

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ИЗГИБА В ДВУХ- И ТРЕХРЯДНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ВНАХЛЕСТ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ

В самолетостроении широко используют заклепочные соединения листов внахлест для продольных стыков обшивки фюзеляжа. Наличие эксцентриситета передачи нагрузок приводит к возникновению напряжений от изгиба, которые оказывают существенное влияние на долговечность. Известно, что изменение шага заклепок в многорядных соединениях приводит к значительному изменению долговечности.

Методика расчета эквивалентных напряжений в двух- и трехрядных соединениях внахлест, предложенная

В.Н. Стебеновым. В работе [2] предложено учитывать влияние напряжений от изгиба на долговечность с помощью определения эквивалентных напряжений отнулевого цикла нагрузок для полосы с заполненным отверстием, приводящих к долговечности, равной долговечности ряда заклепок. При этом использовано допущение о том, что для соединений листов одинаковой толщины внахлест напряжения изгиба примерно равны номинальным напряжениям, действующим в листе.

Формула для определения эквивалентных напряжений [2] наиболее нагруженного крайнего ряда заклепок имеет следующий вид:

$$\sigma_0 = \left[k_{см} \cdot \frac{B}{d} \cdot n + (1 - n) + 0,5 \right] \cdot \sigma_c, \quad (1)$$

где $k_{см} = \frac{k_{см}^{эф}}{k_{л}^{эф}}$;

$k_{см}^{эф}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений однорядного соединения;

$k_{л}^{эф}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений соединения с ненагруженной на срез заклепкой;

n – доля от общей нагрузки, воспринимаемая рассматриваемым рядом заклепок, определенная с учетом податливости соединения;

B – ширина листа;

d – сумма диаметров отверстий в продольном сечении листа;

σ_c – номинальные напряжения в соединении:

$$\sigma_c = \frac{P_c}{F_{нетто}},$$

где P_c – усилие, прикладываемое к соединению;

$F_{\text{нетто}}$ – площадь сечения «нетто».

В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований двух- и трехрядных соединений листов из сплава 2024ST внахлест. Показано, что увеличение шага заклепок в трехрядном соединении в три раза приводит к изменению долговечности в 4,5 раза. В то же время величина эквивалентных напряжений, вычисленных по формуле (1), и, соответственно, долговечность не зависят от шага заклепок. Для оценки достоверности такого подхода к расчету долговечности стыков, нагруженных растяжением и изгибом, определены эквивалентные напряжения согласно (1) и полученная долговечность сопоставлена с результатами экспериментов, приведенных в [1].

Расчет долговечности проведен с использованием усталостных характеристик сплава Д16АТ, который является аналогом сплава 2024ST. Степенное уравнение кривой усталости отнулевого цикла имеет вид

$$\sigma_0^m \cdot N = C,$$

где N – количество циклов до разрушения;

C, m – параметры базовой кривой усталости.

Для стандартных образцов с заполненным отверстием $m = 3,95$,
 $C = 7,21 \cdot 10^{13}$.

Расчет долговечности стыков. Общий вид стыков показан на рис. 1.

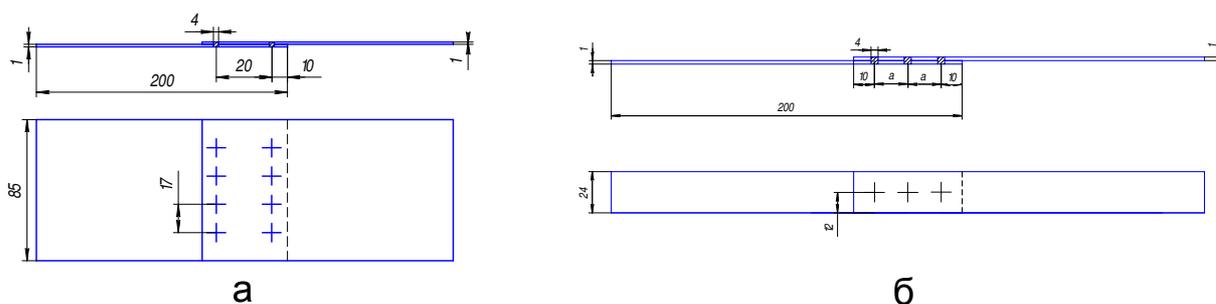


Рисунок 1 – Рассматриваемые варианты стыков

Коэффициенты, входящие в формулу (1), приняты согласно [1, 2]:

а) для двухрядного соединения (рис. 1,а) $k_{CM} = 0,4$, $n = 0,5$,
 $V/d = 5,3$;

б) для трехрядного соединения (рис. 1,б) $k_{CM} = 0,4$, $n = 0,35$, $V/d = 6$.

В работе [1] приведены результаты экспериментальных исследований для двухрядного соединения и трех вариантов шага заклепок в трехрядном соединении: 10, 15 и 25...40 мм (в дальнейших расчетах принято значение 30 мм). Величина долговечности для шага 15

и 30 мм соответствует срединной линии области разброса экспериментальных значений [1].

Расчетные и экспериментальные значения долговечности показаны на рис. 2. В качестве напряжений использованы максимальные напряжения в сечении «нетто».

Установлено, что расчет долговечности заклепочных соединений с применением формулы (1) приводит к удовлетворительному согласованию с экспериментальными данными для двухрядного соединения (рис. 2а). Вместе с тем наблюдается значительное отличие от экспериментальных данных для трехрядного соединения:

- шаг между рядами заклепок 10 мм (рис. 2,б) – в среднем 2,5 раза;
- шаг между рядами заклепок 15 мм (рис. 2,в) – в среднем 6,3 раза;
- шаг между рядами заклепок 30 мм (рис. 2,г) – до 10 раз.

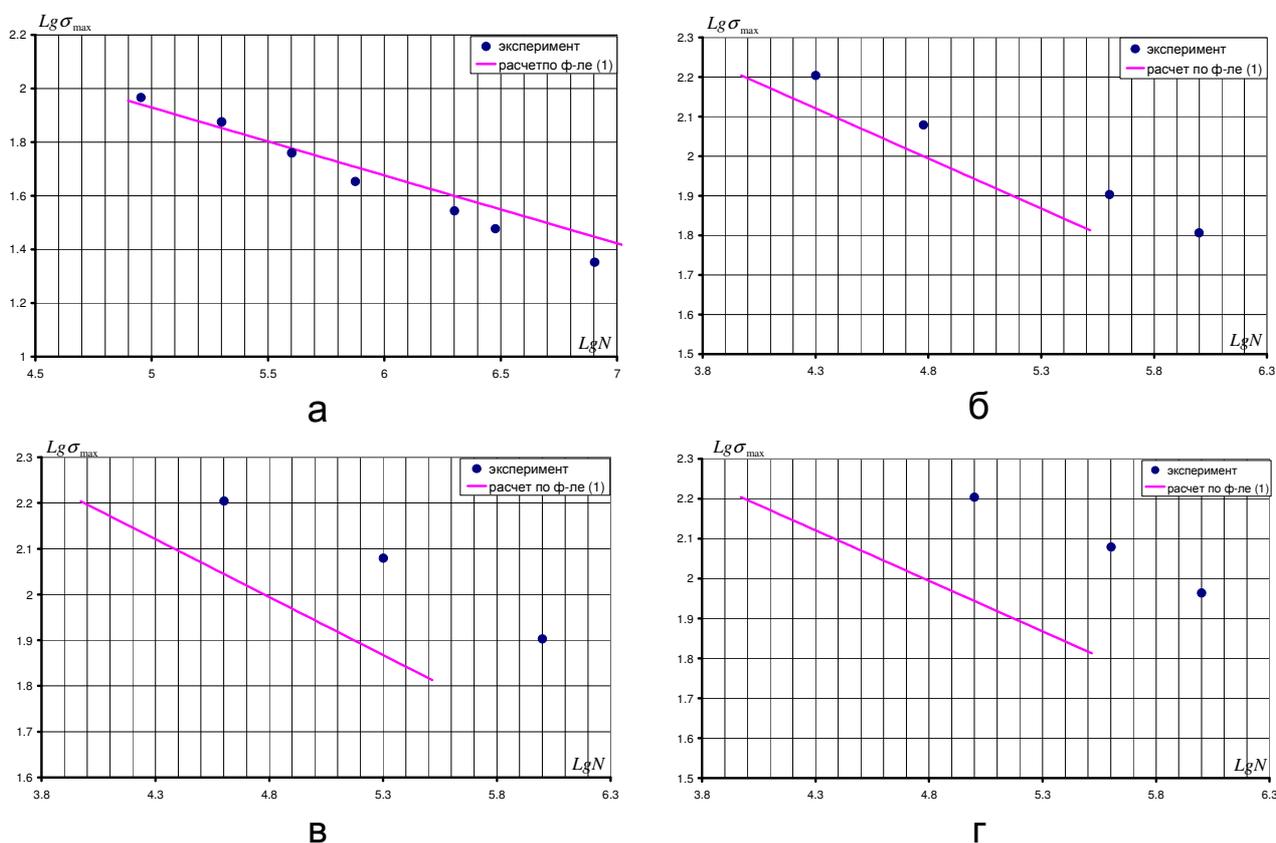


Рисунок 2 – Усталостные кривые заклепочных соединений

Отмечено систематическое смещение расчетных значений долговечности относительно экспериментальных по мере увеличения расстояния между рядами заклепок.

В качестве одной из причин отличия результатов может быть объяснено тем, что в рассмотренной методике [2] напряжения от изгиба принимают равными номинальным напряжениям в соединении. Для определения величины напряжений от изгиба в рассматриваемых

соединениях выполнено исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) двух- и трехрядных стыков с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Определение величины напряжений от изгиба в заклепочных соединениях. Выполнен расчет общего НДС рассматриваемых образцов стыков. Использована упрощенная модель заклепочного соединения. Заклепки имитированы абсолютно жесткими связями соединяемых листов на соответствующих участках.

Модель соединения закреплена следующим образом: на пластины с двух сторон на протяжении 30 мм наложен запрет на перемещения в вертикальной плоскости (имитация ограничений, накладываемых захватами испытательной машины). К свободному концу одной пластины приложена жесткая заделка, а к концу другой пластины – нагрузка в виде номинальных напряжений [1], как показано на рис. 3.

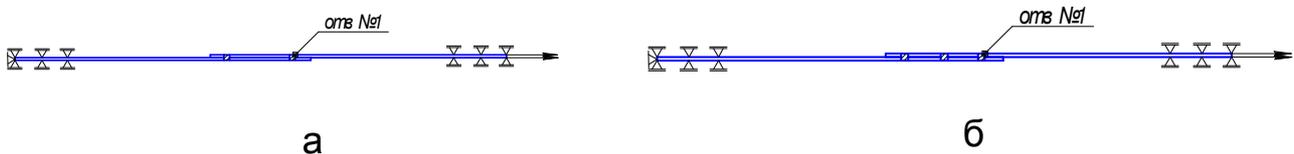


Рисунок 3 – Схема приложения нагрузок и закрепления моделей заклепочных соединений

В связи с тем что в работе [1] не приведены длины образцов соединений, расчет НДС выполнен для различной длины соединяемых листов (100, 200, 300, 400 мм).

Расчеты выполнены в геометрически нелинейной плоской постановке. Приняты следующие размеры конечного элемента: длина – 0,4 мм, высота (по толщине листа) – 0,2 мм.

Значения напряжений от изгиба в соединении вычислены по формуле

$$\sigma_u = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ – максимальные и минимальные напряжения на поверхности пластины в текущем поперечном сечении.

Расчеты проведены для ряда номинальных напряжений в сечении «нетто»: 20...90 МПа – для двухрядного соединения и 45...160 МПа – для трехрядного. В каждом случае нагружения выполнен расчет НДС для различной длины образцов: 80, 100, 200, 300, 400 мм. В результате установлено, что, начиная с длины образца, равной 200 мм и более, отношение напряжений от изгиба к номинальным напряжениям в стыке перед первым рядом заклепок постоянно. Поэтому длину соединяемых листов примем равной 200 мм.

По формуле (2) получены распределения напряжений от изгиба по длине листа до первого крепежного элемента. Распределение напряжений от заделки до первого крепежного элемента для обоих листов совпадает. Примеры распределения напряжений показаны на рис. 4:

а) двухрядное соединение при $\sigma_c = 90$ МПа (рис. 4,а);

б) трехрядное соединение при $\sigma_c = 160$ МПа, $a = 30$ мм (рис. 4,б).

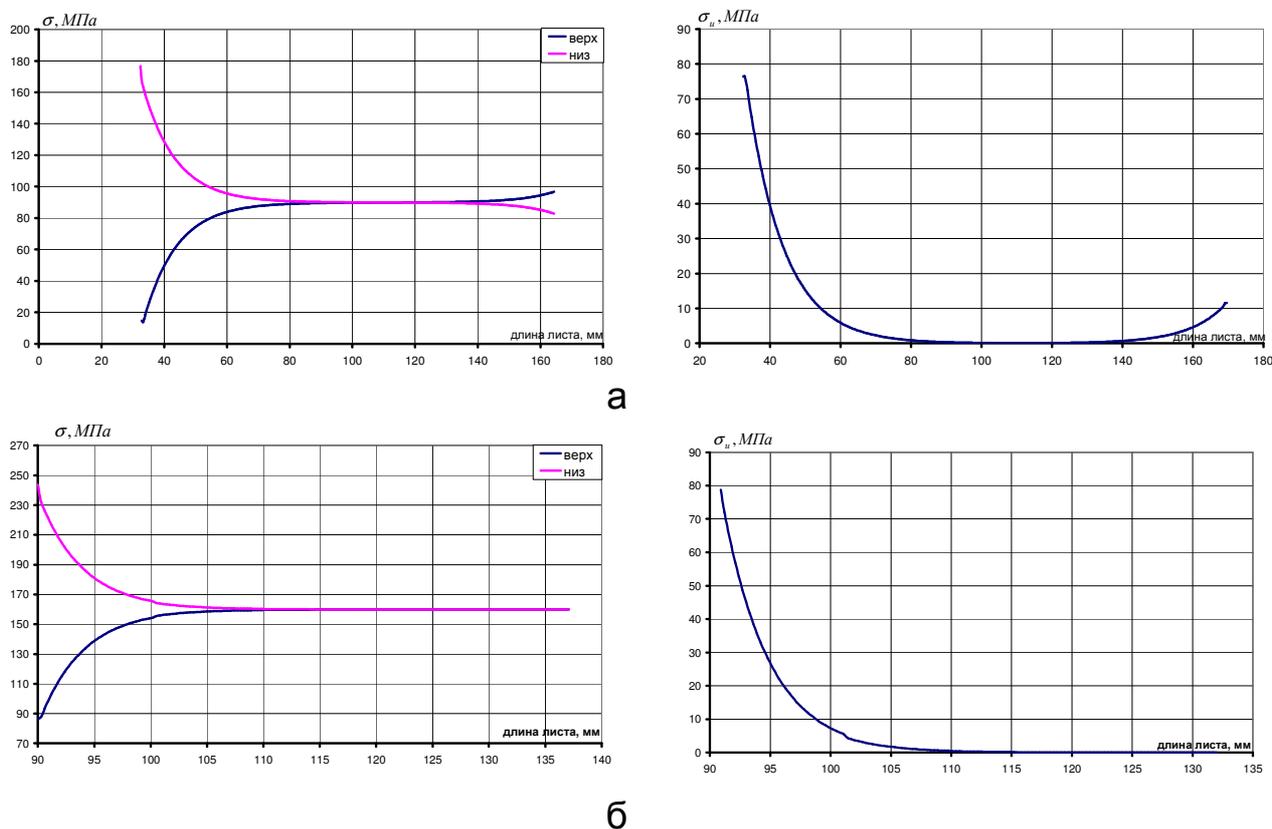


Рисунок 4 – Распределение напряжений по длине листа

Установлено, что напряжения от изгиба изменяются по длине листа и достигают максимальных значений перед первым крепежным элементом. Для учета изменения напряжений от изгиба в зависимости от нагрузок и геометрии введем коэффициент изгиба k_U :

$$k_U = \frac{\sigma_{u \max}}{\sigma_c},$$

где $\sigma_{u \max}$ – максимальные напряжения от изгиба в зоне перед заклепочным соединением.

В результате расчетов установлено, что отношение изгибных напряжений к номинальным изменяется в широком диапазоне как в зависимости от положения по длине, так и от прикладываемой нагрузки, что не позволяет в общем случае установить напряжения изгиба равными напряжениям в листе, как это принято в работе [2].

Зависимость коэффициента изгиба от номинальных напряжений в соединении показана на рис. 5:

а) в двухрядном соединении для номинальных напряжений в сечении «нетто» 20...90 МПа $k_U = 0,85...1,22$ (рис. 5,а);

б) в трехрядном соединении для номинальных напряжений в сечении «нетто» 45...160 МПа:

- шаг между рядами заклепок 10 мм (рис. 5,б, кривая 1) – $k_U = 0,79..1$;
- шаг между рядами заклепок 15 мм (рис. 5,б, кривая 2) – $k_U = 0,58..0,79$;
- шаг между рядами заклепок 30 мм (рис. 5,б, кривая 3) – $k_U = 0,46..0,61$.

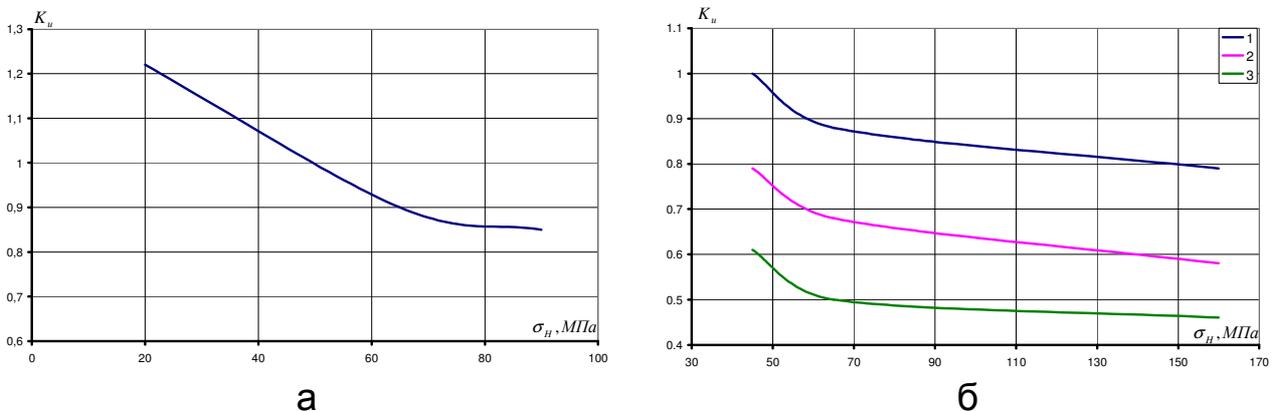


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента изгиба от номинальных напряжений

Расчет долговечности с учетом нелинейной зависимости изгибающих напряжений от прикладываемой нагрузки. Учитывая коэффициент изгиба, выражение (1) принимает вид

$$\sigma_0 = \sigma_c \left(k_{cm} \cdot \frac{B}{d} \cdot n + (1 - n) + 0.5 \cdot k_U \right). \quad (3)$$

Используя значения эквивалентных напряжений, вычисленные по формуле (3), определена долговечность заклепочных соединений. Расчетные и экспериментальные значения долговечности показаны на рис. 6. В качестве напряжений использованы максимальные напряжения в сечении «нетто».

Установлено, что расчет долговечности заклепочных соединений с применением формулы (3) приводит к отличию от экспериментальных значений:

- а) для двухрядного соединения (рис. 6,а) – до 2 раз;
- б) для трехрядного соединения:
- шаг между рядами заклепок 10 мм (рис. 6,б) – 2,5 раза;
 - шаг между рядами заклепок 15 мм (рис. 6,в) – 5 раз;
 - шаг между рядами заклепок 30 мм (рис. 6,г) – 6,3 раза.

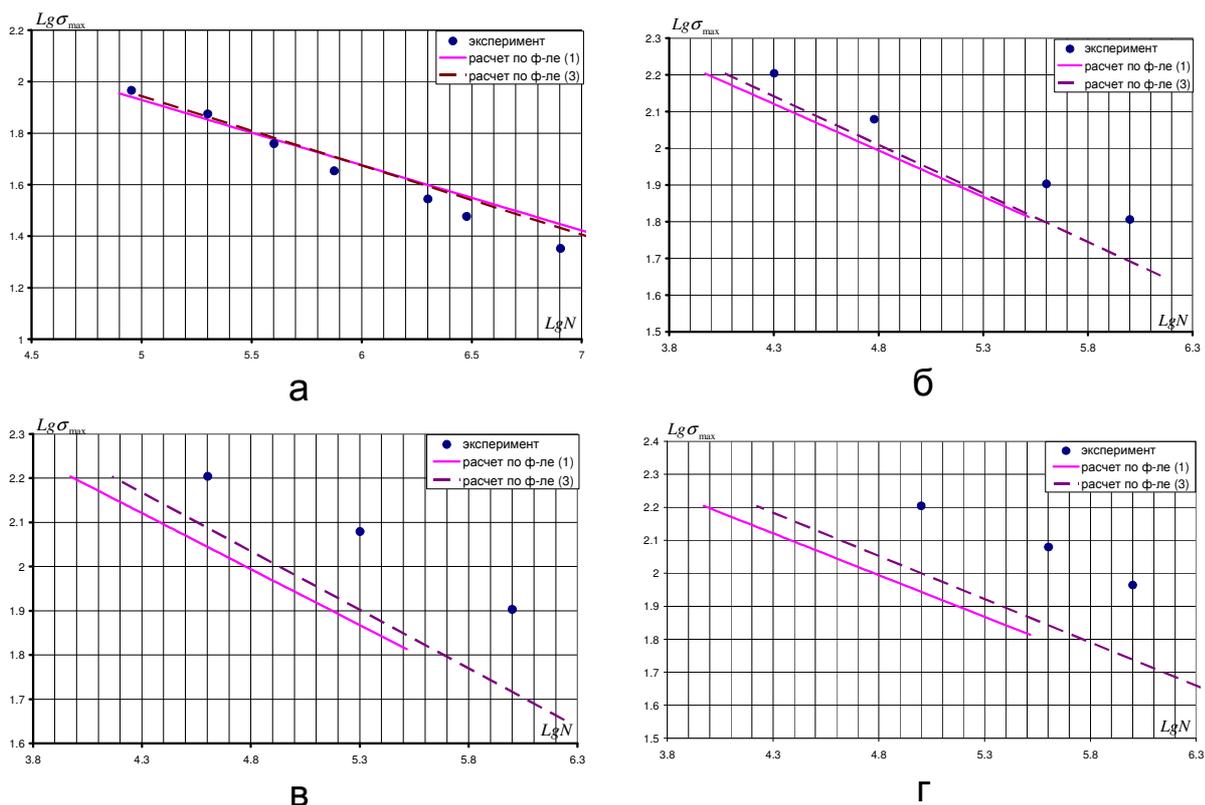


Рисунок 6 – Усталостные кривые заклепочных соединений

Выводы

1. Метод расчета долговечности, рекомендованный ЦАГИ, хорошо согласуется с результатами испытаний двухрядных соединений.

2. Результаты расчета долговечности по методу ЦАГИ не зависят от расстояния между крепежными элементами в трехрядном соединении. Это противоречит данным экспериментальных исследований, поскольку с увеличением шага между заклепками долговечность стыков при испытании возрастает.

3. Расчет НДС трехрядного стыка в геометрически нелинейной постановке приводит к уменьшению величины напряжений от изгиба.

4. Учет зависимости изгибных напряжений по предлагаемой методике от шага заклепок в рамках метода расчета долговечности ЦАГИ, качественно согласуется с данными эксперимента, однако не позволяет объяснить значительное отличие расчетной и экспериментальной долговечности трехрядных заклепочных соединений.

Список использованных источников

1. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев, Т.С. Родченко. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Стебнев В.Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений / В.Н. Стебнев // Труды ЦАГИ. - 1981.- Вып. 2117. - С. 42-54.

*Поступила в редакцию 19.05.2009 г.
Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*