

Математическая модель резонанса в трубопроводе системы выпуска отработанных газов после восстановления герметичности безразборным методом

В.Ю. Бойков, канд. техн. наук, доцент, докторант ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»
В.И. Балабанов, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологий и машин в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»,
vbalabanov@timacad.ru

А.Ф. Ахметзянов, аспирант ФГБОУ ВО «Российский государственный

аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»

Аннотация. *Предложена и рассчитана математическая модель, позволяющая при ремонте элементов трубопроводов системы выпуска отработанных газов в автомобилях в каждом конкретном случае негерметичности подобрать термостойкий адгезивный материал с оптимальными характеристиками таким образом, чтобы избежать разрушения от резонанса в процессе эксплуатации.*

Ключевые слова: *техническое обслуживание, трубопроводы, система выпуска отработанных газов, адгезивы, безразборный сервис, резонанс, трибосоставы.*

С помощью клеевых составов можно восстановить работоспособность деталей и поверхностей без использования дорогостоящего специального оборудования. Такие технологии находят широкое применение в развитых странах (США, Германия, Швейцария), где имеется целая сеть предприятий, производящих большую номенклатуру клеевых составов, которые могут использоваться как на специализированных ремонтных предприятиях (автосервисы, автотранспортные предприятия), так и частными пользователями автотранспортных средств [1-4].

В автотракторной технике АПК имеется целая сеть трубопроводов с разнообразными режимами работы. Все трубопроводы можно условно разделить на две большие группы: трубопроводы, работающие под давлением (напорные), и безнапорные.

Трубопроводы системы выпуска отработанных газов можно считать безнапорными, однако даже в штатном режиме работы они подвергаются сильному нагреву, от вплоть до 500-8000С в районе выпускного коллектора [5]. Восстановление герметичности данного трубопровода следует производить с помощью высокотемпературного адгезива (например, на основе силиката натрия), иногда с использованием стеклоткани, которая служит для армирования адгезива, придания ему нужной формы и предотвращения его стекания [6]. Данный способ ремонта является не только экономически оправданным, но и часто бывает единственно возможным, так как на трубопроводе, сильно пораженном коррозией, сварку применить невозможно.

Существенным недостатком такого способа ремонта является сравнительно небольшая долговечность клеевого соединения. Испытания показывают, что в случае с восстановленным при помощи адгезива трубопроводом системы выпуска отработанных газов, разрушение клеевой накладке, как правило, происходит по двум причинам: 1) в результате термических деформаций; 2) вследствие вибрационных нагрузок. Последние особенно опасны, если частоты собственных колебаний клеевой накладке попадают

в диапазон частот колебаний труб системы выпуска отработанных газов в режиме холостого хода и при движении автомобиля.

В большинстве случаев ремонтная клеевая накладка, восстанавливающая герметичность трубы, имеет прямоугольную форму, при небольших линейных размерах накладки по сравнению с диаметром трубы с большой точностью при расчетах наладку можно считать плоской (рис.1).

Будем считать клеевую наладку прямоугольной пластиной (с линейными размерами a и b и толщиной h), которая в пределах упругих деформаций подчиняется закону Гука. Тогда свободные колебания такой пластины описываются уравнением [7]:

$$\rho \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{D}{h} \Delta^2 \zeta = 0 \quad , \dots \dots \dots (1)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – жесткость пластины , $\dots \dots \dots (2)$

ζ - перемещение по нормали к плоскости пластины, E – модуль продольной упругости, μ – коэффициент Пуассона, ρ – плотность клеевого состава, Δ - двумерный оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

Общее решение уравнения (1) будем искать в виде:

$$\zeta = \zeta_0(x; y) \cos(\omega t + \varphi_0) \quad , \dots \dots \dots (3)$$

где ω – угловая частота собственных колебаний пластины (рад/с), φ_0 – начальная фаза колебаний (рад), t – время (с).

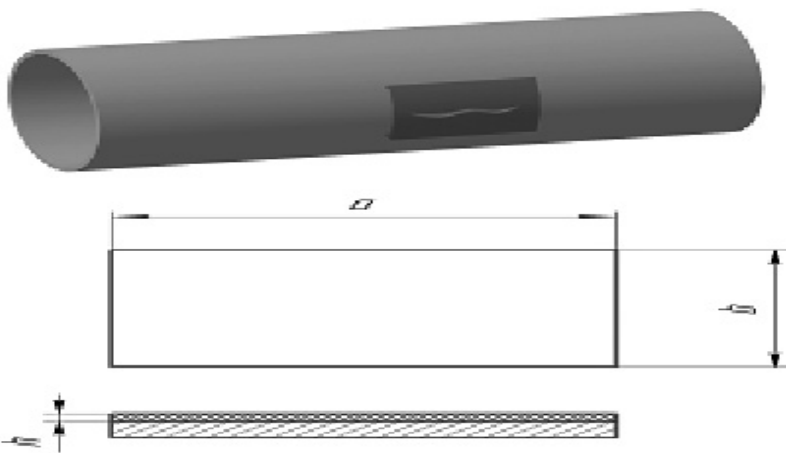


Рис. 1. Схема восстановления трубы системы выпуска отработанных газов при помощи клеевой накладки

$$\rho \frac{\partial^2 (\zeta_0 \cos(\omega t + \varphi_0))}{\partial t^2} + \frac{D}{h} \Delta^2 \zeta_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = 0$$

После вычисления второй производной:

$$-\rho \omega^2 \zeta_0 \cos(\omega t + \varphi_0) + \frac{D}{h} \Delta^2 \zeta_0 \cos(\omega t + \varphi_0) = 0$$

Разделим обе части уравнения на $\frac{D}{h} \cos(\omega t + \varphi_0)$:

$$\Delta^2 \zeta_0 - \frac{h}{D} \rho \omega^2 \zeta_0 = 0$$

Используя выражение (2) получим:

$$\Delta^2 \zeta_0 - \frac{12(1-\mu^2)}{Eh^2} \rho \omega^2 \zeta_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

С учетом обозначения

$$\omega^2 \frac{12\rho(1-\mu^2)}{Eh^2} = k^4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

уравнение (4) приобретает вид:

$$\Delta^2 \zeta_0 - k^4 \zeta_0 = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

Направим оси координат вдоль сторон пластины. Будем считать, что края пластины свободно опираются, тогда граничные условия приобретают вид:

$$\text{при } x=0,a; \zeta=0, \quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = 0,$$

$$\text{при } y=0,b; \zeta=0, \quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} = 0$$

Решение, удовлетворяющее этим условиям:

$$\zeta_0 = A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad \dots\dots\dots (7)$$

где А – амплитуда колебаний, m и n – любые целые числа.

Найдем ω из выражения (5):

$$\omega = \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} k^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Подставим частное решение (7) в уравнение (6):

$$\Delta^2 \left(A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \right) = k^4 A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

После применения оператора Лапласа:

$$\Delta \left(\pi^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \right) = k^4 A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

$$\pi^4 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = k^4 A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

Разделим обе части уравнения на $A \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$ и извлечем корень:

$$\pi^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] = k^2 \dots\dots\dots 9)$$

После подстановки (9) в (8):

$$\omega = \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \pi^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (10)$$

Окончательно частота собственных колебаний клеевой наклейки имеет вид:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho(1-\mu^2)}} \pi^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (11)$$

Из выражения (11) видно, что, так как m и n – любые целые числа, то клеевая наклейка имеет бесконечное множество частот собственных колебаний (гармоник). Следует заметить, что физический смысл имеют лишь натуральные значения m и n, а наибольшую амплитуду имеют низкочастотные гармоники (m=1-2, n=1-2).

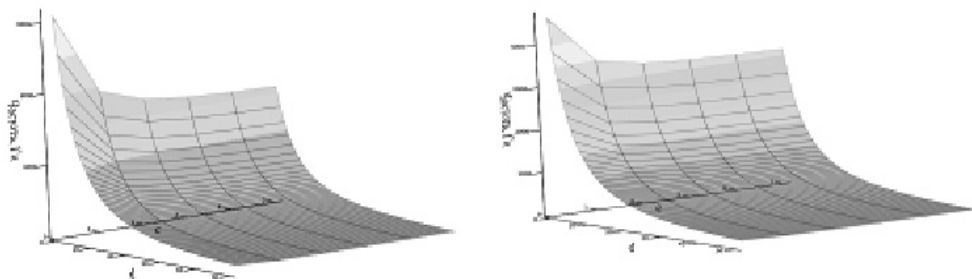
Чтобы обобщить полученные результаты и отвлечься от конкретных размеров наклейки, введем безразмерные параметры: b/h=d и a/b=c. При этом толщина клеевого слоя h, как правило, задается технологией склеивания. Выражение (11) будет иметь вид:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eh^4}{12h^2\rho(1-\mu^2)}} \pi^2 \left[\left(\frac{m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right] = \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} \left(\frac{1}{h} \right) \left(\frac{1}{d} \right)^2 \pi^2 \left[\left(\frac{m}{c} \right)^2 + n^2 \right]$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}} \left(\frac{1}{h} \right) \left(\frac{1}{d} \right)^2 \pi^2 \left[\left(\frac{m}{c} \right)^2 + n^2 \right] \dots\dots\dots (12)$$

С помощью программы Mathcad 14 построим графики зависимости (12) ν от b/h=d и a/b=c при d=10..50, c=1..5.(h=1 мм).

На рис. 2 представлены графики зависимости частоты собственных колебаний клеевой накладки на основе состава ЦМК-20 ($E=210\text{МПа}$, $\rho=2400\text{кг/м}^3$, $\mu=0,5$).

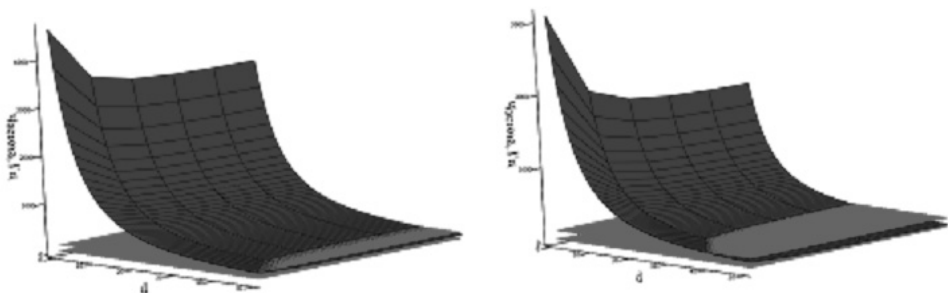


(1-ая гармоника: $m=1, n=1$)

(2-ая гармоника $m=1, n=2$)

Рис. 2. Частота ν собственных колебаний клеевой накладки в зависимости от d и c

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования показывают, что частота вынужденных колебаний труб системы выпуска отработанных газов близка к частоте вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания. Если учесть, что коленчатый вал двигателя вращается со скоростью от 600 до 8000 об/мин, то частота воздействия возмущающей силы на клеевую накладку лежит в диапазоне от 10 Гц до 133 Гц. Наиболее опасный режим работы адгезива возникает при попадании частот собственных колебаний клеевой накладки в данный диапазон, так как из-за резонансных явлений амплитуда колебаний накладки многократно увеличивается, что, в свою очередь, ведет к многократному увеличению напряжений, которые выходят за предел выносливости адгезива к повторно-переменным нагрузкам, и, как следствие, к разрушению клеевого соединения. Путем подбора геометрических характеристик клеевой накладки следует избегать подобного явления. На рис. 3 показаны графики частот собственных колебаний клеевой накладки (1 и 2 гармоника) в зависимости от ее геометрических характеристик, совмещенные с диапазоном частот колебаний труб системы выпуска отработанных газов.



(1-ая гармоника: $m=1, n=1$)

(2-ая гармоника: $m=1, n=2$)

Рис. 3. Частота собственных колебаний клеевой накладки и диапазон колебаний труб глушителя

Разработанная математическая модель, имитирующая физические процессы при ремонте элементов трубопроводов системы выпуска отработанных газов в автомобилях, позволяет в каждом конкретном случае негерметичности подобрать термостойкий адгезивный материал с оптимальными

характеристиками (E , ρ , μ), а также оптимальные геометрические размеры клеевой наклейки для того, чтобы избежать резонанса и тем самым значительно продлить срок службы клеевого соединения.

Литература

Гаркунов Д.Н., Балабанов В.И. Восстановление двигателей внутреннего сгорания без их разборки [Текст] / Д.Н. Гаркунов, В.И. Балабанов. // Тяжелое машиностроение. М., 2000, № 2. С. 18-22.

Балабанов В.И. Повышение долговечности двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники реализацией избирательного переноса при трении [Текст] / Дис. ... докт. техн. наук, М. МГАУ, 1999. – 516 с.

Балабанов В.И. Безразборное восстановление трущихся соединений [Текст] М., МГАУ, 1999. – 72 с.

Мохов А.И., Бойков В.Ю. Ремонт машин с применением анаэробных и формообразующих полимерных материалов / Механизация строительства. – 2006. – № 9. – С.9-11.

Бойков В.Ю., Башкирцев Ю.В. Экспериментальные исследования распределения температуры в системе выпуска отработанных газов в автомобилях [Текст] / Сб. материалов МНТК «Ресурсосбережение XXI век». – Орел, ОрГАУ. – 2006. – С. 147-153.

Бойков В.Ю., Сливов А.Ф., Башкирцев Ю.В. Классификация термостойких адгезивов для технического сервиса машин и оборудования в АПК [Текст] / Технический сервис в агропромышленном комплексе. Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. – 2004. – № 1(6). – С.26-31.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10-ти т. Т. VII Теория упругости: Учеб. Пособие – 4-е изд., испр. и доп. [Текст] – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

Mathematical model of resonance in the exhaust system pipe after restore of the leak tightness by the without disassemble method

Boykov V., PhD, Associate Professor, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.

Balabanov V., d. SC., Prof., head of department of technologies and machinery for crop production, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.

Ahmetzânov A.f., PhD student, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.

Annotation. *Suggested and designed mathematical model allowing during the repair of exhaust systems pipelines in each case of the leakage to pick up heat-resistant adhesive material with optimal characteristics in such a way as to avoid the destruction of resonance during operation.*

Keywords: *maintenance, piping, exhaust system, adhesives, without disassemble service, resonance, tribocompositions.*

References:

Garkunov D.N., Balabanov V.I. Restoring internal combustion engines without disassembling [Text] / D.N. Garkunov, V.I. Balabanov. Heavy machinery. M., 2000, № 2. - P. 18–22.

Balabanov V.I. Increase of durability of internal combustion engines of agricultural machinery implementation of selective transfer by friction [Text] / Dis. ... Doctor. tehn. Science, MSAU. M., 1999. - 516 p.

Balabanov V.I. Nondemountable recovery of rubbing compounds [Text]. M. MSAU, 1999. - 72 p.

Mokhov A., Boikov V. Repair of machines by using anaerobic and mass polymer materials/ Building Mechanization. -2006. – № 9. -P. 9-11.

5. *Boikov V., Bashkirtsev U.* Experimental study of temperature distribution in exhaust system in automobiles [Text] / ISRC “Resource-saving twenty-first century”. - Orel, OrSAU. - 2006. -P. 147-153.

6. *Boikov V., Slivov A., Bashkirtsev U.* Classification of heat-resistant adhesives for technical service of machines and equipment in agriculture [Text] / Technical support in the agricultural sector. Journal of MSAU them. V. Goryachkin. -2004. -No. 1 (6). - P. 26-31.

7. *Landau L., Lifshitz E.* Theoretical physics. VII Theory of elasticity: Stud. Manual-4 ed., Corr. and additional charge. - Moscow: Nauka. H. Ed. Physical and mathematical literature, 1987. -248 p.