

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВИЖНОГО УЗЛА ПРИ КОСОСИММЕТРИЧНОМ ЕГО НАГРУЖЕНИИ

### Введение

Подвижные узлы являются весьма распространенным конструктивом соединяющим либо отдельные части, либо целые самолетные агрегаты между собой [1].

Такой вид соединений сосредотачивает в себе разнообразные усилия, напряжения и контактные давления, которые существенным образом сказываются на долговечности по износу и выносливости их основных деталей при кососимметричном ( $M$ ) нагружении.

В подавляющем большинстве предыдущих исследований рассматривались узлы с симметричным нагружением ( $P$ ), и поэтому проблему их долговечности удалось частично решить [1, 2, 3].

При моментном нагружении узла (рис. 1) исследований выполнено крайне мало [3], хотя кососимметричность по своей природе привносит во взаимодействие основных деталей существенную неравномерность, которую по данным работы [4] принято оценивать через коэффициенты избыточности погонных усилий в зонах трения.

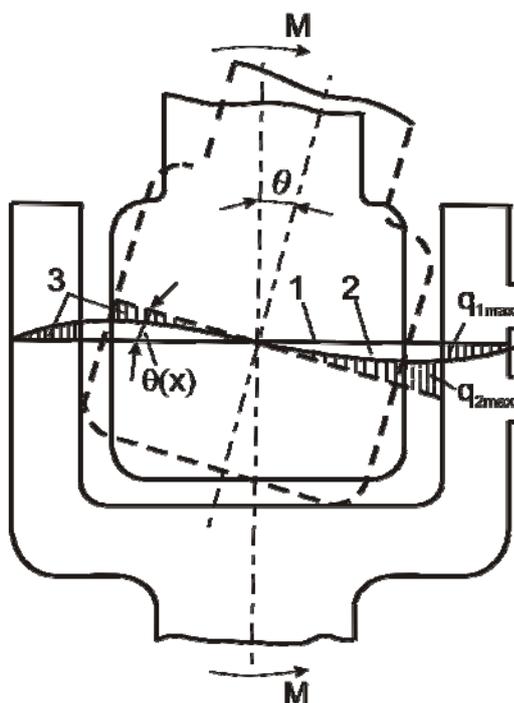


Рисунок 1 – Перемещения в шарнирном узле с кососимметричным нагружением ( $M$ ):  $\theta$  – угол перемещения между стыкуемыми деталями узла; 1, 2 – положение оси стыкующей детали до и после нагружения; 3 –  $q_{1max}$ ,  $q_{2max}$  – погонные нагрузки в стыкуемых деталях

В работе [4] оценку долговечности подвижного узла на трение и износ предложено вести на основе неравенства

$$\alpha_q^M(\Phi_y^M) \leq \alpha_q^M(N), \quad (1)$$

где  $\alpha_q^M(\Phi_y^M)$  – коэффициент избыточности погонных усилий в зоне трения обусловленный параметрами узла  $\Phi_y^M$ , а  $\alpha_q^M(N)$  – допустимая величина коэффициента избыточности погонных усилий в зоне трения, обусловленная заданной долговечностью подвижного узла на износ.

В указанной работе принято, что коэффициент избыточности является функцией не только неравномерности  $q_1$  и  $q_2$  (рис.1), но и уровня нагрузки действующей, на узел  $K^M$ :

$$\alpha_q = \frac{q_{i \max}}{q_{пр}}, \quad (2)$$

$$\alpha_q^M = \frac{\alpha_q}{K^M}; \quad (3)$$

где  $q_{пр}$  – предельно допустимая величина обмятия стыкуемых деталей узла;  $K^M = M/M_p$  – отношение величины действующего момента к его расчетной (разрушающей) величине.

Поскольку величины  $\alpha_q^M$  при кососимметричном нагружении превышают 1,0 [4], то при реализации неравенства (1) возникает необходимость установления взаимосвязей типа  $\alpha_q^M(\Phi_y^M)$  и  $\alpha_q^M(N)$ .

### Постановка задачи исследований

Основная задача данной статьи заключается в разработке модели взаимодействия стыкуемых и стыкующей деталей подвижного узла и оценке коэффициентов избыточности погонных усилий  $\alpha_q^M(\Phi_y^M)$  в контактом взаимодействии основных элементов узла с целью возможности использования полученных данных для реализации условия (1)

### Расчетная модель кососимметрично нагруженного шарнирного узла

На рис. 2 представлена расчетная модель шарнирного узла с кососимметричным нагружением ( $M$ ).

Учитывая приведенное конструктивное исполнение подвижного узла и воспринимаемый им вид нагрузки, полагаем, что нижний стыкуемый элемент остается неподвижным (обминаются лишь его поверхности  $\Gamma_1$ ), а верхний стыкуемый элемент поворачивается на угол  $\theta$  рис. 1.

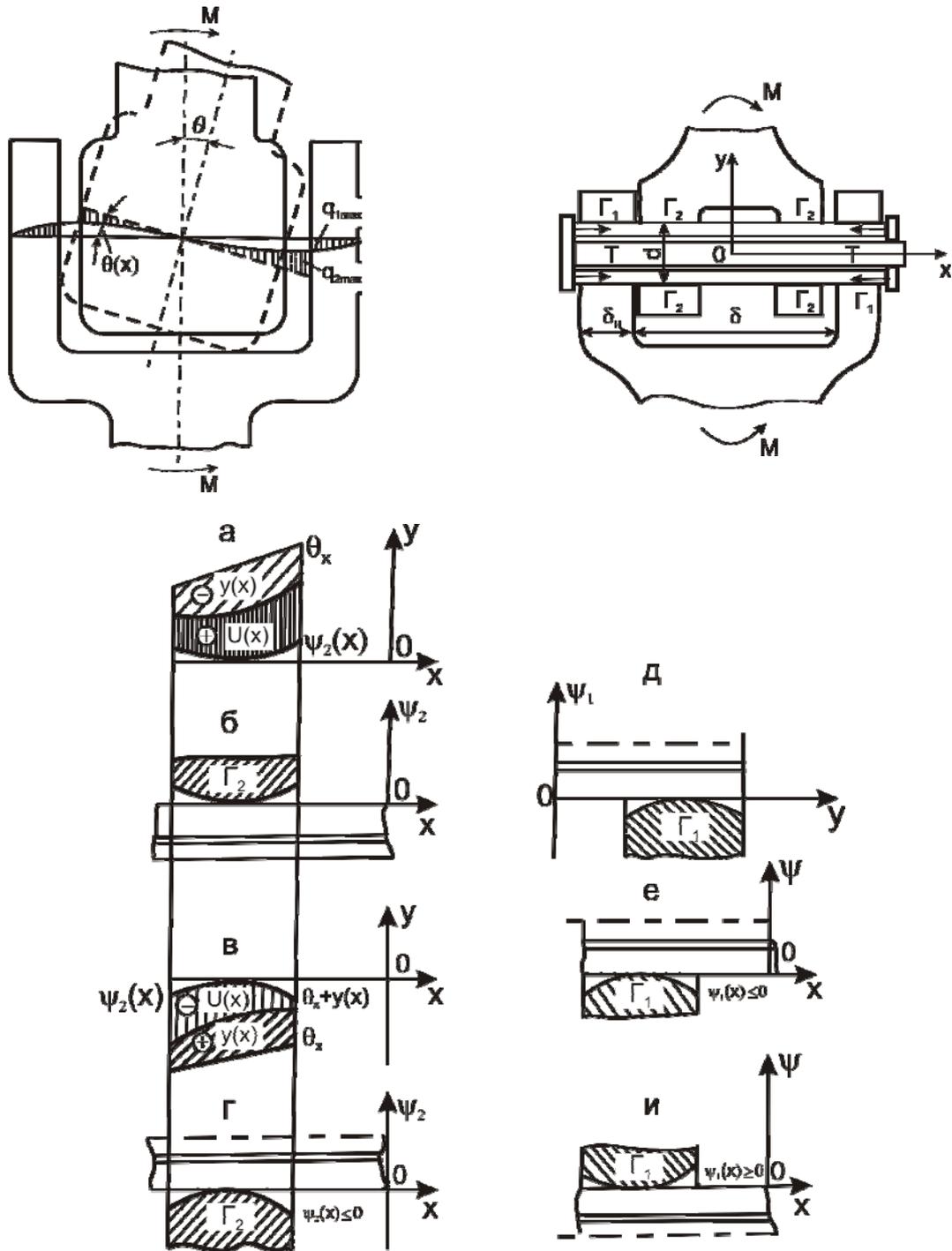


Рисунок 2 – Расчетная модель узла с кососимметричным нагружением ( $M$ )

Пусть функция  $\vartheta_i(x)$  ( $x \in \Gamma_i$ ) характеризует обмятия стыкуемых деталей узла. Полагаем, что

$$\vartheta_2(x) = \theta x + y(x) - \Psi_2(x), \quad (4)$$

где  $y(x)$  – неизвестная функция, характеризующая прогиб оси стыкующей подсорки [3];  $\theta$  – угол поворота верхнего стыкуемого элемента вокруг точки  $O$ ;  $\Psi_2(x)$  – функция, характеризующая неровности поверхности контакта между стыкуемыми элементами и стыкующей подсоркой.

Принято, что положительное перемещение направлено вдоль оси  $y$ , а положительное направление угла поворота – против часовой стрелки. В ситуации, изображенной на рис. 2, а, верхний стыкуемый элемент опускается и поворачивается по часовой стрелке:  $\theta < 0$ .

На рис. 2, б рассматривается правая часть верхнего стыкуемого элемента, а касание происходит на верхнем стыкуемом элементе.

На рис. 2, в, г представлена левая часть верхнего стыкуемого элемента, а касание происходит на нижней части детали.

В ситуации, изображенной на рис. 2, б, обминается верхняя часть верхней детали в направлении оси  $y$ , т.е.  $\vartheta(x) \geq 0, x \in \Gamma_2$  (здесь и далее под  $\Gamma_2$  мы понимаем ту часть поверхности верхней детали, на которой осуществляется контакт со стыкующей подсборкой в нагруженном состоянии).

В ситуации, показанной на рис. 2, в, г, обминается нижняя часть левого верхнего стыкуемого элемента в направлении, противоположном оси  $y$ , т.е.  $\vartheta(x) \leq 0, x \in \Gamma_2$ .

Теоретически может возникнуть ситуация, когда при кососимметричном нагружении угла конструктивного элемента одновременно будет осуществляться контакт левой части верхнего стыкуемого элемента со стыкующей подсборкой одновременно по ее верхней и нижней частям. В этом случае функция  $\Psi_2(x)$ , входящая в выражение (4), соответствует обеим поверхностям контакта  $\Gamma_2$ .

### Моделирование взаимодействий деталей узла

Обозначим через  $q_n(x)$  погонную нагрузку, действующую на верхний стыкуемый элемент (положительное направление вверх):

$$q_n(x) = G_p(x)\vartheta(x), \quad (5)$$

где  $G_p$  - модуль смятия материала стыкуемых элементов.

Для верхней стыкуемой детали выражение (2) примет вид

$$\int_{\Gamma_2} G_{p2}(x)\vartheta(x)xdx - M = 0. \quad (6)$$

Подставляя значения  $\vartheta(x)$  из выражения (1) в уравнение (3), получим

$$\theta \int_{\Gamma_2} G_{p2}(x)x^2dx + \int_{\Gamma_2} G_{p2}(x)y(x)xdx - \int_{\Gamma_2} G_{p2}(x)\Psi_2(x)dx - M = 0, \quad (7)$$

где  $y(x)$  – перемещения оси стыкующей детали [4] узла.

Введем обозначения

$$r = \int_{\Gamma_2} G_{p_2}(x) dx, \quad S = \int_{\Gamma_2} x G_{p_2}(x) dx, \quad t = \int_{\Gamma_2} x^2 G_{p_2}(x) dx, \quad (8)$$

$$R_2 = M + \int_{\Gamma_2} G_{p_2}(x) \Psi_2(x) x dx. \quad (9)$$

Используя соотношения (8), (9), запишем уравнение (7) в виде

$$t\theta = R_2 - \int_{\Gamma_2} G_{p_2} y(x) x dx,$$

откуда

$$\theta = \frac{R_2 - \int_{\Gamma_2} G_p(x) y(x) x dx}{t}. \quad (10)$$

Пусть  $q_2(x)$  – погонная нагрузка (рис. 3), действующая на стыкующую подборку. По второму закону Ньютона имеем

$$q_2(x) = -q_n(x) = -\tilde{G}_{p_2}(x)(\theta x + y(x) - \Psi_2(x)). \quad (11)$$

Используя полученные выражения для  $\theta$ , имеем

$$q_2(x) = \frac{\tilde{G}_{p_2}}{t} \left[ \begin{array}{l} - \left( R_2 - \int_{\Gamma_2} G_{p_2}(x) y(x) x dx \right) S + \\ + \left( R_2 - \int_{\Gamma_2} G_{p_2}(x) y(x) dx \right) rx - \end{array} \right] - \tilde{G}_{p_2}(x) y(x) + \tilde{G}_{p_2}(x) \Psi_2(x). \quad (12)$$

Воздействие нижней детали на стыкующую подборку характеризуется погонной нагрузкой

$$q_1(x) = -\tilde{G}_{p_1}(x)(y(x) - \Psi_1(x)). \quad (13)$$

Количественная оценка  $q_1(x)$  и  $q_2(x)$  показывает что погонные усилия по линии контактов стыкуемых ( $\Gamma_1, \Gamma_2$ ) и стыкующей деталей носит ярко выраженный кососимметричный характер (рис. 3).

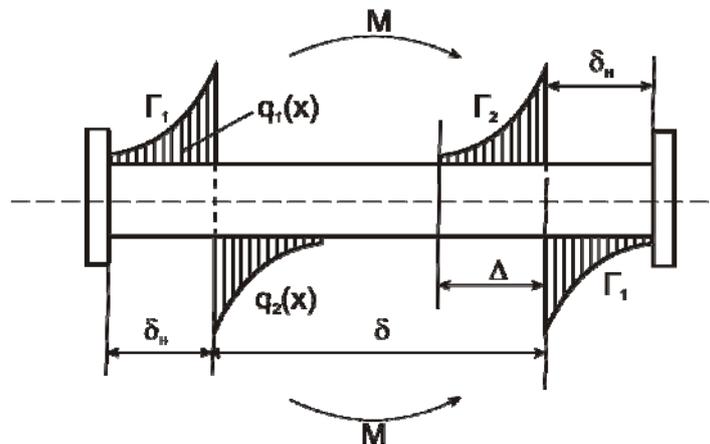


Рисунок 3 – Распределение погонных усилий по длине стыкующей подборки узла при его кососимметричном нагружении

Полученные выражения (12,13) в сочетании с (3) позволяют количественно оценить изменение коэффициентов избыточности погонных усилий в зонах трения подвижного узла (рис. 4).

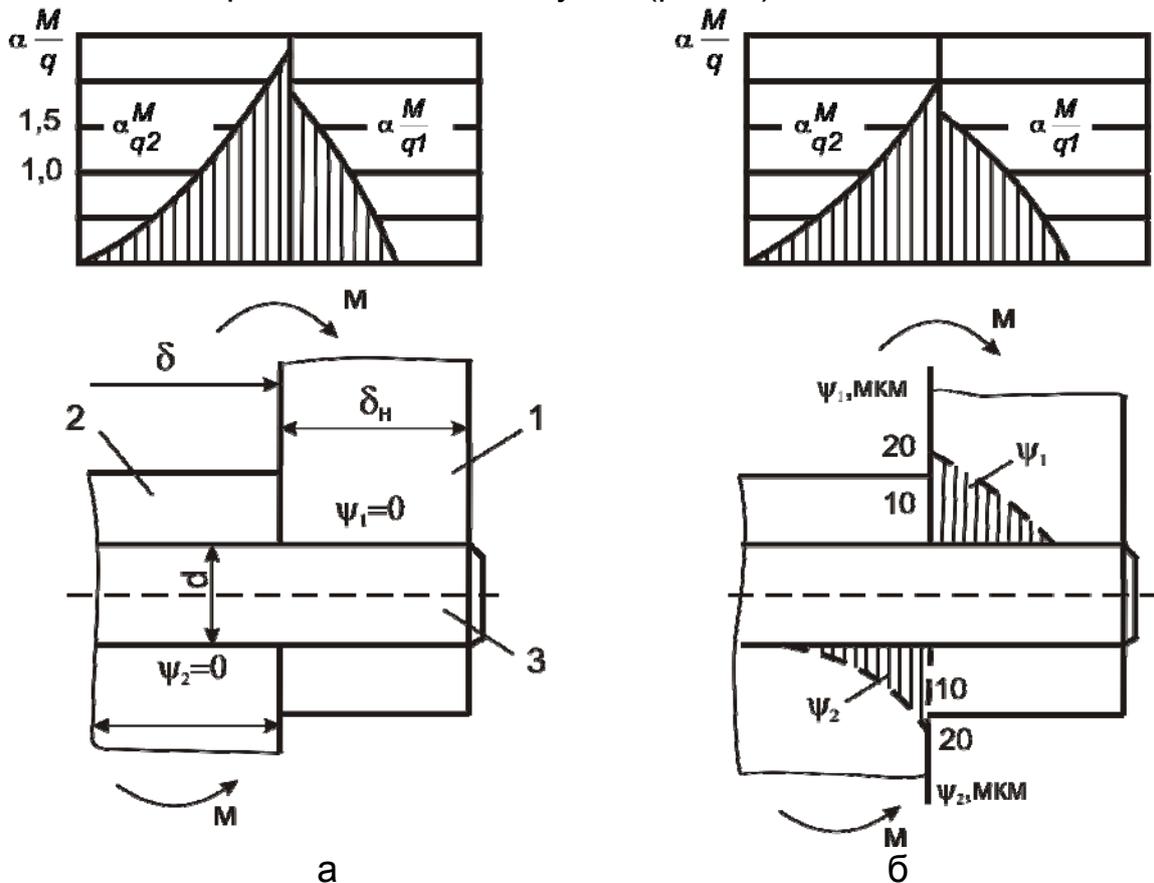


Рисунок 4 – Значения  $\alpha_q^M$  по линии контактов стыкуемых (1, 2) и стыкующей (3) деталей:  
а – при  $\psi_1 = \psi_2 = 0$ ; б – при  $\psi_1(x) > 0$  и  $\psi_2(x) > 0$

На этом рисунке показаны изменения  $\alpha_{q1}^M$  и  $\alpha_{q2}^M$  при нулевых отклонениях по линии контакта ( $\psi_1 = \psi_2 = 0$ ) – вариант «а» и при значениях  $\psi_1(x) > 0$  и  $\psi_2(x) > 0$  – вариант «б».

Как следует из приведенных данных значения  $\alpha_{q1}^M$  и  $\alpha_{q2}^M$  намного превышают 1, 0, что и является первопричиной усиленных и неконтролируемых износов в этих зонах трения.

Анализируя данные, приведенные на рис. 4, б, нетрудно заметить, что при наличии  $\psi_1(x) > 0$  и  $\psi_2(x) > 0$  вызванных износом узла в процессе эксплуатации, значения коэффициентов избыточности погонных усилий  $\alpha_q^M$  заметно снижаются, что можно объяснить увеличением площадей контактов в зонах трения по мере их износа.

## Экспериментальная оценка результатов взаимодействий в подвижном узле

Подтверждение адекватности распределения  $\alpha_q^M(x)$  и изношенности поверхности в подвижных узлах проведено на специальном стенде, обеспечившем испытание подвижных узлов в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным [5, 6].

Правильность расчетного метода определения коэффициентов  $\alpha_q^M$  проверялась на подвижных узлах из предположения, что форма изношенных втулок по длине после окончания периода приработки копирует упругую ось стыкующей под сборки. Для проведения экспериментов такого рода выбраны узлы с парой "бронза – хромированная сталь", поскольку в такой паре изнашивается только втулка.

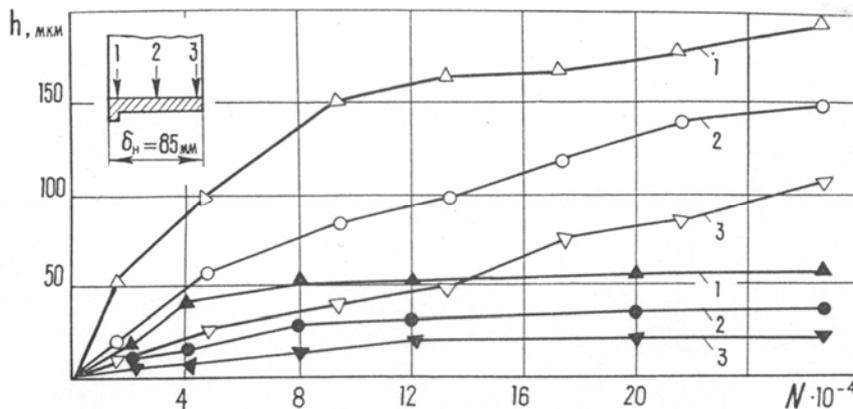


Рисунок 5 – Изменение выработки  $h$  в различных зонах контакта: 1, 2, 3 – сечения по длине втулки  $\delta_H$  при  $\delta/d = 0,35$  и  $\delta_H/d = 0,75$ ; ———— – линейный износ; • – при  $K^M = 0,2$ ;  $\nabla, \circ, \Delta$  – при  $K^M = 0,4$

Очевидно что, линейный износ полностью копирует изменение коэффициента  $\alpha_q^M$  по координате  $X$ , что позволяет говорить о достоверности определения расчетным путем.

Из данных приведенных на рис. 5, также следует, что форма изношенной поверхности ( $h_1 > h_2 > h_3$ ) предопределяет не только величины износов, но и угол поворота  $\theta$  между стыкуемыми деталями узла при его кососимметричном нагружении.

Расчетное значение этого угла определяется по выражению (8), а экспериментальные данные – из соотношения

$$\theta_{\partial} = \frac{h_1 - h_3}{\delta_H}. \quad (15)$$

Замеры  $h_1$  и  $h_3$  осуществлялись в узлах с  $d=28,40,60$  мм при различных соотношениях  $\delta_H/d$  в установившемся процессе их изнашивания ( $N>10^4$ ). Результаты определения  $\theta_3$  таким путем приведены на рис. 6.

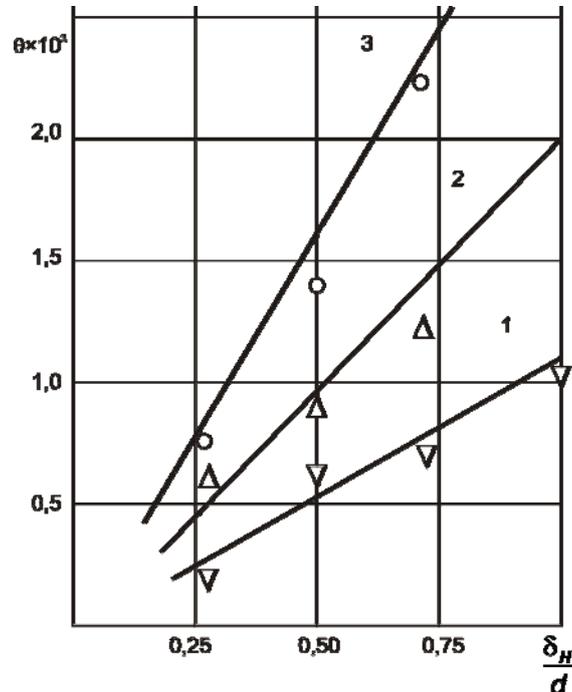


Рисунок 6 – Влияние относительной нагрузки  $K^M$  и геометрических параметров  $\delta_H/d$  на величину угла  $\theta$ . — — — расчетные значения;

$\nabla, \circ, \Delta$  – экспериментальные данные 1 –  $K^M=0,1$ ; 2 –  $K^M=0,2$ ; 3 –  $K^M=0,3$

Сравнительная оценка определения угла поворота стыкуемых деталей узла при кососимметричном его нагружении показывает, что расчетные значения достаточно близко согласуются с данными эксперимента. Это еще раз подтверждает достоверность приведенного в статье моделирования взаимодействий основных элементов кососимметрично нагруженного узла.

### Выводы

1. В статье разработаны физическая и математическая модели взаимодействий стыкуемых и стыкующей деталей узла при кососимметричном его нагружении.

2. С помощью таких моделей решена задача оценки обмятий в зонах трения узла в виде:

– коэффициентов избыточности погонных усилий в зонах контакта стыкуемых и стыкующей деталей;

– углового взаимного перемещения стыкуемых деталей, обусловленного кососимметричным нагружением узла.

3. Путем испытаний натуральных подвижных узлов на трение и износ экспериментально подтверждена достоверность расчетного определения обмятий в зонах трения и углового смещения стыкуемых деталей узла, обусловленного кососимметричностью его нагружения.

4. Полученные результаты являются необходимой частью построения ресурсных моделей подвижных узлов.

#### Список использованных источников

1. Селихов, А.Ф. Система классификации конструктивных нерегулярностей планера самолета [Текст] / А.Ф. Селихов, С.И. Галкин // Тр. ЦАГИ, 1976. – Вып. №1739. – С. 1–49.

2. Сухарев, И.П. Прочность шарнирных узлов машин [Текст] справ. пособие / И.П. Сухарев //– М. Машиностроение, 1987. – 168 с.

3. Рябков, В.И. Исследование влияния конструктивно-технологических особенностей соединений на напряженное состояние их элементов [Текст] / В.И. Рябков, С.Е. Шеметов // Вопросы проектирования самолетных конструкций. – Х., сб. науч. тр. – Вып. 2. ХАИ. – С. 52–58.

4. Бычков, С.А. Основные положения метода обеспечения долговечности подвижных самолетных узлов [Текст] /С. А. Бычков, А.В. Лось // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: – сб. науч. тр. – Нац. аэрокосм. ун-та „Харьк. авиац. ин-т”. – Вып. 62 – Х. – 2013. – С. 46–54.

5. Волох, И.Н. Разработка методики и средств стендовых испытаний шарнирных узлов [Текст] /И.Н. Волох // Вопросы оптимизации самолетных конструкций: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-т „Харьк. авиац. ин-та”. – Х., 1986. – Вып. 2. – С. 47–52.

6. Трофимов, В.А. Методы улучшения триботехнических характеристик подвижных узлов шасси, выполненных из титановых сплавов [Текст] /В.А. Трофимов //Авиационно-космическая техника и технология. – Х. – 2001. – Вып. 24. – С. 143–150.

*Поступила в редакцию 29.11.2013.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Бычков,  
ГП «Антонов», г. Киев.*