

УДК 621.822

М. Б. Хадиев, Н. В. Соколов, Е. М. Федотов

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОВЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ, ПРОФИЛИРОВАННЫХ СКОСОМ,
ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РАДИАЛЬНОМУ МЕЖПОДУШЕЧНОМУ КАНАЛУ**

Ключевые слова: упорный подшипник скольжения, клиновой скос, форма зазора, анализ характеристик.

В статье приводятся технология изготовления клинового скоса, вывод формы зазора и результаты расчетов и анализа характеристик упорных подшипников скольжения с неподвижными подушками, профилированных скосом, параллельным радиальному межподушечному каналу. Анализ выполнен с учетом межподушечных каналов в термоупругогидродинамической постановке с периодическими тепловыми граничными условиями на входе в смазочный слой. Учитываются температурные деформации опорных поверхностей подушек и тепловое состояние упорного диска. Приводятся сравнения характеристик двух форм зазора упорных подшипников с неподвижными подушками: с винтовой поверхностью клинового скоса и с параллельным межподушечному каналу скосом.

Keywords: thrust bearing, V-bevel, gap shape, conditions analysis.

The article presents the technology of the V-bevel, output of a gap shape and calculations and analysis of the thrust bearings with fixed pads, shaped with a bevel, parallel to the radial interpad channel. The analysis is performed, taking into account the interpad channels in a thermoflexible hydrodynamic setting with periodic thermal limit conditions at the inlet of the lubricating layer. Temperature strains of the supporting pads surfaces and thermal condition of the thrust plate are considered. Characteristics of two forms of the gap of the thrust bearings with fixed pads are compared: with a helical surface of the V-bevel and with a bevel parallel to the interpad channel.

Повышение надежности работы, ресурса эксплуатации и других эксплуатационных характеристик турбомашин является важной задачей последних десятилетий для компрессорной техники [1]. Эти параметры в первую очередь зависят от надежности эксплуатации подшипников и уплотнений.

В центробежных и винтовых компрессорах, паровых и газовых турбинах, редукторах, мультипликаторных компрессорах и других роторных машинах, в которых существуют осевые силы, находят широкое применение упорные подшипники скольжения с неподвижными подушками. Представляет интерес изучение работы данных подшипников с разным профилем рабочей поверхности подушки, в т.ч. при динамических режимах [2], поскольку они в значительной мере определяют эксплуатационную надежность компрессора в целом.

Среди подшипников с неподвижными подушками наиболее перспективными с точки зрения изготовления, пуска и остановки под нагрузкой, а также получения высокой несущей способности, являются те из них, подушки которых имеют профиль с клиновыми скосами и плоскими участками. Наиболее трудоёмкой в изготовлении деталью подшипника является подпятник 1 (рис.1а и б), состоящий из нескольких фиксированных подушек, разделенных между собой маслоподводящими или дренажными каналами 2 и образованных клинообразующим скосом I и плоской поверхностью II. Изначально наибольшее распространение получили подшипники с параллельным радиальному межподушечному каналу клиновым скосом (рис.1б).

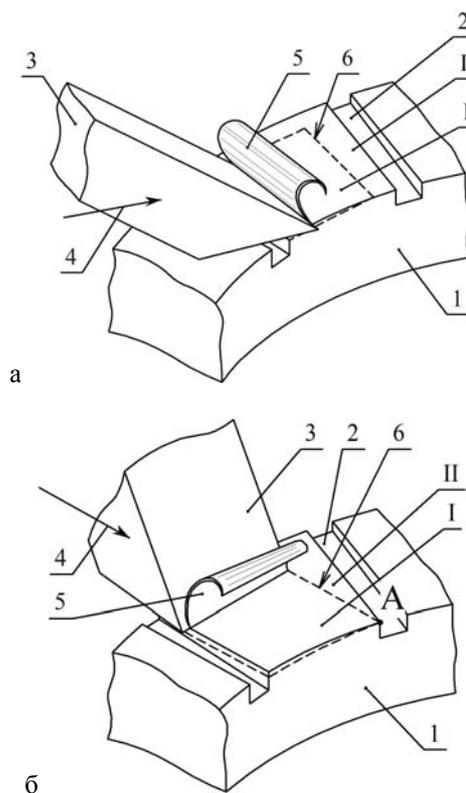


Рис. 1 - Технология получения клинового скоса: а) винтовая поверхность клинового скоса; б) поверхность с параллельным радиальному межподушечному каналу скосом

В частности в ФРГ создан стандарт DIN 7479 на упорные подшипники скольжения аналогичной конструкции [3], [4]. Позже были внедрены подшипники с винтовой поверхностью клинового скоса (рис.1а), у которых толщина смазочного слоя постоянна в радиальном направлении [5]. Подшипники обеих форм зазора обладают большей несущей способностью, чем чисто клиновые подушки [6, 7]. Плоскоклинные подшипники плоской частью воспринимают нагрузку также при отсутствии вращения.

Две формы зазора визуально отличаются между собой линией перехода б клинового скоса I на плоскую часть II (рис.1), при этом направление линии перехода связана с технологией получения клинового скоса. Подпятник 1 с фрезерованными маслоподводящими каналами 2 закрепляют в шпинделе станка, а плоский шлифованный резец 3 – в резцедержателе. Лезвие резца должно быть строго параллельно торцовой поверхности подпятника в случае рис.1а и наклонено на величину угла клинового скоса в случае рис.1б. При движении из-под резца выходит стружка 5, которую необходимо периодически убирать щеткой или крючком. Глубина скоса контролируется часовым индикатором, у которого ножка индикатора должна опираться на плоскую рабочую поверхность подпятника. Нарезку можно выполнить за один или несколько проходов. Движение резца 4 для нарезки первой формы зазора (рис.1а) должно происходить по винтовой линии, начиная от рабочей поверхности или от маслоподводящих каналов, после которого нарезается винтовая поверхность клинового скоса подушки. Для второй формы зазора (рис.1б) движение резца 4 должно быть строго параллельно входной кромке подушки, при этом резец 3 должен двигаться со стороны внешнего или внутреннего радиусов подшипника. При движении резца 3 в случае первой формы зазора (рис.1а) при $r = R_1$ и $\theta_k = \theta_n$ получается чистый скос без плоской поверхности II. В случае же второй формы зазора (рис.1б) линия перехода б клинового скоса I на плоскую часть II получается параллельно входной кромке, в результате чего при $r = R_1$ и $\varphi_k = \theta_n$ (точка А) образуется треугольный сектор из плоской части II. В этом основное геометрическое отличие рабочих поверхностей двух форм зазора.

Для расчета подшипников с параллельным межподушечному каналу скосом пользуются известной методикой расчета [3], [4], выполненной в виде номограммы, которая тепловые эффекты учитывает лишь усредненно. Однако эта методика не позволяет учитывать выделение и распространение тепла, изменение вязкости и плотности смазки в зависимости от температуры, а также температурные деформации элементов конструкций подшипника. Она также не позволяет определять максимальную температуру смазки в слое. Поэтому исследования упорных подшипников с целью создания инженерной методики расчета и выявления рекомендаций по проектированию, позволяющие выполнить поверочный и проектировочный расчеты

одно- и двухсторонних упорных подшипников с неподвижными подушками, актуальны.

Наиболее полный учет теплообменных процессов, происходящих в смазочных слоях и межподушечных каналах, возможен лишь при совместном рассмотрении в них течения жидкости, распространения тепла и деформаций конструктивных элементов подшипника. Такая задача применительно к упорным подшипникам скольжения с самоустанавливающимися подушками и неподвижными подушками с винтовой поверхностью была поставлена и реализована в работах [8-10]. Постановка теплового граничного условия на входе в смазочный слой в периодической форме позволила определить распределение температуры по высоте входного слоя в процессе расчета, а не задаваться им заранее. В этой постановке учтено также влияние упорного диска на характеристики подшипника.

В упорных подшипниках между вращающимся упорным диском и подушками образуются тонкие смазочные слои, а подушки в угловом направлении разделены межподушечными каналами. Эти каналы обеспечивают подвод жидкости в смазочный слой. В межподушечных каналах на поверхности упорного диска образуются тонкие пограничные слои смазки, выходящие из-под предыдущих подушек и взаимодействующие со смазочными слоями смежных подушек и основной холодной жидкостью в канале. Математическая модель таких подшипников в общей постановке с учетом нестационарности течения подробно описана в работе [9]. Несколько упрощенная математическая модель стационарной периодической задачи с учетом распределения температуры на среднем радиусе упорного подшипника была реализована с использованием численных методов в работах [8]-[10]. В этой модели для упорного подшипника с неподвижными подушками использовалась форма зазора с винтовой поверхностью клинового скоса при $0 \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\theta}_n$ (рис.1а), выражаемая формулой

$$\bar{h} = 1 + \varepsilon_0 \left(1 - \bar{\varphi} / (\bar{\theta}_k \bar{\theta}_n) \right) \delta_k + \bar{\alpha}_n \frac{\Psi_n}{\psi} \int_0^1 \left[\bar{T}(\bar{\theta}_n, \bar{y}_n) - \bar{T}(\bar{\varphi}, \bar{y}_n) \right] d\bar{y}_n, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 = (h_1 - h_2) / h_2$ – относительная клиновидность,

$\bar{\alpha}_n = \alpha_n \mu_0 \omega R_{cp}^2 \theta / (c \rho_0 h_2^2)$ – коэффициент, учитывающий тепловую деформацию подушки, α_n – коэффициент линейного расширения материала подушки, $\delta_k = 1$ при $0 \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\theta}_k$ и $\delta_k = 0$ при $\bar{\theta}_k \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\theta}_n$.

Заменим в формуле (1) второй член, учитывающий геометрическое профилирование несущей поверхности, оставляя неизменными тепловые деформации. Координаты произвольной точки в случае опорной поверхности с параллельным межподушечному каналу скосом [9] можно записать $\xi = r \cos \varphi$, $\eta = r \sin \varphi$. Тогда толщина смазочного слоя выражается через координату η в виде

$$h = h_2 + \delta_{ск} (1 - \eta / \eta_k) \delta_k \quad \text{или}$$

$$h = h_2 + \delta_{ск} (1 - r \sin \varphi / \eta_k) \delta_k, \quad (2)$$

где $\delta_{ск}$ - глубина клинового скоса на входной кромке подушки, δ_k - единичная функция, имеющая нулевое значение в плоской части подушки подшипника. Перейдем к безразмерной форме через параметры

$$\varphi = \bar{\varphi} \theta, \quad r = R_{cp} (\sigma \bar{r} + 1), \quad \eta_k = R_{cp} \bar{\eta}_k,$$

$$\sigma = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1), \quad \varepsilon_0 = (h_1 - h_2) / h_2. \quad (3)$$

Таким образом, учитывая (2) и (3), форму зазора (1), для упорных подшипников с параллельным межподушечному каналу скосом толщину смазочного слоя в области $0 \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\theta}_n$ можно представить в безразмерном виде

$$\bar{h} = 1 + \varepsilon_0 (1 - (\sigma \bar{r} + 1) \sin(\sigma \lambda \bar{\varphi}) / \bar{\eta}_k) \delta_k + \bar{\alpha}_n \frac{\Psi_n}{\psi} \int_0^1 [\bar{T}(\bar{\theta}_n, \bar{y}_n) - \bar{T}(\bar{\varphi}, \bar{y}_n)] d\bar{y}_n. \quad (4)$$

Для определения границы перехода с клиновой части на плоскую воспользуемся тем, что глубина скоса $\delta_{ск}$ на этом участке равняется нулю, т.е.

$$\varepsilon_0 [1 - (\sigma \bar{r}_k + 1) \sin(\sigma \lambda \bar{\varphi}) / \bar{\eta}_k] \cdot 1 = 0. \quad (5)$$

Отсюда квадратная скобка равна нулю, поскольку $\varepsilon_0 > 0$. Решив (5) относительно $\bar{\varphi}_k$ и при заданном $\bar{r} = \bar{r}_k$, получим

$$\delta_k = 1 \quad \text{при} \quad 0 \leq \bar{\varphi} \leq 1 / (\sigma \lambda) \arcsin \bar{\eta}_k / (\sigma \bar{r} + 1),$$

$$\delta_k = 0 \quad \text{при} \quad 1 / (\sigma \lambda) \arcsin \bar{\eta}_k / (\sigma \bar{r} + 1) \leq \bar{\varphi} \leq \bar{\theta}_n. \quad (6)$$

Условную толщину пограничного слоя, находящегося на поверхности упорного диска в межподушечном канале при $\bar{\theta}_n \leq \bar{\varphi} \leq 1$, аппроксимируем выражением [7]

$$\bar{h} = \left[\bar{h}_{\bar{\varphi}=\bar{\theta}_n} \frac{(1 - \bar{\theta}_n)^2 - (\bar{\varphi} - \bar{\theta}_n)^2}{(1 - \bar{\theta}_n)^2} + \bar{h}_{\bar{\varphi}=0} \frac{(\bar{\varphi} - \bar{\theta}_n)^2}{(1 - \bar{\theta}_n)^2} \right] + \varepsilon_1 (\bar{\varphi} - \bar{\theta}_n) (\bar{\varphi} - 1) + \varepsilon_2 (\bar{\varphi} - \bar{\theta}_n)^2 (\bar{\varphi} - 1), \quad (7)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - параметры пограничного слоя.

Приняв за основу математическую модель стационарной периодической задачи [10] и заменив в ней выражение для толщины смазочного несущего слоя \bar{h} на форму зазора (4), учитывающую новое геометрическое профилирование и тепловые деформации подушки, была разработана новая версия программного приложения «Sm2Px2T - Течение жидкости в зазорах и каналах между подушками упорного подшипника» для MS Windows 98/2000/XP/Vista/7, защищенная свидетельством государственной регистрации [11].

Для подбора параметров метода были проведены предварительные расчеты при следующих исходных данных: $\sigma=0,25$; $\lambda=2$; $Re=0$; $\psi=0,001$; $Pe=10000$; $b_0=385$; $\Psi_0=1$; $b_n=385$; $\Psi_n=1$; $\bar{\theta}_n=0,5$; $\varepsilon_0=1,5$; $\chi=1$; $\bar{\beta}=0,1$; $\alpha_m^*=0,02179$;

$$\alpha_n^*=0,0005; \quad Nu_{03}=0,5; \quad Nu_{n0}=Nu_{n\theta n}=Nu_{nHn}=0,3;$$

$\bar{t}_0 = \bar{T}_{a1} = \bar{T}_{a4} = 0$; $\varepsilon_1=0$ и $\varepsilon_2=0$, $\bar{\eta}_k=0,2$. На основе этих расчетов принято с достаточной степенью точности следующее число узлов сетки по координатам: $N_\varphi \geq 81$, $N_r \approx N_\varphi \bar{\theta}_n$ (принято $N_r = 61$), $N_y \geq 21$, $N_{yn} \geq 21$. При всех расчетах были приняты следующие допустимые погрешности: по температуре $[\varepsilon_t]=0,001$, по давлению $[\varepsilon_p]=1E-14$, по расходу $[\varepsilon_Q]=0,001$; и числа итераций: по давлению $[k_p]=1000$, по температуре $[k_t]=100$. Допустимое число глобальных итераций $[k_{гл}]=1000$. Для расчета подушек с винтовой поверхностью клинового скоса приняты те же значения параметров метода.

С целью сравнения характеристик упорных подшипников с параллельным межподушечному каналу скосом и винтовой поверхностью клинового скоса были проведены численные эксперименты. Исходные данные приняты такими же, как при подборе параметров метода. При этом для винтовой поверхности относительная протяженность клинового скоса принята $\bar{\theta}_k = 0,75$, которая, как и клиновидность $\varepsilon_0 = 1,5$, является оптимальной величиной для коэффициента несущей способности \bar{P} [7]. Граничные условия для уравнения энергии [9], [10] задавались следующие: при $\bar{y}=1$ в пределах $\bar{\theta}_n \leq \bar{\varphi} \leq 1$, т.е. в межподушечном канале, температура $\bar{t} = 0$, а при $\bar{y}=0$ в пределах $0 \leq \bar{\varphi} \leq 1$ температура $\bar{t} = \bar{T}_{dp}$. Численные эксперименты проведены для жидкости с переменной вязкостью при режимном параметре $\chi=1$, характеризующем степень изменения вязкости смазки от температуры. (6)

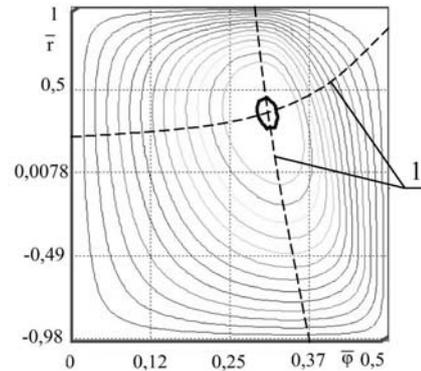


Рис. 2 - Изобары несущей поверхности подушки упорного подшипника с параллельным межподушечному каналу скосом

Как видно из результатов численных экспериментов, эквипотенциальные кривые распределения давления (изобары) по несущей поверхности подушек упорного подшипника обеих форм зазора качественно совпадают: форма кривых распределения давления имеет схожее строение, имеется один общий максимум давления, причем координаты максимума давления \bar{p}_{max} отличаются лишь по радиальной координате. В случае формы зазора с винтовой поверхностью клинового скоса (рис.1а) экс-

тремум давления \bar{p} при возрастании координат \bar{r} и $\bar{\varphi}$ практически не смещается и находится в области общего максимума давления. Однако несколько по-другому ведет себя экстремум давления \bar{p} в случае формы зазора с параллельным межподушечному каналу скосом (рис.1б): при возрастании координат \bar{r} и $\bar{\varphi}$ происходит смещение экстремума \bar{p} во внутреннюю область подушки (рис.2). Это вызвано профилированием рабочей поверхности подушки скосом, параллельным межподушечному каналу. Получающаяся при этом форма зазора (4) деформирует изобары и смещает главные оси распределения давления 1 (рис.2) по сравнению с формой зазора (1). Направление градиентов давления указывает направление составляющей скорости жидкости, описываемой течением Пуазейля. Следовательно, можно сделать вывод о том, что поворот направления постоянной глубины клинового скоса от радиального направления к направлению, параллельному входной кромке подушки подшипника, поворачивает поле распределения давления \bar{p} по несущей поверхности подушки, т.е. главные оси распределения, в том же направлении.

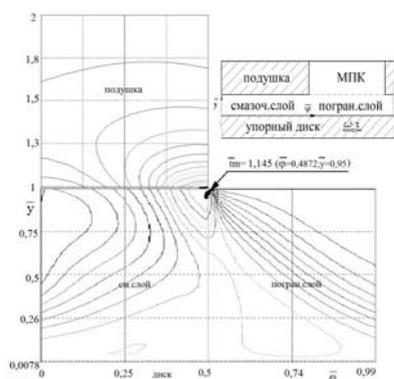


Рис. 3 - Распределение температуры в смазочном и пограничном слоях и в теле подушки упорного подшипника с параллельным межподушечному каналу скосом

Как видно из графиков полученных результатов численных экспериментов, эквипотенциальные кривые распределения температуры (изотермы) по толщине смазочного и пограничного слоев и температурное поле в теле подушки обеих форм зазора также качественно совпадают. Из расположения линий изотерм и распределения температур видно (рис.3), что у входа в смазочный слой происходит достаточно интенсивное втекание холодной омывающей жидкости межподушечного канала (МПК) ($\bar{\psi} = 1$). В случае винтовой поверхности имеется также зона пониженной температуры около входной кромки подушки. Вблизи поверхности упорного диска ($\bar{\psi} \approx 0$) температуры смазочного слоя низкие. Однако при приближении к поверхности подушки ($\bar{\psi} \rightarrow 1$) и возрастании координаты $\bar{\varphi}$ происходит нагрев смазки и повышение температуры. Максимум температуры \bar{t}_m в обоих случаях достигается практически вблизи выходной кромки по-

душки после выхода из смазочного слоя и на её поверхности. При этом в случае винтовой поверхности безразмерная температура \bar{t}_m выше на $(1,17-1,145) \cdot 100 / 1,145 = 2,2\%$. Частично эта разница в температуре \bar{t}_m объясняется неоптимальной величиной ширины клинового скоса $\bar{\eta}_k$ в случае формы зазора (4) со скосом, параллельным межподушечному каналу. В области межподушечного канала при $\bar{\theta}_n < \bar{\varphi} < 1$ по линиям изотерм заметно влияние охлаждающей жидкости МПК, поступающей в толщу жидкости пограничного слоя и понижающей таким образом температуру. Далее охлажденная в МПК жидкость с повышенной вязкостью поступает в смазочный слой следующей подушки, увеличивая, таким образом, несущую способность упорного подшипника.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1) на основе математической модели, рассмотренной в данной статье, разработано новое программное приложение «Sm2Px2T - Течение жидкости в зазорах и каналах между подушками упорного подшипника» [11];

2) данное приложение позволяет в дополнение к характеристикам упорных подшипников скольжения с самоустанавливающимися подушками и неподвижными подушками с клиновыми скосами, профилированными по винтовой поверхности [10], получать характеристики упорного подшипника с неподвижными подушками, профилированными по поверхности с клиновым скосом, параллельным межподушечному каналу.

Литература

1. Максимов, В.А. Компрессорное и холодильное машиностроение на современном этапе./ В.А. Максимов, А.А. Мифтахов, И.Г. Хисамеев. // Вестник КГТУ.-1998г.-№1.- с.104-113.
2. Хадиев, М.Б. Выбор конструкции упорного подшипника скольжения с неподвижными подушками с целью изучения нестационарных характеристик./ М.Б. Хадиев, Т.В. Максимов, Н.В. Соколов. // В 38 Вестник Казанского технологического университета. Т. 14. № 18; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : КНИТУ, 2011.- с. 206-211.
3. Gersdorfer O. Gleitaxiallageringe werden genormt. Ind. – Anz., 1966, 88, №78, SS, 1729-1733. См. также экспресс-информацию: Детали машин, 1966, №46.
4. Gersdorfer O. Genormte Gleit-Axiallageringe fur die Antriebstechnik. – Antriebstechnik, 1966, 5, №11, S. 403-407, 382. См. также экспресс-информацию: Детали машин, 1967, №20.
5. Хадиев М.Б., Максимов В.А. Изготовление подпятников с плоскоклинной рабочей поверхностью. Информационный листок № 375-74, Казань, Татарский ЦНТИ, 4 с.
6. Левит Г.А. Гидродинамический расчет направляющих прямолинейного и кругового движения. Станки и инструмент, 1958, №9, с.5-27.
7. Хадиев М.Б. Исследование и расчет гидродинамических упорных подшипников с неподвижными подушками. // Украинский заочный политехнический институт, Харьков, 1979.-19 с.
8. Хадиев М.Б., Федотов Е.М. Численная реализация ма-

- тематической модели процессов течения жидкости в смазочном и пограничном слоях упорных подшипников // Сб.: Теория сеточных методов для нелинейных краевых задач. Материалы третьего Всероссийского семинара. Казань-2000.-изд-во Казанского мат. Общества.-2000.-с. 127-129.
9. Хадиев М.Б. Гидродинамические, тепловые и деформационные характеристики смазочных слоев упорных подшипников турбомашин: Монография. Казань: Казан. гос. технол. ун-т. 2001. 96 с.
10. Максимов В.А., Хадиев М.Б., Федотов Е.М. Определение гидродинамических и тепловых характеристик упорных подшипников математическим моделированием // Вестник машиностроения. 2004. №6. с. 39-45.
11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013615688. Sm2Px2T - Течение жидкости в зазорах и каналах между подушками упорного подшипника / Федотов Е.М., Хадиев М.Б., Соколов Н.В. - № 2013613582; заявл. 25.04.13; зарегистрировано 18.06.13.

© **М. Б. Хадиев** – д-р техн. наук, проф. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ, cmu@kstu.ru; **Н. В. Соколов** – асп. той же кафедры; **Е. М. Федотов** - д-р физ.-мат. наук, проф. каф. вычислительной математики К(П)ФУ, eugeny.fedotov@ksu.ru.