

Рекадзе П.Д.,
Родионов Л.В.

Самарский национальный
исследовательский университет
имени С.П. Королева
ул. Московское шоссе, д. 34,
г. Самара, Российская Федерация
443086
rekadze.pd@ssau.ru
rodionov@ssau.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИИ НАСОСА

В работе описаны меры по снижению уровня акустического излучения малорасходного шестеренного насоса внешнего зацепления. На основе эксперимента на стендовой установке проведена оценка акустической эффективности применения роторов из материала РЕЕК в конструкции шестеренного насоса при оборотах приводного вала 1000...2500 об/мин и давлении нагнетания 3...12 бар. Для сравнения в статье приведена акустическая эффективность через относительную разность акустического излучения насоса с компоновками роторов «сталь-сталь» и «сталь-РЕЕК». Также приведен обзор методов и способов снижения механического шума зубчатой передачи, оценено демпфирование современных конструкционных полимерных материалов на основе полиамида, полиацетали, полифениленсульфида и полиэфирэфиркетона в сравнении с традиционными материалами машиностроения – сталь, алюминий, чугун серый. Предложены рекомендации по применению полимерных материалов в конструкции насоса.

Ключевые слова: шестеренчатый насос; акустика; полимерные материалы; демпфирование

1 Введение

Как известно, природа возникновения шума в шестеренчатых насосах носит механический и гидродинамический характер [1]. Гидродинамическая составляющая шума изучена достаточно подробно, разработан ряд конструктивных мер [2] для снижения шума такого рода, в то время как снижению механической составляющей не уделяется достаточного внимания.

Одной из основных причин повышенной виброакустической нагруженности шестеренчатого насоса является процесс механического зацепления зубьев роторов.

Снижение акустической нагруженности в источнике шума можно достичь путём использования элементов насоса из материалов с большими внутренними потерями. Традиционные материалы роторов шестеренчатого насоса имеют невысокую демпфирующую способность. Такого недостатка лишены современные конструкционные полимерные материалы (ПМ) с большим (чем у сталей) коэффициентом потерь механической энергии.

В работе для снижения акустической нагруженности шестеренного насоса (ШН) используется метод снижения акустической нагруженности в источнике за счёт использования ПМ в его конструкции вместо традиционных материалов. Поэтому в работе проведено экспериментальное исследование звукоизлучения ШН с элементами из ПМ.

Цель работы: оценка акустической эффективности применения современных ПМ в конструкции шестеренчатого ШН.

Задачи исследования:

1. Анализ методов и способов снижения механического шума ШН.
2. Оценка характеристик демпфирования современных конструкционных ПМ.
3. Экспериментальное исследование влияния материала элемента малорасходного насоса на акустические характеристики ШН.
4. Разработка рекомендаций по применению ПМ в конструкции насоса.

Анализ основных направлений снижения механического шума ШН [1] показал, что малошумность передачи в основном достигается повышением точности и класса

обработки исполнения элементов зубчатого зацепления. Стоит отметить, что материал звукоизоляции корпуса также играет немаловажную роль (рисунок 1).



1- сталь, 2 – чугун, 3- полиамид

Рисунок 1. Средний уровень звукового давления передачи в корпусах из различных материалов (300-500 об/мин)

Также к снижению шума и вибрации ШН ведет использование фланкирования и разношаговости в зубчатой передаче или оптимизации профиля зуба [3,4].

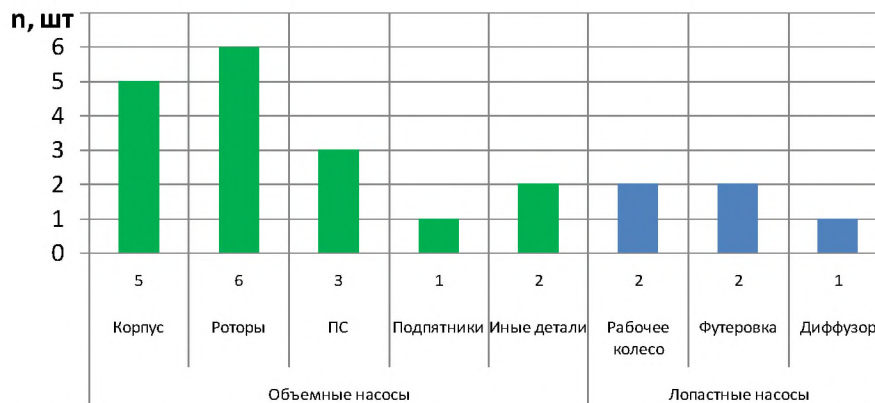


Рисунок 2. Распределение количества элементов из полимерных материалов в зависимости от элементов насосов

Таким образом, наибольшее количество элементов из ПМ среди 22 насосов объемного типа было реализовано в корпусах и роторах, у насосов лопастного типа – распределение близко к равномерному между элементами.

Представляет интерес частота использования ПМ в элементах насосов (рисунок 3).

Температурный градиент поверхности зубчатого венца и температура плавления ПМ – основные факторы, лимитирующие работу передачи из ПМ [5].

Анализируя как серийные, так и экспериментальные насосы роторного типа (шестеренные и героторные), сделан вывод о конструктивной применимости в них деталей из ПМ.

Проанализировав конструкции 22 насосов (объемных и лопастных) с элементами и покрытиями из ПМ наиболее ряда производителей [6-10], представим распределение количества элементов из ПМ в соответствии с основными элементами насосов (рисунок 2).

Наиболее распространенные ПМ в обзоре всех работ: полиэфирэфиркетон (PEEK), полифениленсульфид (PPS), полифтоламид (PPA), политетрафлюороэтилен (PTFE), полифениленоксид (PPO), полиэтилен (PE), полипропилен (PP), поливинилиденфторид (PVDF).

Элементы насоса		Материал							
		PEEK	PPS	PPA	PTFE	PPO	PE	PP	PVDF
Объемного типа	Корпус		+	+					
	Роторы	+	+	+	+				
	ПС	+	+						
	Подпятники	+	+						
	Иные детали	+							
Лопастного типа	Рабочее колесо					+			
	Диффузор					+			
	Футеровка						+	+	+

Рисунок 3. Частота использования материалов в соответствии с элементом насоса

Анализ насосов с элементами из ПМ показал, что чаще всего в объемном типе насосов подвергается замене ведомый и ведущий ротор, корпус [6,7] выполняются из ПМ, а в насосах лопастного типа – рабочее колесо, диффузор и футеровка проточной части [8-10].

Рассеивающая способность материала играет огромную роль в динамическом поведении конструкции. Она характеризует ослабление собственных колебаний, снижение амплитуд при вынужденных колебаниях и сглаживание напряжений в зоне концентрации при колебаниях [11].

К современным ПМ с наилучшими физическими, механическими и химическими свойствами можно отнести ПМ группы полиэфирэфиркетонов (PEEK) и полифениленсульфидов (PPS).

Для оценки характеристик демпфирования материалов используется тангенс угла механических потерь $tg\delta$. Анализ литературы по характеристикам демпфирования и паспортов производителей современных ПМ [12,13] приведен на рисунке 4.

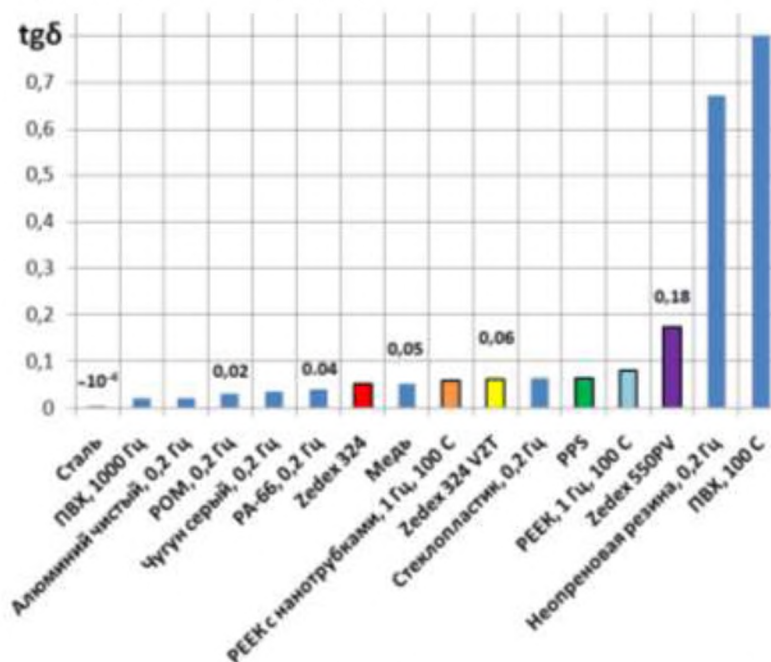


Рисунок 4. Тангенс угла механических потерь различных материалов

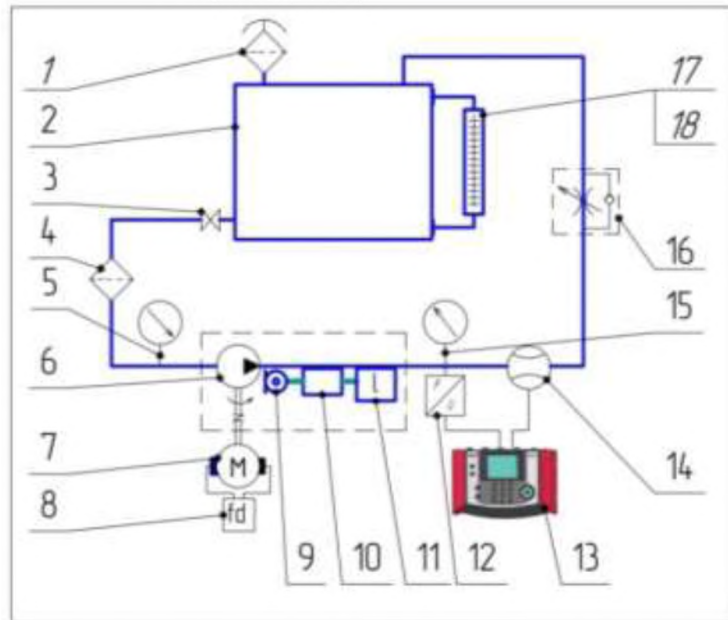
Анализируя $tg\delta$ вышеприведенных материалов (рисунок 2), можно утверждать, что:

- $tg\delta$ материалов на основе РЕЕК (Zedex 324, Zedex 324 V2T и др.) в 10 раз больше, чем у стали (основного материала ротора насоса), в 2 раза больше, чем у алюминия, в 1,7 раза больше, чем у серого чугуна, в 1,5 раза больше, чем у меди (основы для производства бронзовых подшипников скольжения для насоса);

- ненаполненный «чистый» РЕЕК (на рисунке 2 – «РЕЕК, 1 Гц, 100 0С») обладает большим коэффициентом потерь ($tg\delta=0,080$), чем РЕЕК с наполнителями (Zedex 324, РЕЕК с нанотрубками, Zedex 324 V2T, Zedex 550PV):
 $tg\delta=0,052$;

- у современных ПМ (Zedex 324, Zedex 324 V2T) $tg\delta$ приблизительно в 2 раза больше, чем у основных конструкционных ПМ 1970-х – 1990-х гг. (РА и РОМ).

Исследования влияния ПМ элемента насоса на его акустические характеристики проводились в лабораторном помещении с помощью шумомера на стендовой установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 5.



- 1 – воздушный фильтр, 2 – бак, 3 – кран, 4 – фильтр грубой очистки, 5 – вакуумметр, 6 – шестеренный микронасос, 7 – привод, 8 – частотный преобразователь, 9 – микрофон, 10 – измерительная система, 11 – ноутбук, 12 – датчик давления, 13 – портативный регистратор данных HYDAC, 14 – расходомер, 15 – манометр, 16 – дроссель с обратным клапаном, 17 – уровнемер, 18 – термометр

Рисунок 5. Принципиальная схема стенда

Акустическая нагруженность насоса оценивалась по эквивалентному уровню и рассчитывалась как отношение разницы звукового давления, излучаемого насосом с разными компоновками роторов («сталь-сталь» и «сталь-РЕЕК») к компоновке «сталь-сталь»:

$$\bar{L}_{\text{экв}} = \frac{L_{\text{экв}}_{\text{сталь}} - L_{\text{экв}}_{\text{РЕЕК}}}{L_{\text{экв}}_{\text{сталь}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Испытуемый источник шума – малорасходный шестеренный насос с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики шестеренного микронасоса

Характеристики	Ед. изм.	Значение
Давление на выходе	МПа	до 3
Давление на входе	МПа	до 0,1
Производительность, при $n=1500$ об/мин	л/мин	0,3
Частота вращения номинальная	об/мин	1000
КПД объёмный	%	0,85
Тип гидравлического масла	-	HLP 46
Рабочая температура жидкости	°С	-20...60
Размеры ШН, Д*Ш*В	мм	45*45*45

Режимы работы ШН при эксперименте приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Режимы работы ШН

Параметр	Значение			
Частота вращения (n), об/мин	1000	1500	2000	2500
Давление на выходе из насоса ($P_{\text{вых}}$), бар	3	6	9	12

Для эксперимента был использован ШН с компоновками роторов «сталь-полимер» и «сталь-сталь».

Результаты эксперимента приведены на роторной и зубцовых частотах ШН (рисунок 6), в зависимости от оборотов привода ШН (рисунок 7), в зависимости от выходного давления ШН (рисунок 8).

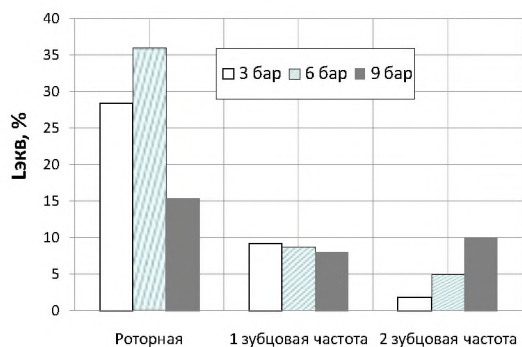


Рисунок 6. Акустическая эффективность на частотах рабочего процесса насоса при $n=1000$ об/мин

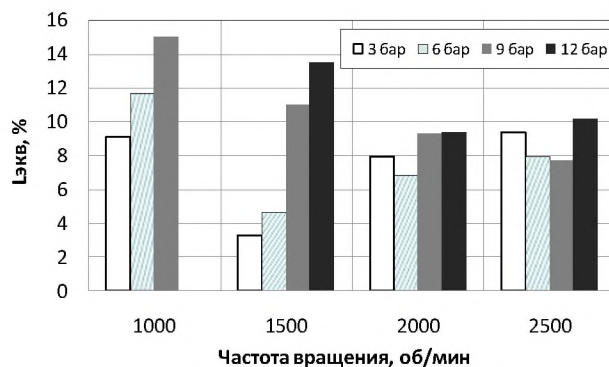


Рисунок 7. Акустическая эффективность использования полимерного материала

На режимах с большей частотой вращения увеличение выходного давления незначительно влияет на эффективность.

На рисунке 8 виден рост акустической эффективности применения компоновки "сталь-полимер" с ростом выходного давления на низких частотах привода. На

режимах с большими скоростями вращения эффективность растет с меньшей скоростью.

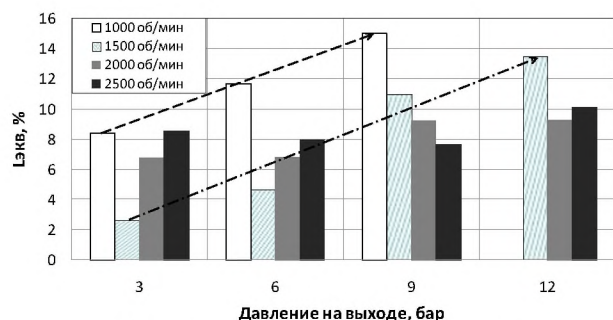


Рисунок 8. Акустическая эффективность использования полимерного материала

Как видно из рисунков 6-8 акустическая эффективность составила 2,5...37 % в зависимости от рабочих частот работы ШН, оборотов привода и выходного давления ШН.

Результаты измерений энергетических параметров ШН показали, что объёмный КПД ШН для компоновки "сталь-пластик" составил (0,53...0,87), для компоновки "сталь-сталь" - (0,67...0,92) в зависимости от режима нагружения.

В ШН роторы, подшипники скольжения (ПС) и корпус воспринимают наибольшие ударные нагрузки. Поскольку нет экспериментальной базы по оценке виброакустической эффективности применения отдельно каждого из вышеприведенных элементов (из ПМ) в конструкции насоса, то возможно теоретически оценивать эффективность данных элементов по $\text{tg}\delta$, а практически снижение механической энергии оценивать по вибронгруженности агрегата посредством вибродиагностики.

2 Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты и сделаны выводы:

1) наиболее эффективные меры снижения нагрузки в зубчатой передаче (в 2,7 раза): фланкирование зуба, применение разношаговости и асимметричного профиля зуба;

2) оценены характеристики демпфирования современных конструкционных материалов РЕЕК и PPS: тангенс угла механических потерь полимеров на основе РЕЕК и PPS в 10 раз больше, чем у стали;

3) на основании эксперимента акустическая эффективность применения пластикового ротора в ШН составила:

- (2,5...37) % на основных частотах работы микронасоса при разных частотах вращения привода в зависимости от нагрузки;

- (2,5...15) % по эквивалентному уровню звукового давления в зависимости от частоты вращения привода и выходного давления.

Объёмный КПД ШН для компоновки "сталь-пластик" составил (0,53...0,87), для компоновки "сталь-сталь" - (0,67...0,92) в зависимости от режима нагружения;

5) чаще в конструкции насоса стальные роторы заменяются на полимерные. Как правило, замене подвергаются оба ротора;

6) для получения более точных и достоверных результатов работы следует:

- уменьшить объёмные утечки насоса путём замены экспериментального ШН на серийный;

- использовать методику по оценке виброакустической нагруженности насоса посредством вибродиагностики;

- исследовать демпфирующие способности ПМ линейки РЕЕК, PPS и их модификаций на роторных частотах при разной температуре.

Поставленные в работе задачи решены полностью. Результаты работы следует применять при решении проблемы снижения виброакустической нагруженности технических систем, содержащих насосные агрегаты.

Список использованных источников

[1] Хекл М. Справочник по технической акустике [Текст] / М. Хекл, М.А. Мюллер. – Л.: Судостроение, 1980. - 214 с.

[2] Metalsi Tani, F., Study of feasibility of plastic gear to reduce noise in a gear pump [Текст] / Tani F.

Metalsi, A. Bourdim // *Advances in Production Engineering & Management*. – 2012. – Vol. 7. – P. 143-149.

[3] Балякин Б. В. Методы борьбы с вибрацией в упругих системах с зубчатыми колесами [Текст] / Б. В. Балякин // Вторая международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин»: Сб. Докладов. – Самара: СГАУ. – 2014. – С. 291-300.

[4] Devendran R. S. Design potentials of external gear machines with asymmetric tooth profile [электронный ресурс] / R. S. Devendran, A. Vacca // *ASME/Bath Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2013 October 8-11*. – Sarasota, FL, USA. – 2013.

[5] Mao K. Walton Polymer gear surface thermal wear and its performance prediction [Электронный ресурс] / K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, D. Walton // *Tribology International*. – 2010. – № 43. – P. 433–439.

[6] Magnetically coupled (Tuthill) [Электронный ресурс]. – Available at: <https://www.tuthillpump.com/dam/5259.pdf>, 2014.

[7] Donnini S. Replacement of metallic parts for polymer composite materials in motorcycle oil pumps [Текст] / S. Donnini, M. Cioffi, B. Carlos // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. – 2016.

[8] Насосное оборудование и фильтры (Belamos) [Электронный ресурс]. – Available at: https://belamos24.ru/category/skvazhinnye_nasosy/?yclid=1, 2013.

[9] Поверхностный центробежный многоступенчатый насос (Speroni water pumps) [Электронный ресурс]. – Available at: http://www.speroni.it/public/ru/prodotto_dett.php?id_az=22&id=62, 2015.

[10] Magnetic drive plastic pump Type FNP M (Pumpen) [Электронный ресурс]. – Available at: [http://promhimtech.com/wp-content/uploads/2016/06/Горизонтальный-](http://promhimtech.com/wp-content/uploads/2016/06/Горизонтальный-насос_FNPM-0311_eng-2.pdf)

насос_FNPM-0311_eng-2.pdf, 2013. [11] Нашиф А. Демпфирование колебаний [Текст] / А. Нашиф // М.: Мир, 1988. – 448 с.

[12] Chung D. Review materials for vibration damping / D. Chung // *Journal of materials science*. – 2001. – № 36. – С. 5733 – 5737.

[13] Свойства материалов Zedex [Электронный ресурс]. – Available at: http://ipplastmassgrebe.kz/file/svoistva_zedex.pdf.

Pavel D. Rekadze,
Leonid V. Rodionov

Samara University
Moskovskoe Shosse, 34
Samara, Russian Federation
443086
rekadze.pd@ssau.ru
rodionov@ssau.ru

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF ACOUSTIC EFFICIENCY OF APPLICATION OF POLYMERIC MATERIALS IN THE PUMP DESIGN

The paper describes measures to reduce the level of acoustic emission of a low-gear external gear pump. On the basis of the experiment on a bench installation, the acoustic efficiency using rotors were made from PEEK material in the design of a gear pump was evaluated when shaft speed was of 1000 ... 2500 rpm and a discharge pressure of 3 ... 12 bar. For comparison, the article presents the acoustic efficiency by the relative difference of the acoustic emission of the pump with configuration of the «steel-steel» and «steel-PEEK» rotors. It also provides an overview of methods for reducing mechanical noise in gears, damping of modern structural polymeric materials based on polyamide, polyacetal, polyphenylenesulfide and polyetheretherketone in comparison with traditional engineering materials - steel, aluminum, gray cast iron is estimated. Recommendations for using of polymeric materials in the design of the pump are proposed.

Key words: gear pump; acoustics; polymer materials; damping

References

[1] Khekl, M. and Myuller, M.A. (1980), *Spravochnik po tekhnicheskoy akustike*, Sudostroyeniye, Leningrad, Russian Federation, 214 p.

[2] Metalsi Tani, F. and Bourdim, A. (2012), “Study of feasibility of plastic gear to reduce noise in a gear pump”, *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 7, pp. 143-149.

[3] Balyakin, B.V. *Metody bor'by s vibratsiyey v uprugikh sistemakh s zubchatymi kolesami*, (2014), “Vtoraya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Dinamika i vibroakustika mashin»”, SGAU, Samara, Russian Federation, 2014, pp. 291-300.

[4] Devendran, R.S. and Vacca A., (2013), “Design potentials of external gear machines with asymmetric tooth profile” [Online]. *ASME/Bath Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC2013*, Sarasota, FL, USA, October 8-11, 2013.

[5] Mao, K., Li, W. and C.J. Hooke, D. Walton, (2010), “Polymer gear surface thermal wear and its performance prediction”, *Tribology International*, no. 43, pp. 433–439.

[6] Tuthill (2014), “Magnetically coupled”, available at: <https://www.tuthillpump.com/dam/5259.pdf> (Accessed 2014).

[7] Donnini, S., Cioffi, M. and Carlos, B. (2016), “Replacement of metallic parts for polymer composite materials in motorcycle oil pumps”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*.

[8] Belamos (2013), “Nasosnoye oborudovaniye i fil'try” available at: https://belamos24.ru/category/skvazhinnye_nasosy/?yclid=1 (Accessed 2013).

[9] Speroni water pumps (2015), “Poverkhnostnyy tsentrobezhnyy mnogostupenchatyy nasos”, available at: http://www.speroni.it/public/ru/prodotto_dett.php?id_az=22&id=62 (Accessed 2015).

[10] Pumpen (2013), “Magnetic drive plastic pump Type FNP M”, available at: http://promhimtech.com/wp-content/uploads/2016/06/Gorizonta'lnyy-nasos_FNPM-0311_eng-2.pdf (Accessed 2013).

[11] Nashif, A. (1988), *Dempfirovaniye kolebaniy*, Mir, Moscow, Russia Federation, 448 p.

[12] Chung, D. (2001), “Review materials for vibration damping”, *Journal of materials science*, no. 36, pp. 5733 – 5737.

[13] Svoystva materialov Zedex, available at: http://ipplastmass-grebe.kz/file/svoistva_zedex.pdf.