



MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE DURING BENDING-TORSIONAL VIBRATIONS OF CYLINDER HEADS OF DIESEL LOCOMOTIVE ENGINES

Kasimov Obidzhon Toirdzhonovich¹

Turdimurodov Bobir chori ugli²

¹candidate of technical sciences, associate professor of the Department of "Locomotives and locomotive equipment",

²doctoral student (of Ph) of the Department of "Locomotives and locomotive equipment", State Transport University, Uzbekistan, Tashkent

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17473238>

ARTICLE INFO

Received: 24th October 2025

Accepted: 28th October 2025

Online: 29th October 2025

KEYWORDS

Diesel engines of diesel locomotives, cylinder heads of diesel locomotives, numerical simulation of the stress-strain state during bending-torsional vibrations of cylinder heads of diesel locomotives, algorithm, program for the MATHCAD 15 programming environment.

ABSTRACT

The article presents a mathematical model and algorithm for numerical simulation of the stress-strain state during bending-torsional vibrations of cylinder heads of diesel locomotives; numerical studies were carried out in the MATHCAD 15 programming environment.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЯХ КРЫШЕК ЦИЛИНДРОВ ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Касимов Обиджон Тоирджонович¹, Турдимуродов Бобир чори угли²

¹доктор (PhD) технических наук, доцент кафедры "Локомотивы и локомотивное хозяйство", ²докторант (of Ph) кафедры "Локомотивы и локомотивное хозяйство", Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.17473238>

ARTICLE INFO

Received: 24th October 2025

Accepted: 28th October 2025

Online: 29th October 2025

KEYWORDS

Дизели тепловозов, головки цилиндров дизелей тепловозов, численное моделирование напряженно-

ABSTRACT

В статье представлена математическая модель и алгоритм для численного моделирования напряженно-деформированного состояния при изгибно-крутильных колебаниях крышек цилиндров тепловозных дизелей, численные исследования проведены в среде программирования MATHCAD 15.



*деформированного
состояния при изгибно-
крутильных колебаниях
головок цилиндров дизелей
тепловозов, алгоритм,
программа для среды
программирования
MATHCAD 15.*

Значительный вклад в повышение эксплуатационной надёжности транспортных дизелей и развитие современных мобильных методов и средств диагностирования внесли такие учёные, как: А.Э. Симсон, С. Мэнсона, Б. Боли, Дж. Уэйнера, Д.А. Гохфельда, В.А. Четвергов, В.И. Киселев, А.Н. Савоськин, И.И. Лобанов (МИИТ), В.В. Стрекопытов, И.Г. Киселёв, Л.К. Пойлов, В.Н. Иванов, Панченко М.Н., А.В. Грищенко, И.А. Ролле (ПГУПС), Н.Д. Чайнова, А.П. Гусенкова и др.[1÷2].

В Узбекистане существенный вклад в дальнейшее развитие и совершенствование методов теоретических расчетов и экспериментальных исследований по вопросам диагностирования узлов и деталей подвижного состава внесли такие ученые как академик АН РУз, профессор, д.т.н. Глущенко А.Д., профессора Файзибаев Ш.С., Хромова Г.А., Шермухамедов А.А., Рахимов Р.В., Хамидов О.Р., а также к.т.н. Касимов О.Т., Валиев М.Ш., Турсунов М.Ш., Кудратов Ш.И. и др.

Известны работы [2,3], посвященные исследованию напряженно-деформированного состояния крышек цилиндров тепловозных дизелей. В этих работах утверждается, что разрушение крышек цилиндров связано с развитием трещин в стенке крышки, а механизм разрушения связан с усталостным разрушением, выражающимся в постепенном развитии трещин при многократно повторяющихся переменных напряжениях. При этом авторы работ [2÷5] вводят понятие «малоцикловая усталость». Под этим термином понимается механизм развития трещин усталости за счет прогрева дизеля, в том числе и крышки цилиндра, при некотором времени работы дизеля и его последующее охлаждение при остановке дизеля [3,4].

Для изучения явления возникновения механических напряжений в крышках цилиндров тепловозных дизелей при механических воздействиях и пульсационном воздействии давления паровых газов в цилиндре тепловозного дизеля в дизель-генераторе 1А-9ДГ для тепловоза UzTE16М использовались методы итераций и кусочно-линейной аппроксимации в среде программирования MATHCAD 15.

Напряженно-деформированное состояние (НДС) крышек цилиндров тепловозных дизелей характеризуется наличием механических напряжений от давления газов в цилиндре и термических напряжений от высоких температур, что приводит к сложной картине напряжений и деформаций, особенно в зонах контакта с гильзой цилиндра, клапанами и форсункой. Это состояние может



привести к трещинам, деформациям и общей потере герметичности, что снижает долговечность и надежность дизеля тепловоза.

Ввиду сложности конструкции крышки цилиндра дизеля аналитическое решение задачи по расчету их напряженно-деформированного состояния получить сложно, поэтому целесообразно применять численные методы.

Математическая модель для моделирования напряженно-деформированного состояния при изгибно-крутильных колебаниях крышек цилиндров тепловозных дизелей при механических воздействиях составлена с использованием дифференциальных уравнений для изгибно-крутильных колебаний оболочки под воздействием пульсирующего давления от паровых газов в цилиндре дизеля [6÷7].

Поскольку сопротивление межклапанной перемычки определяется критическим сечением, а точнее, локальной областью ее поверхностного слоя с максимальной температурой и максимальными изгибно-крутильными напряжениями, то расчет напряженно-деформированного состояния можно свести к расчету граничного элемента в виде упругой пластины длиной ℓ_p , шириной b_p и толщиной h_p , частично сжатой контактными деформациями по контуру (рисунок 1).

Для обоснования предлагаемой нами расчетной модели межклапанной перемычки крышки цилиндра тепловозного дизеля (рисунок 1) вводим ряд допущений.

1. Будем моделировать межклапанную перемычку крышки цилиндра тепловозного дизеля как граничный элемент в виде упругой пластины, закрепленной по контуру. При этом принимаем контур модельной пластины в виде прямоугольника - длиной ℓ_p , шириной b_p и толщиной h_p . При этом площадь её будет равна: $S_p = \ell_p \cdot b_p$. Считаем толщину модельной пластинки h_p постоянной в пределах всей площади S_p .

2. Принимаем цилиндрическую жесткость модельной пластинки элемента межклапанной перемычки крышки цилиндра постоянной и равной

$$D_p = \frac{E_p \cdot h_p^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (1)$$

где E_p - приведенный модуль упругости материала межклапанной перемычки крышки цилиндра тепловозного дизеля типа 1А-5Д49, отлитой из высокопрочного чугуна марки ВЧ50 $E_{\text{ч}} = 1,75 \cdot 10^5$ МПа.

3. Для модели прямоугольной пластинки элемента межклапанной перемычки крышки цилиндра и с учетом введенных допущений запишем дифференциальное уравнение изгибных колебаний в перемещениях в виде [6,7]

$$\frac{\partial^4 W_p}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W_p}{\partial y^4} = \frac{q_p(x,y)}{D_p}. \quad (2)$$

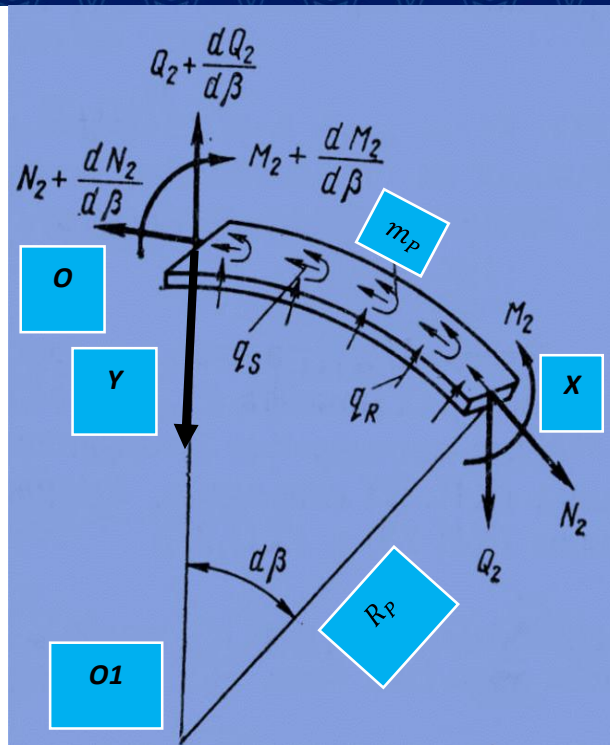


Рисунок 1. Расчетная схема модели межклапанной перемычки крышки цилиндра тепловозного дизеля в виде прямоугольной пластинки при изгибно-крутильных колебаниях.

Используем функции изгиба срединного слоя модели межклапанной перемычки крышки цилиндра вдоль оси Ox , учитывающие собственные функции изгиба упругой пластинки, которые возникают при механических воздействиях и пульсациях давления паровых газов в цилиндре. В связи с этим с учетом нелинейности воздействия примем динамическую нагрузку в виде гармонического разложения в ряд

$$\frac{q_p(X,Y)}{D_p} = \sum_{i=1,3,5} A_{ip}(Y) \cdot \sin \frac{i\pi X}{2 \cdot l_p}. \quad (3)$$

Для таких допущений возможно по методу Фурье представить решение уравнения (2) в форме суммы ряда вида

$$W_{ip}(X,Y) = W_{ip}(Y) \cdot \sin \frac{i\pi X}{2 \cdot l_p} \quad (4), \quad \text{где } i = 1,3,5 \dots$$

После подстановки частных производных от (4) в уравнение (2) для каждой « i » формы колебаний получим уравнение

$$\frac{d^4 W_{pi}}{dY^4} - \frac{\pi^2 \cdot i^2}{4 \cdot l_p^2} \cdot \frac{d^2 W_{pi}}{dY^2} + \frac{\pi^4 \cdot i^4}{16 \cdot l_p^4} \cdot W_{pi} = A_{ip}(Y), \quad (5)$$

которое допускает точные решения для определения функции изгибных перемещений межклапанной перемычки крышки цилиндра тепловозного дизеля типа 1А-5Д49 $W_{ip}(X,Y)$.

Для этого дифференциального уравнения (2) действительны граничные условия при закреплении упругой пластины по контуру.

Решение дифференциального уравнения (2) выполняем методом операционного преобразования Лапласа [6, с.271]. В результате получаем решение для $W_{ip}(Y)$ вида



$$\begin{aligned}
 W_{iP}(Y) = A_{iP} & \left[\frac{16 \cdot h_{II}^4}{\pi^4 \cdot i^4} + \frac{(\rho_1^2 - \rho_2^2) \cdot sh\rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - 2\rho_1\rho_2 \cdot ch\rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y}{2\rho_1\rho_2 \cdot [(\rho_1^2 - \rho_2^2) + 4 \cdot \rho_1^2 \cdot \rho_2^2]} \right] + W_{oi} \\
 & \cdot \frac{1}{2\rho_1\rho_2} \cdot [(\rho_1^2 - \rho_2^2) \cdot sh\rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - 2\rho_1\rho_2 \cdot ch\rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y] + \\
 & + \dot{W}_{oi} \cdot \frac{1}{2\rho_1\rho_2} \cdot [\rho_1 \cdot ch\rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - \rho_2 \cdot sh\rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y] + \\
 & + (\ddot{W}_{oi} + \frac{\pi^2 i^2}{4 \cdot h_K^2} \cdot W_{oi}) \cdot \frac{1}{2\rho_1\rho_2} \cdot [sh\rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y] + \quad (6). \\
 & + (\ddot{W}_{oi} + \frac{\pi^2 i^2}{4 \cdot h_K^2} \cdot \dot{W}_{oi}) \cdot \frac{1}{2\rho_1\rho_2} \cdot [\rho_1 ch\rho_1 Y \cdot \sin \rho_2 Y - \rho_2 \cdot sh\rho_1 Y \cdot \cos \rho_2 Y]
 \end{aligned}$$

Начальные условия при колебаниях упругой пластины принимаем нулевыми.

Для изгибно-крутильных колебаний прямоугольного элемента модели межклапанной перемычки крышки цилиндра тепловозного дизеля типа 1А-5Д49 $Q_K(X)$ можно записать следующую систему уравнений (вводится учет переменности массы и жесткостей для эквивалентного несущего каркаса крышки цилиндра)

$$\begin{aligned}
 & \frac{m_k(x)}{Ж_n(x)} \frac{d^2 W_k}{dt^2} + 2b_2 \frac{d^2 W_k}{dz^2} + \frac{b_1 + 2b_2 x}{Ж_n(x)} \frac{d^3 W_k}{dx^3} + \\
 & + \frac{d^4 W_k}{dx^4} - \frac{i_k(x)}{Ж_n(x)} \frac{d^4 W_k}{dx^2 dt^2} - \frac{\delta_1 + 2\delta_2 x}{Ж_n(x)} \frac{d^3 W_k}{dx dt^2} = \frac{n_W(x,t)}{Ж_n(x)}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\frac{i_k(x)}{Ж_k(x)} \frac{d^2 \theta_k}{dt^2} - \frac{r_1 + 2r_2 x}{Ж_k(x)} \frac{d\theta_k}{dx} - \frac{d^2 \theta_k}{dx^2} = n_k(x,t)/Ж_k(x). \quad (8)$$

Решение по реальным конструктивным размерам межклапанной перемычки крышки цилиндра тепловозного дизеля 1А-5Д49 получено численным методом по готовому аналитическому решению (см. формулы (1) ÷ (7)) для граничного элемента в виде упругой пластины путем кусочно-линейной аппроксимации и связки по узлам. Для численных исследований используется среда программирования MATHCad 15.

В результате проведенных аналитико-численных исследований разработан комплексный аналитико-численный метод для исследования напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженного элемента межклапанной перемычки крышки цилиндра дизеля 1А-5Д49 при механических воздействиях и пульсациях давления паровых газов в цилиндре, а также нами разработана методика инженерного расчета напряженного состояния крышек цилиндров тепловозных дизелей при механических воздействиях и пульсациях давления паровых газов в цилиндре с подбором их рациональных параметров для подвижного состава на базе теоретических, экспериментальных и опытно-конструкторских разработок [8,9].

References:

1. Володин А.И. Локомотивные энергетические установки: Учебник для вузов / А. И. Володин [и др.]; ред. А. И. Володин. -М.: Желдориздат, 2002. -715 с.



2. Ролле И.А. Повышение ресурса крышек цилиндров тепловозных дизелей. // 05.22.07: Диссертация ... кандидата технических наук, Петерб. гос. ун-т путей сообщ.- Санкт-Петербург, 2006.- 130 с.
3. Валиев М.Ш. Определение технического состояния двигателя внутреннего сгорания пассажирских локомотивов с помощью диагностических средств. // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2023. 8(113). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/15901> **DOI** - **10.32743/UniTech.2023.113.8.15901**
4. Валиев М.Ш. Диагностирование тепловозных дизелей по параметрам рабочего процесса. Материалы VII между-народной научно-практической конференции «Trans-Mech-Art-Chem». Москва. - 2010. - С. 49-50.
5. Хамидов О.Р., Кудратов Ш.И., Юсупов А.Р. Расчет прочности крышек цилиндра локомотивных энергетических установок. // Journal of Advanced Research and Stability. 2022-yil, № , С. 221-230.
6. Кудратов Ш.И., Турдимуродов Б.Ч., Ахмедова А.Г. Lokomotiv issiqlik kuch qurilmalari dizelining tirsakli vali va uning hisobi. // Journal of Advanced Research and Stability. 2022-yil, Volume 02, Issue 02, P. 213-220. <https://www.sciencebox.uz>
7. Кудратов Ш.И., Турдимуродов Б.Ч. Назначение, неисправности и диагностика топливной аппаратуры дизелей 10Д100./ // Development and innovation online journal. August 2022-yil, part 2. С. 105-122. <https://sites.google.com/view/imxu>