^{2\pi} [N_2 \varepsilon_2 + (M_1 + M_1^*)\kappa_1 + (M_2 + M_2^*)\kappa_2 + 2H\tau] R d\beta dx. \quad (28)$$

В формулу потенциальной энергии (28) подставлялись соотношения (19) – (22), (27), а также аппроксимация (10), и производилось интегрирование. В соответствии с принципом Лагранжа, было получено следующее квадратное уравнение:

$$15m^2 \pi^2 \left( \frac{\mu}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) w_m^2 + \left[ \frac{3}{R} + 4Rh^2 m^4 \pi^4 \left( \frac{1}{a^4} + \frac{1}{R^4 b^4} + \frac{2}{3R^2 a^2 b^2} \right) - \right. \\ \left. - 12R(1 + \mu)m^2 \pi^2 \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{R^2 b^2} \right) \alpha_T \Delta T \right] w_m - 8(1 + \mu)\alpha_T \Delta T = 0. \quad (29)$$

Таким образом, оказалось, что при любом заданном значении температуры оболочка получает перемещение  $w_m$ , определяемое из решения уравнения (29) для каждого члена ряда с последующим суммированием.

При этом понятие потери устойчивости для выпуклой оболочки теряет смысл, так как оболочка при повышении температуры сразу получает изменение кривизны. Дальнейшее изменение состояния оболочки целесообразно определять с помощью методики, изложенной в разделе 2.

В пятом разделе «Экспериментальное исследование процесса деформирования оболочки при воздействии неравномерного нагрева» содержатся результаты экспериментально-теоретического исследования моделей пластины для оценки достоверности разработанной методики определения состояния оболочки в очаге пламени, а также влияния огнезащитного покрытия СГК-2.

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 6.

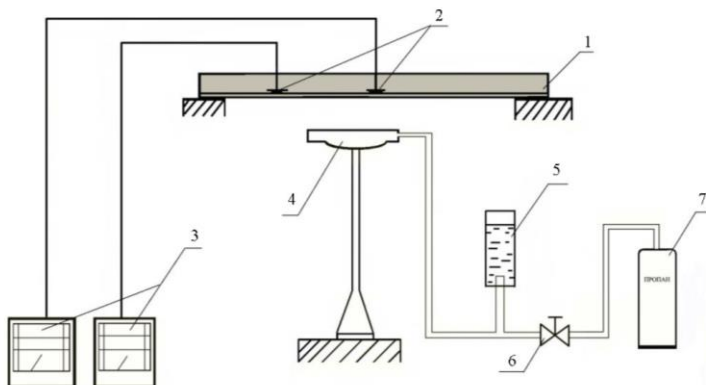


Рисунок 6 – Схема опытной установки

Установка была создана во ВНИИПО и включала опытную модель пластины 1, термопары 2, самопишущие потенциометры 3, пропановую горелку 4, расходомер 5, вентиль-регулятор 6 подачи газа и баллон 7 с пропаном. Испытывались две опытные модели 1, изготовленные в МИИТе: без защиты и с огнезащитным покрытием СГК-2 (толщиной 3 мм), разработанным ГП «Московский институт теплотехники» (МИТ).

Каждая модель представляла собой квадратную пластину из стального листа (Ст. 3) толщиной 2 мм, по периметру приваренную к раме из уголка № 7. До начала экспериментов расстояние от горелки до нижней поверхности образца составляло 40 мм. Тепловой поток от горелки задавался при помощи вентиля 6 с учетом показаний расходомера 5.

В начале каждого эксперимента включалась протяжка потенциометров 3, открывался запорный вентиль 6 и поджигалась горелка 4. 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

и через 137 мин. у модели с покрытием) эксперименты прекращались. Для этого отключались приборы 3 и закрывался вентиль 6.

Зависимости температуры термопар от времени определялись по показаниям лент потенциометров. Максимальные значения температуры модели без защиты составили: для центральной термопары 589 °С, для боковой – 167 °С. Соответствующие значения для модели с покрытием СГК-2 составили: для центральной термопары 248 °С, для боковой – 151 °С.

Нагрев моделей в ходе экспериментов сопровождался "выпучиванием" оболочки вследствие появления тепловых деформаций.

Прогибы моделей оболочки замерялись в 49 точках, равномерно распределенных по поверхности. 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 остаточных прогибов каждого образца.

Следует отметить, что модели имели значительные начальные и остаточные деформации, сопоставимые с величинами тепловых деформаций в экспериментах. Уровень отклонений после экспериментов оказался ниже, чем до экспериментов. Наличие начальных деформаций обусловлено технологией изготовления сварных моделей.

Исходя из сказанного, наиболее адекватное представление о тепловых деформациях можно было получить, рассматривая процесс остывания моделей. При этом прогиб в каждой точке получается вычитанием остаточного отклонения из отклонения в максимально нагретом состоянии.

На рисунке 7 показано поле прогибов модели (без защитного покрытия).

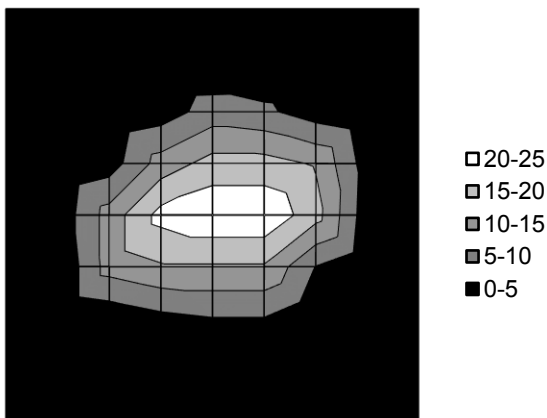


Рисунок 7 – Поле тепловых прогибов модели

Деформация имела характер «выпучивания» вверх, то есть в сторону, обратную расположению горелки. Характер деформации оболочки объясняется явлением теплового расширения материала. 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.

Наибольший прогиб имеет место в центральной зоне и составляет 24,1 мм для модели без защиты и 10,8 мм для модели с защитой СГК-2. При удалении к краям модели прогибы убывают до нуля. Таким образом, наличие защитного слоя существенно (в 2,2 раза) снижает уровень прогибов и других параметров, определяющих состояние объекта.

Были выполнены также расчеты моделей на основе разработанной методики. Пример сравнения результатов расчета и эксперимента приведен на рисунке 8.

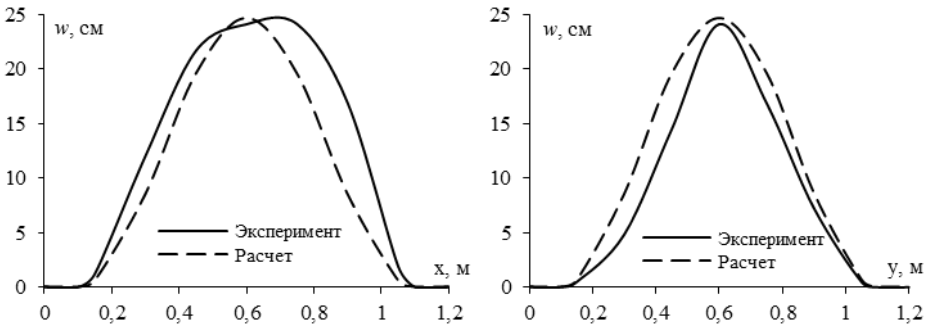


Рисунок 8 – Изменение деформаций модели без защитного покрытия

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

## 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.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**I Публикации 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**

1. Маслов, И.Г. О новой методике определения напряженно-деформированного состояния котла цистерны [Текст] / И.Г. Маслов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – №7. – С. 51.
2. 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.
3. 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.

**II В научных журналах, материалах конференций**

4. 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.
5. 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.
6. 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-B2009.
7. 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.

Маслов Илья Геннадьевич

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

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать \_\_.\_\_.2016    Заказ № \_\_\_\_\_    Формат 60×90/16  
Усл. печ. л. – 1,25                      Тираж 80 экз.

---

127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, МИИТ