

УДК 539.3+620.178.15

Вовк Л.П.¹, Лупаренко Е.В.²

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассматриваются математические аспекты решения пространственной динамической задачи контактирования цилиндрических деталей машин. Приведена модификация метода суперпозиции, позволяющая провести аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния и дать практические рекомендации по оценке интенсивности локальной концентрации напряжений в нерегулярных зонах контакта, что практически предопределяет прочностные параметры контактной пары.

Детали, воспринимающие контактные нагрузки, как правило, являются одними из наиболее ответственных, и от их прочности зависит работоспособность и надежность всего механизма в целом. Однако при рассмотрении систем контактирующих тел механическими явлениями в зоне контакта зачастую пренебрегают, проводя упрощение и схематизацию усилий, действующих на детали механизма. Такие упрощения могут приводить к неверным результатам, так как в большинстве реальных механизмов закон распределения контактных давлений оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) механизма или конструкции в целом. В связи с этим возникает необходимость исследования НДС деталей механизма в местах их контактного взаимодействия при произвольной площадке контакта, размеры которой зависят от приложенных нагрузок.

Теоретические исследования в этой области сопряжены с решением краевых задач нестационарной динамики со смешанными граничными условиями. Одним из наиболее эффективных является аналитический подход, предложенный в [1] и развитый в работе [2]. Разработка аналитических подходов возможна при введении ряда гипотез [1, 2] или эмпирических коэффициентов [3]. В последние годы широкое распространение при решении упругопластических задач получили численные методы, среди которых наиболее универсальным является метод конечного элемента.

Цель работы – построение алгоритма метода суперпозиции, свободного от предположений раздельного рассмотрения волновых движений с различными типами симметрии относительно срединной плоскости цилиндра, распространения этого метода на трехмерные области с криволинейной границей и применения разработанной схемы для численно-аналитического расчета полей контактных напряжений в поршневом пальце (ПП) двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Постановка задачи. Пусть ПП, моделируемый конечным полым цилиндром, занимает в цилиндрической системе координат область $D: -H \leq z \leq 0 \cup b \leq R \leq a \cup 0 \leq \varphi \leq 2\pi$.

Предполагаем, что материал цилиндра характеризуется упругими параметрами ρ – плотность, λ , μ – коэффициенты Ляме. Пусть вдоль границы области заданы следующие граничные условия в напряжениях (ω – круговая частота виброн нагружения):

$$\begin{aligned} R = a: \quad & \sigma_R = f_1^+(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{Rz} = f_2^+(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{R\varphi} = f_3^+(\varphi, z)e^{-i\omega t}; \\ R = b: \quad & \sigma_R = f_1^-(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{Rz} = f_2^-(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{R\varphi} = f_3^-(\varphi, z)e^{-i\omega t}; \\ z = -H: \quad & \sigma_z = \varphi_1(R, \varphi)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{Rz} = \varphi_2(R, \varphi)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{\varphi z} = \varphi_3(R, \varphi)e^{-i\omega t}; \\ z = 0: \quad & \sigma_z = \varphi_4(R, \varphi)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{Rz} = \varphi_5(R, \varphi)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{\varphi z} = \varphi_6(R, \varphi)e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (1)$$

¹ДонНТУ, д-р техн. наук, проф.

²ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

Движение среды описывается уравнениями линейной теории упругости в смещениях, связь компонент векторов напряжений и деформаций определяется соотношениями закона Гука в цилиндрической системе координат [5].

Решение сформулированной краевой задачи строим с использованием принципа суперпозиции, используя тот факт, что данная область является пересечением подобластей $D_1 : a \leq R \leq b$ и $D_2 : -H \leq z \leq 0$. Вектор смещения $\vec{U}(R, \varphi, z)$ в области $D_1 \cup D_2$ ищем в виде суммы векторов $\vec{U}(R, \varphi, z) = \vec{u}_1(R, \varphi, z) + \vec{u}_2(R, \varphi, z)$, определяющих решения вспомогательных задач для бесконечного цилиндрического слоя ($D_1 - \vec{u}_1$) и слоя с плоскопараллельными границами ($D_2 - \vec{u}_2$).

Решение вспомогательной задачи для бесконечного цилиндрического слоя. С этой целью рассмотрим установившиеся гармонические колебания области $D_1 : a \leq R \leq b$ при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} R = a : \sigma_R &= X_1^+(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \tau_{Rz} = X_2^+(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \tau_{R\varphi} = X_3^+(\varphi, z)e^{-i\omega t}; \\ R = b : \sigma_R &= X_1^-(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \tau_{Rz} = X_2^-(\varphi, z)e^{-i\omega t}, \tau_{R\varphi} = X_3^-(\varphi, z)e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Функции напряжений X_j^\pm , вообще говоря, неизвестны, но в рамках постановки вспомогательной задачи предполагаем их заданными и принадлежащими к классу суммируемых вдоль всей границы рассматриваемой подобласти. На бесконечности задаются условия излучения энергии колебаний. Эти предположения являются естественными и необходимы для корректного использования при решении задачи методики интегральных преобразований Фурье [4]. В результате получено следующее представление для компонент вектора перемещений:

$$\vec{u}_1(R, \varphi, z) = \{u_{11} = u_{R1}, u_{21} = u_{\varphi 1}, u_{31} = u_{z1}\} \\ u_{k1} = \frac{a}{2\pi\mu} \int_{\Gamma} \{\tilde{u}_{k1}(R, \phi, \alpha)\} \exp[i\alpha z] d\alpha, \quad (3)$$

$$\tilde{u}_{k1}(R, \phi, \alpha) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=1}^3 [G_{jn}^{(k1)}(R, \alpha, \omega) A_{jn}(\alpha, \omega) + G_{jn}^{(k2)}(R, \alpha, \omega) B_{jn}(\alpha, \omega)] \Delta_n^{-1}(\alpha, \omega) \exp(in\phi)$$

Вид контура интегрирования Γ в комплексной плоскости α определяется использованием принципа предельного поглощения при удовлетворении условиям излучения на бесконечности [6] и имеет следующий вид: обходит положительные особенности подынтегральной функции снизу, отрицательные – сверху, а на остальной части совпадает с вещественной осью. Функции $A_{jn}(\alpha, \omega)$, $B_{jn}(\alpha, \omega)$ определяются при удовлетворении выражениями (3) граничным условиям (2), $G_{jn}^{(k1)}(R, \alpha, \omega)$, $G_{jn}^{(k2)}(R, \alpha, \omega)$, $\Delta_n(\alpha, \omega)$ имеют довольно громоздкую структуру, например,

$$\begin{aligned} G_{jn}^{(11)}(R, \alpha, \omega) &= \alpha \left[J_n \left(R \sqrt{\theta_j^2 - \alpha^2} \right) \right]_{\alpha}^{\prime}, \quad j = 1, 2; \\ G_{3n}^{(11)}(R, \alpha, \omega) &= \frac{in\alpha}{R} J_n \left(R \sqrt{\theta_2^2 - \alpha^2} \right) = G_{2n}^{(21)}(R, \alpha, \omega); \\ \theta_1^2 &= \frac{\rho\omega^2 a^2}{\mu}, \quad \theta_2^2 = \frac{\rho\omega^2 a^2}{\lambda + 2\mu} \text{ и т.п.} \end{aligned} \quad (4)$$

При подстановке представлений (3) в граничные условия (2) с использованием соотношений закона Гука в цилиндрической системе координат, в преобразованиях Фурье по координате z с разложением всех заданных и неизвестных функций в ряд Фурье по координате φ получаем для каждого значения параметра n систему шести функциональных уравнений для определения неизвестных функций $A_{jn}(\alpha, \omega)$, $B_{jn}(\alpha, \omega)$. Численные значения этих коэффициентов при заданных значениях параметров проще получить, реализуя численный

алгоритм их определения непосредственно на ЭВМ. Точность получаемых при этом результатов не ниже, чем при расчете по аналитическим представлениям.

Итоговое представление решений этой задачи имеет вид (3), где

$$\tilde{u}_{kj}(R, \varphi, \alpha) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=1}^3 [\Phi_{jn}^{(k+)}(R, \alpha, \omega) \bar{X}_{jn}^{(+)}(\alpha) + \Phi_{jn}^{(k-)}(R, \alpha, \omega) \bar{X}_{jn}^{(-)}(\alpha)] \exp(in\varphi) \quad (5)$$

$$\text{Здесь } \bar{X}_{jn}^{(\pm)}(\alpha) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X_j(z, \varphi) \exp[-i(n\varphi + \alpha z)] dz d\varphi$$

Решение вспомогательной задачи для бесконечного слоя с плоскопараллельными границами. Рассмотрим задачу об установившихся гармонических колебаниях области D_2 : $x, y \in (-\infty, +\infty)$; $-H \leq z \leq 0$ при следующих граничных условиях

$$\begin{aligned} z = -H: \quad \sigma_z = Y_1(x, y)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{xz} = Y_2(x, y)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{yz} = Y_3(x, y)e^{-i\omega t}; \\ z = 0: \quad \sigma_z = Y_4(x, y)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{xz} = Y_5(x, y)e^{-i\omega t}, \quad \tau_{yz} = Y_6(x, y)e^{-i\omega t}. \end{aligned} \quad (6)$$

На бесконечности, как и ранее, задаем условия излучения энергии колебаний. Решение задачи строим методом интегральных преобразований с использованием принципа предельного поглощения [6]. В результате получаем следующее представление для амплитудной функции вектора смещения $\bar{u}_2(x, y, z) = \{u_{12}, u_{22}, u_{32}\}$:

$$u_{j2}(x, y, z) = \frac{a}{4\pi^2 \mu} \iint_{\Gamma} \tilde{u}_{j2}(\gamma, \beta, z) \exp[i(\gamma x + \beta y)] d\gamma d\beta \quad (7)$$

$$\text{Здесь } \tilde{u}_{j2}(\gamma, \beta, z) = \sum_{k=1}^6 L_{jk}(\gamma, \beta, z) \bar{Y}_k(\gamma, \beta), \quad j = 1, 2, 3;$$

$$\begin{aligned} L_{11}(\gamma, \beta, z) = \frac{i\beta}{\mu u^2 \Delta_1(u)} [(u^2 + \sigma_2^2)^2 (ch \sigma_1 z - ch \sigma_1 (H-z) ch \sigma_2 H) + 8u^2 \sigma_1 \sigma_2 sh \sigma_2 H sh \sigma_1 (H-z) + \\ + 4u^2 (u^2 + \sigma_2^2) (ch \sigma_2 z - ch \sigma_2 (H-z) ch \sigma_1 H) + \frac{(u^2 + \sigma_2^2)^3 sh \sigma_1 H sh \sigma_2 (H-z)}{\sigma_1 \sigma_2}]_{1, \dots,} \end{aligned}$$

$$u^2 = \gamma^2 + \beta^2; \quad \sigma_j^2 = u^2 - \theta_j^2; \quad \theta_j = \frac{\omega a}{V_j}; \quad V_1^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}; \quad V_2^2 = \frac{\mu}{\rho};$$

$$\Delta_1(u) = 8(u^2 + \sigma_2^2)^2 (ch \sigma_1 H ch \sigma_2 H - 1) - [(u^2 + \sigma_2^2)^4 u^{-2} + 16u^2 (\sigma_1^2 \sigma_2^2)] (\sigma_1^{-1} \sigma_2^{-1}) sh \sigma_1 H sh \sigma_2 H;$$

$$L_{k(j+3)}(\gamma, \beta, z), \quad j = 1, 2, 3, \text{ получаем из } L_{kj}(\gamma, \beta, z) \text{ меняя во всех формулах } z \text{ и } H - z$$

$$\text{местами, } \bar{Y}_k(\gamma, \beta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Y_k(x, y) \exp(-i[\gamma x + \beta y]) dx dy.$$

Полученные соотношения позволяют проводить расчет амплитудных характеристик вектора смещения в слое при заданных на его гранях напряжениях $Y_k(x, y) \exp(-i\omega t)$.

Система интегральных уравнений пространственной динамической задачи для конечного цилиндра при однородных граничных условиях. Рассмотрим исходную краевую задачу о возбуждении колебаний в конечном цилиндрическом слое в пространственной постановке (граничные условия (1)). В соответствии с принципом суперпозиции ищем в виде суммы решений вспомогательных краевых задач для бесконечного цилиндрического слоя с граничными условиями (2) и плоскопараллельного слоя (граничные условия (6)):

$$\bar{u}(x, y, z) = \bar{u}_1(x, y, z) + \bar{u}_2(R, \varphi, z). \quad (8)$$

Представления для компонент векторов \bar{u}_j определены соотношениями (3), (4), (5) – для \bar{u}_1 и (7) для \bar{u}_2 . Функции напряжений, определенные граничными условиями вспомогательных краевых задач, вообще говоря, неизвестны. Для их определения используем граничные условия исходной краевой задачи (1) и соотношения закона Гука в цилиндрических и декартовых

координатах [5]. В результате получаем систему двенадцати интегральных уравнений относительно двенадцати неизвестных функций напряжений $X_j^{(\pm)}(\phi, z)$, $Y_n(x, y)$, ($j = 1, 2, 3$; $n = 1, 2, \dots, 6$), определяющих граничные условия вспомогательных задач.

Система интегральных уравнений пространственной динамической контактной задачи для поршневого пальца. При постановке контактной задачи предполагается, что на части поверхности цилиндра заданы компоненты вектора смещения, а на остальной части – компоненты вектора напряжения. Рассмотрим случай, когда на внешней поверхности цилиндра $R = a$ в области $\Omega: \phi \in [-\phi_0, \phi_0] \cup z \in [h_1, h_2]$ заданы компоненты вектора смещения, например $u_R(\phi, z) = U(z, \phi)$. При контакте без трения касательные напряжения в области Ω полагаем равными нулю ($f_2^{(+)} = f_3^{(+)} = 0$). Нормальные усилия в области контакта ($f_1^{(+)}(R, \phi)$) неизвестны и подлежат определению. Получим систему 12 уравнений с 13 неизвестными. Для определения дополнительного неизвестного (нормального контактного давления $f_1^{(+)}(R, \phi)$) используем условие равенства компоненты смещения поверхности цилиндра в области Ω – $u_R(\phi, z)$ смещению подошвы штампа $U(z, \phi)$. Это дополнительное уравнение имеет следующую структуру

$$u_R = u_{11}(a, \phi) + \sqrt{u_{12}^2(a \cos \phi, a \sin \phi, z) + u_{22}^2(a \cos \phi, a \sin \phi, z)} = U(z, \phi) \quad (9)$$

где u_{11} определяется соотношениями (3) – (5); u_{12}, u_{22} – соотношениями (7). В результате правая часть (9) является интегральным оператором от неизвестных функций напряжений X_j, Y_j . Получаемое интегральное уравнение замыкает СИУ. Алгоритм получения представлений интегральных операторов достаточно прост при матричной записи. Однако при его реализации аналитические представления для подынтегральных функций операторов системы чрезвычайно громоздки и труднообозримы. Для исследования и построения решения систем предложено пользоваться численными методами, позволяющими производить расчет значений подынтегральных функций при фиксированных значениях параметров. Для заданных функций напряжений разработаны алгоритмы и программы расчета интегральных представлений, определяющих операторы системы.

Численные результаты. Рассмотрим приложение разработанной выше численно-аналитической методики к уточненному расчету полей контактных напряжений в деталях цилиндрично-поршневой группы ДВС. Анализ проведем двумя способами: 1) при помощи метода конечных элементов; 2) решением системы интегральных уравнений с выделением математической особенности механических характеристик в нерегулярных точках области контактирования. В качестве основной расчетной модели был выбран ПП 406.1004020-01 для двигателей марок ЗМЗ-4061.10, ЗМЗ-4062.10 и ЗМЗ-4063.10, шатун в сборе 24-1004045-02 с втулкой 406-1004052-10, поршень ЗМЗ 523-1004014.

При реализации первого способа воспользуемся методикой работы [8]. В связи с тем, что точное распределение контактных напряжений между ПП и бобышкой и между головкой шатуна и ПП неизвестны и подлежат определению, в зоне контакта моделировали сетку контактных элементов (общим количеством до 36000). Взаимодействие деталей должно удовлетворять условиям контактирования, в соответствии с которыми точки одного тела не должны проникать внутрь другого.

Для обнаружения условий проникновения задаются контактные узлы, а на поверхности поршневого пальца – контактные элементы. Вместе они образуют контактную пару. Контактный узел, попадая на поверхность контактного элемента, скользит вдоль нее с коэффициентом трения μ . При вычислении контактных сил использовался известный метод штрафных функций.

Результаты решения динамической задачи представлены в виде полей напряжений, деформаций и перемещений деталей поршневой группы. На рис. 1, 2 показаны нормальные напряжения σ_y, σ_x , соответствующие пятой моде колебаний и действующие в глобальных направлениях Y, X в принятой системе координат. Видно, что в зоне контакта бобышки

поршня с поршневым пальцем возникает концентрация напряжений, обусловленная влиянием граничных эффектов. Поля напряжений имеют характерный пик в окрестности особой точки и ниспадающий характер на удалении. Похожая картина возникает в зоне контакта поршневого пальца с головкой шатуна. На рис. 1, 2 видно, что кроме сжимающих напряжений, обусловленных контактным взаимодействием, возникают значительные растягивающие напряжения, обусловленные изгибом, и приводящие к овализации пальца. Попеременное воздействие этих напряжений приводит к появлению усталостных трещин и разрушению. В настоящее время в инженерной практике принято использовать приближенные зависимости, предложенные в работе [7].

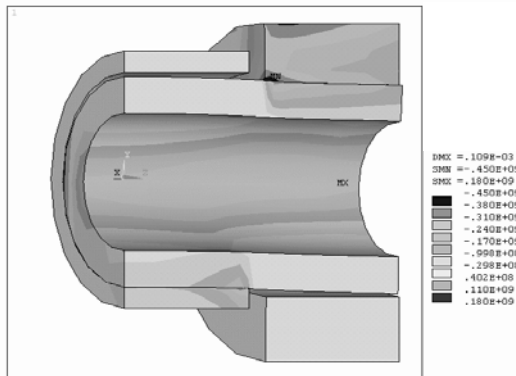


Рис. 1 – Поле нормальных напряжений σ_y .

Предполагается, что нагрузка по длине поршневого пальца распределяется по кусочно-линейному закону. Ясно, что такая схема нагружения будет давать весьма приближенные результаты расчета НДС пальца, так как не учитывает концентрации напряжений в особых точках, характерные черты которой присутствуют на рис. 1, 2.

При расчете по предлагаемой в данной работе численно-асимптотической методике предполагаем, что поле напряжений имеет корневую особенность вдоль границы зоны контакта. Это позволяет выделить сингулярные члены в разложениях механических характеристик и улучшить сходимость функциональных рядов для контактных напряжений.

Для примера детально рассмотрим интенсивность локальной концентрации напряжений,

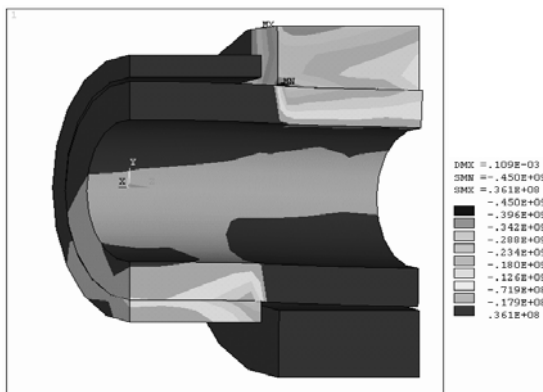


Рис. 2 – Поле нормальных напряжений σ_x .

возникающей в зоне контакта поршневого пальца с головкой шатуна (см. рис. 1, 2). Подсчитаем относительное значение внутренней энергии E [5], накопленной в нерегулярной зоне контакта Ω возле кромки головки шатуна. Значение E представляет собой процентное отношение энергии, накопленной в области Ω к энергии, накопленной во всей области контакта головки шатуна с поршневым пальцем. Если взять начало координат в плоскости кромки головки шатуна, то область Ω задается неравенствами (координата z измеряется в миллиметрах): $\Omega: \varphi \in [-\pi, \pi] \cup z \in [-1, 1]$.

В таблице 1 подсчитаны значения внутренней энергии на первых шести резонансных частотах, полученные при помощи метода конечных элементов (E_1) и при помощи решения

Таблица 1 – Относительная внутренняя энергия, накопленная в области концентрации

№ моды	Значение собственной частоты, Гц	E_1	E_2
1	30.7	51.3	56.4
2	113.6	46.7	50.5
3	326.2	46.1	47.7
4	648.7	40.8	41.8
5	864.5	38.8	38.5
6	1023.6	38.0	34.9

определяющей системы интегральных уравнений (E_2). Величины E_1 и E_2 можно принять за показатели интенсивности концентрации напряжений в области Ω .

Из данных таблицы 1 следует:

1. Для любой рассмотренной моды колебаний наблюдается существенная концентрация напряжений в нерегулярной области контакта Ω , которая составляет лишь примерно 4 % от общей площади контакта поршневого пальца с головкой шатуна. Это еще раз свидетельствует о невозможности применять в уточненных прочностных расчетах инженерные гипотезы [7].

2. С увеличением порядкового номера моды колебаний интенсивность концентрации напряжений несколько уменьшается, приближаясь к постоянной величине.
3. Результаты расчетов, проведенных по обеим методикам, практически совпадают, что свидетельствует о достоверности полученных данных.
4. Для достаточно больших значений частоты нагружения ω целесообразно применять конечно-элементные методики расчета, поскольку весь алгоритм решения определяющей системы интегральных уравнений контактной задачи базируется на том, что длина волны много больше размеров поршневого пальца.

Большой интерес представляет оценка роли граничных условий в формировании спектра резонансных частот и форм колебаний полых цилиндрических деталей. С этой точки зрения в работе проведено рассмотрение динамической смешанной контактной задачи, которая имеет выраженное прикладное значение. Получено интегральное уравнение, определяющее неизвестные напряжения в области контакта, которое замыкает определяющую систему интегральных уравнений относительно неизвестных функций вспомогательной задачи. Таким образом, получены возможности численного исследования всех особенностей контактного деформирования полых цилиндрических деталей при общем случае нагружения их внешней поверхности.

В качестве перспектив дальнейших исследований следует рекомендовать распространение предложенной численно-аналитической методики для анализа полей контактных напряжений для существенно анизотропных тел и тел с трещинами.

Выводы

Предложенная в работе методика обобщения метода суперпозиции для построения решения пространственной динамической задачи вибрационного деформирования полых цилиндрических тел обладает достаточным элементом научной новизны. Суть ее состоит в возможности представления общего решения в виде суммы решений вспомогательных задач для бесконечного цилиндрического слоя и бесконечного слоя с плоскопараллельными границами. Применение интегральных преобразований для решения вспомогательных задач позволяет получить их решение в замкнутой форме.

Перечень ссылок

1. Александров В.М. Контактные задачи в машиностроении / В.М. Александров, Б.Л. Ромалис. – М.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Кадомцев И.Г. Осесимметричное упругопластическое соударение двух тел, одно из которых коническое / И.Г. Кадомцев // Изв. СКНЦ ВШ. – 1990. – № 4. – С. 50 – 54.
3. Матлин М.М. Определение параметров первоначально точечного упругопластического контакта по физико-механическим свойствам контактирующих тел / М.М. Матлин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1993. – № 5. – С. 11 – 20.
4. Уфлянд Я.С. Интегральные преобразования в задачах теории упругости / Я.С. Уфлянд. – М.: Наука, 1968. – 402 с.
5. Гринченко В.Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах / В.Т. Гринченко, В.В. Мелешко. – Киев: Наук. думка. 1981. – 284 с.
6. Ворович И.И. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей / И.И. Ворович, В.А. Бабешко. – М.: Наука, 1979. – 319 с.
7. Кинасошвили Р.С. Расчет поршневого пальца авиационного двигателя / Р.С. Кинасошвили. – М.: Оборонгаз, 1977. – 148 с.
8. Вовк Л.П. Применение акустического метода свободных колебаний к диагностике технологически неоднородных деталей / Л.П. Вовк // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2004. – № 3. – С. 55 – 58.

Рецензент: Ю.Е. Коляда
д-р физ.-мат. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 27.03.2008