

УДК 621.891:539.375(043.2)  
UDC 621.891:539.375(043.2)

Кравченко<sup>1</sup> И.Ф., Колесник<sup>1</sup> П.А., Единович<sup>1</sup> А.Б., Стельмах<sup>2</sup> А.У., Шимчук<sup>3</sup> С.П.  
<sup>1</sup> ГП «Ивченко-Прогресс»

<sup>2</sup> Национальный авиационный университет

<sup>3</sup> Луцкий национальный технический университет

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РЕДУКТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУХФАЗНОЙ МАСЛОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Лабораторные исследования, стендовые испытания и эксплуатация восьми двигателей с конструкторскими доработками по организации смазки маслотовоздушной смесью показали, что ресурс осей сателлитов передних редукторов двигателей ТВ3-117ВМА-СБМ1 повысился более чем в 7 раз, а признаки их выкрашивания не обнаруживались, редукторы работают надёжно и устойчиво

**Ключевые слова:** трение, маслотовоздушная смесь, редуктор, ресурс, давление, граничные слои.

**Постановка проблемы.** Разработка, конструирование и организация производства новых серийных авиационных летательных аппаратов требует значительных материальных затрат. Поэтому при создании нового летательного аппарата всегда рассматривается возможность использования в его составе серийно выпускаемых агрегатов, которые хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации и по техническим характеристикам соответствуют предъявляемым требованиям в составе нового изделия. При создании новых типов самолётов Ан-140, Ан-148 и Ан-158 в КБ «Ивченко-Прогресс» разрабатывались газотурбинные двигатели (ГТД) ТВ3-117ВМА-СБМ1 и Д-436-148 на базе существующих ТВ3-117ВМА и Д-436.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Для обеспечения необходимого для подшипников качения роторов и редукторов ГТД теплового режима [1] применяется система смазки и охлаждения с прокачкой десятков и сотен литров в минуту, в то время как для обеспечения смазки поверхностей трения без учета теплонапряженности требуются всего миллилитры [2]. В работах [3, 4] указывается, что потери на трение в подшипниках с маслотовоздушным смазыванием смазкой масляным туманом существенно снижаются (до трех раз), хотя интенсивность теплоотвода в воздушно-масляную фазу также уменьшается. Из этого следует, что охлаждающая жидкая (однофазная) среда в трибоконтакте, обеспечивая теплоотвод от него, в это же время является причиной увеличенного тепловыделения.

Повышение износостойкости и ресурса высокооборотных трибосистем качения при уменьшении количества смазочного материала, подаваемого в зону контакта в виде маслотовоздушной смеси, не находит своего однозначного объяснения с позиции известных теорий, гипотез и положений о трении и изнашивании. Общеизвестная эластогидродинамическая (ЭГД) теория смазки [5 – 8] включает в себя ряд положений, исходя из которых, для повышения ресурса трибосистем необходимо реализовывать обильное смазывание контакта и избегать возможности возникновения условий масляного голодания. Тем не менее, практика высокоскоростных трибосистем качения и скольжения показала, что в ряде случаев обильное смазывание ЭГД-контакта приводит к интенсивному изнашиванию поверхностей, их выкрашиванию или термическому разрушению. Увеличение расхода смазочного материала для обеспечения интенсивного теплоотвода от ЭГД-контакта оказалось малоэффективным.

В 2007 году была выдвинута гипотеза о компрессионно-вакуумной природе трения [9, 10], исходя из которой, в ЭГД-контакте протекают значительно более сложные процессы, чем взятые за основу в эластогидродинамической теории смазки. В работах [9, 10] представлены экспериментальные данные, которые легли в основу компрессионно-вакуумной гипотезы о природе трения и трибокавитационном механизме изнашивания. Основным положением этой гипотезы является самопроизвольное возникновение относительно минимального зазора каждого элементарного трибоконтакта двух характерных областей. В области уменьшения зазора по направлению скольжения и/или качения, т.е. конфузорной, происходит повышение давления в граничных слоях смазки и возникновение вторичного течения, противоположного направлению вращения. В этой области при высоких скоростях трение происходит между набегающими с

движущейся поверхности слоями граничной смазки и слоями вторичного обратного течения, вызванного градиентом давлений в сужающейся зоне трибоконтакта.

**Цель и постановка задач исследования.** Целью исследования является увеличение ресурса редукторов газотурбинных двигателей путем использования двухфазной масловоздушной смеси. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать гидродинамические процессы в граничных слоях пар трения редуктора ГТД;
- провести стендовые испытания редуктора ГТД.

**Гидродинамические процессы в граничных слоях пар трения редуктора ГТД.**

Применительно к трению качения, гидродинамические процессы в граничных слоях протекают аналогично трению скольжения. На рис. 1 показана схема возникновения области повышенного  $+\Delta P$  и пониженного  $-\Delta P$  давления в граничных слоях смазки (ось  $P_{oc}$ ) и векторы вторичных течений смазки: компрессионных  $v^{компр}$  и вакуумных  $v_{вак.}$ , направленных противоположно набегающим смазочным слоям при давлении окружающей среды равном атмосферному  $P_{атм.}$  (пересечение осей  $x$  и  $P_{oc}$ ) и распределение давлений смазочного слоя на поверхности ролика. Пунктиром показано распределение упругих контактных напряжений по Г. Герцу без смазки, в среде воздуха (зазор – условный).

Если наблюдать за качением ролика по кольцу по схеме, представленной на рис. 1, когда контакт относительно наблюдателя неподвижен, то в конфузурной области набегающие с движущимися поверхностями ролика и дорожки кольца потоки по мере приближения к минимальному зазору будут встречать сопротивление вторичных течений, направленных противоположно движению. При этом через минимальный зазор в соответствии с физическим законом сохранения количества вещества, смазка пройдет в количестве не превышающем имеющегося вещества в зоне максимальных контактных напряжений, где граничные слои максимально упруго деформированы. В диффузорной области контакта будет происходить разрежение прошедших через минимальный зазор слоев смазки, понижение в них давления относительно давления окружающей среды, например атмосферного. Как следствие, здесь вторичные вакуумные течения будут направлены из среды в контакт и также против движения. Соответственно на ролик будут действовать давления сжатых и разреженных слоев смазки, как показано на рис.1 в виде эпюры давлений.

Результаты лабораторных исследований, а также основные положения компрессионно-вакуумной гипотезы процесса трения были использованы при выборе режима подачи смазочного материала в роликовые подшипники сателлитов переднего редуктора двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1, который является маршевым для самолетов Ан-140. Стендовые испытания опытных двигателей подтвердили необходимость доработки главного редуктора двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ1 с целью повышения его ресурса и надежности, так как наблюдалось повреждение осей подшипника-сателлита по дефекту выкрашивания. После испытаний и разборки редукторов было установлено, что поверхность рабочего сектора качения роликов была значительно меньше (в 2 раза) расчетной. Конструкторами было принято решение уменьшить радиальный зазор подшипников сателлитов с 0,015...0,035 мм до 0,005...0,025 мм, что позволило уменьшить сектор бесконтактного торможения роликов смазкой и сепаратором в нерабочей и бесконтактной с осью области, где ролики находились в состоянии инерционного вращения. При этом подвод смазки оставался прежним – через те же 2 отверстия на беговой дорожке и с тем же расходом (рис. 2, а), то есть смазывание трибоконтактов осуществлялось более обильно, чем ранее - с большим зазором.

**Стендовые испытания редуктора ГТД.** При стендовых испытаниях обнаружено, что выкрашивание поверхностей качения при прочих равных условиях и уменьшении зазора, происходит менее интенсивное, чем при больших зазорах. В ходе анализа результатов мнения специалистов относительно возникшей проблемы разделились: с позиций эластогидродинамической теории смазки требуется увеличить расход масла для более обильного смазывания и снижения теплонапряженности трибоконтактов путем более интенсивного отвода тепла. С позиций компрессионно-вакуумной гипотезы трения [9,10], необходимо снижать вязкость смазочной среды, например, путем перевода ее в двухфазное состояние.

Исходя из основных положений компрессионно-вакуумной гипотезы трения, аргументация использования масловоздушной смазочной среды в высокоскоростных редукторах заключалась в следующем. Основным источником выделения тепла является трение интенсивных набегающих граничных и вторичных течений смазочных слоев в конфузурных областях трибоконтактов. Для улучшения теплового режима зоны контакта необходимо отказаться от обильного смазывания и

применить масловоздушную смесь, объемная вязкость и плотность которой существенно (на порядок) меньше, чем у базового масла. Использование двухфазной смазочной среды обеспечит уменьшение степени разрежения и снижение интенсивности трибокавитации, которая также является источником теплоты и причиной кавитационного разрушения поверхностей.

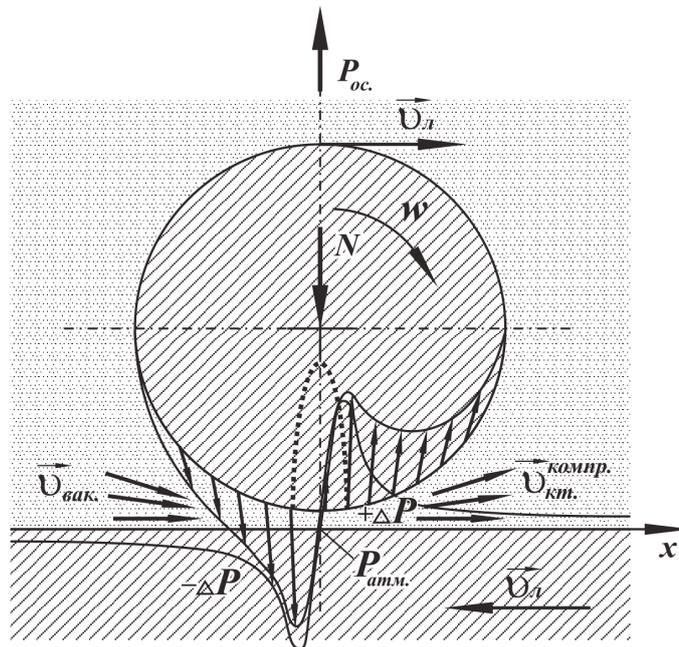


Рис. 1. Схематическое возникновение компрессионных и вакуумных гидродинамических процессов в граничных слоях смазки при трении качения ролика по кольцу

Проанализировав основные положения ЭГД-теории и компрессионно-вакуумной гипотезы трения, было принято решение в пользу последней и реализована смазка двухфазной средой подшипников сателлитов переднего редуктора двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1. Для этого была произведена конструкторская доработка (рис. 2, б) роликовых подшипников сателлитов, а именно: масло, с тем же расходом, подавалось не на дорожки качения, а через каналы на торцы роликов. При этом на больших частотах вращения роликов (4000 об/мин) образуется двухфазная смазочная среда в виде масловоздушной смеси.

Стендовые испытания на ОАО «Мотор Сич» проводились на двигателях с серийными номерами 317001 и 317013 в течение 2007-2009 гг. и подтверждают существенное повышение ресурса главных редукторов без признаков усталостного выкрашивания поверхностей качения осей сателлитов. Такая конструктивная доработка была внедрена на восьми двигателях ТВЗ-117ВМА-СБМ1, которые в настоящее время находятся в эксплуатации. На протяжении более одного года при суммарной наработке более 5000 ч съёмов редукторов по дефекту выкрашивания осей сателлита не происходило.

Использование масловоздушной смазывающей среды – эффективный путь снижения потерь на трение и теплонапряженности высокоскоростных трибосистем опор и редукторов ГТД. Экспериментально подтверждается, что трение набегающих граничных слоев смазки с движущейся поверхностью и слоев смазки вторичных течений, возникающих в диффузорной области контакта, а также кавитация в конфузорной являются основными причинами разогрева высокоскоростных трибосистем с ЭГД-контактами. Выделению из смазочной среды масловоздушной фазы, наряду с барботажем, способствуют процессы разрежения смазки в диффузорных областях контакта, то есть трибокавитация, когда степень разрежения достигает значений меньше давления насыщенных паров масла. Стендовые испытания ТВЗ-117ВМА-СБМ1 на ОАО «Мотор Сич» и ГП «Ивченко-Прогресс» показали, что при уменьшении зазоров в роликовом подшипнике и при том же расходе масла на дорожках качения ресурс передних редукторов двигателя несколько увеличивался, однако выкрашивание не прекращалось. При использовании масловоздушной смазки, вместо струйной подачи масла на беговую дорожку признаков разрушения поверхностей обнаружено не было. Эксплуатация восьми двигателей с

конструкторскими доработками по организации смазки маслораздушной смесью показала, что при увеличении ресурса осей сателлитов передних редукторов двигателей ТВЗ-117ВМА-СБМ1 более чем в 5 раз, признаки их выкрашивания не обнаружены, а редуктора работают надёжно и устойчиво. Приведенные результаты исследований подтверждают справедливость компрессионно-вакуумной гипотезы трения и трибокавитационного механизма изнашивания, свидетельствуют об их научно-технической состоятельности, в частности применительно к термонагруженным и высокоскоростным трибосистемам современных ГТД, а также перспективность их использования при проектировании трибосистем авиационного двигателестроения.

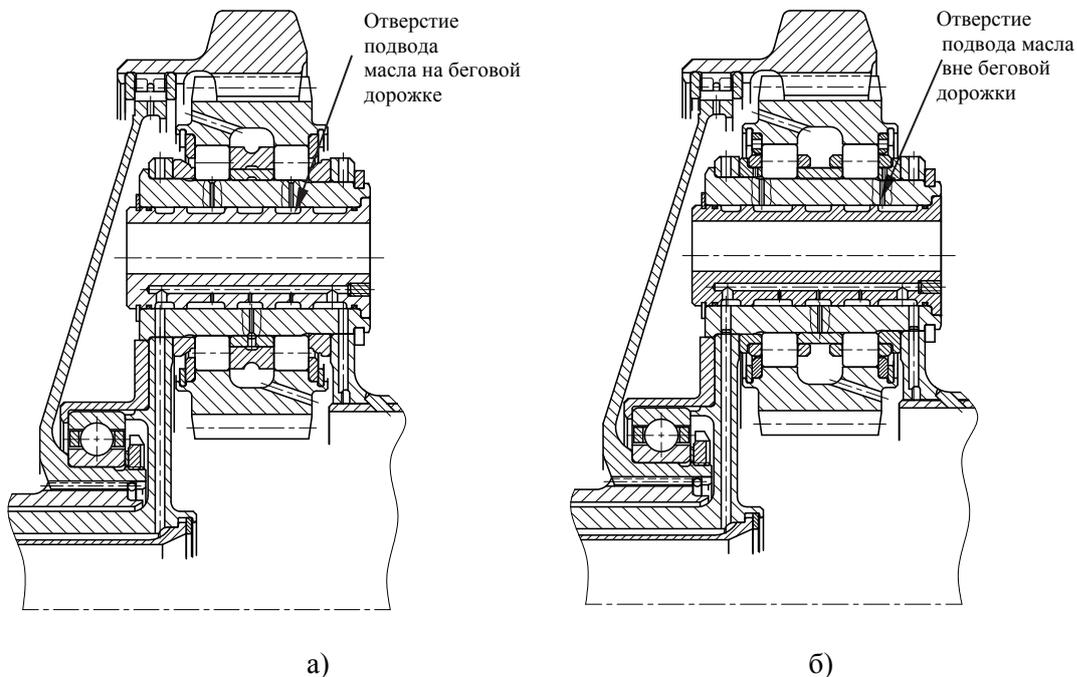


Рис. 2. Схема подвода смазки в подшипники главного редуктора двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ1: а) исходная конструкция; б) доработанная конструкция подшипника сателлита

### Выводы

1. В результате проведенного исследования гидродинамических процессов в граничных слоях пар трения редуктора ГТД наблюдается возникновения повышенного  $+\Delta P$  и пониженного  $-\Delta P$  давления в граничных слоях смазки. В трибоконтакте выделяется наличие диффузорной и конфузорной областей.

2. В результате лабораторных исследований доказано, что использование маслораздушной смазывающей среды – эффективный путь снижения потерь на трение и теплонапряженности высокоскоростных трибосистем опор и редукторов ГТД.

3. Экспериментально подтверждено, что трение набегающих граничных слоев смазки с движущейся поверхностью и слоев смазки вторичных течений, возникающих в диффузорной области контакта, а также кавитация в конфузорной являются основными причинами разогрева высокоскоростных трибосистем с ЭГД-контактами.

1. Ковеза Ю.В., Никитин С.В, Пшеничных С.И. О решении тепловой задачи применительно к обычным и гибридным подшипникам качения газотурбинных двигателей. Ж. «Авиационно-космическая техника и технология», 2008, №10 (57). – С.132-135.

2. Демидович В.М. Исследование теплового режима подшипников ГТД.- М.: Машиностроение, 1978.- 172 с.

3. Основы теплопередачи в авиационной технике /Под ред. Кошкина В.К. – М.: Оборонгиз, 1960. – 389с.

4. Ли Сейрег. Расчет коэффициента трения в контактах скольжения и качения // Современное машиностроение. – 1989. – Серия Б, №12.- С.148-152.

5. Kenneth C Luderma, Arbor A. Friction, wear, lubrication. A Textbook in Tribology. – CRC Press, Inc. - Boca Raton, New York, London, Tokyo. – 1996. – 257 p.

6. Грубин А.Н. Основы гидродинамической теории смазки тяжело нагруженных криволинейных поверхностей. – М.: Mashgiz., 1949. – 150 с.
7. Петрусевич А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки // Изв. АН СССР ОТН. – 1951, №2. – С.209-223.
8. Сомов В.А. Смазка машин и механизмов (Особенности смазки деталей дизелей) // Трение, износ, смазка. Том 11, №1, март 2009г. с.17.
9. Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания. – Деп. в ГНТБ Украины. - 07.07.2008, №109 – Ук 2008. – 28 с.
10. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. – Деп. в ГНТБ Украины 14.04.09, №20 – Ук 2009г. – 43 с.

#### REFERENCES

1. Koveza Yu. V., Nikitin S.V., Pshenichnyh S.I. The solution of the thermal problem in relation to conventional and hybrid rolling bearings of turbine engines. J. "Aerospace Engineering and Technology", 2008, №10 (57). - S.132-135.
2. Demidovitch V.M. Investigation of the thermal regime of the bearing GTD.- M.: Machinery, 1978.- 172 s.
- 3 Fundamentals of heat transfer in aeronautical engineering / Ed. V.K. Koshkin - M.: Oborongiz 1960 - 389s.
5. Kenneth C Luderma, Arbor A. Friction, wear, lubrication. A Textbook in Tribology. – CRC Press, Inc.- Boca Raton, New York, London, Tokyo. – 1996. – 257 p.
6. Grubin A.N. Fundamentals of the hydrodynamic theory of lubrication of heavily loaded curved surfaces.- M.: Mashgiz., 1949 - 150 p.
- 7 Petrusевич A.I. The main conclusions of the contact-hydrodynamic lubrication theory // Math. USSR Academy of ANM. - 1951, №2. - S.209-223.
- 8 Somov V.A. Lubrication of machines and mechanisms (Features lubricating parts of diesel engines) // Friction, wear, lubrication. Volume 11, №1, March 2009. p.17.
9. Stelmah A.U. Compression-vacuum mechanism of adhesive friction and wear. - Dep. GNTB in Ukraine. - 07.07.2008, №109 - Uk 2008 - 28 p.
- 10 Stelmah A.U. The emergence of the jet streams in contact under boundary lubrication mechanism of their formation. - Dep. In GNTB Ukraine 14.04.09, №20 - Uk 2009. - 43.

#### **Кравченко И.Ф., Колесник П.А., Единолич А.Б., Стельмах А.У., Шимчук С.П. Підвищення ресурсу редукторів газотурбінних двигунів шляхом використання двофазної маслоповітряної суміші.**

Лабораторні дослідження, стендові випробування та експлуатація восьми двигунів з конструкторськими доробками з організації мащення маслоповітряною сумішшю показали, що ресурс осей сателітів передніх редукторів двигунів ТВ3-117ВМА-СБМ1 підвищився більш ніж у 7 разів, а ознаки їх викришування не виявлялися, редуктори працюють надійно і стійко.

**Ключові слова:** тертя, маслоповітряна суміш, редуктор, ресурс, тиск, граничні шари

#### **I. Kravchenko, P. Kolesnik, A. Edinovich, A. Stelmah, S. Shimchuk. Increase of a resource reducers gas turbine engines by means of a two-phase oil and air mixture.**

Development, design and organization of new production aircraft of aircraft requires considerable expenses. Therefore, when creating a new aircraft is always considered the possibility of using part of its mass-produced units that are well proven in service and technical characteristics meet the requirements in the new product. When you create new types of aircraft AN-140, AN-148 and AN-158 CB "Ivchenko-Progress" developed GTD TV3-117VMA SBM1-and D-436-148 on the basis of existing TV3-117VMA and D-436.

To ensure proper thermal regime of rolling bearings of the rotors and gears GTD traditionally applied lubrication and cooling pumping tens and hundreds of liters per minute, while the full lubrication of friction surfaces only requires milliliters of oil.

The materials of the articles listed laboratory tests, bench tests and the results of the operation of eight engines with design modifications to the organization of oil-air lubrication mixture, which showed that the resource caliper front axle gear TV3-117VMA-SBM1 rose by more than 7 times, and signs of chipping is not detected, gearboxes operate reliably and steadily.

**Keywords:** friction, air-oil mixture, gear, life, pressure, boundary layers

#### **АВТОРЫ:**

**КРАВЧЕНКО Игорь Федорович**, ГП «Ивченко-Прогресс», генеральный конструктор.

**ПЕЙЧЕВ Григорий Иванович**, ГП «Ивченко-Прогресс», главный инженер.

**ЕДИНОВИЧ Андрей Борисович**, ГП «Ивченко-Прогресс», ведущий конструктор.

**СТЕЛЬМАХ Александр Устинович**, Национальный авиационный университет, заведующий Лаборатории «Нанотриботехнологий», [stelmah65@yandex.ua](mailto:stelmah65@yandex.ua).

**ШИМЧУК Сергей Петрович**, Луцкий национальный технический университет, доцент кафедры машин легкой промышленности, [kim.c.p@mail.ru](mailto:kim.c.p@mail.ru).

**АВТОРИ:**

*КРАВЧЕНКО Ігор Федорович*, ДП «Івченко-Прогрес», генеральний конструктор.

*ПЕЙЧЕВ Григорій Іванович*, ДП «Івченко-Прогрес», головний інженер.

*ЄДИНОВИЧ Андрій Борисович*, ДП «Івченко-Прогрес»,

*СТЕЛЬМАХ Олександр Устимович*, Національний авіаційний університет, завідуючий Лабораторією «Нанотриботехнологій», [stelmah65@yandex.ua](mailto:stelmah65@yandex.ua).

*ШИМЧУК Сергій Петрович*, Луцький національний технічний університет, доцент кафедри машин легкої промисловості, [kim.c.p@mail.ru](mailto:kim.c.p@mail.ru).

**AUTHORS:**

*KRAVCHENKO Igor*, SE "Ivchenko-Progress", General designer.

*PEYTCHEV Grigory*, SE "Ivchenko-Progress", Chief engineer.

*EDINOVICH Andrei.*, SE "Ivchenko-Progress", Lead designer.

*STELMAH Alexander*, professor, National Aviation University, head of the Laboratory "Nanotribotechnology», [stelmah65@yandex.ua](mailto:stelmah65@yandex.ua).

*SHIMCHUK Sergei*, Lutsk national technical university, Associate professor Department of Light Industry Machinery, [kim.c.p@mail.ru](mailto:kim.c.p@mail.ru).

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

*АКСЕНОВ А.Ф.*, доктор технических наук, профессор, Национальный авиационный университет, советник ректора, Киев, Украина.

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

*АКСЬОНОВ О.Ф.*, доктор технічних наук, професор, Національний авіаційний університет, радник ректора, Київ, Україна.

**REVIEWER:**

*A. AKSENOV*, Doctor of Science in Technology, Professor, National Aviation University, Rector Advisor, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла в редакцію 05.09.2014р.