

**В.Ф. Громов**

Московский авиационный институт

**А.Ф. Макаров**

Университет природы, общества и человека

**Д.А. Овсянников**

Московский авиационный институт

## **НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ШАРНИРНОГО УЗЛА С ЗАПРЕССОВАННОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ВТУЛКОЙ**

Статья посвящена анализу напряженно-деформированного состояния под нагрузкой элементов шарнирного узла с запрессованной высокопрочной втулкой в сравнении с втулкой, установленной по скользящей посадке.

В изделиях машиностроения широко используются шарнирные узлы, работающие под воздействием циклических нагрузок высокого уровня в условиях присущей им концентрации напряжений. Усталостные разрушения элементов шарнирного узла, как показано на рис. 1 приводят к значительным экономическим потерям из-за простоя дорогостоящего оборудования и техники. Как при производстве отдельных деталей шарнирного узла, так и при ремонте детали после разрушения имеются достаточно эффективные технологические методы увеличения их выносливости. Одним из направлений в этом плане является использование напряженных посадок цилиндрических деталей вал-втулка.

В строительных и подъёмных машинах распространены подвижные шарнирные узлы. Для увеличения износостойкости в таких узлах применяют втулки из материала с более высокой твёрдостью. Втулка может быть установлена с радиальным натягом. Поэтому было исследовано влияние радиального натяга посадки втулки в отверстие на концентрацию напряжений в пластине.

Отверстие находится вблизи края пластины, что значительно изменяет напряженное состояние в пластине как при посадке с натягом, так и при нагружении соединения. Напряженно-деформированное состояние, создаваемое посадкой с натягом, в этом случае является несимметричным. Контактные радиальные напряжения натяга будут переменными по окружности отверстия, а напряжения в перемычке до края пластины

значительно больше, чем при посадке в отверстие, в бесконечной пластине. Особый интерес представляет решение задачи для посадки тонкостенной втулки, стенка которой является гибкой и мало препятствует неосесимметричной деформации отверстия. В этом случае произойдет искажение сечения втулки, в том числе внутреннего диаметра, то есть появится овальность. Расчёт напряжённого состояния, возникающего при нагружении узла силой, осложняется, кроме влияния края пластины, необходимостью решать контактную задачу для трёх тел: пластины, втулки и оси. При посадке втулки с натягом необходимо совместно решать задачу о напряженной посадке и контактную задачу для трёх тел.



Рис. 1. Характерное разрушение детали шарнирного узла

Rys. 1. Charakterystyczne uszkodzenie części zespołu przegubu kulistego

Решение задачи о напряженной посадке в деталь произвольной формы, в частности, в проушину или отверстие у края пластины, а также задачи о нагружении отверстия силой классическими методами теории упругости является громоздким и возможно только числовыми методами с использованием ЭВМ. Современные методы конечного элемента, реализованные, в частности в программах COSMOS или ANSYS, позволяют значительно упростить решение подобных задач. Применение односторонних контактных элементов между осью, втулкой и пластиной позволяют учитывать силы трения в контакте, взаимное проскальзывание деталей и возникновение зазоров на части окружности отверстия, что исключено при применении аналитических методов расчета.

Напряженно-деформированное состояние, создаваемое посадкой с натягом втулки в детали некруглой формы исследовано методом конечного элемента (МКЭ) с использованием программы COSMOS. В качестве объекта исследования была выбрана пластина с эксцентрично расположенным отверстием.

Расчётная схема приведена на рис. 2. Размеры пластины 100x100 мм. Диаметр отверстия  $D = 20$  мм. Диаметр отверстия во втулке  $d = 0.84$ ,  $D = 16.8$  мм. Ось установлена во втулку без натяга, величина зазора притята равной нулю. Нагрузка равномерно распределена по сечению оси.

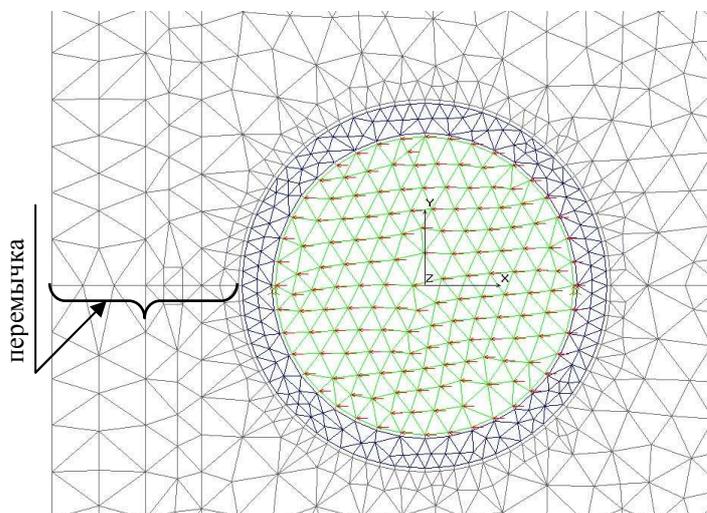


Рис. 2. Расчетная схема шарнирного узла

Rys. 2. Schemat obliczeniowy zespołu przegubu kulistego

Расстояние (перемычка) от центра отверстия до края пластины 20 мм, то есть перемычка от края отверстия до края пластины равна 10 мм, что достаточно для обеспечения прочности перемычки на разрыв.

Конечные элементы – плоские двумерные TRIANG. Для контакта использованы односторонние контактные GAP-элементы, коэффициент трения принят равным  $f = 0$ . Задача решалась в нелинейной постановке.

Материалы пластины – чугун с механическими свойствами: модуль упругости  $E = 1,2 \cdot 10^{11}$  МПа (12000 кгс/мм<sup>2</sup>), коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ . Материал втулки – сталь с механическими свойствами:  $E = 2 \cdot 10^{11}$  МПа (20000 кгс/мм<sup>2</sup>),  $\mu = 0,3$ . Материалы принят упругими во всем диапазоне напряжений. Для удобства перехода к другим величинам натяга в числовых расчетах принята величина натяга, равная 1%. Абсолютная величина натяга посадки втулки в пластину равна 0,20 мм (1%) или 0,1 мм на радиус. Также выполнен расчёт для посадки втулки в отверстие пластины с нулевым натягом.

Напряжения смятия между втулкой и пластиной приняты равными  $\sigma_s = 24.5$  МПа (2.5 кг/мм<sup>2</sup>). Соответственно, между осью и втулкой напряжения смятия равны 29 МПа (3 кг/мм<sup>2</sup>).

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчёта для случая посадки втулки в пластину без натяга. Напряжения в этом случае создаются только приложенной нагрузкой. При переменной внешней нагрузке они будут переменными напряжениями. Напряжений от напряжённой посадки нет. Угол контакта между втулкой и отверстием равен  $\approx 40^\circ$  от оси симметрии узла. Закон распределения окружных напряжений по сечению перемычки (рис. 3а) показывает явно выраженный «рамный эффект» и принципиально отличается от случая пластины бесконечных размеров, то есть, при

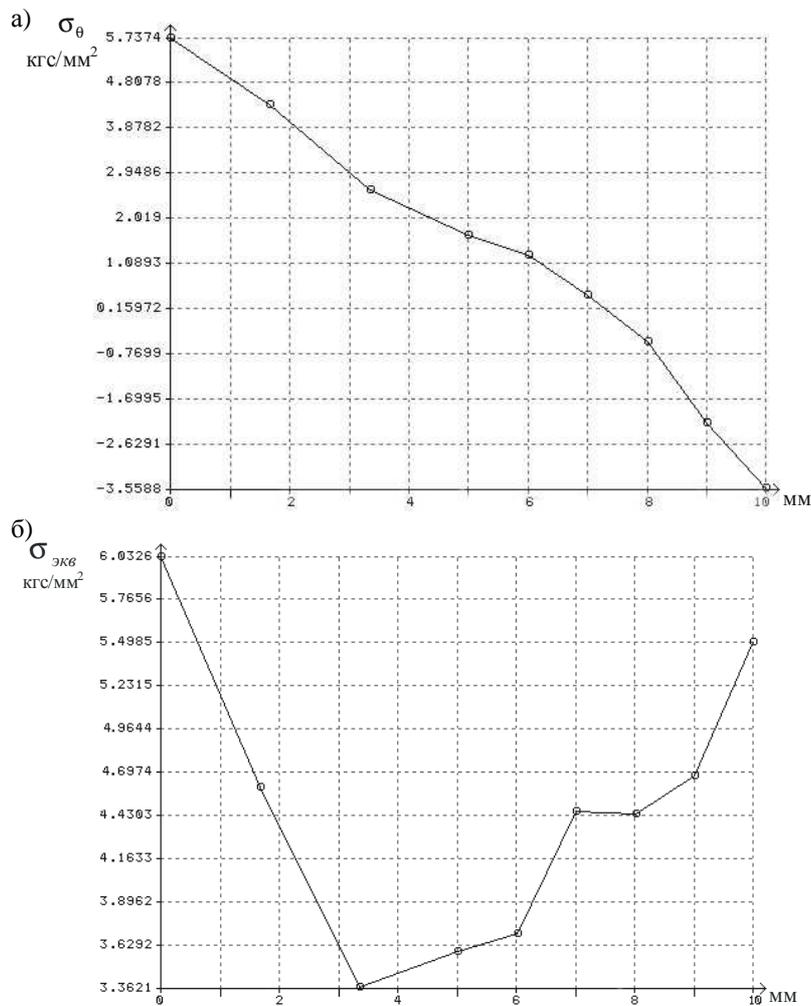


Рис. 3. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в перемычке при посадке втулки без натяга

Rys. 3. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia w łączniku przy wstawianiu tulejki bez wciskania

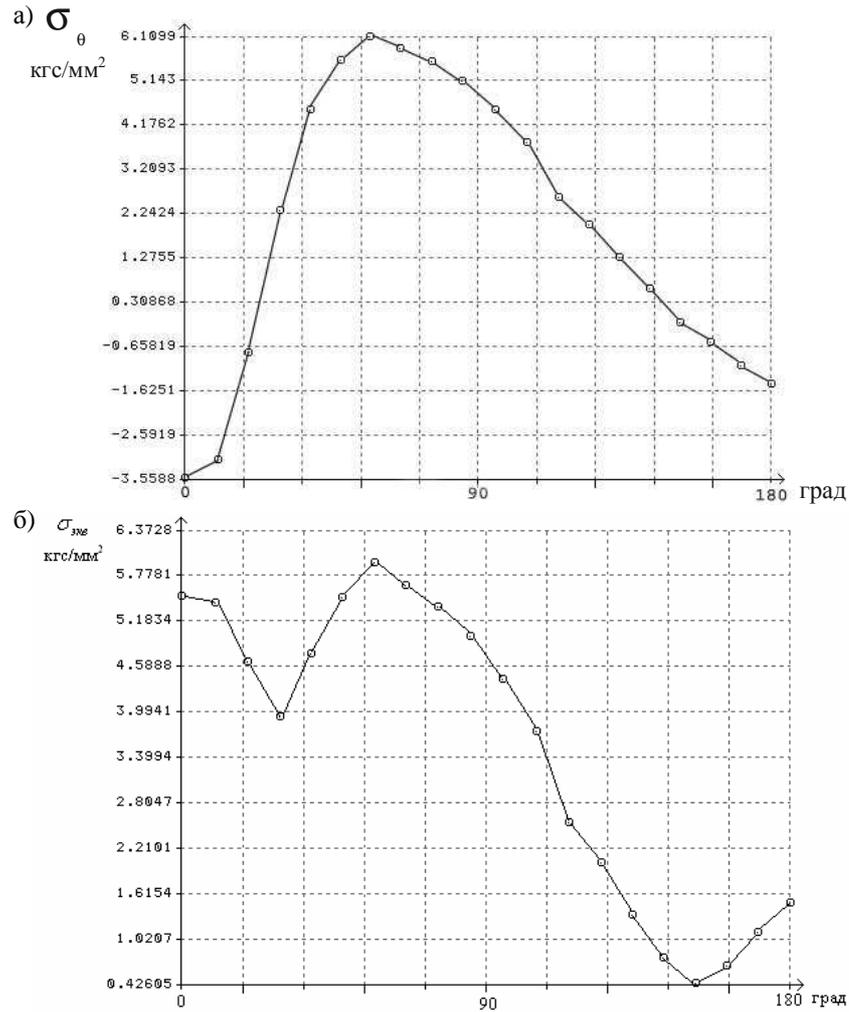


Рис. 4. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения по окружности отверстия в пластине на дуге 180° при посадке втулки без натяга

Rys. 4. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia na obwodzie otworu w płycie na cięciwie 180° przy wstawianiu tulejki bez wcisku

значительной величине перемычки. В бесконечной пластине окружные напряжения убывают при удалении от отверстия. В настоящем случае распределение напряжений соответствует изгибу перемычки, как стержня рамы, нагруженного в середине поперечной силой. Максимальные напряжения имеют место на наружном крае пластины. Эквивалентные напряжения по Мизесу (рис. 3б) также отражают «рамный эффект». Распределение окружных и эквивалентных напряжений по окружности отверстия в пластине показано на рис. 4а и б. Максимум напряжений

находится на угле  $50-60^\circ$ , где обычно начинается усталостное разрушение (см. рис. 1). Коэффициент концентрации напряжений по отношению к величине напряжений смятия между втулкой и пластиной равен  $K = 2.4$  для окружных и эквивалентных напряжений.

При посадке втулки с радиальным натягом, равным 1%, как показал расчёт, форма отверстия искажается вследствие влияния края пластины. По оси симметрии диаметр отверстия в пластине увеличился на 0.38%, в поперечном направлении на 0.28%. Напряжения при нагружении узла с втулкой, установленной с радиальным натягом, приведены на рис. 5 и 6. На них приведены суммарные напряжения, вызванные внешней нагрузкой и посадкой с радиальным натягом. Как следует из предыдущих результатов, напряжения натяга значительно больше, чем вызванные нагрузкой. Но напряжения натяга постоянные, поэтому слабо влияющие на усталостное разрушение. Напряжения от нагрузки переменные и являются определяющими при усталостном разрушении.

Суммарные напряжения в перемычке (рис. 5а и б) показывают «рамный эффект» и для напряжений натяга. По окружности отверстия максимум окружных и эквивалентных напряжений находится также на угле  $50-60^\circ$ , рис. 6а и б.

Из суммарных напряжений были выделены напряжения, создаваемые нагрузкой. Путём сравнения с напряжениями от нагрузки при посадке без натяга получено следующее. Окружные и эквивалентные напряжения в перемычке уменьшились в 1.16-1.19 раза. На окружности отверстия в районе угла  $50-60^\circ$  окружные напряжения уменьшились в 1.13 раза, а эквивалентные в 1.32 раза. То есть, коэффициенты концентрации напряжений уменьшились в такое же число раз при переходе к посадке втулки с радиальным натягом.

При посадке втулки без натяга вся нагрузка с оси передаётся на перемычку, а затем проходит через пластину, создавая концентрацию напряжений. При посадке с натягом втулка начинает участвовать в передаче нагрузки, разгружая перемычку.

При посадке без натяга средние окружные напряжения во втулке при угле  $90^\circ$  равны нулю. При посадке с натягом при приложении нагрузки в том же сечении втулки создаются растягивающие напряжения (дополнительные к сжимающим напряжениям натяга). То есть, во втулке создаётся усилие, передаваемое на обратную сторону отверстия (угол более  $90^\circ$ ), которое разгружает перемычку. В данном случае доля разгрузки составляет 18%, а напряжения натяга на обратной стороне отверстия уменьшаются на 6 МПа ( $0.6 \text{ кгс/мм}^2$ ). Отсюда можно определить требуемую величину натяга, необходимую для его сохранения по всей окружности отверстия при действии нагрузки.

Данные расчёты выполнены для случая, когда коэффициент трения между втулкой и пластиной в отверстии равен нулю. Если коэффициент

трения больше нуля, эффект снижения концентрации напряжений будет выше.

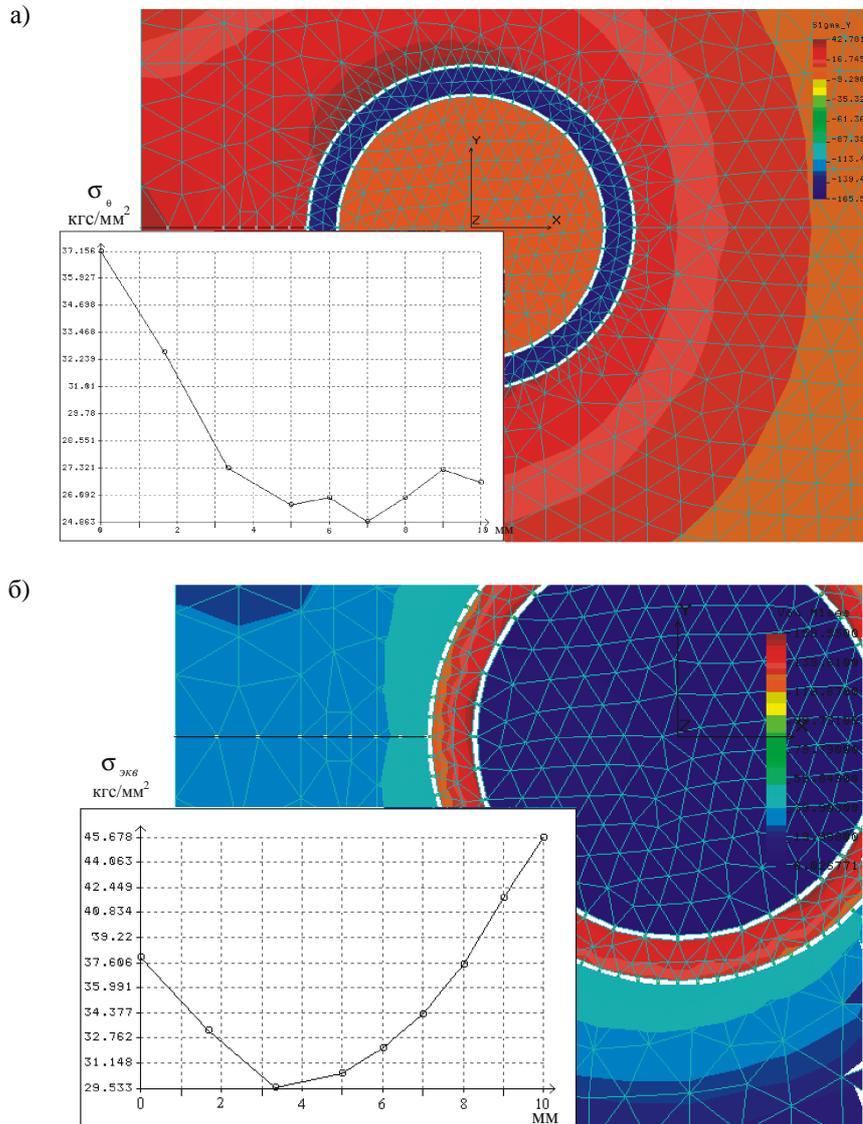


Рис. 5. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения в перемычке при посадке втулки с натягом

Rys. 5. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia w łączniku przy wstawianiu tulejki z wciskiem

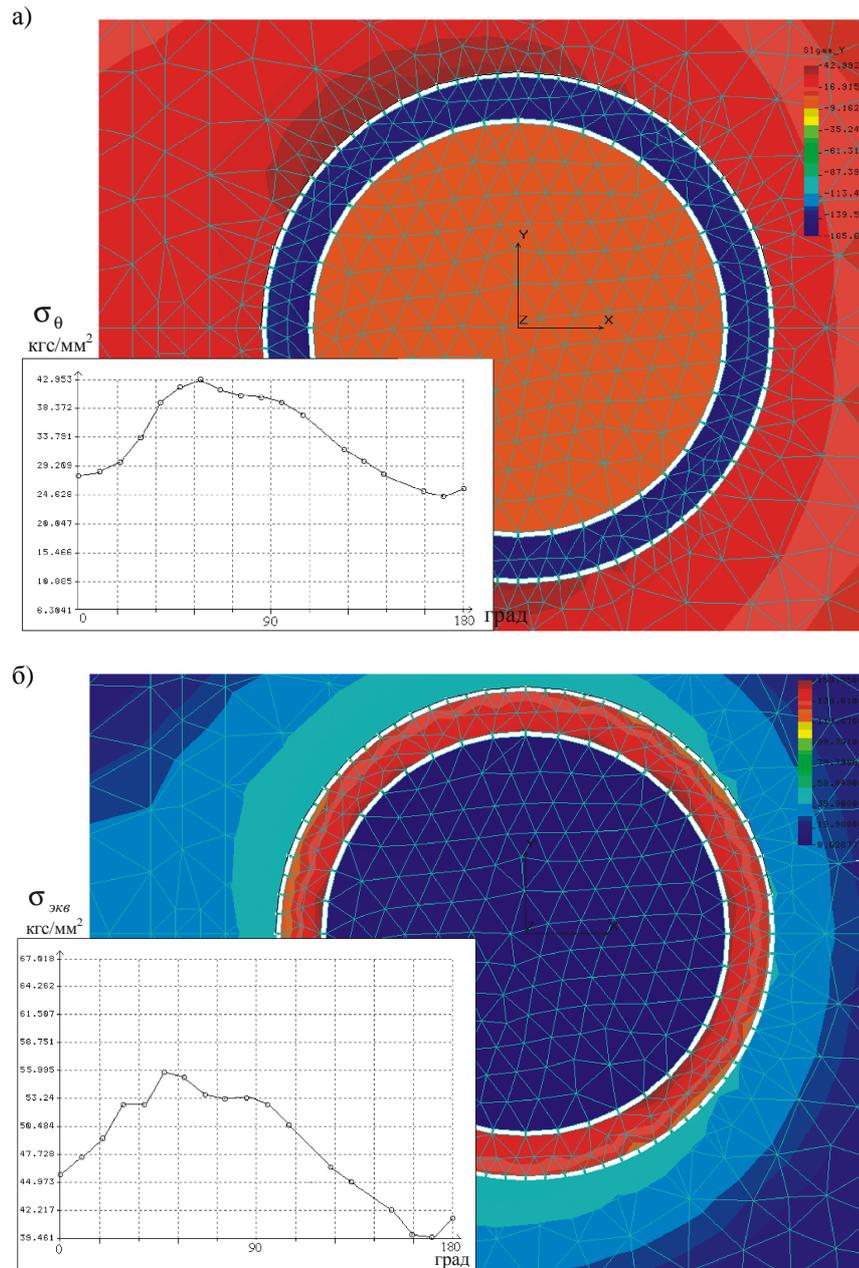


Рис. 6. Окружные (а) и эквивалентные (б) напряжения по окружности отверстия в пластине на дуге 180° при посадке втулки с натягом

Rys. 6. Obwodowe (a) i ekwiwalentne (b) naprężenia na obwodzie otworu w płycie na cięciwie 180° przy wstawianiu tulejki z wciskiem

## **Выводы**

1. Посадка втулки с радиальным натягом приводит к уменьшению концентрации переменных напряжений при нагружении шарнирного узла. Часть нагрузки при этом передаётся через втулку, приводя к разгрузке перемычки до края пластины. Напряжения натяга на обратной стороне отверстия уменьшаются.

2. Форма отверстия при посадке с натягом искажается вследствие влияния края пластины.

3. Метод конечных элементов позволяет рассчитать напряжения в шарнирном узле и оценить требуемую величину натяга для обеспечения его сохранения по всей окружности отверстия при нагружении.

## **NAPRĘŻENIOWO-DEFORMACYJNY STAN PRZY OBCIĄŻANIU KULISTEGO PRZEGUBU Z WCIŚNIĘTĄ CIENKOŚCIENNĄ TULEJKĄ**

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono analizę stanu naprężeniowo-deformacyjnego w warunkach obciążenia elementów zespołu kulistego przegubu z wciśniętą tulejką o wysokiej wytrzymałości w porównaniu z analogiczną tulejką wstawioną z pasowaniem suwliwym.

## **STRESSED-DEFORMED STATE WHILE HINGE JOINT WITH EMBEDDED THIN-WALL PLUG IS LOADED**

### **Summary**

Article covers stress-deformed analysis under load of hinge joint elements with embedded high-strength plug in comparison with slide fitted plug.

*Złożono w redakcji w lipcu 2011 r.*

Громов Виктор Федорович – Московский Авиационный институт (государственный технический университет), доцент, к.т.н.  
Россия, 125284, г.Москва, 1-ый Боткинский проезд, д.6, кв.67  
Тел. +7 (495) 045-78-32  
e-mail [vikirin@mail.ru](mailto:vikirin@mail.ru)  
паспорт № 631852661, до 21.04.2012г.

Gromov Victor F. – Moscow Aviation Institute (State Technical University), Professor, Doctor of Science  
App.67, 6, 1<sup>st</sup> Botkinskiy lane, Moscow, 125284, Russia  
Tel. +7 (495) 045-78-32  
e-mail [vikirin@mail.ru](mailto:vikirin@mail.ru)  
passport № 63 1852661, expired 21.04.2012г.

Макаров Александр Федотович – Университет природы, общества и человека, г.Дубна, доцент, к.т.н.  
Makarov Aleksandr F. – University of Nature, Society and Human, Dubna, Professor, Doctor of Science  
Tel. +7 (916) 063-89-94  
e-mail [afmakarov1@yandex.ru](mailto:afmakarov1@yandex.ru)

Овсянников Дмитрий Александрович - Московский Авиационный институт (государственный технический университет), аспирант  
Россия, 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4, каф.104  
Тел. +7 (925) 509-44-17  
e-mail [ovdi1@rambler.ru](mailto:ovdi1@rambler.ru)  
паспорт № 06 3349430 до 16.02.2021

Ovsyannikov Dmitriy A. - Moscow Aviation Institute (State Technical University), Ph.D. student

104 Dept., 4, Volokolamskoye roadway, A-80, GSP-3, Moscow, 125993, Russia  
Tel. +7 (925) 509-44-17  
e-mail [ovdi1@rambler.ru](mailto:ovdi1@rambler.ru)  
passport № 06 3349430, expired 16.02.2021