

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОГО ТРЕНИЯ**

*На основе выполненных фрикционных испытаний, произведена расчетно-графическая оценка влияния типа и процентного состава двух групп жидких композитных добавок (органические соединения) к основным смазочным материалам марок И-40А и ВМ-4 с целью повышения их способности создавать граничные слои на трущихся поверхностях в условиях граничного трения. По модифицированному методу наименьших квадратов, применяя двухуровневую оптимизацию, получены уравнения регрессии трибологических характеристик для оптимального типа композитной смазки в зависимости от параметров действующих факторов. Построены номограммы для быстрого определения этих характеристик непосредственно на рабочем месте конструктора при разработке конструкции узла трения машин.*

**Ключевые слова:** граничное трение, композитная смазка, трибологические характеристики, уравнение регрессии, номограмма

На данном этапе выполнения трибологических исследований актуальными являются следующие задачи: изучение закономерностей граничной смазки, выполнение экспериментов и вероятностная оценка трибологических характеристик новых композитных смазочных материалов, оптимизация состава и количества указанных добавок [1-4]. Для этого необходимо: выявить функциональные связи между показателями износостойкости и трибологическими характеристиками этих материалов в результате ранее выполненных испытаний на трение и износ; выполнить статистическое и расчетно-графическое исследования трибологических характеристик смазочных материалов, содержащих композитные добавки; составить программные средства для математического моделирования исследуемых процессов при граничной смазке.

Для обработки экспериментальных данных использованы положения теории вероятностей и математической статистики – метод наименьших квадратов (МНК), номографическое представление многомерных регрессионных связей, которые позволяют расчетно-графическим методом проследить за влиянием единичного или комплексно действующих факторов, а также определить необходимые трибологические характеристики смазочных материалов. Для выполнения значительного объема расчетно-графических процедур разработаны программные средства.

Для выявления регрессионных связей между исследуемыми трибологическими характеристиками, которые, в основном, носят криволинейный характер, применен модифицированный МНК. При этом предпочтения даются параболическим функциям порядка  $n$  (чаще всего,  $n=2$ ), параметры которых определяют из соответствующих систем нормальных уравнений. В данной работе, для расширения возможностей расчетной методики рассмотрены прямолинейные, гиперболические и параболические связи, а при выборе окончательной математической модели применен двухуровневый метод оптимизации-выбор функции, обеспечивающей условие [5,6]

$$\min(E \Rightarrow \min), \quad (1)$$

где  $E$  – сумма квадратов разностей между опытными и расчетными данными.

Рассматриваются статистические и расчетно-графические методы оценки результатов экспериментального исследования двух групп композитных смазочных материалов [1,2]:

- а) хлоро- и азотосодержащие углеводородные органические соединения – ДХБ, ДХЭ, ДХК и К-АВ14;
- б) насыщенные растительные жирные кислоты – КК, МК, ПК, СК, АК и БК.

Полученные результаты указывают на взаимосвязь между действующими факторами и, следовательно, на многопараметрическую функциональную связь между группами параметров:

$$F(P, f, \Delta d, A, B, C) = 0, \quad (2)$$

где  $P, f, \Delta d$  - внешняя нагрузка и основные трибологические характеристики;  $A$  – вид трения (в нашем случае – граничное трение);  $B$  и  $C$  - тип и процентное содержание композитной добавки. Для практического применения полученных результатов значительного объема разнохарактерных испытаний и измерений целесообразно общую функцию (2) представить в виде системы параметрических уравнений:

$$\begin{aligned} f, \Delta d &= \varphi_{1,2}(P), & f, \Delta d &= \varphi_{10,11}(P, A), & \Delta d &= \varphi_{18}(f, C), \\ \Delta d &= \varphi_3(f), & f, \Delta d &= \varphi_{12,13}(P, B), & f, \Delta d &= \varphi_{19,20}(A, B), \\ f, \Delta d &= \varphi_{4,5}(A), & f, \Delta d &= \varphi_{14,15}(P, C), & f, \Delta d &= \varphi_{21,22}(B, C), \\ f, \Delta d &= \varphi_{6,7}(B), & \Delta d &= \varphi_{16}(f, A), & f, \Delta d &= \varphi_{23,24}(A, C), \\ f, \Delta d &= \varphi_{8,9}(C), & \Delta d &= \varphi_{17}(f, B), & & \end{aligned} \quad (3)$$

Такой подход позволяет, применяя системный анализ и классификацию возможных функциональных связей, имеющих логическую последовательность, обнаружить ранее не замеченные зависимости для выбора оптимального варианта и процентного состава композитного смазочного материала, т.к. имеет место разнообразная вариация исследуемых трибологических характеристик от действующих физико-химических и механических факторов процесса трения. Такими являются связи  $\Delta d = \varphi_{16}(f, A)$ ,  $\Delta d = \varphi_{17}(f, B)$ ,  $\Delta d = \varphi_{18}(f, C)$ . Используя вычислительную программу, получены регрессионные уравнения функций  $f, \Delta d = \varphi_{14,15}(P, C)$  для композитных добавок ДХБ, ДХЭ, ДХК и К-АВ14.

Как ранее отмечалось [7], лучшими трибологическими характеристиками обладает композитный смазочный материал (И-40А+К-АВ14), данные и математические модели которого представлены на рис. 1.

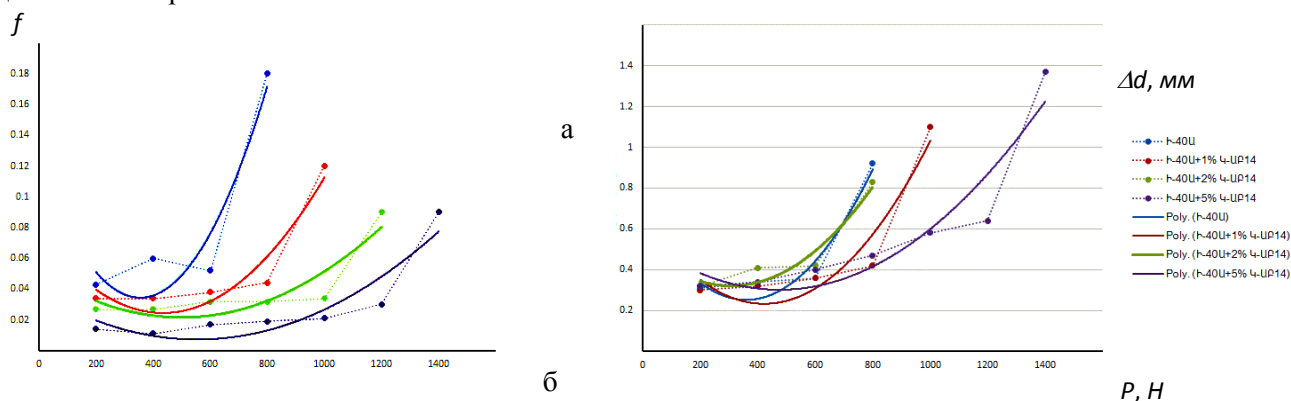


Рис.1. Функции  $f = \varphi_{14}(P, C)$  (а) и  $\Delta d = \varphi_{15}(P, C)$  (б) для композитной смазки (И-40А+К-АВ14)

Практическое и целенаправленное использование разнообразных по виду и характеру функциональных связей (3) диктует необходимость сгруппировать и представить их в номографической форме, которая позволяет простыми графическими построениями в оперативном порядке получить достоверные значения трибологических характеристик для их использования в поисковых исследованиях или предварительных конструкторских разработках узлов трения машин.

Можно представить номограммы следующих видов:

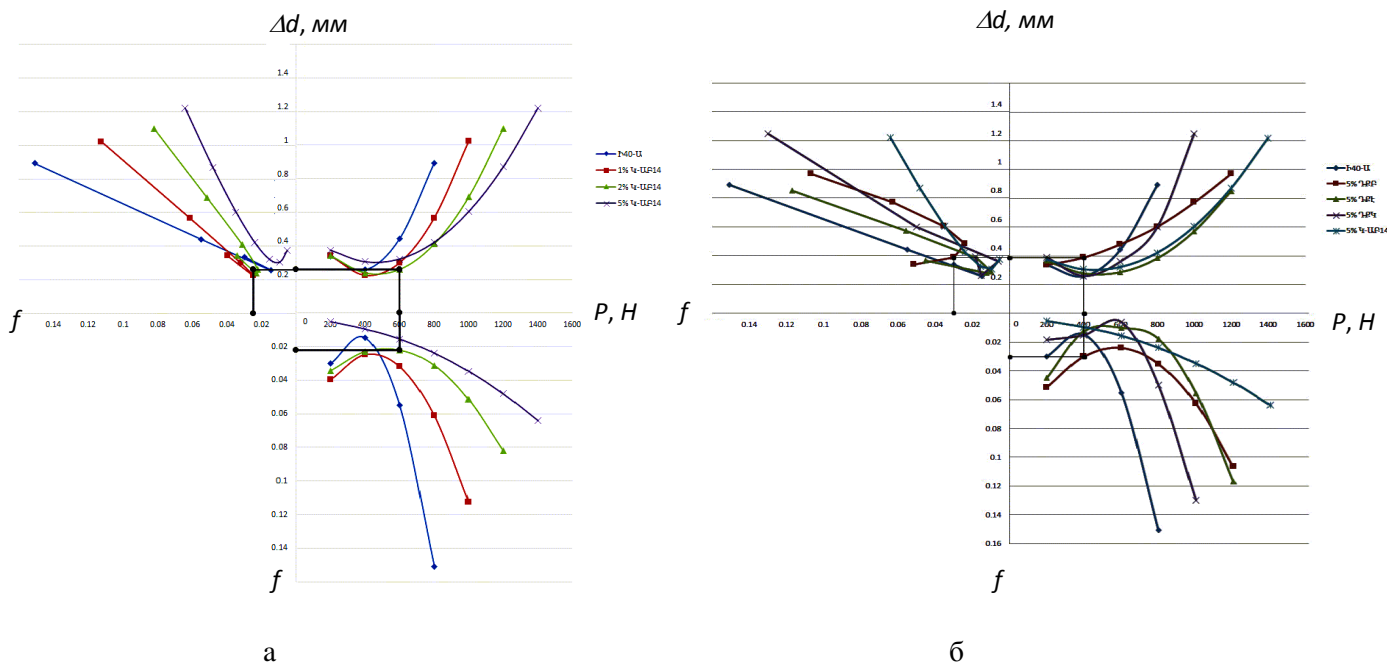
а)  $(f - \Delta d - P - C)$ - для отдельного типа композитной смазки, представляются функции  $f, \Delta d = \varphi_{14,15}(PC)$  и  $\Delta d = \varphi_{18}(f, C)$  в квадрантах I-III - рис. 2а;

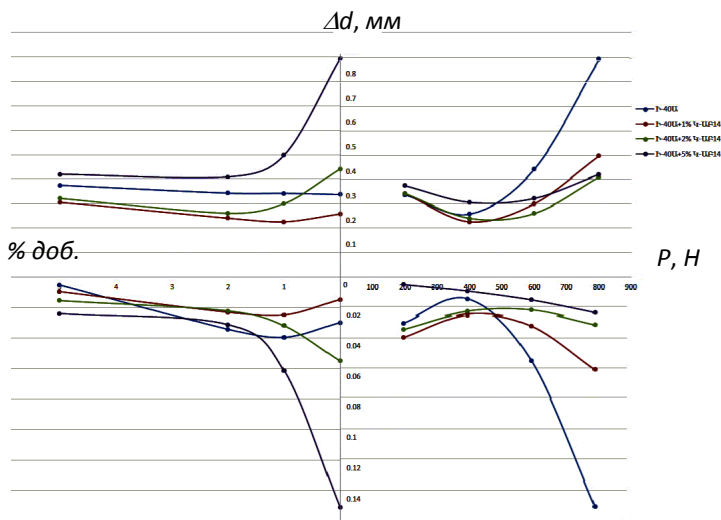
б)  $(f - \Delta d - P - B)$ - для всех типов композитных смазок, но при определенном процентном содержании композитных добавок, представляются функции  $f, \Delta d = \varphi_{12,13}(PB)$ ,  $\Delta d = \varphi_{17}(f, B)$  в квадрантах I-III - рис. 2б;

в)  $(f - \Delta d - P - C)$ - для отдельного типа композитной смазки, представляются функции  $f, \Delta d = \varphi_{14,15}(P, C)$  и  $f, \Delta d = \varphi_{8,9}(C)$  в квадрантах I-IV - рис. 2в.

Основные трибологические характеристики  $f$  и  $\Delta d$  достигают оптимальных значений при разных интервалах параметров действующих факторов, поэтому важное значение имеет установление новой, ранее не рассмотренной функциональной связи  $\Delta d = \varphi_{18}(f, C)$ , которая при сопоставлении кривых на рис. 1 а, б обладает постоянным градиентом и почти является прямой линией (рис. 2а, б).

Аналогичным образом, получены регрессионные уравнения (3) и для второй группы композитных добавок из насыщенных растительных жирных кислот. В отличие от первой группы добавок, здесь градиенты функций  $f, \Delta d = \varphi_{14,15}(P, C)$  непропорциональны, в связи с чем  $\Delta d = \varphi_{18}(f, C)$  имеет вид слабо выраженной параболы 2-й степени.



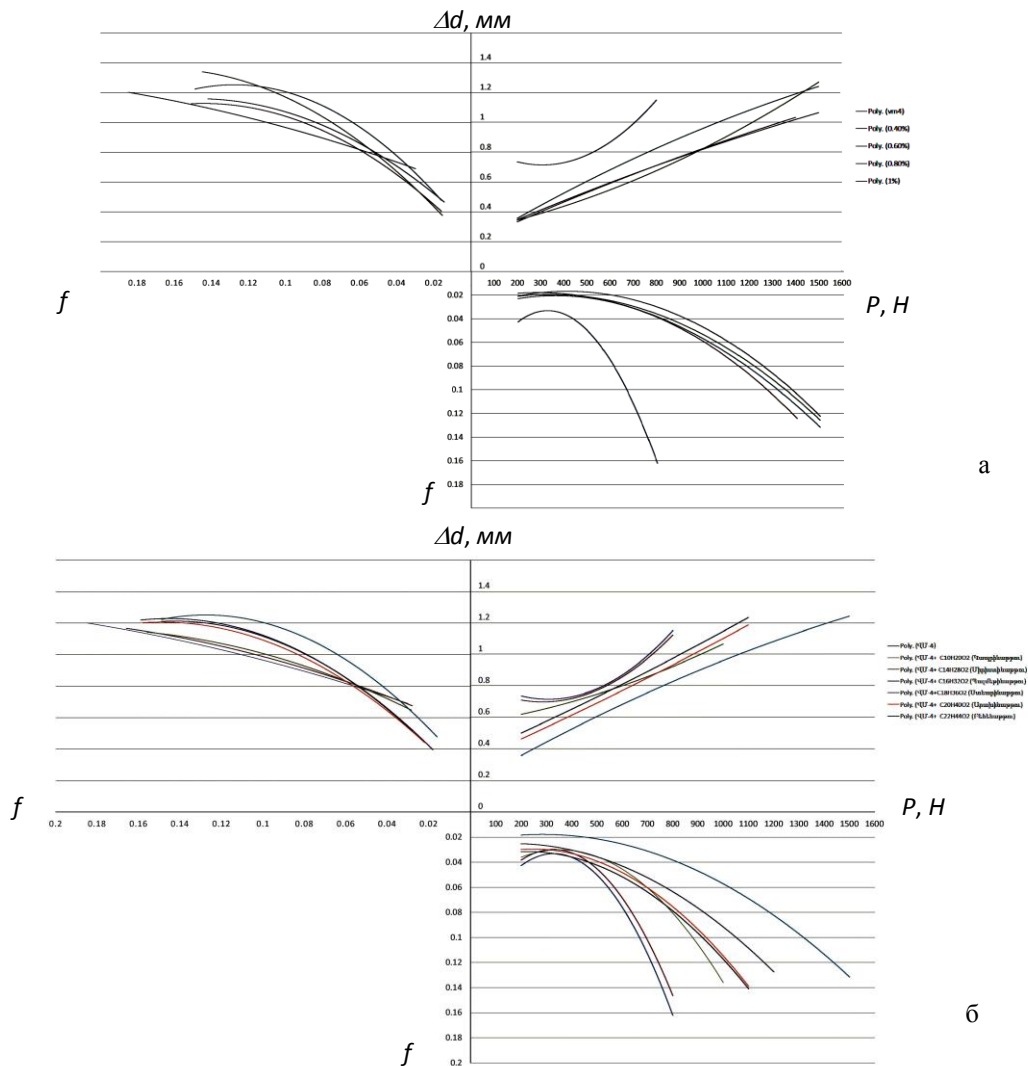


**Рис. 2. Номограммы:**  
 а -  $(f - \Delta d - P - C)$ -  
 для композитной смазки (И-40А+К-АВ14);  
 б -  $(f - \Delta d - P - B)$ - для всех типов  
 добавок при их 5%-м содержании;  
 в -  $(f - \Delta d - P - C)$ - для композитной  
 смазки (И-40А+К-АВ14)

Построены также номограммы для второй группы композитных смазок:

а)  $(f - \Delta d - P - C)$ - для отдельного типа композитной смазки – рис. 3а;

б)  $(f - \Delta d - P - B)$ - для всех типов композитных смазок, но при определенном процентном содержании композитных добавок – рис. 3б.



**Рис. 3. Номограммы:** а -  $(f - \Delta d - P - C)$ - для композитной смазки (ВМ-4+С<sub>18</sub>Н<sub>36</sub>О<sub>2</sub>);  
 б-  $(f - \Delta d - P - B)$ - для всех типов добавок при их 1%-м содержании

Анализ вычислений и кривые на рис.3 свидетельствует, что при применении композитных смазок с короткими углеводородными цепями ( $C_{10}$ ,  $C_{14}$ ) трибологические характеристики почти совпадают с таковыми для основной смазки (ВМ-4). Лишь при длинных цепях ( $C_{16}$ ,  $C_{18}$ ) эти характеристики достигают оптимальных значений, а затем – при ( $C_{20}$ ,  $C_{12}$ ) отмечается падение результатов из-за достижения состояния критического мицеллообразования.

Обобщая полученные результаты (рис. 2,3), можно утверждать, что в каждой группе номограмм выявляются определенные закономерности изменения трибологических характеристик, что обусловлено физико-химическими и механическими факторами процессов трения на микро- и макроструктурном уровнях. Функции (3), в основном, с достаточной точностью описываются параболическими уравнениями 2-й степени и лишь при использовании хлоро- и азотосодержащих композитных добавок функция  $\Delta d = \varphi_{18}(P, C)$  становится почти прямолинейной. В интервале нагрузок  $P=0...800H$  изменение трибологических характеристик незначительное, при  $P>800H$  они достигают оптимальных значений, а нагрузочная способность по признаку начала процесса заедания контактных поверхностей увеличивается до  $P=1200...1500H$ . При этом, изменение указанных характеристик от процентного содержания композитных добавок носит возрастающе-убывающий характер, оптимальные значения которых можно определить по разработанным номограммам для функций (3), с учетом комплексного воздействия нескольких факторов. Лучшими композитными смазочными материалами для первой группы добавок являются: (И-40А+К-АВ14) при 5%-м, а для второй группы - (ВМ-4+ $C_{18}H_{36}O_2$ ) при 0,8%-м содержаниях добавок.

На основе массовых фрикционных испытаний, проведенных в условиях граничного трения с применением композитных смазочных материалов, выполнено математическое моделирование процессов трения, износа и заедания [8]. Выявлены многопараметрические регрессионные связи между трибологическими характеристиками, нагружением, поверхностным натяжением, молекулярной структурой и процентным содержанием органических добавок, позволяющие построить номограммы для графо-аналитической оценки указанных параметров при различных их проявлениях и сочетаниях. Создание номограмм для многопараметрических связей этих характеристик позволит в оперативном порядке и с достаточной точностью для проектных расчетов получить интересующие параметры, в чем и заключается научно-практическая значимость выполненного исследования. Для выполнения расчетов и двухуровневой оптимизации процедур с применением МНК составлена вычислительная программа (Visual C++, 0,8 Мбт).

**Մ.Գ.Ստակյան,  
Ք.Ռ. Բոնիաթյան**

**ՍԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ՅՈՒՂՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ՔՍԱՅՈՒՂԱՅԻՆ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ՇՓԱԳԻՏԱԿԱՆ  
ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄԸ**

*Շփական փորձարկումների հիմքով կատարված է И-40А և ВМ-4 մակնիշների հիմնական քայտուղերի համար երկու խումբ հեղուկ կոմպոզիտային հավելանյութերի (օրգանական միացություններ) տեսակի և տոկոսային բաղադրության ազդեցության գնահատումը, որը նպատակ ունի սահմանային շփման պայմաններում բարձրացնելու այդ քայտուղերի հատկությունը շփման մակերևույթների վրա ստեղծել կայուն սահմանային շերտեր:*

Փոքրագույն քառակուսիների ձևափոխված մեթոդով, կիրառելով երկմակարդակ լավարկում, կոմպոզիտային քսայուղի լավարկային տարբերակի համար ստացվել են ռեգրեսիայի հավասարումներ շփագիտական բնութագրերի և ազդող գործոնների պարամետրերի միջև: Կառուցվել են նոմոգրամներ՝ արագ կարգով և նախագծողի աշխատատեղում մեքենայի շփահանգույցի կոնստրուկցիայի մշակման ընթացքում անմիջականորեն այդ բնութագրերի որոշման համար:

**Առանցքային բառեր.** Սահմանային շփում, կոմպոզիտային քսայուղ, շփագիտական բնութագրեր, ռեգրեսիայի հավասարում, նոմոգրամ

**M.G.Stakyan  
K.R.Boniatyan**

### **OPTIMIZATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANTS IN BOUNDARY FRICTION CONDITIONS**

*On the base of the performed friction tests computational and graphical evaluation of the influence of the type and the percentage composition of the two groups of liquid composite additives (organic compounds) to the main lubricants of brands I-40A and BM-4 in order to increase their ability to create the boundary layers on the friction surfaces under boundary friction is made. According to the modified method of least squares, using a two-level optimization, regression equations for optimal tribological properties of the composite type of grease depending on the parameters of existing factors have been obtained. Nomograms for the rapid determination of these characteristics directly in the workplace of the designer in developing the design friction unit machines have been constructed.*

**Keywords:** boundary friction, lubrication composite, tribological characteristics, the regression equation, nomogram

### **Литература**

1. Օրգանական հավելանյութերով յուղերի շփագիտական փորձարկումների արդյունքների վիճակագրական մշակումը /**Ք.Ռ.Բոնիաթյան, Վ.Վ.Սարոյան, Ա.Կ.Պողոսյան, Մ.Գ.Ստակյան** // Հայ. ճարտ. ակադ. Տեղեկագիր.-2011.-Հ.8,№1. - էջ 99 -104:
2. Օրգանական հավելանյութերով քսայուղերի շփագիտական պարամետրերի լավարկման հաշվեգրաֆիկական մեթոդ /**Ք.Ռ. Բոնիաթյան, Ա.Կ. Պողոսյան, Մ.Գ. Ստակյան, Վ.Վ. Սարոյան** // Հայ. գիտ. ակադ. և ՀՊՃՀ Տեղեկագիր. ՏԳ սեր. -2012.-Հ65, №1. – էջ 3-13:
3. Յուղանյութերի շփագիտական բնութագրերի լավարկման վիճակագրական հետազոտում /**Ք.Ռ.Բոնիաթյան, Ա.Կ.Պողոսյան, Մ.Գ.Ստակյան, Վ.Վ. Սարոյան, Կ.Վ. Հովհաննիսյան** // ՀՊՃՀ գիտ. հոդվ. ժող.՝ ԼԸԱԲԵԸ, Մաս 2, Երևան.-2013.- էջ 351-357:
4. **Лагутин М.Б.** Наглядная математическая статистика. – М.: БИНОМ, 2007.– 472с.

5. **Стакян М.Г., Маргарян Э.А., Ильев Д.Б.** Расширение возможностей метода наименьших квадратов, применяемого в различных исследованиях //Международный научный журнал (г. Москва).– 2011.– N4.– С. 65-70.
6. **Wolberg J.** Data Analysis Using the Method of Least Squares.– Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.-256 p.
7. Statistical analysis of tribological properties of several chlorinated compounds in mineral oil/**A.Pogosian, C. Boniatian, M. Stakyan, W. Saroyan W.** //Proceedings of the Int. conf.: “BALTRTRIB`2011”.-Kaunas, lithuanua.-2011.- P. 69-73.
8. **Kudish I., Covitch M.** Modeling and analytical methods in tribology.-New York: CRC press, 2010.- 925 p.

*Ստակյան Միհրան Գրիգորի, ս.գ.դ., պրոֆ. (ՀՀ. ք. Երևան) - ՃՀՀԱՀ, ակ. Ալ. Թամանյանի անվ. Ճարտարապետության և շինարարության պրոբլեմային լաբորատորիա, գ.ա., ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ), (010)564012, (010)554362: Բոնիատյան Քրիստոֆեր Ռոլանի (ՀՀ. ք. Երևան) - ՀՊՃՀ (Պոլիտեխնիկ), ասպիրանտ, (010)564012, (010)224031:*

*Стакян Мигран Григорьевич, д-р т.н., проф. (РА, г.Ереван) – НУАСА, Проблемная лаборатория Архитектуры и строительства им. акад. Ал. Таманяна, н.с., ГИУА(Политехник), (010)564012, (010)554362. Бониатян Кристофер Роланович (РА, г.Ереван) ГИУА(Политехник), аспирант, (010)564012, (010)224031.*

*Stakyan Mihran Grigor, doctor of sciences(technical), prof. (RA, Yerevan) – NUACA, Research Laboratory of Architecture and Construction by Academician Al. Tamanyan, scientific researcher, SEUA, (010)564012, (010)554362. Boniatyan Oristopher Rolan (RA, Yerevan)- SEUA, postgraduate student.*

*Ներկայացվել է՝ 05.08.2014*

*Ընդունվել է սպիազրոյան՝ 10.08.2014*