

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Н.Е. ЖУКОВСКОГО  
"ХАРЬКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ"**

**ОТКРЫТЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ**

**Сборник научных трудов**

**Выпуск 37**

**Харьков  
«ХАИ»  
2007**

ББК 32.973.3

О 83

*Утверждено к печати ученым советом Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», протокол № 7 от 19.12.2007 г.*

**Редакционная коллегия: А. И. Бабушкин, П. В. Балабуев, В. К. Борисевич, В. Е. Гайдачук, А. Г. Гребеников, Н. В. Ефремова, В. В. Кириченко, Б. М. Конорев, В. С. Кривцов, А. К. Мялица, В. И. Рябков, И. Б. Сироджа, В. Г. Сухоребрий, О. Е. Федорович, В. Н. Фурашев**

**Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. трудов. Вып. 37. - Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2007. – 228 с.**

Освещены вопросы аэродинамики, прочности, конструкции и технологии производства авиационной техники, методы интегрированного проектирования, подготовки производства, инженерного анализа с помощью систем CAD/CAM/CAE. Представлены методы обеспечения безопасности конструкций при длительной эксплуатации, системы информационного обеспечения жизненного цикла самолетов, системы обеспечения безопасности жизнедеятельности для летательных аппаратов, вопросы экономического анализа рисков, методы поддержки, принятия управленческих решений.

Для специалистов промышленных и научных организаций, преподавателей и студентов.

**Адрес редакционной коллегии: 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17,**

**Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»,**

**тел. (057) 707-43-63**

**Свидетельство о государственной регистрации КВ №7975 от 09.10.2003 г.**

**В сборнике публикуются статьи на украинском и русском языках.**

**© Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2007**

## Содержание

А.Г. Гребеников, С.П. Светличный, В.А. Матвиенко, А.М. Гуменный. Метод анализа влияния последовательного применения дорнирования и барьерного обжата пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении	5
А.И. Полетучий. Волновая сдвоенная зубчатая передача для главного редуктора вертолета	18
А.А. Бабушкин. Методологические основания разработки системы автоматизированного проектирования приспособлений для сборки летательных аппаратов	25
Е.Т. Василевский, Н.В. Паршутто, А.В. Кальян, Д.М. Устюгов Метод исследования характеристик контактного взаимодействия твердотельных элементов конструкций с помощью системы MSC.NASTRAN	35
А.Г. Гребеников, В.А. Матвиенко, А.М. Гуменный, А.С. Третьяков. Экспериментальное исследование влияния последовательного упрочнения пластин в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на их усталостную долговечность	44
В.Ф. Деменко, В.Ф. Несвит, А.Ю. Воробьев, И.В. Линецкий, З.Р. Ранджи. Изучение биомеханического взаимодействия имплантатов и опорных тканей челюсти с применением метода конечных элементов	53
А.И. Полетучий, Я.А. Стеценко. Оптимизация параметров волновой зубчатой передачи по предельному вращающему моменту	73
Г.О. Приймаков. Зносостійкість розмірного ланцюга “вал генератора – гнучке колесо” силових хвильових зубчастих передач	80
В.Г. Сухоробрый, М.И. Никифорова. Оценка вероятности потери технической устойчивости ракеты-носителя методом ускоренного статистического моделирования	83
А.П. Собчак, П.Е. Ефременко. Синтез алгоритма функционирования привода регулятора давления в программно-аппаратной модели контроля системы автоматизированного управления газораспределительной станцией	93
П.Ф. Поляков, В.А. Хорунжий, В.П. Поляков, В.А. Антонова. Элементы и устройства функциональной микроэлектроники. ПАВ-датчики: силочувствительные элементы	101
А.О. Красноруцкий, О.Р. Кретів, Б.В. Остроумов. Метод кодирования изображений в системах видео наблюдения авиационной бригады	108
В.Г. Сухоробрый, А.С. Гристан, Д.В. Джулгаков. СИНТАР-3 и СИНТАР 2007: сравнительный анализ систем разработки контроллерного ПО	113
О.Г. Приймаков, Ю.О. Градиський, В.М. Стадніченко. Дослідження трибосполучень за допомогою сигналів електронно-акустичної емісії	119
А.С. Денисенко. Применимость XML в системах CMS	130

И.В. Шевченко, Е.П. Киричук. Синтез и минимизация базы вероятных квантов знаний в курсе «Основы систем искусственного интеллекта»	133
В.М. Вартамян, Р.А. Сухобрус. Прогнозная модель экспоненциального сглаживания с учетом неопределенности исходных данных	140
Е. Н. Бут, И. В. Бычков. Компьютерное моделирование чувствительности измеряемых параметров к изменению формы	145
В.Л. Клеєвська. Інформаційні технології з прогнозування екологічних і соціально-економічних наслідків ймовірних пожеж і потреби в силах, засобах і ресурсах для їх ефективної ліквідації або запобігання. Сучасний стан проблеми	150
Л.С. Рева, Ф.М. Трубчанинов. Экономические и потенциальные возможности энергосбережения в Украине	159
Б.Б. Стелюк, И.В. Дронова, Аль Дахери Али Мухаммед. Анализ управленческой деятельности организации	164
А.В. Фурашев. Этапы эволюции массивов информации	169
А.Є. Мельник. Стан лісових ресурсів України	179
Д.С. Кива, С.А. Бычков А.Г. Гребеников, Е.Т. Василевский, Д.Ю. Дмитренко. Разработка прогрессивной потайной заклепки с коническим компенсатором для выполнения соединений силовых элементов крыла	183
А.А. Жильцов, В.Н. Желдоченко. Исследование влияния конструктивных параметров на характеристики локального НДС при растяжении пластины с функциональным отверстием	202
Рефераты	217
Требования к оформлению статей в тематический сборник научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии»	227

**За достоверность информации несет ответственность автор.  
При перепечатывании материалов сборника ссылка на «Открытые  
информационные и компьютерные интегрированные технологии»  
обязательна**

**Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики их локального НДС при растяжении**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
ОАО УкрНИИТ*

Эффективным технологическим методом повышения ресурса деталей и агрегатов, работающих в условиях циклических нагрузок, является обработка деталей методами поверхностного пластического деформирования (ППД) [1–5].

При использовании этих методов в результате давления инструмента на металл микронеровности и волнистость исходной поверхности сглаживаются, улучшается чистота и увеличивается точность обработки. Кроме того, при деформировании стенок отверстий в зоне вблизи отверстия возникают остаточные напряжения, изменяющие амплитуду локальных напряжений и деформаций при циклическом нагружении детали, что обеспечивает изменение долговечности упрочненной детали. В настоящее время широко применяют методы ППД для обработки отверстий статическим способом. В зависимости от формы, размеров, материала детали, предъявляемых требований к геометрическим параметрам и качеству поверхности используют различные способы упрочняющей обработки ППД.

Многие авторы, работающие в данной области, исследовали влияние технологии упрочнения, проводя экспериментальные исследования влияния различных методов упрочнения деталей возле отверстий на усталостную долговечность образцов. Экспериментальные исследования выполняли для оптимизации геометрии деформирующего инструмента и режимов процессов упрочнения. При этом вопросу определения локального НДС в зоне отверстий уделялось мало внимание. Не проводились работы, в которых изучалось бы влияние последовательного применения нескольких методов упрочнения на характеристики локального НДС с учетом истории нагружения.

Целью данной работы является анализ характеристик локального НДС пластины с тремя отверстиями с фаской  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочненной методом последовательного применения дорнования и барьерного обжатия, для прогнозирования влияния данного метода упрочнения на усталостную долговечность образца пластины. При анализе характеристик локального НДС вблизи концентратора не учитывают шероховатость обрабатываемой поверхности и дефекты, возникающие в процессе выполнения отверстий.

В качестве образца пластины с тремя отверстиями рассмотрен стандартный образец ( $B/d=6$ ), применяемый при проведении усталостных испытаний.

Геометрия образца и технологического инструмента, используемого для упрочнения, а также основные размеры показаны на рис. 1 – 3. Образец изготовлен из алюминиевого сплава Д16Т [6].

Для анализа характеристик локального НДС и оценки эффективности предложенного последовательного упрочнения применен метод конечных элементов, реализованный в системе ANSYS.

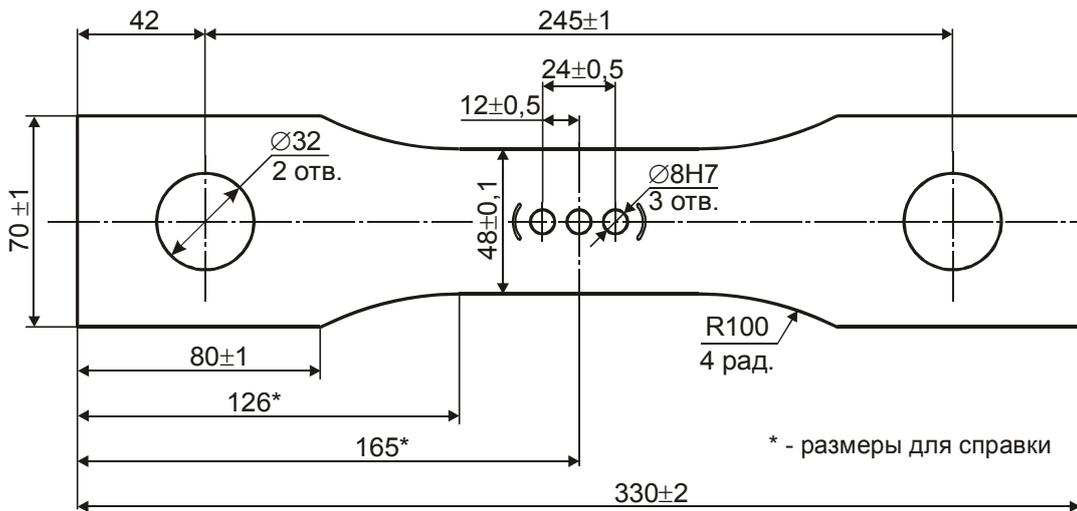


Рис. 1. Образец пластины с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм

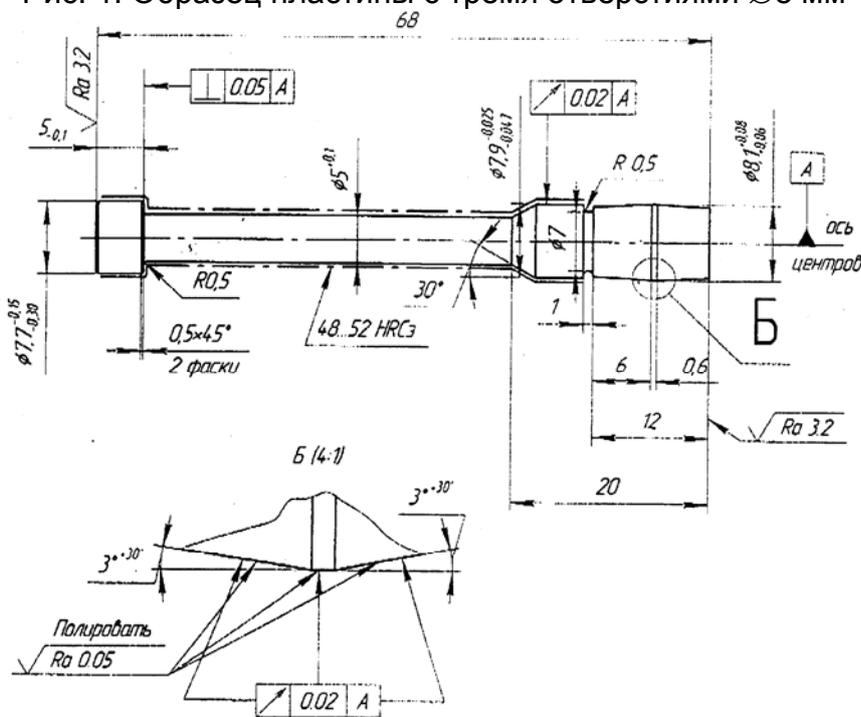


Рис. 2. Чертеж дорна

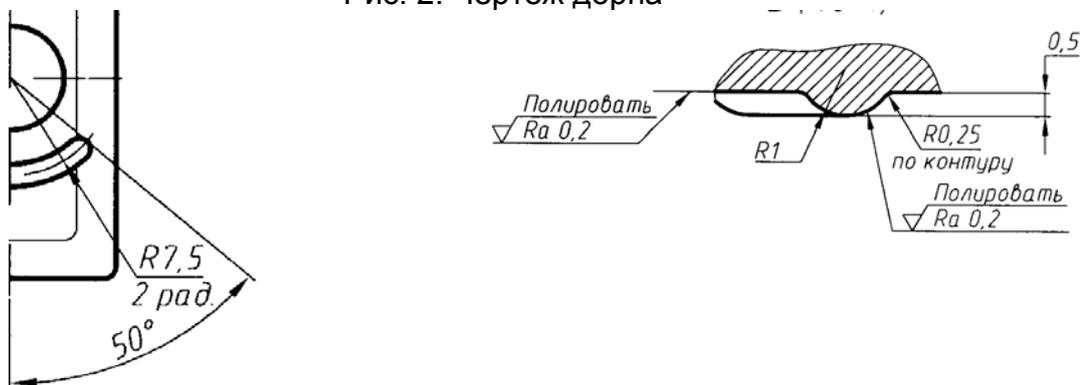


Рис. 3. Фрагмент чертежа обжимки для выштамповки сегментных лунок

Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС включает в себя:

1. Создание геометрических моделей пластины с тремя отверстиями и технологического инструмента, используемого для упрочнения пластины.

2. Разработку расчетных схем.

3. Задание физико-механических свойств материала и кривой деформирования.

4. Создание конечно-элементной модели пластин с тремя отверстиями, а также учет контактного взаимодействия технологического инструмента с упрочняемыми участками поверхности пластины.

5. Задание граничных условий.

6. Моделирование процесса дорнования, включающего в себя внедрение дорнов в стенки отверстий, путем перемещения дорна в осевом направлении на величину 0,6 мм. Определение напряжений и деформаций после внедрения дорна.

7. Моделирование процесса дорнования путем перемещения дорна в осевом направлении на величину 8 мм. Определение напряжений и деформаций после дорнования. Анализ геометрии отверстия после дорнования.

8. Моделирование процесса барьерного обжатия поверхности пластины вблизи отверстий на глубину 0,3 мм. Определение напряжений и деформаций после обжатия.

9. Моделирование процесса отведения обжимок в исходное положение. Определение остаточных напряжений и деформаций в пластине после отведения обжимок.

10. Приложение растягивающих напряжений  $\sigma_{бр}^0$  в торцевом сечении пластины. Определение напряжений и деформаций в пластине в нагруженном состоянии.

11. Моделирование процесса разгрузки пластины. Определение напряжений и деформаций после разгрузки.

12. Расчет характеристик локального НДС пластины с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом и последующего барьерного обжатия на заданную глубину при разных уровнях нагружения  $\sigma_{бр}^0$ .

13. Качественный и количественный анализ распределения эквивалентных и главных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования в пластине в зонах крайнего отверстия и обжатия.

14. Определение максимальных растягивающих напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в зонах вероятного усталостного разрушения.

15. Сравнение полученных характеристик локального НДС с характеристиками для базовых образцов пластины с одним отверстием и тремя отверстиями без их упрочнения.

В качестве метода упрочнения рассмотрено совместное последовательное применение метода дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм.

Величина эксплуатационных напряжений при численных исследованиях составляет  $\sigma_{бр}^0 = 0; 100; 130; 150$  МПа.

Созданные геометрические модели пластины и технологического инструмента (см. рис. 4) переданы в систему инженерного анализа ANSYS с использованием формата импорта CATIA v5 и послужили основой для построения конечно-элементных моделей.

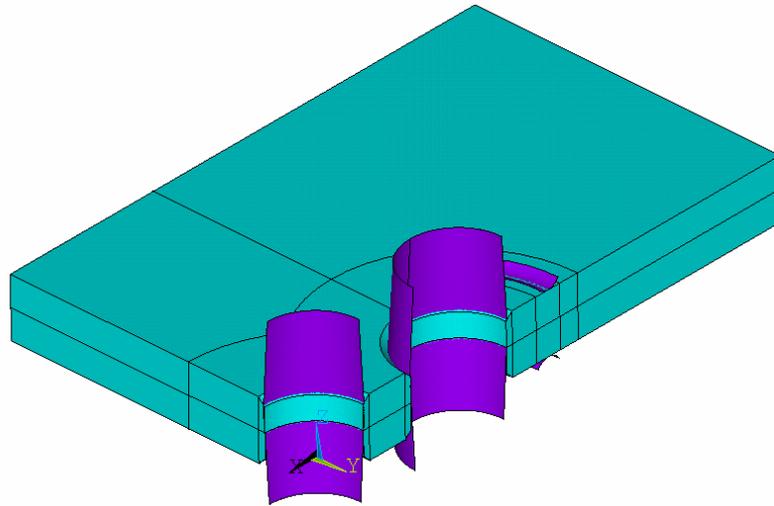


Рис. 4. Геометрические модели пластины, дорнов и обжимок

Расчетная схема пластины с тремя отверстиями, упрочненной методом последовательного применения дорнования и барьерного обжатия показана на рис. 5.

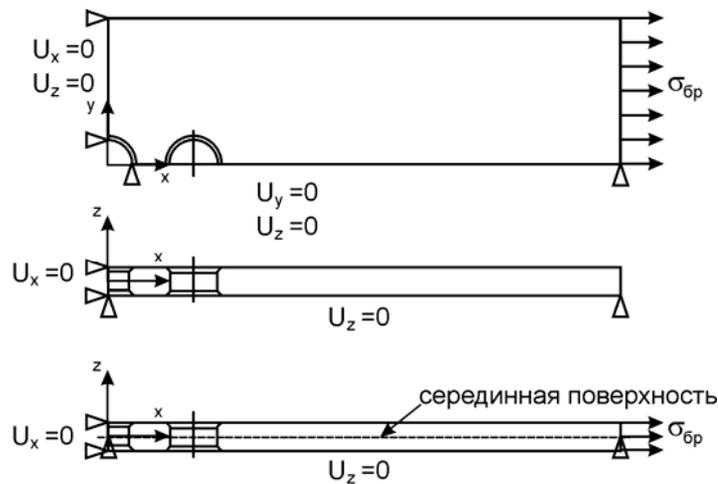


Рис. 5. Расчетная схема пластины с тремя отверстиями упрочняемой методом дорнования и выштамповки сегментных лунок: а – этап дорнования и извлечения дорнов; б – этап приложения растягивающих напряжений

При выполнении расчетов принято допущение: технологический инструмент, используемый для упрочнения пластины в зоне отверстий, считается абсолютно жестким. Данное допущение правомерно, поскольку жесткость технологического инструмента в три раза выше жесткости пластины и в ходе выполнения расчетов не исследуют НДС в технологическом инструменте. В расчетной схеме не учитывают степень шероховатости поверхности стенок отверстий.

Построены конечно-элементные модели пластины и соответствующего технологического инструмента (см. рис. 6 – 9). Основой для построения конечно-элементных моделей явились трехмерные модели пластины с тремя отверстиями и модели деформирующих элементов, созданные с помощью системы CATIA и переданные в препроцессор системы ANSYS.

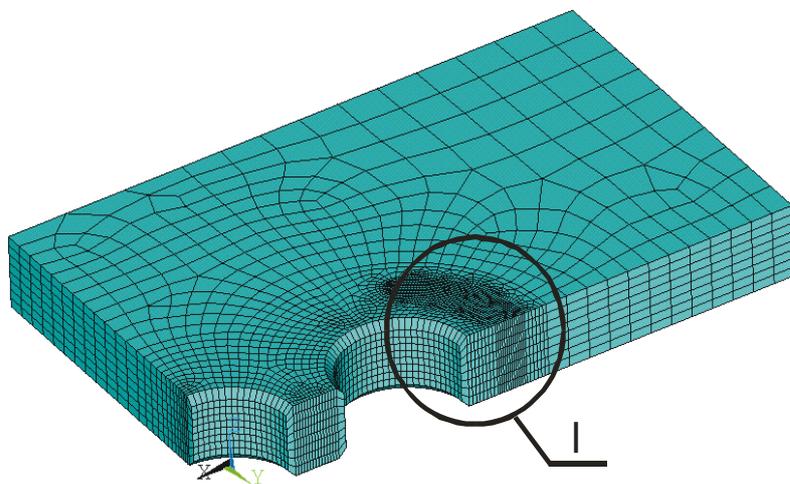


Рис. 6. Конечно-элементная модель пластины с тремя отверстиями, упрочняемой методом дорнования и выштамповки сегментных лунок

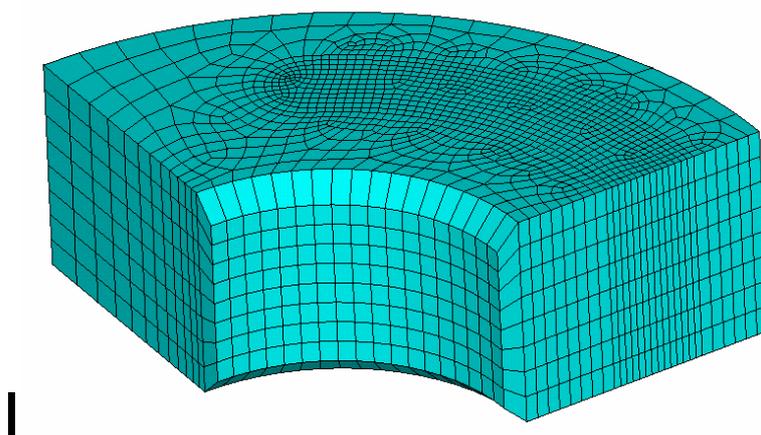


Рис. 7. Фрагмент конечно-элементной модели пластины с тремя отверстиями в зоне выштамповки сегментных лунок

В результате решения задач были получены численные значения параметров, характеризующих НДС пластины в зоне отверстий.

В качестве параметров, характеризующих НДС, рассмотрены: главные растягивающие напряжения  $\sigma_1$  и деформации  $\varepsilon_1$ , а также их произведение  $\sigma_1^* \varepsilon_1$ . Определен характер распределения напряжений и деформаций в пластине в зоне отверстий для всего диапазона прикладываемых напряжений ( $\sigma_{br}^0 = 0, 100, 130$  и  $150$  МПа), используемый для качественной предварительной оценки результата (см. рис. 10 – 14).

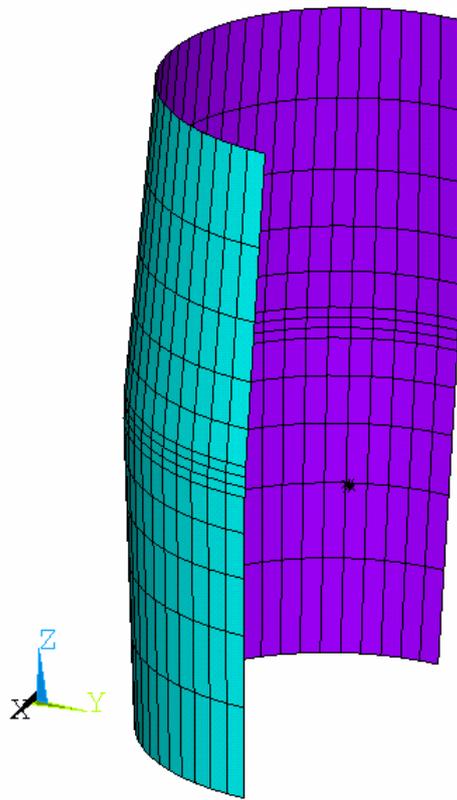


Рис. 8. Конечно-элементная модель дорна (на рисунке изображен дорн, вставляемый в крайнее отверстие)

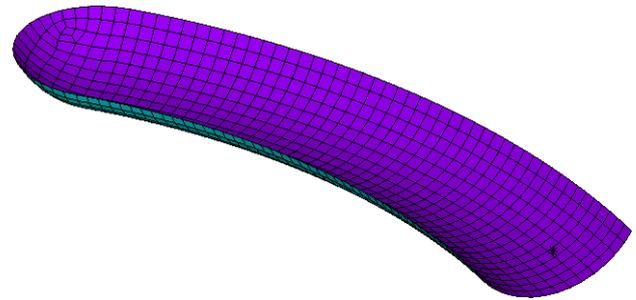
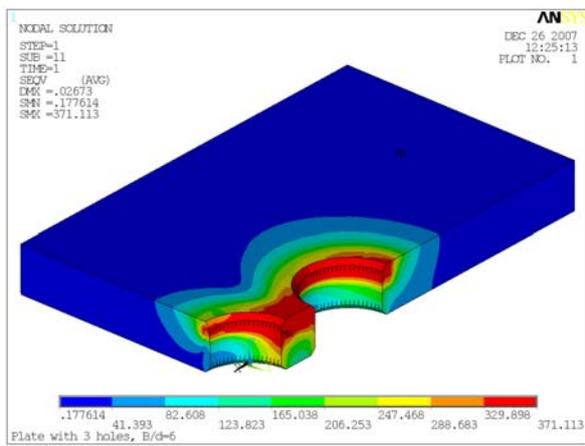
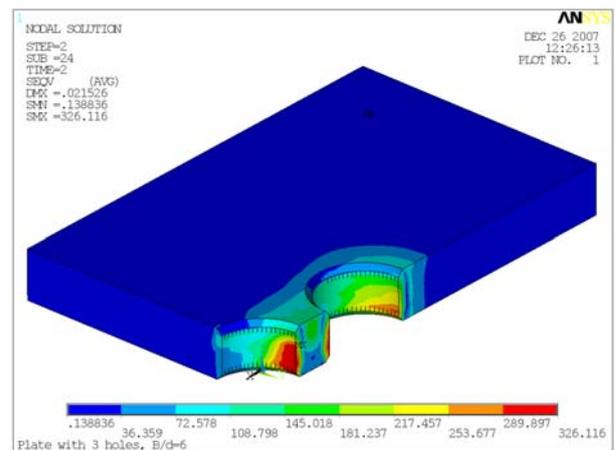


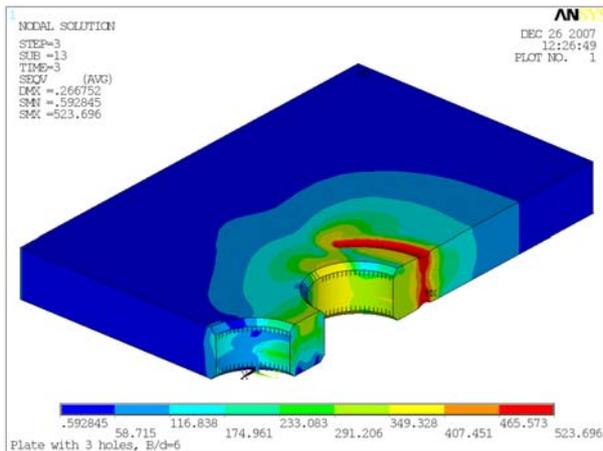
Рис. 9. Конечно-элементная модель обжимки для выштамповки сегментных лунок (на рисунке изображена только верхняя обжимка)



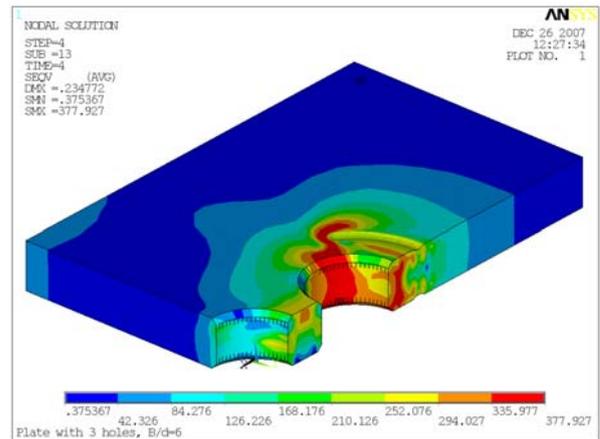
а



б



В



Г

Рис. 10. Характер распределения эквивалентных напряжений Мизеса в пластине с тремя отверстиями, упрочняемой методами дорнования с натягом 1% и последующего барьерного обжатия на глубину 0,3 мм:  
 а – на начальном этапе – внедрение дорна;  
 б – после дорнования;  
 в – после дорнования и последующего обжатия на глубину 0,3 мм;  
 г – после упрочнения

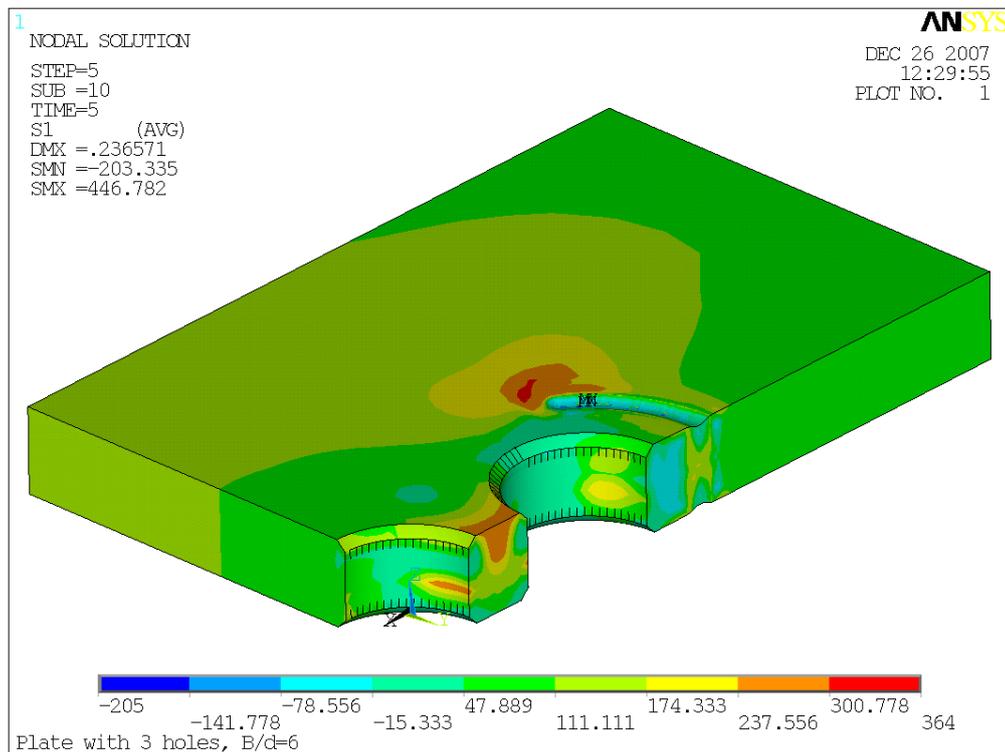


Рис. 11. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{ор}^0 = 100$  МПа)

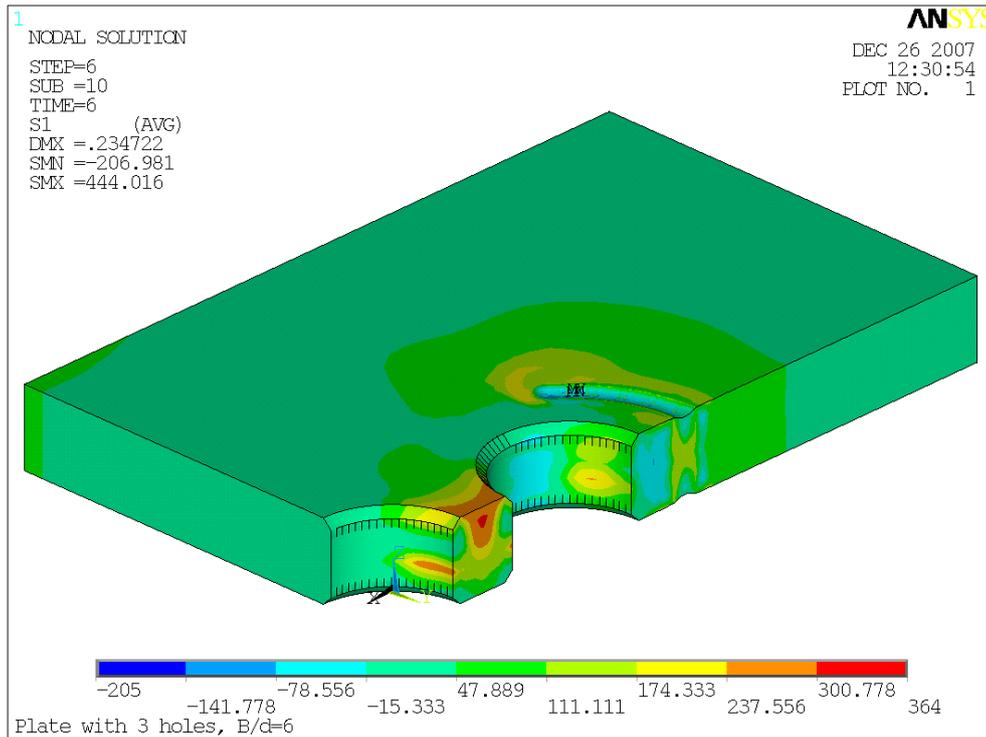


Рис. 12. Характер распределения главных растягивающих напряжений в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{бр}^0 = 0$  МПа – после разгрузки)

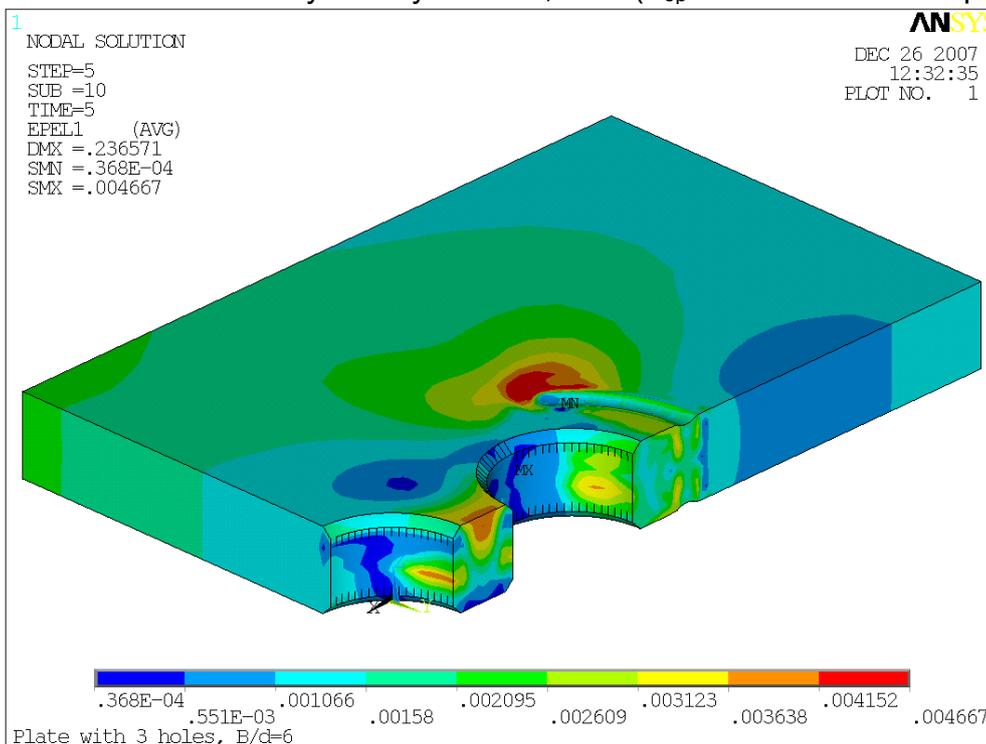


Рис. 13. Характер распределения главных растягивающих деформаций (упругая составляющая) в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{бр}^0 = 100$  МПа)

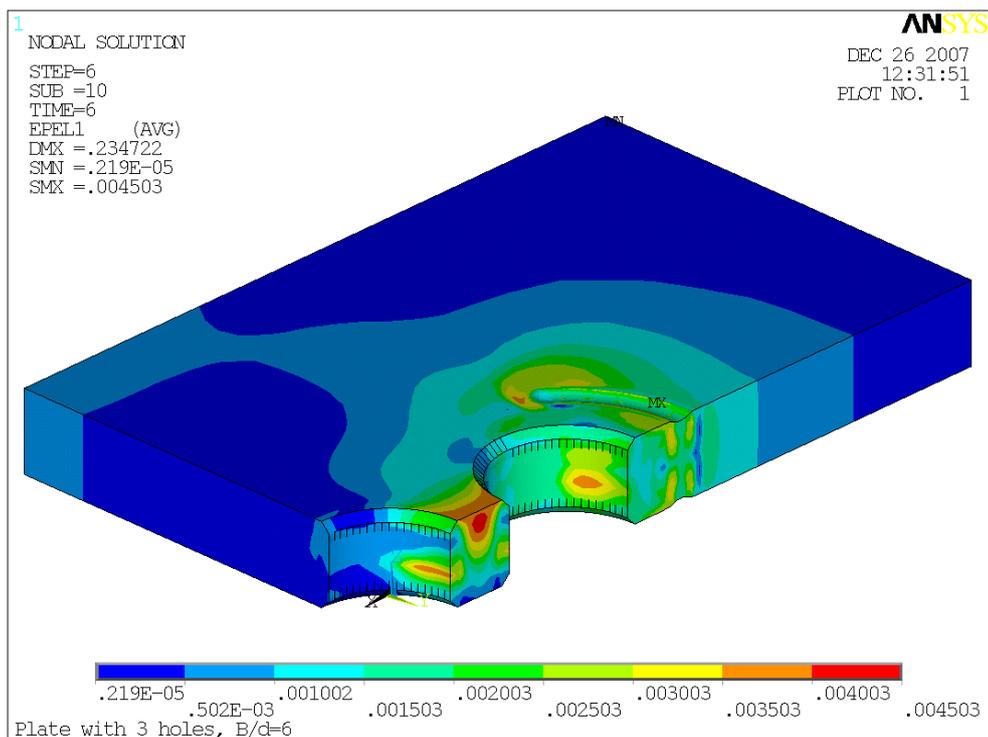


Рис. 14. Характер распределения главных растягивающих деформаций (упругая составляющая) в пластине с тремя отверстиями, упрочненной методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм ( $\sigma_{бр}^0 = 0$  МПа – после разгрузки)

Анализ характера распределения главных растягивающих напряжений и деформаций показывает, что в процессе последовательного применения дорнования и барьерного обжатия возникает дополнительная зона концентрации напряжений в зоне обжатия.

Для анализа эффективности применяемого метода упрочнения, позволяющего повысить усталостную долговечность пластины в зоне отверстий, в данной работе в качестве критериев используем следующие:

- 1) максимальные главные напряжения  $\sigma_{1max}$ ;
- 2) максимальные главные деформации  $\varepsilon_{1max}$ ;
- 3) максимальная удельная энергия деформирования  $w_{1max} = \sigma_{1max} \cdot \varepsilon_{1max}$ .

При расчете амплитуды деформаций рассматриваем упругую составляющую деформаций, поскольку именно она сильно изменяется в процессе циклического нагружения.

Цикл нагружения приведен к эквивалентному отнулевому циклу по формуле Одингга.

Для этого:

1. Определены значения амплитуды напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования в зоне вероятного усталостного разрушения в сечениях по осям отверстий и в зоне обжатия.

2. Рассчитаны максимальные напряжения, деформации и удельная энергия деформирования эквивалентного отнулевого цикла в зоне вероятного усталостного разрушения.

3. Определены максимальные значения рассчитываемых в п. 2 параметров в диапазоне эксплуатационных нагрузок.

По результатам расчета построены графики изменения максимальных напряжений, деформаций и удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла при  $\sigma_{бр}^0 = 0, 100, 130$  и  $150$  МПа (рис. 14–16).

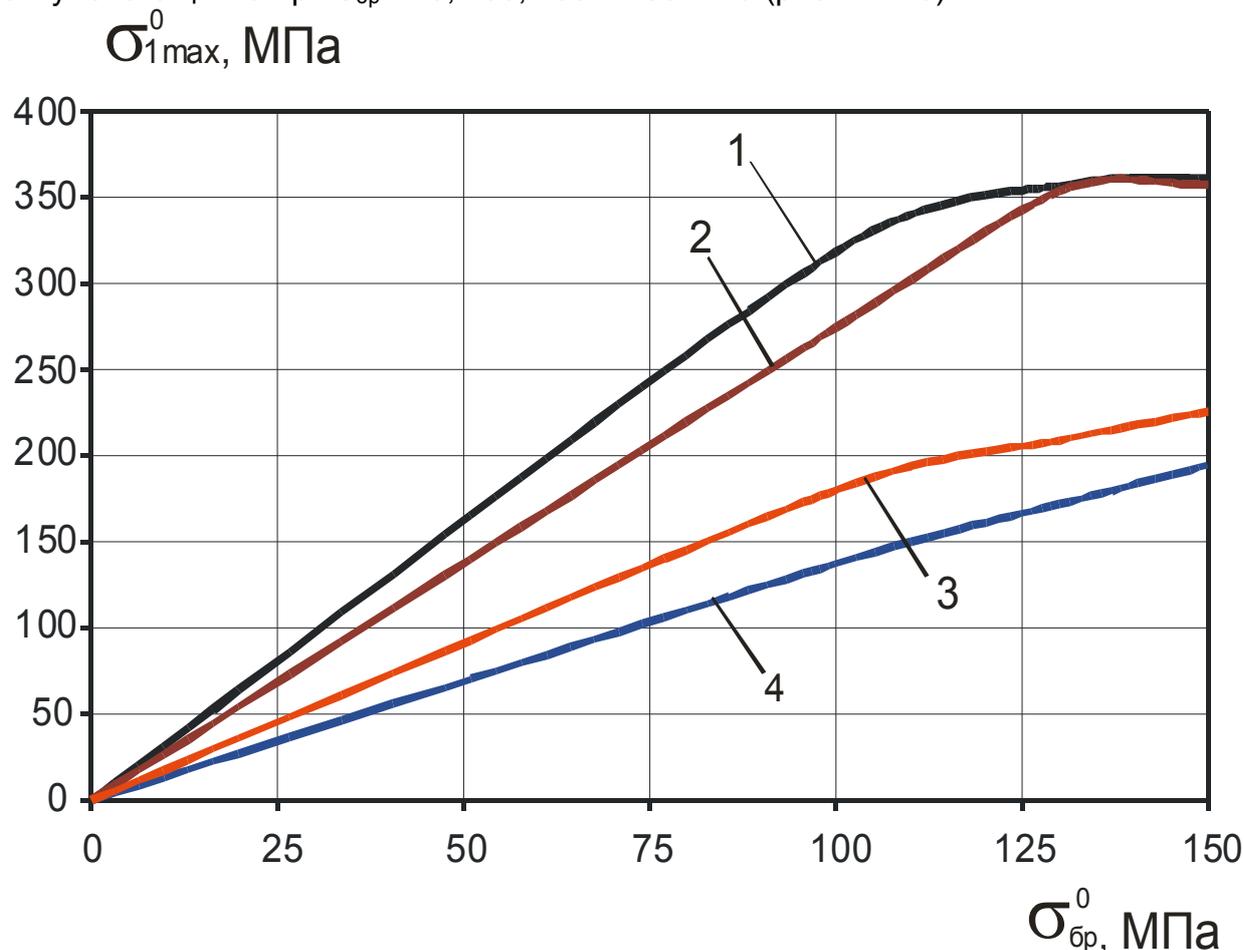


Рис. 14. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных напряжений эквивалентного отнулевого цикла в пластине:

- 1 – с отверстием  $\varnothing 8,006$  мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 2 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,006$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 3 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , по оси крайнего отверстия;
- 4 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , зона обжатия

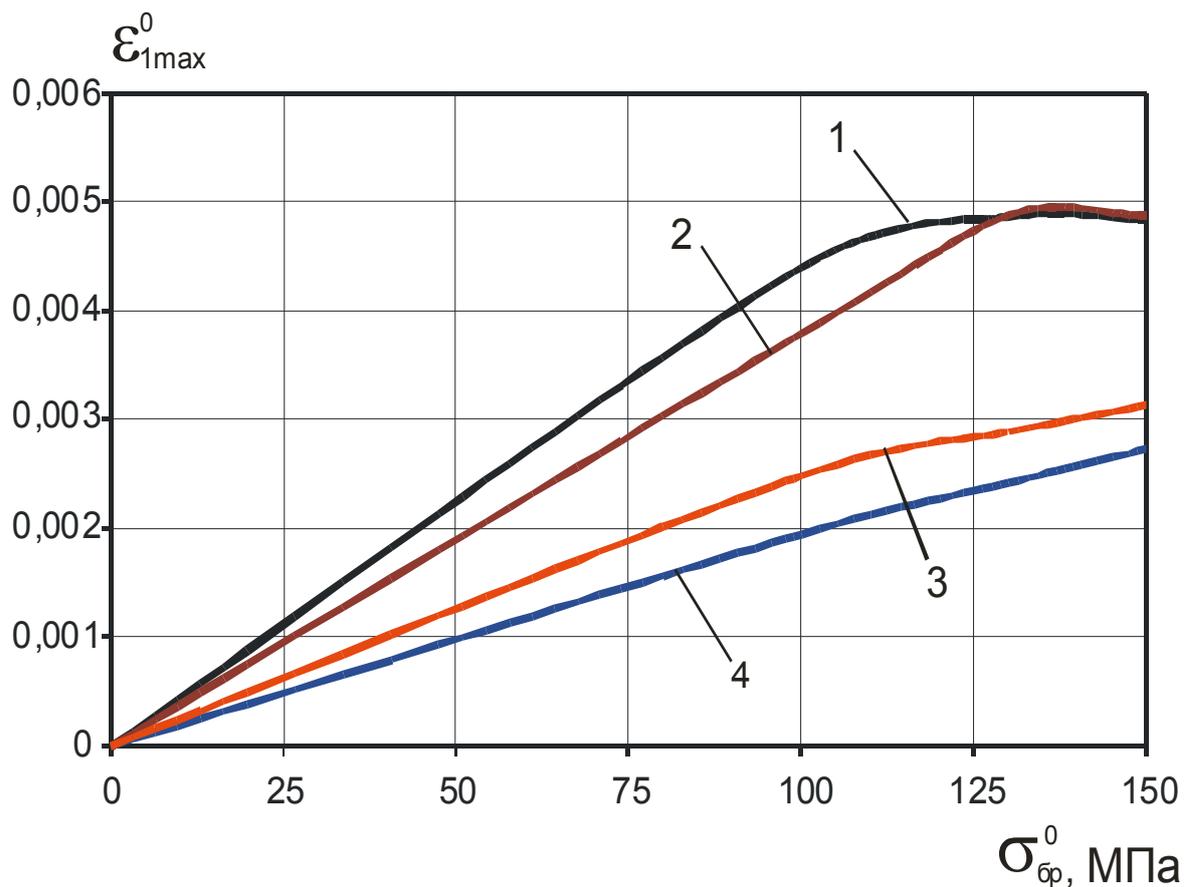


Рис. 15. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальных главных деформаций эквивалентного отнулевого цикла в пластине:

- 1 – с отверстием  $\varnothing 8,006$  мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 2 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,006$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 3 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , по оси крайнего отверстия;
- 4. с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , зона обжатия

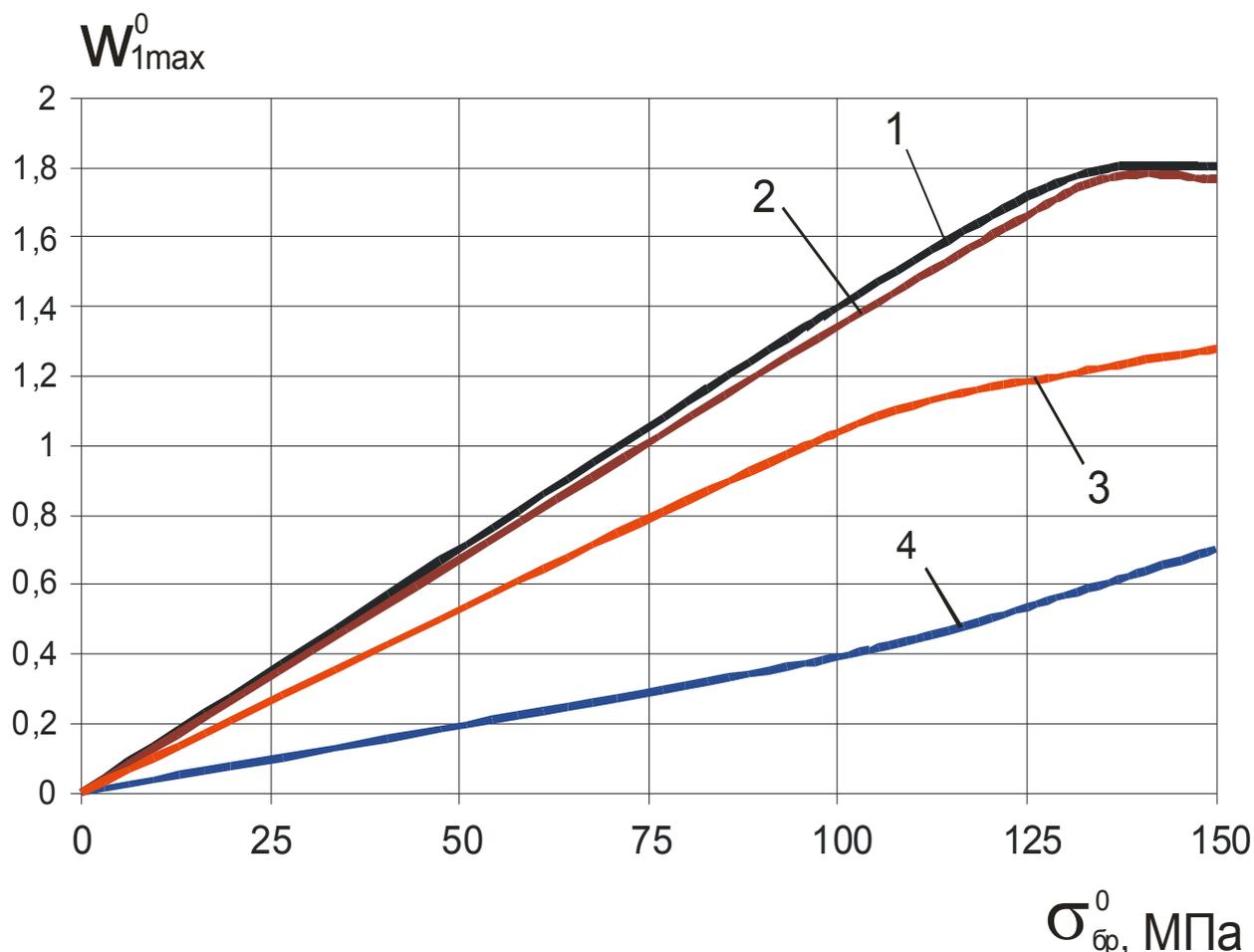


Рис. 16. Влияние уровня нагружения и метода упрочнения на изменение максимальной удельной энергии деформирования эквивалентного отнулевого цикла в пластине:

- 1 – с отверстием  $\varnothing 8,006$  мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 2 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,006$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска  $0,5 \times 45^\circ$ , без упрочнения;
- 3 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , по оси крайнего отверстия;
- 4 – с тремя отверстиями  $\varnothing 8,007$  мм, расстояние между отверстиями – 12 мм, фаска –  $0,5 \times 45^\circ$ , упрочняемой методом дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок, глубина обжатия – 0,3 мм, угол раствора –  $60^\circ$ , зона обжатия

### Выводы

1. Разработан метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС, позволяющий прогнозировать зоны вероятного усталостного разрушения.

2. Совместное применение метода дорнования с натягом 1% и выштамповки сегментных лунок глубиной 0,3 мм приводит к снижению максимальных главных растягивающих напряжений эквивалентного отнулевого цикла в 1,84–2,06 раза, максимальных главных деформаций – в 1,79–2,01 раза и удельной энергии деформирования – в 2,51–3,01 раза по сравнению с этими характеристиками для пластины с тремя отверстиями без упрочнения отверстий.

3. Предложенный метод оценки эффективности применения методов упрочнения может быть использован для пластин с отверстиями различной конфигурации, а также других типов концентраторов и для выбора оптимальных параметров технологического инструмента и режимов упрочнения.

### Список литературы

1. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.

2. Пширков В.Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений. – М.: Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1980. – 170 с.

3. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.

4. Бронз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. – М.: Машиностроение, 1986.–184 с.

5. Гребеников А.Г. Мовчан Ю.А., Гребеников В. / Анализ характеристик локального НДС с помощью системы ANSYS в пластине с отверстиями, подверженной упрочнению дорнованием или глубокого пластического деформированию и растяжению // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. научн. трудов Нац. аэрокосм. университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х.: НАКУ, 2003. ».– Вып 32(1). – С. 124–138.

6. Авиационные материалы. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы/ Под общей ред. д-ра техн. наук Р.Е. Шалина. – М.: ОНТИ, – 1983. – 350 с.

## Волновая сдвоенная зубчатая передача для главного редуктора вертолета

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Винты современных вертолетов имеют частоту вращения  $n_B = 300 \dots 600 \text{ мин}^{-1}$ . Если в качестве приводов использовать газотурбинные двигатели, то необходимые передаточные отношения главных редукторов будут находиться в пределах  $i = 40 \dots 80$  [1]. В настоящее время в качестве главных редукторов применяют планетарные зубчатые передачи. Однако они при таких передаточных отношениях имеют весьма сложную конструкцию, повышенные габаритные размеры и массу, большое число зубчатых колес и подшипников.

Известно, что волновая передача при тех же нагрузках и передаточных отношениях обладает примерно в 2-3 раза меньшими габаритными размерами и массой по сравнению с планетарными [2]. Поэтому были предприняты попытки использовать волновые передачи для тяжело нагруженных быстроходных механических систем [3]. Для привода винтов вертолета «Каман» был применен волновой редуктор, передающий мощность 370 кВт при частоте вращения на входе  $53000 \text{ мин}^{-1}$  и передаточном отношении  $i=51$ . В экспериментальном волновом редукторе использовано колоколообразное гибкое колесо, генератор волн с гидродинамическим подшипником и адаптивное жесткое колесо, состоящее из набора колец, установленных на брусках равного сопротивления изгибу. Но волновые передачи с металлическим гибким колесом обеспечивают его долговечность при  $i > 80$ . Поэтому в экспериментальном волновом редукторе применили сложную геометрию зубьев, вызывающую сомнения в ее эффективности при длительной работе. Кроме этого, изготовление колоколообразного гибкого колеса и адаптивного жесткого колеса связано с большими технологическими трудностями.

Указанные недостатки известной волновой зубчатой передачи затрудняют ее использование в качестве главного редуктора вертолета. В целях решения этой проблемы автором в ХАИ была предложена [4] сдвоенная волновая зубчатая передача, выполненная по оригинальной схеме, с гидростатической смазкой генераторов и синхронизатором их вращения (см. рис. 1).

Передача содержит: 1 – корпус; 2, 3 – быстроходный и тихоходный валы; 4 – гибкое зубчатое колесо с внутренним 5 и наружным 6 зубчатыми венцами; 7, 8 – внутреннее и наружное жесткие зубчатые колеса; 9, 10 – генераторы волн; 11, 12 – зубчатые колеса с внутренними зубьями; 13, 14 – шестерни; 15 – вал; 16, 17 – подшипники жидкостного трения генераторов волн; 18 – опорный подшипник скольжения; 19, 20, 21, 22, 23 – маслоподводящие каналы; 24 – полость; 25 – уплотняющие кольца; 26, 27, 28, 29 – маслоподводящие каналы; 30 – сливной канал.

Передача работает следующим образом. Перед включением передачи в работу от маслосистемы высокого давления по каналам 19, 20, 21 и 22 подается смазочный материал на рабочие поверхности подшипников скольжения 17 и 18, а по каналу 21 через полость 23, каналы 25, 26 смазочный материал подается на рабочую поверхность подшипника скольжения 16. При этом между

подшипниками 16 и 17 и гибким колесом 4 создаётся слой смазочного материала с избыточным давлением, необходимым для существования жидкостного трения.

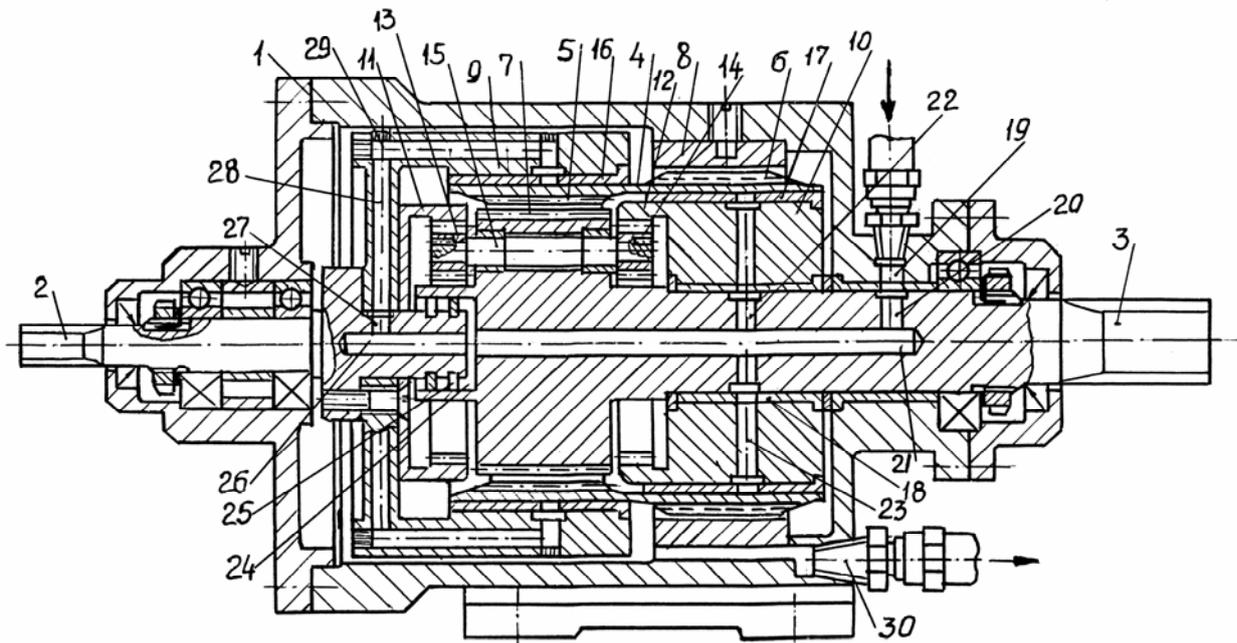


Рис. 1. Сдвоенная волновая зубчатая передача для главного редуктора вертолета

При вращении быстроходного вала 2 получает вращение непосредственно связанный с ним генератор волн 9 внешнего расположения и генератор волн 10, связанный с генератором 9 зубчатой передачей, состоящей из колёс 11, 13, 14, 12.

Вращение генераторов волн 9 и 10 происходит синхронно, и относительное положение их осей не изменяется при разгоне и остановке передачи.

При своём вращении генераторы 9 и 10 деформируют гибкое зубчатое колесо 4. Благодаря волновому зацеплению наружного венца 6 с жёстким зубчатым колесом 8 и внутреннего венца 5 с внутренним жёстким колесом 7 последнее получает замедленное вращение и сообщает его тихоходному валу 3.

Слабым элементом предложенной СВЗП является нагрузочная способность подшипников скольжения генераторов. Для этих подшипников мы предложили гидростатическую систему смазки. Так как даже без нагрузки подшипники генератора нагружаются силами радиальной жесткости гибкого колеса, то гидродинамический подшипник здесь не подходит из-за больших потерь и износа при пуске – остановке.

Силы, действующие со стороны генератора на гибкое колесо, характеризуются функцией распределения давления на поверхности трения гидростатического подшипника

$$P = \int_0^L P(\varphi, z) dz . \quad (1)$$

Для нахождения этой функции воспользуемся уравнением движения вязкой жидкости (уравнение Навье–Стокса) и уравнением неразрывности

$$\rho \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\text{grad} p + \mu \Delta \bar{v}, \quad (2)$$

$$\text{div} \rho \bar{v} = 0.$$

С учетом принятых допущений [5] система уравнений Навье-Стокса и неразрывности сводится к уравнению Рейнольдса [6]. В общем виде неизотермичности и турбулентности течения уравнение Рейнольдса запишем следующим образом [6]:

$$\frac{1}{R_H^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{h^3}{\mu K_\varphi} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu K_z} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6\omega_H \frac{dh}{d\varphi}, \quad (3)$$

где  $R_H$  – радиус поверхности скольжения недеформированного гибкого колеса;  $h$  – зазор в подшипнике скольжения генератора;  $\omega_H$  – угловая скорость вращения генератора при неподвижном гибком элементе;  $P$  – давление в слое смазочного материала;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $K_\varphi$  и  $K_z$  – коэффициенты турбулентности, полученные В. Н. Константинеску.

Согласно работе [7]

$$K_\varphi = 1 + 0,044 \cdot (\sigma^* R_e)^{0,725}; \quad K_z = 1 + 0,0247 \cdot (\sigma^* R_e)^{0,65};$$

$$\sigma^* = 0,125 \cdot R_e^{0,07}; \quad R_e = \frac{\omega_H \cdot R_H \cdot h}{\nu}, \quad (4)$$

где  $R_e$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – кинематическая вязкость смазочного материала.

Для ламинарного изотермического течения смазочного материала параметры  $\mu$ ,  $K_\varphi$  и  $K_z$  из уравнения (3) исключаются.

Обозначения, принятые в формулах, показаны на рис. 2. При решении (3) необходимо учитывать изменение вязкости вследствие приращения температуры на поверхности трения. Указанное приращение температуры можно определить, решая уравнение теплового баланса, которое базируется на законе сохранения энергии. Будем считать процесс установившимся (стационарным), т.е.  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ .

Запишем уравнение уравнение теплового баланса [6]

$$C_m \cdot \rho_m \left( q_\varphi \frac{\partial T}{R_H \partial \varphi} + q_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \mu \frac{U^2}{h} + \frac{h^3}{12\mu} \left[ \left( \frac{1}{R_H} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где

$$q_\varphi = -\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial P}{R_H \partial \varphi} + \frac{h \cdot U}{2}; \quad q_z = -\frac{h^3}{12 \cdot \mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z};$$

$C_m$ ,  $\rho_m$  – теплоемкость и плотность масла;  $q_\varphi$  и  $q_z$  – потоки масла вдоль координат  $\varphi$  и  $z$ ;  $T$  – температура масла;  $U$  – скорость относительного скольжения.

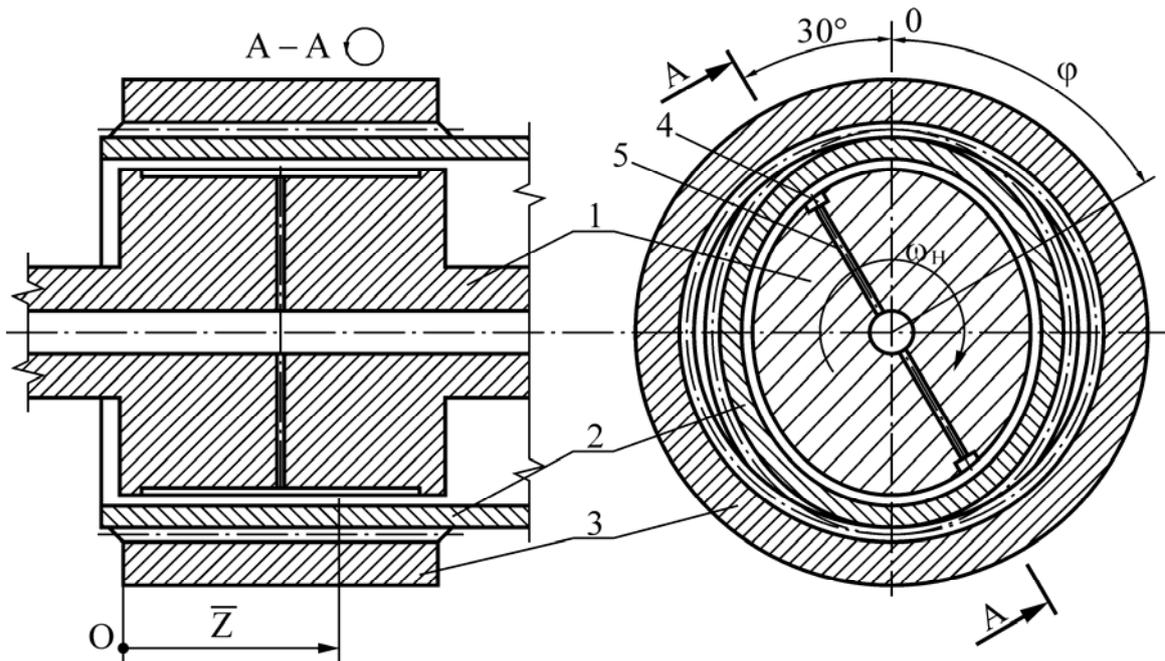


Рис. 2. Расчетная схема волновой передачи с подшипником скольжения жидкостного трения: 1 – кулачковый генератор; 2, 3 – гибкое и жесткое колеса; 4 – камера; 5 – дроссель

Зависимость вязкости от температуры аппроксимируем формулой

$$\mu = \mu_0 \exp[\alpha_\mu (T - T_0) + \beta (P - P_0)]; \quad (7)$$

$$T(0, z) = f_1(z); \quad T\left(\varphi, \frac{L}{2}\right) = f_2(\varphi), \quad (8)$$

где  $\alpha_\mu$  – температурный коэффициент;  $\beta$  – пьезокоэффициент вязкости.

Приведем уравнение (5) к безразмерному виду и введем обозначения [8]

$$\begin{aligned} & \left( -\frac{\bar{h}^3 \cdot \lambda}{12 \cdot \bar{\mu}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varphi} + \frac{\bar{h} \bar{U}}{2} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varphi} + \left( -\frac{\bar{h}^3 \cdot \lambda}{12 \cdot \bar{\mu}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = \\ & = \frac{\bar{\mu} \cdot U^2}{\lambda \cdot \bar{h}} + \frac{\lambda \cdot \bar{h}^3}{12 \cdot \bar{\mu}} \left[ \left( \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varphi} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A &= \left[ \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varphi} - 3 \left( \frac{2 \cdot \bar{\mu} \cdot \bar{U}}{\lambda \cdot \bar{h}^2} \right) \right]; \quad B = \left[ \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right]; \\ D &= -3 \left( \frac{2 \cdot \bar{\mu} \cdot \bar{U}}{\lambda \cdot \bar{h}^2} \right)^2 - \left( \frac{\partial \bar{P}}{\partial \varphi} \right)^2 - \left( \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right)^2. \end{aligned} \quad (10)$$

После преобразований уравнение (9) представим в виде

$$A \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varphi} + B \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{z}} = D. \quad (11)$$

Для нахождения поля температур во всех сечениях подшипника нужно решить двумерную задачу для квазилинейного уравнения переноса (11) при граничном условии по координате  $\varphi$ :

$$\bar{T}(\varphi = 0, z) = \bar{T}_0. \quad (12)$$

Для решения задачи необходимо задать граничное условие по координате  $z$ . Однако на торцах генератора волн определить температуру сложно. В связи с этим нами предложено использовать в качестве граничного условия по координате  $z$  решение одномерной задачи для срединного сечения генератора:

$$\bar{T}(\varphi, z = L/2) = \bar{T}(\varphi) \text{ одномерное.} \quad (13)$$

При решении двумерной краевой задачи для квазилинейного уравнения переноса наиболее часто применяют шаблоны двух типов: L-шаблон и Г-шаблон. Решая формулу численно на L-шаблоне, приходим к разностной схеме

$$\bar{T}_{i+1,j} = \bar{T}_{ij} + \left[ D - B \left( \frac{\bar{T}_{ij+1} - \bar{T}_{ij}}{\Delta \bar{z}} \right) \right] \frac{\Delta \varphi}{A}. \quad (14)$$

Решая зависимость на Г-шаблоне, получаем

$$\bar{T}_{i+1,j} = \left[ D + \frac{A}{\Delta \varphi} \bar{T}_{ij} - \frac{B}{\Delta \bar{z}} \bar{T}_{i+1,j+1} \right] / \left( \frac{A}{\Delta \varphi} - \frac{B}{\Delta \bar{z}} \right). \quad (15)$$

Дальнейшие действия, связанные с численным решением уравнения, аналогичны описанным для одномерной задачи. Таким образом, мы получаем поле температур, удовлетворяющее исходному дифференциальному уравнению (9) при граничных условиях (12) и (13), которое служит для расчета вязкости смазки по формуле (7).

Таким образом, совместное решение уравнений Рейнольдса и энергии позволяет определить нагрузочную способность гидростатического генератора и зазоры, уравнивающие силы зацепления.

Расчет генераторов волн для главного редуктора вертолета сводится к исследованию силового взаимодействия звеньев в волновом редукторе и установлению таких параметров, как давление на входе  $P_0$  и вязкость смазочного материала  $\mu$ , зазоры средний  $\delta$  и текущий  $h$  между кулачком генератора и гибким элементом при соответствующих значениях числа, ширины  $b_k$  и длины  $l_k$ .

Был разработан алгоритм расчета гидростатического генератора на базе изложенной выше математической модели (рис. 3) и выполнены исследования основных параметров, характеризующие работоспособность генератора.

В качестве примера на рис. 4 показаны графики, полученные расчетом зависимостей КПД редуктора зазора между кулачком и гибким колесом  $\delta$ . Они показывают, что оптимальные значения зазора  $\delta$  по КПД находятся в диапазоне  $\delta = 0.05 \dots 0.06$  мм. Аналогично было исследовано влияние на КПД и нагрузочную способность  $T$  параметров  $P_0$ ,  $\mu$ ,  $\omega$  и др.

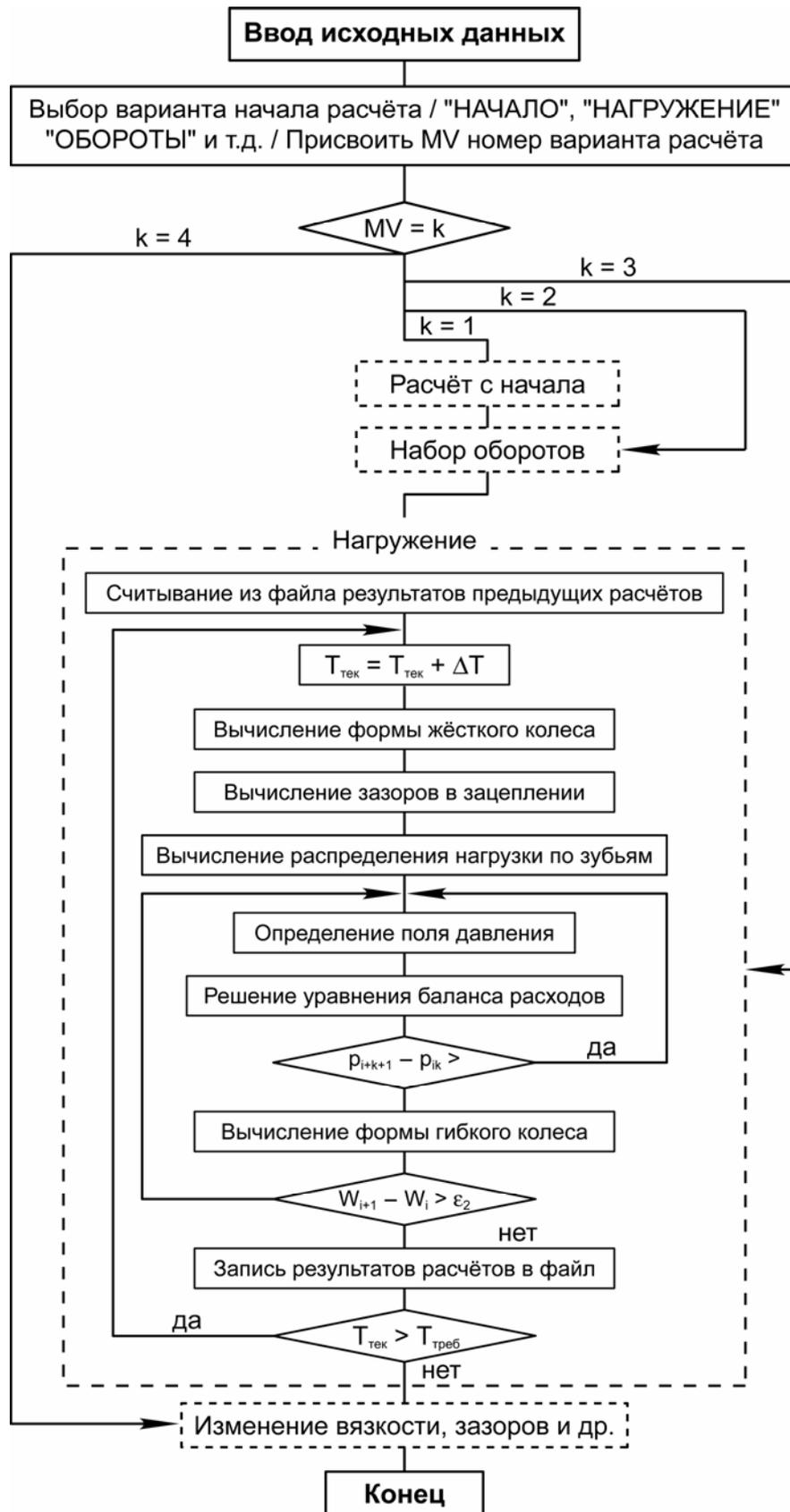


Рис. 3. Укрупненный алгоритм расчета силового взаимодействия звеньев ВЗП с генератором скольжения

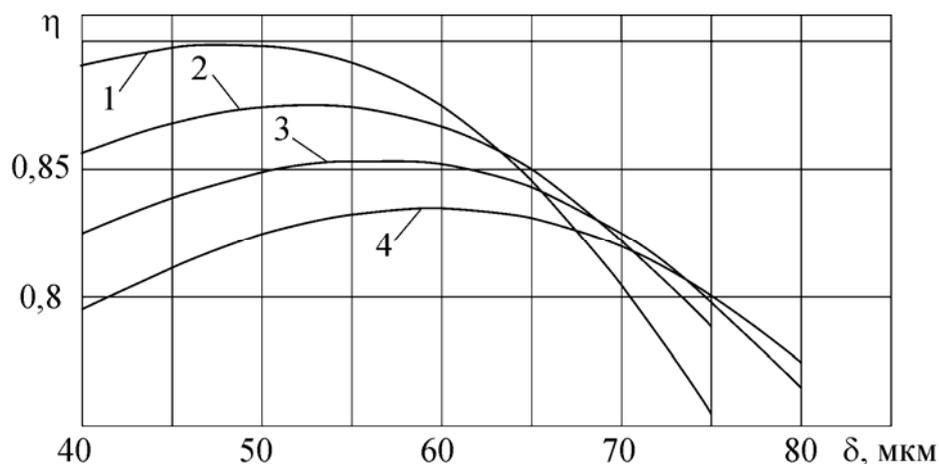


Рис. 4. Зависимость КПД от среднего зазора в подшипнике генератора волн при  $\mu = 0.002 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $T_2 = 1000 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и  $\omega_H - \text{var}$  :  
 кривая 1 –  $\omega_H = 600 \text{ с}^{-1}$ ; кривая 3 –  $\omega_H = 1000 \text{ с}^{-1}$ ;  
 кривая 2 –  $\omega_H = 800 \text{ с}^{-1}$ ; кривая 4 –  $\omega_H = 1200 \text{ с}^{-1}$

### Выводы

1. Разработана новая СВЗП, которая может быть эффективно использована для тяжело нагруженных, высокоскоростных редукторов. При этом достигается снижение габаритных размеров и массы примерно в 2-3 раза.
2. Изложены основы теории работоспособности генератора волн с гидростатическим подшипником.
3. Приведен алгоритм расчета нагрузочной способности гидростатического генератора волн.

### Список литературы

1. Полетучий А.И., Рыдченко В.М. Основы конструирования авиационных редукторов: Учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов: В 2 ч. – Х.: ХАИ, 1994. – Ч. I. – 337 с., – Ч. II. – 58 с.
2. Иванов М.Н. Волновые зубчатые передачи. – М.: Высш. – 1984. – 184 с.
3. Волновые зубчатые передачи / Д.П. Волков, А.Ф. Крайнев, М.В. Маргулис и др. – К.: Техніка, 1976. – 221 с.
4. Сдвоенная волновая зубчатая передача: Патент 49543 Украины, МКИФ16Н 1/00/ А.И. Полетучий (Украина). – 2001128985; Заявлено 25.12.2001; опубл. 16.09.2002, Бюл. № 9. – 5 с.
5. Полетучий А.И. Некоторые вопросы теории волновой зубчатой передачи с генераторами скольжения // Вестник Харьк. политехн. ун-та: Сб. науч. тр. – Х.: ХГПУ, 1999. – Вып. 50. – С.86-94.
6. Богданов О.Д., Дьяченко С.К. Расчет опор скольжения. – К.: Техніка. – 1966. – 242 с.
7. Константиnescу В.Н. Анализ работы подшипников в турбулентном режиме // Техническая механика. – 1964. – № 3. – С. 168 – 176.
8. Полетучий А.И., Цуканов Р.Ю. Решение уравнения энергии для масляного слоя подшипников скольжения генератора волновой передачи // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Харьк. авиац. ин-т. им. Н.Е. Жуковского. – 1998. – С. 170 – 174.

## **Методологические основания разработки системы автоматизированного проектирования приспособлений для сборки летательных аппаратов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Создание (проектирование, конструирование, изготовление и монтаж) приспособлений для сборки летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, ракетно-космических комплексов) занимает одно из главных мест в технологической подготовке авиационного производства.

Более 80-90% всех специфицированных сборных частей планера летательных аппаратов (ЛА) требуют обязательного использования при их сборке специальных (или специализированных) сборочных приспособлений (СП). Это означает, что для сборки современного самолета требуется в среднем не менее 150-300 единиц СП при опытном производстве и в 2,5-3 раза больше – при серийном изготовлении ЛА.

Ввиду того, что большинство СП представляют собой конструктивно сложные инженерные сооружения и составляют большую номенклатуру в подготовке производства, то на проектирование, конструирование и изготовление их требуются большие трудовые и материальные затраты, а сроки полного оснащения сборочного производства растягиваются на многие месяцы и годы.

Из анализа предшествующих исторических периодов освоения и изготовления новых конструкций ЛА следует, что затраты на создание СП возрастали по экспоненциальному закону. Так, если в начале 50-х годов прошлого столетия, когда реактивная авиация только набирала темпы своего развития, на разработку сборочной оснастки для таких самолетов, как истребитель МиГ-17, средний бомбардировщик Ил-28, штурмовик Су-8, требовалось затратить порядка 6-8 месяцев инженерного труда коллектива конструкторов в количестве 10-15 человек, то в 70-е годы, когда самолеты существенно усложнились конструктивно и увеличились в габаритных размерах (пассажирские реактивные авиалайнеры Ил-18, Ту-104, Ан-10, Ту-124 и др.), на проектирование необходимого комплекта СП потребовалось не менее 24-36 месяцев работы конструкторов по сборочной оснастке в количестве 40-50 человек. Тенденция увеличения затрат и сроков создания СП продолжилась в последующие годы, особенно при освоении таких самолетов-гигантов, как транспортно-грузовые Ан-124 «Руслан», Ан-225 «Мрія» и др. Создание стапельно-сборочной оснастки для таких самолетов старыми традиционными средствами и способами не оправдывалось экономически, а для некоторых видов СП (например для сборки фюзеляжа) становилось технически трудно осуществимой задачей.

Стало очевидным, что для повышения эффективности технологической подготовки сборочного производства необходимо основное внимание обратить на работы, связанные с рациональным оснащением сборочных процессов, решая задачи по трем направлениям:

- сокращение сроков и ускорение темпов создания необходимого количества СП для оснащения серийного сборочного производства ЛА;

- интенсификация инженерного труда и снижение затрат на проектирование сборочных приспособлений, уменьшение трудоемкости изготовления как отдельных элементов СП (главным образом – базово-фиксирующих устройств), так и монтажа СП на рабочих местах в сборочных цехах;

- повышение качества конструкций СП и качества их изготовления для обеспечения необходимой точности форм и размеров собираемых в них изделий для повышения производительности сборки путем обеспечения более удобных подходов к рабочим зонам при установке, фиксации и соединении входящих элементов собираемых конструкций, удобства выема и транспортировки собранного изделия из СП.

Для решения этих задач следовало искать новые пути повышения качества СП и сокращения сроков и затрат на их создание. Одним из привлекательных эффективных путей, на который было обращено внимание специалистами авиапрома, был путь разработки и применения методов и средств компьютерных технологий с переходом к автоматизированному проектированию и изготовлению на всех этапах создания СП, а именно: при разработке технических предложений, проектировании геометрического облика и конструировании рабочего проекта СП, разработке рабочих чертежей на составные части приспособления, разработке технологических процессов изготовления деталей СП на станках с числовым программным управлением, разработке технологии монтажно-сборочных и контрольно-измерительных операций окончательной сборки СП как единого целого сооружения.

С повышением требований к точности изготовления обводообразующих частей планера высокоскоростных ЛА и к точности взаимной увязки геометрических форм сопрягаемых элементов (разъемов и стыков), а также с ростом габаритных размеров ЛА объективно происходило увеличение точностных и весовых характеристик сборочных приспособлений, которые превращались в высокоточные по геометрическим параметрам массивные многотонные инженерные сооружения – сборочные стапели зачастую с вмонтированными в них средствами механизации для выполнения технологических процессов сборки.

Все это вело к резкому увеличению затрат на проектирование и изготовление сборочных приспособлений. Поэтому актуальность решения проблемы автоматизированного создания СП для сборки новых конструкций ЛА назревала в последние десятилетия XX столетия как **насуцная объективная необходимость** и как **реальная возможность** ее осуществления.

**Объективная необходимость** разработки методов и средств автоматизированного создания СП состояла в стремлении уменьшения сроков подготовки производства и повышения качества серийного изготовления вновь создаваемых ЛА (стремительно конструктивно усложняющихся и часто сменяемых в производстве).

**Реальная возможность** перехода к автоматизированному проектированию СП на предприятиях авиационной промышленности состояла в том, что благодаря большим достижениям в области разработки электронно-вычислительной техники стали доступными персональные ЭВМ, а также мощные графические рабочие станции. Появилась возможность использования многофункциональных систем проектирования для решения задач автоматизации проектных работ.

Первые разработки отдельных элементов автоматизированного проектирования конструкций СП и изготовления их обводообразующих элементов

базово-фиксирующих устройств (БФУ), как наиболее трудоемких в изготовлении, были осуществлены в авиастроении в 80-90-е годы прошлого столетия [1-5] в виде: 1) системы информационной поддержки оперативного поиска типовых конструкций СП и составных элементов БФУ и разработки принципиального облика конструкций СП, 2) разработки технологии автоматизированного изготовления обводообразующих контуров БФУ на станках с числовым программным управлением.

Для решения первой задачи необходимо было, прежде всего, создать базу данных на основе нормативно-технических документов, охватывающих весь комплекс сведений о типовых технологических процессах сборки конструкций ЛА различными методами сборки, о типовых конструкциях сборочных приспособлений и их составных элементах (ложементах, рубильниках, стапельных плитах, узлах и механизмах установки и фиксации собираемых объектов), а также о составных частях каркасов СП (основаниях, колоннах, балках, кронштейнах и соединительных деталях и др.) с учетом реальных возможностей использования базы данных в разработанных в то время автоматизированных системах [6].

Разработанная нами база данных [2] применительно к системе AutoCAD удовлетворяла основным требованиям этой системы: 1) взаимодействие пользователя (конструктора по проектированию СП) с разработанной базой данных осуществлялось в диалоговом режиме; 2) объектами базы данных служила поисковая геометрическая, текстовая, иллюстративная и параметрическая информация; 3) доступ пользователя к базе данных осуществлялся по имени, ключу или номеру; 4) работа с базой данных велась с помощью системы иерархических меню.

База данных, являющаяся основной частью информационной поддержки системы автоматизированного проектирования СП, была встроена в систему AutoCAD.

Система информационной поддержки процесса автоматизированного проектирования СП на первом уровне ее развития позволяла решать следующие задачи:

- выбор базового графического образа сборочного приспособления из числа типовых аналогичных конструкций в соответствии с классификатором сборочных приспособлений. Базовый вариант образа СП принимался конструктором в качестве текущего чертежа;

- поиск множества графических объектов – элементов каркаса и базово-фиксирующих устройств СП, анализ и выбор рациональных элементов и включение их в текущий чертеж СП;

- поиск текстовой информации о характеристиках и параметрах выбранных объектах и включение ее в текущий проект СП;

- формирование и компоновка общего вида СП, дополнение недостающими элементами, оформление окончательного варианта СП.

Эта система по своей сути была системой оперативного поиска и формирования облика СП из числа типовых, стандартных или нормализованных элементов конструкций сборочных приспособлений, оптимального выбора и формирования конструкции СП путем широкого перебора возможных вариантов с помощью ЭВМ.

Экономическая эффективность предложенной технологии автоматизированного проектирования СП, как подтвердила практика ее

использования на Харьковском авиационном заводе, достигалась путем сокращения длительности разработки и формирования окончательного варианта СП, выполнения графических работ на ЭВМ, оптимизации конструкции СП благодаря оперативному перебору возможных вариантов проекта.

Однако предложенная система поддержки автоматизированного проектирования СП не решала многих принципиальных конструктивно-технологических задач автоматизации расчетов и выбора основополагающих параметров СП:

1) формирование первоначального (эскизного) геометрического облика сборочного приспособления в зависимости от конструктивных характеристик объекта сборки и принятого технологического метода сборки;

2) определение (расчет) оптимального количества и мест размещения базово-фиксирующих устройств сборочного приспособления, обеспечивающих заданную точность собираемого объекта и его функциональную взаимозаменяемость по аэродинамическим поверхностям, конструктивным разъемам и технологическим стыкам;

3) расчет прочности и жесткости основных элементов сборочного приспособления (каркаса и базово-фиксирующих устройств), обеспечивающих несущую способность и допустимые прогибы конструкции сборочного приспособления;

4) расчет допустимых погрешностей процесса изготовления и монтажа сборочного приспособления, обеспечивающих заданную точность и взаимозаменяемость собираемого изделия;

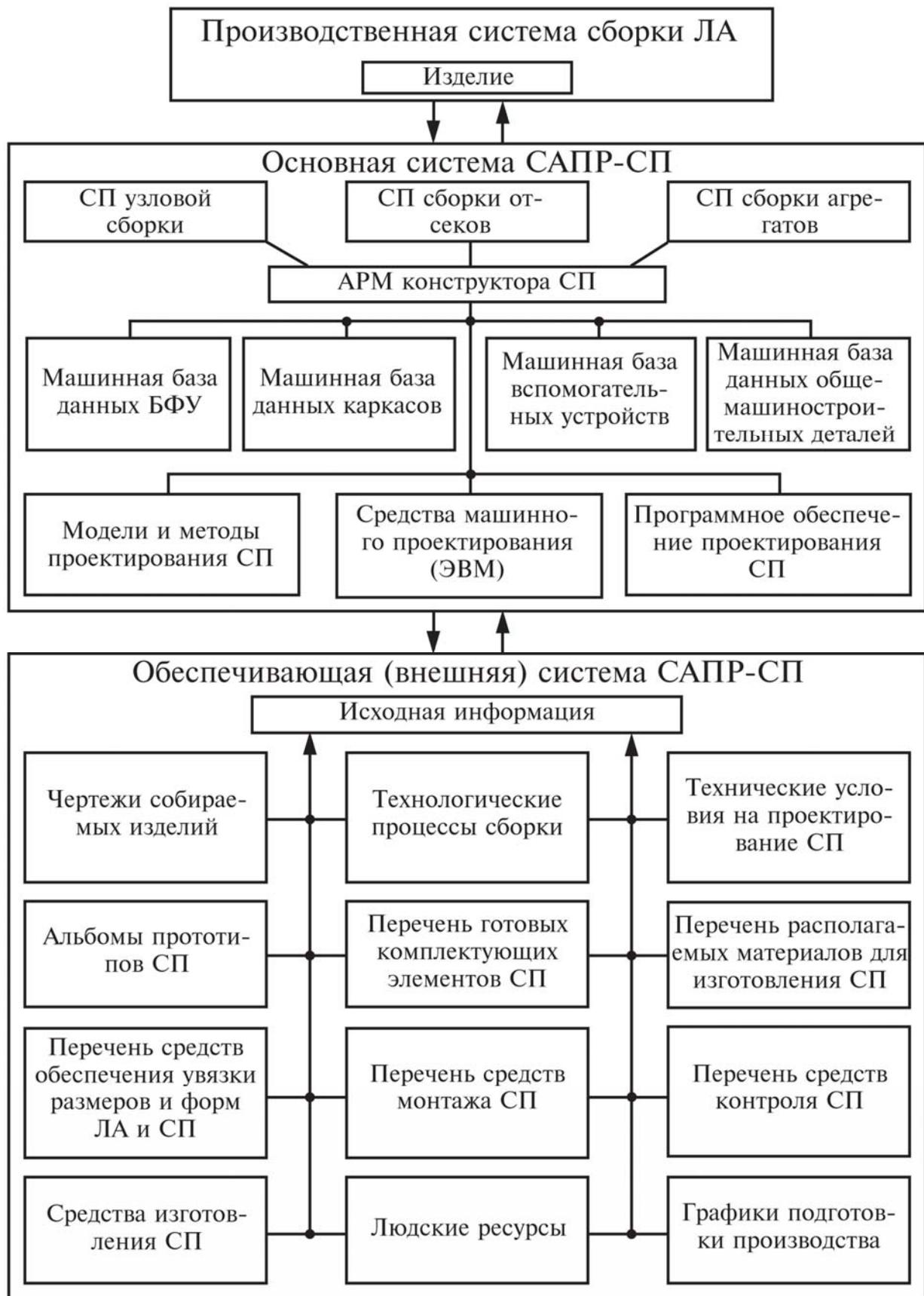
Очевидно, что перечисленные задачи могли быть решены только при условии разработки научно обоснованных логико-математических моделей и методов, алгоритмизации их и написания прикладных программ для всей совокупности поставленных задач с последующим объединением в комплексную интегрированную систему автоматизированного проектирования сборочных приспособлений для сборки летательных аппаратов всех классов и типов (САПР-СП).

Положив в основу принципы системного подхода к решению сложных научно-технических задач, к числу которых следует отнести и систему автоматизированного проектирования сборочных приспособлений для сборки ЛА, представим ее общую структуру САПР-СП в виде двух блоков: основной системы – проектирующей и вспомогательной – обеспечивающей (см. рисунок).

Основной блок САПР-СП отражает предметную область системы (СП, предназначенные для узлов, секционной и агрегатной сборки ЛА); содержит внутреннюю базу данных (перечисленных ранее) в виде машинных файлов; модели и методы проектирования составных частей СП; прикладные программы для решения конкретных задач в соответствии с разработанными моделями и методами; технические и организационно-управленческие средства автоматизированного рабочего места (АРМ) конструктора СП.

Вспомогательный блок является внешней информационной базой данных, на основе которых формируются условия на проектирование СП, формируются входные данные для аппаратной части системы.

Для принятия оптимальных решений при проектировании сборочного приспособления вспомогательный блок должен располагать достаточными данными для диалогового анализа и синтеза окончательного варианта СП:



Структура модели проектирования сборочных приспособлений

о прототипах СП, наличии на предприятии готовых стандартных элементов СП, наличии материалов для изготовления элементов СП, наличии соответствующего оборудования и средств монтажа СП, наличии средств обеспечения увязки форм и размеров СП, наличии транспортных средств для монтажа СП, наличии квалифицированных исполнителей.

Как следует из приведенной структуры САПР-СП, она представляет собой многоуровневую сложную систему, декомпозиция которой на самостоятельные компоненты является объективной необходимостью для детального и полного их анализа и последующего синтеза в единое целое для достижения главной цели САПР-СП – создания интегрированной системы комплексного проектирования СП, обеспечивающей снижение затрат и сроков на технологическую подготовку сборочного производства и повышения качества ЛА.

Центральным ядром системы и наиболее наукоемким в процессе проектирования САПР-СП является разработка моделей и методов решения конкретных компонент системы, алгоритмов и программного обеспечения (разработка прикладных программ и привязка их к существующим системам автоматизированного проектирования).

Разработка моделей и методов, базирующихся на принципах модульного моделирования разнородных связей и отношений между параметрами (изменяемыми переменными) и характеристиками (независимыми переменными) в интегрированной системе, возможна на основе использования различных научно-технических подходов. При этом необходимо обеспечить совместимость модулей для создания единой интегрированной модели. Для достижения этой цели было принято графоаналитическое представление и математическое описание входящих в систему моделей.

В связи с этим построение моделей системы автоматизированного проектирования САПР-СП осуществлялось выполнением следующих процедур:

1. Формализованное описание СП как объекта проектирования на основе выявленных параметров и характеристик, которые наиболее существенно влияют на результаты моделирования. Количество этих параметров выбрано таким, чтобы их набор давал достаточную информацию для принятия необходимых решений на определенном уровне проектирования СП.

2. Разработка математического описания моделей на основе абстрактного графического представления и использования конечных алгебраических и трансцендентных уравнений для описания геометрических, прочностных, функциональных отношений параметров и характеристик СП как сложной технической системы.

3. Разработка вычислительных алгоритмов моделей, т.е. очевидной последовательности расчетов и логических процедур для решения поставленной задачи, проводимых на основе выбранных (или разработанных) методов.

4. Осуществление программной реализации алгоритмов математических моделей (программное обеспечение может базироваться на существующие системы или на разработанные специально для решения поставленных задач).

Изложенная методологическая концепция разработки моделей автоматизированного проектирования проектно-аналитического облика сборочных приспособлений в соответствии с приведенным составом обязательных процедур

реализована автором в виде разработки следующих локальных аналитических моделей:

1) рационального числа и мест расположения БФУ в СП в следующей постановке: найти такое минимальное число мест размещения БФУ, которое обеспечивало бы заданную точность собираемого в приспособлении объекта, т.е.

$$[\delta_{CB}]_{PP} \leq [\delta_{CB}]_{TY}, \quad (1)$$

где  $[\delta_{CB}]_{PP}$  – точность сборки собранного объекта в СП,

$[\delta_{CB}]_{TY}$  – заданная по техническим условиям точность собираемого объекта;

2) рационального выбора конструкций СП (опорных колонн, несущих балок, БФУ) в следующей постановке:

а) конструкция любого элемента СП должна обеспечивать допустимую прочность, т.е.

$$[\sigma_{pac}]_{PP} \leq [\sigma]_{TY}, \quad (2)$$

где  $[\sigma_{pac}]_{PP}$  – расчетная величина прочности конструкций СП,

$[\sigma]_{TY}$  – допустимая прочность материала, из которого изготовлена конструкция СП;

б) конструкция любого элемента СП (особенно продольных и поперечных несущих балок) должна обеспечивать допустимые прогибы, т.е.

$$[Z_{PP}]_{ИЗГ} \leq [f_{CB}]_{TY}, \quad (3)$$

где  $[Z_{PP}]_{ИЗГ}$  – расчетная величина прогиба,

$[f_{CB}]_{TY}$  – допустимая величина прогиба;

3) рациональной точности изготовления и монтажа СП в следующей постановке:

$$[\delta_{PP}]_{ИЗГ} \leq [\delta_{CB}]_{TY}, \quad (4)$$

где  $[\delta_{PP}]_{ИЗГ}$  – расчетная величина точности изготовления СП,

$[\delta_{CB}]_{TY}$  – заданная точность изготовления собираемого объекта.

Исследования, проведенные на авиационных предприятиях, и анализ влияния параметров и характеристик сборочных процессов, осуществляемых в СП, позволили установить функциональные отношения и зависимости между ними для разработки перечисленных выше моделей.

Так, для разработки модели определения мест размещения БФУ, удовлетворяющих условию (1), необходимо математическое описание взаимовлияния следующих характеристик и параметров: величин погрешностей

изготовления деталей  $\delta_{дет}$  поступающих на сборку; погрешностей изготовления сборочных приспособлений  $\delta_{пр}$  и, как результат, их суммарной погрешности взаимной увязки  $C_{пр-дет}$  в местах установки БФУ; величины шага установки БФУ вдоль базируемых контуров собираемых деталей  $t_{БФУ}$ ; усилий прижатия деталей к опорным поверхностям БФУ для фиксации в сборочном положении  $Q_{БФУ}$ ; знание механических характеристик материалов, из которых изготовлены собираемые детали -  $\sigma, E, J$ .

Тогда величина шага установки БФУ -  $t_{БФУ}$  вдоль базируемых контуров собираемых деталей, удовлетворяющая условию 1, - есть функциональная зависимость множества перечисленных выше характеристик и параметров, влияющих на процесс сборки:

$$t_{БФУ} = F(\delta_{дет}, \delta_{ПР}, C_{пр-дет}, Q_{БФУ}, \sigma_e, E, J), \quad (5)$$

Раскрытие функционала (5) осуществлено на основании математического описания процесса базирования, фиксации (прижима) деталей при сборке и расфиксации собранного изделия. Полученная математическая модель позволяет находить оптимальное расположение БФУ, варьируя значения  $\delta_{дет}, \delta_{ПР}, C_{пр-дет}$  при условии неперевышения контактных напряжений  $\sigma_{кон}$  в собираемых деталях выше допустимых.

Для разработки модели прочностных расчетов конструктивных элементов СП, удовлетворяющих условиям 2 и 3, необходим учет следующих параметров и характеристик: геометрической схемы СП (однобалочная, двухбалочная, многобалочная и места установки опорных колонн -  $L_{ПР}, H_k, L_k$ , характеристик силового нагружения конструктивных элементов СП в процессе сборки (сосредоточенные силы  $P$ , распределенные нагрузки  $q$ , изгибающие  $M_{изг}$  и крутящие моменты  $M_{кр}$ ); механических характеристик материалов, из которых будут изготовлены элементы СП -  $\sigma, E$ , а также геометрических характеристик сечений балок и колонн (статический момент инерции  $S_{ст}$ , момент сопротивления изгибу  $W$ , осевой момент инерции  $J$  и др.).

В этом случае функционал множества перечисленных параметров и характеристик позволит рассчитать значения прочности  $\sigma_{расч}$  и жесткости  $Z_{расч}$  элементов конструкции СП, удовлетворяющих условиям 2 и 3

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{расч} \\ Z_{расч} \end{matrix} \right\} = F(L_{ст}, H_k, l_k, P, M_{изг}, M_{кр}, Q_{пер}, J, S, W). \quad (6)$$

Раскрытие функционала (6) и математическое описание модели нахождения искомых  $\sigma_{расч}$  и  $Z_{расч}$  осуществлены для типовых схем нагружения балок, колонн и других элементов СП с использованием методов классической теории механики деформируемых твердых тел [7].

Модели расчета точности изготовления СП, удовлетворяющих условию 4, разработаны на основании методов классической теории размерных цепей [8,9] с учетом особенностей самолетостроительного производства. Главная особенность переноса информации о геометрических параметрах форм и размеров при изготовлении деталей планера ЛА (в том числе и СП) состояла в учете использования в авиастроении специфического способа – **исключительно путем копирования** с помощью жестких носителей (теоретических и конструктивных плазов, плоских шаблонов, объемных эталонов и макетов) так называемым методом многократного переноса форм и размеров. На каждом этапе копирования неизбежно возникает дополнительная погрешность  $\delta_i$  и в конечном счете результирующий размер (замыкающее звено размерной цепи) определяется как сумма накопленных погрешностей на всех этапах:

$$\delta_{зам} = F \left( \sum_{i=1}^n \delta_i \right). \quad (7)$$

Раскрытие функционала (7) проведено для основных схем увязки форм и размеров (с использованием плоских эталонов, объемных макетов и эталонов) и для основных методов сборки. Построенные модели размерных цепей позволяют выбирать такие средства копирования форм и размеров, которые обеспечивают выполнение условий точности 4.

В результате для полученных моделей разработаны синтезированные алгоритмы и ядро информационной технологии автоматизированного программного комплекса (ИПК) [12].

Программное обеспечение ИПК представляет собой исполняемое приложение, адаптированное к запуску в консольном режиме на выбранной аппаратно-программной платформе.

Анализ 39 существующих систем CAD/CAM/CAE показал, что для нашего случая решения задачи в автоматизированном режиме по предложенным моделям и методам рационально использовать в проектируемом ИПК:

- в качестве аппаратного средства – процессор Pentium Core Duo – 1,6 ГГц, с оперативной памятью 512 Мб, видеопамятью – 64 Мб;
- среди доступных операционных систем при проектировании сборочной оснастки – операционная система Windows XP;
- для выбранной операционной системы Windows XP лучшим инструментальным средством следует признать Microsoft Visual Studio 2005;
- лучшей технологией доступа к базе данных при использовании Microsoft является модернизированная технология Active Data Objects (ADO) для платформы NET.

На основании этого выбора спроектированы интегрированная система автоматизированного проектирования СП, т.е. архитектура системы в целом, и модули, которые выполняют функции автоматизации СП: основной модуль – Programs.cs, модуль описания модели предметной области – Data Models.cs, модуль правил отображения в графических компонентах диалоговых форм – Data View.cs, модуль контроля функционирования модели предметной области – Data Controllers.cs, модуль автоматизированного проектирования СП – Evaluate.cs,

модуль основных классов, используемых для организации графического интерфейса с пользователем – Forms.cs.

Результаты тестовых проверок ИПК проектирования СП на контрольных примерах дали корректные результаты расчетов для анализа и принятия решений конструктору-пользователю по формированию аналитического облика СП и дальнейшей разработке рабочей конструкторской документации.

### Список литературы

1. Бабушкин А.А. Автоматизированное проектирование стапельно-сборочной оснастки // Новые технологии в машиностроении (по материалам международной конференции). – Х.: ХАИ, 1994. – С 155 – 157.
2. Бабушкин А.А., Пименов В.П. Разработка базы данных для проектирования стапельно-сборочной оснастки с помощью ПЭВМ // Новые технологии в машиностроении (по материалам международной конференции). – Х.: ХАИ, 1994. С 133 – 135.
3. Бабушкин А.И., Бабушкин А.А. Влияние конструктивно-технологических особенностей ЛА на выбор принципиальных схем сборочных приспособлений // Труды Харьковского авиационного института. – Х.: ХАИ, 1995. – С. 321 – 327.
4. Бабушкин А.А. Концепция автоматизированного проектирования специальных сборочных приспособлений в самолетостроении // Труды Харьковского авиационного института. – Х.: ХАИ. 1998. – С. 47 – 48.
5. Бабушкин А.А. Методологические подходы при создании САПР сборочных приспособлений в самолетостроении // Труды Харьковского авиационного института «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии». – Х.: ХАИ. 1999. – С. 225 – 232.
6. Четвериков В.Н., Ревунов Г.И., Самохвалов Э.Н. Базы и банки данных: Учебник. – М.: Высш.шк., 1987. – 248 с.
7. Тимошенко С.П., Дж.Гере. Механика материалов. – М.: Мир, 1976. – 669 с.
8. Иваненко И.А. Технологические размерные расчеты и способы их автоматизации. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.
9. Цепи размерные. Методы расчета плоских цепей. ГОСТ 16320 – 70. – М.: Машиностроение, 1985. – 298 с.
10. Вирт Н. Алгоритмы и структура данных / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 360 с.
11. Ван Тассел Д. Сталь, разработка, эффективность, отладка и испытание программ / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 332 с.
12. Бабушкин А.А. Модели и средства автоматизации проектирования сборочных приспособлений в технологической подготовке производства летательных аппаратов: Магист. дис-ция. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2007.

## **Метод исследования характеристик контактного взаимодействия твердотельных элементов конструкций с помощью системы MSC.NASTRAN**

*Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова,  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Во многих конструкциях самолетов закрылки и предкрылки выдвигаются путем движения роликов каретки по направляющим рельсам. При этом работоспособность механизмов определяется характеристиками напряженно – деформированного состояния контактирующих деталей. Такие контактные задачи широко распространены в инженерной практике и требуют особого внимания вследствие возникновения сложного напряженно-деформированного состояния в зоне контакта. В настоящее время имеется некоторый объем теоретических решений, позволяющих провести проектировочный расчет контактного взаимодействия [1,4]. Однако многообразие условий контактирования и взаимных смещений поверхностей, находящихся в силовом взаимодействии, не позволяет воспользоваться имеющимися теоретическими решениями. Тем не менее вследствие глобальной компьютеризации появилась возможность внедрить новые методы прочностных расчетов при контактном взаимодействии на базе метода конечных элементов. Такие методы можно рассматривать как универсальное средство анализа конструкций.

Целью данной работы является исследование средств программного пакета MSC.NASTRAN и разработка рекомендаций для расчета контактных задач методом конечно-элементного анализа.

Данный программный пакет предоставляет широкую типологию элементов для создания конечно-элементной модели конструкции [2,3]. Контактное взаимодействие моделируется двумя типами элементов – Slide Line и GAP, причем каждый из них обладает своей спецификой задания и осуществления контакта.

Элемент Slide Line позволяет моделировать контактное взаимодействие деформируемых тел вдоль линии, при этом все контактные сегменты должны лежать в плоскости XY локальной системы координат, и контакт должен осуществляться в данной плоскости, что вызывает определенные трудности при моделировании и расчете объемных несимметричных элементов конструкции.

GAP элемент моделирует нелинейную связь между двумя узлами в системе координат элемента. Построение GAP элемента аналогично построению линейного, в частности балочного элемента, что обеспечивает относительную простоту в моделировании контактного взаимодействия. Жесткости выбирают таким образом, чтобы избежать проникновения тел и создать условия скольжения (статического трения) между двумя контактирующими точками [5]. Элемент типа GAP наиболее приемлем при моделировании различного рода контактного взаимодействия.

Рассмотрим контактную задачу на примере взаимодействия цилиндра и плиты со следующими геометрическими параметрами:  $D = 100\text{мм}$  - диаметр цилиндра;  $L = 2\text{мм}$  - толщина цилиндра и соответственно длина контактной

площадки;  $E_1 = 72000 \text{ МПа}$ ,  $\mu_1 = 0,33$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала цилиндра соответственно;  $E_2 = 210000 \text{ МПа}$ ,  $\mu_2 = 0,3$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона материала плиты соответственно (рис.1). Приложим распределенную сжимающую нагрузку величиной  $q = 250 \text{ кН/м}$ .

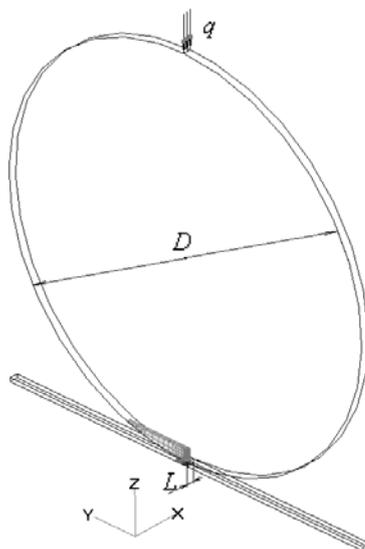


Рис. 1. Геометрические параметры контактной задачи

В данном случае первоначальное касание происходит по прямой, и площадка контакта под нагрузкой имеет форму прямоугольника. Распределение давлений по площадке контакта показано на рис.2.

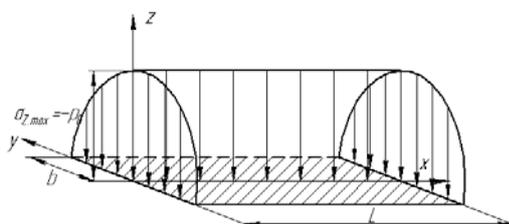


Рис. 2. Распределение давлений по площадке контакта цилиндра и плиты

На основе теоретических выкладок [1] можно определить полуширину контактной площадки и величину контактного давления.

$$b = \sqrt{\frac{qD}{\pi} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)} = \sqrt{\frac{250000 \cdot 0,1}{\pi} \left( \frac{1-0,33^2}{72000} + \frac{1-0,3^2}{210000} \right)} = 0,52 \text{ мм} \quad - \text{ полуширина}$$

контактной площадки;  $p_0 = \frac{2q}{\pi b} = \frac{2 \cdot 250000}{\pi \cdot 0,52 \cdot 10^{-3}} = 306,2 \text{ МПа}$  - давление на единицу площади контакта.

Соответственно максимальное нормальное напряжение вдоль оси Z составит  $\sigma_z = -p_0 = -306,2 \text{ МПа}$

На рис. 3 изображены теоретические графики изменения нормальных и касательных напряжений по глубине цилиндра вдоль оси Z [1]. Данные зависимости получены при следующих допущениях:

- а) поведение материала соприкасающихся деталей в зонах контакта подчиняется закону Гука, материал однороден и изотропен;
- б) линейные размеры площадки контакта малы по сравнению с радиусами кривизны соприкасающихся поверхностей ;
- в) силы давления, распределенные по поверхностям контакта, нормальны к этим поверхностям;
- г) силы трения отсутствуют;
- д) контактирующие детали имеют бесконечную длину.

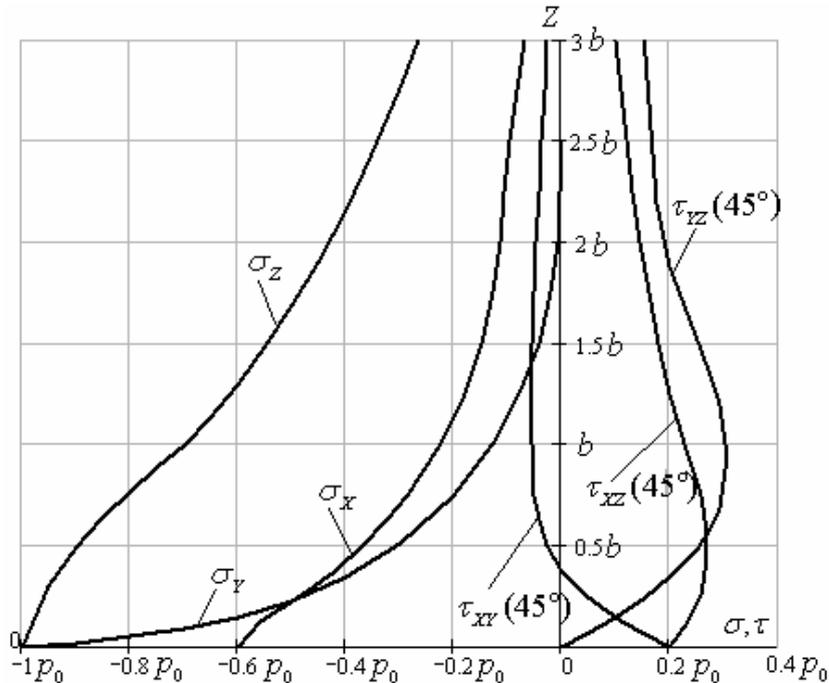


Рис. 3. Распределение напряжений вдоль оси Z

В поверхностном слое максимальное значение касательного напряжения составляет  $\sim 0,2p_0$  в центре полоски контакта. Наибольшей величины  $0,3p_0$  касательное напряжение достигает на глубине  $0,768b$  на площадках, наклоненных к оси Z под углом  $45^\circ$ . Нормальные напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  уменьшаются по мере удаления вглубь от поверхности контакта, причем  $\sigma_z$  уменьшается значительно медленнее, чем  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , и на глубине  $z=b$  составляет  $\sim 0,7p_0$ , а на глубине  $z=2b$  - около  $0,4p_0$ . На поверхности нормальные напряжения  $\sigma_y$  и  $\sigma_z$  совпадают по абсолютной величине, а касательные  $\tau_{yz}=0$ . Касательные напряжения  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{xz}$  на поверхности в центре полоски различны по знаку и равны по величине.

Проведем сравнительный анализ теоретических положений и результатов решения данной задачи методом конечных элементов при определении напряжения  $\sigma_z$  по глубине цилиндра для различного качества сетки. Для этого построим несколько конечно-элементных моделей со следующими геометрическими параметрами: размер элементов по ширине предполагаемой зоны контакта – 0,2; 0,1; и 0,05 мм; размер элементов по длине контакта – 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05 и 0,025 мм.

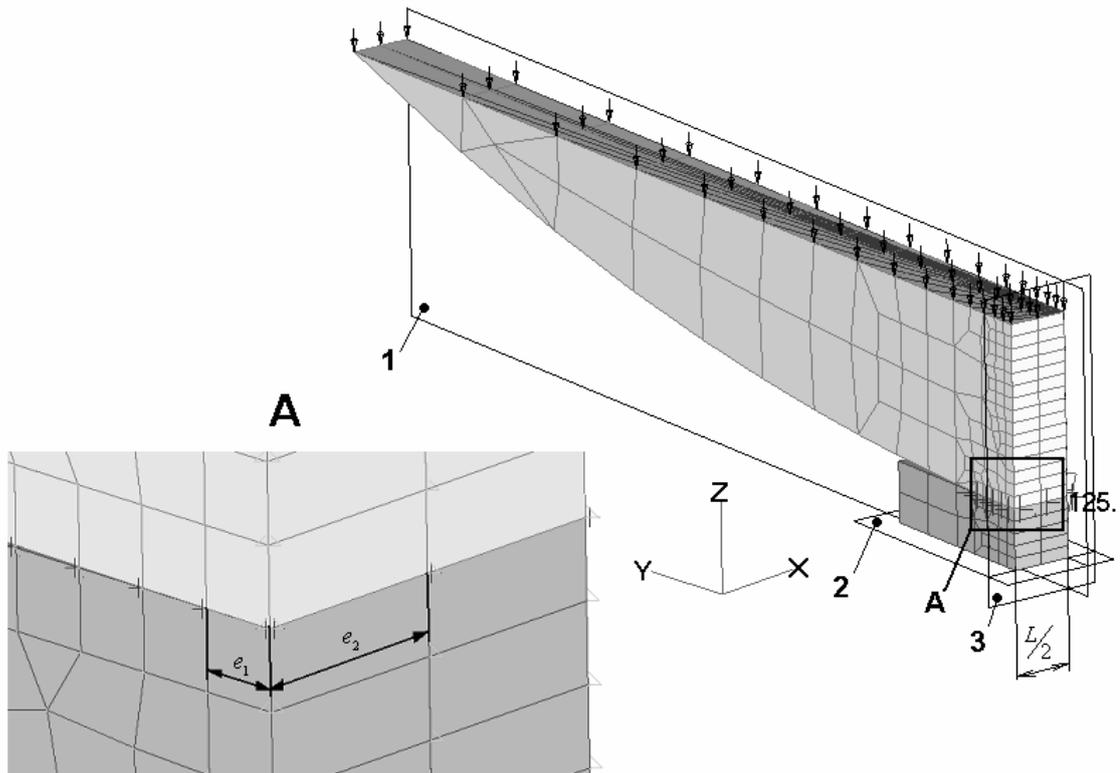


Рис. 4. Конечно – элементная модель:  $e_1$  - размер элемента по ширине контакта;  $e_2$  - размер элемента по длине контакта

Задачу в силу симметрии будем решать для 1/4 части цилиндра. Вследствие этого граничные условия будут следующими: в узлах плоскости ZX запрещены перемещения вдоль оси Y (плоскость 3); в узлах одной из плоскостей YZ запрещены перемещения вдоль оси X (плоскость 1); узлы нижней XY поверхности плиты зафиксированы по всем степеням свободы (плоскость 2); нагрузка прикладывается в виде сосредоточенной силы, распределенной с помощью RIGID-элемента по верхней XY-поверхности цилиндра и составляет  $P = \frac{L \cdot q}{4} = \frac{0,002 \cdot 250000}{4} = 125 \text{ кН}$  (рис.4).

Распределение напряжения  $\sigma_z$  по глубине контакта для моделей с различными геометрическими параметрами показаны на рис.6-8.

По результатам конечно-элементного анализа очевидно следующее:

- 1) варьирование максимального значения  $\sigma_z$  на поверхности контакта составляет до 7% от теоретического;
- 2) детализация сетки по ширине контактной площадки приводит максимальное значение  $\sigma_z$  на поверхности контакта к величине в 321..324 МПа (рис.5);
- 3) расчет модели с одним элементом по длине контакта дает заниженный результат, анализ данной модели некорректен;
- 4) общая картина распределения напряжения  $\sigma_z$  по глубине контакта наиболее точный вид имеет при расчете моделей с размером элемента по длине контактной площадки, равным  $e_2 = 0,025..0,5 \text{ мм}$ .

Из этого следует, что качество сетки удовлетворительно при соотношении  $\frac{e_1}{b} \approx 20\%$  и количестве элементов по длине контактной площадки, равном 6–10.

Дальнейшее измельчение сетки не целесообразно, так как получаемые результаты не отличаются значительной точностью, а создание модели и ее расчет требуют большего количества времени и ресурсов вычислительной техники.

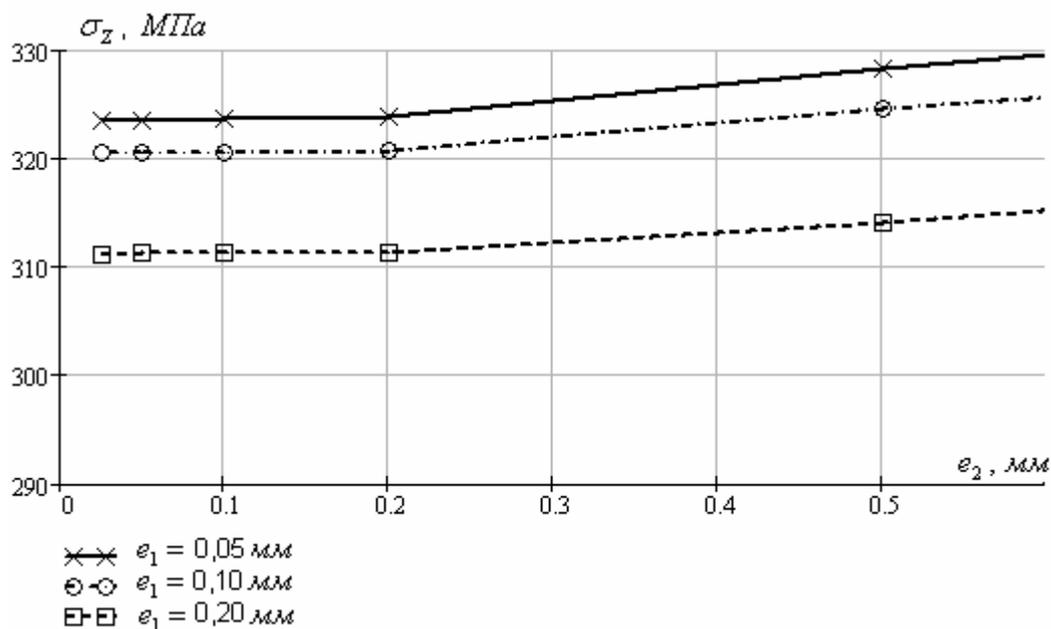


Рис.5. Влияние детализации сетки на максимальное значение  $\sigma_z$

Так как теоретические положения приводились для контактируемых тел, имеющих бесконечную длину, проведем сравнительный анализ теоретических значений распределения нормальных и касательных напряжений по глубине контакта и результатов расчета конечно-элементной модели в зависимости от длины контактируемых тел для  $L_1$ , равной 1мм, 10мм и 100мм. Размеры контактирующих элементов выберем с учетом предыдущего анализа:  $e_1 = 0,10$ мм и  $e_2 = 0,50$ мм. Результаты НДС показаны на рис.9.

Из данных результатов следует:

- 1) удовлетворительное совпадение распределения нормальных напряжений с теоретическими данными при соотношении  $L/D > 10\%$ ;
- 2) теоретические касательные напряжения завышены по сравнению с результатами конечно-элементного анализа до 30%;
- 3) точки максимальных касательных напряжений находятся немного ближе к поверхности, чем по теоретическим данным.

Данные несоответствия с теорией объясняются недостаточной точностью теоретических значений, допущениями, принятыми при теоретическом расчете, а также неточностью определения ширины контактной площадки при конечно-элементном анализе.

На основе на полученных результатов, предлагается следующая методика расчета контактных напряжений для твердотельных конструкций:

1. Разбиение геометрических моделей по поверхности конечными элементами типа PLOT ONLY таким образом, чтобы контактирующие узлы находились на линии передачи нагрузки.
2. Определение зазора между контактирующими узлами.
3. Построение локальных систем координат для каждой линии передачи нагрузки.
4. Задание материалов и свойств деталей, задание свойств GAP элементов по каждой линии передачи нагрузки с выбором соответствующей локальной системы координат. Рекомендуемое значение для параметра Max Penetration 1/10000 – максимального габаритного размера конструкции [5].
5. Разбиение геометрических моделей пространственными элементами с использованием поверхностной сетки.
6. Построение GAP элементов по контактирующим узлам с назначением соответствующих свойств.
7. Задание граничных условий и приложение внешних нагрузок.
8. Задание параметров нелинейного анализа. Рекомендуемый метод расчета – Полный Ньютона-Рафсона.
9. Расчет и анализ результатов.

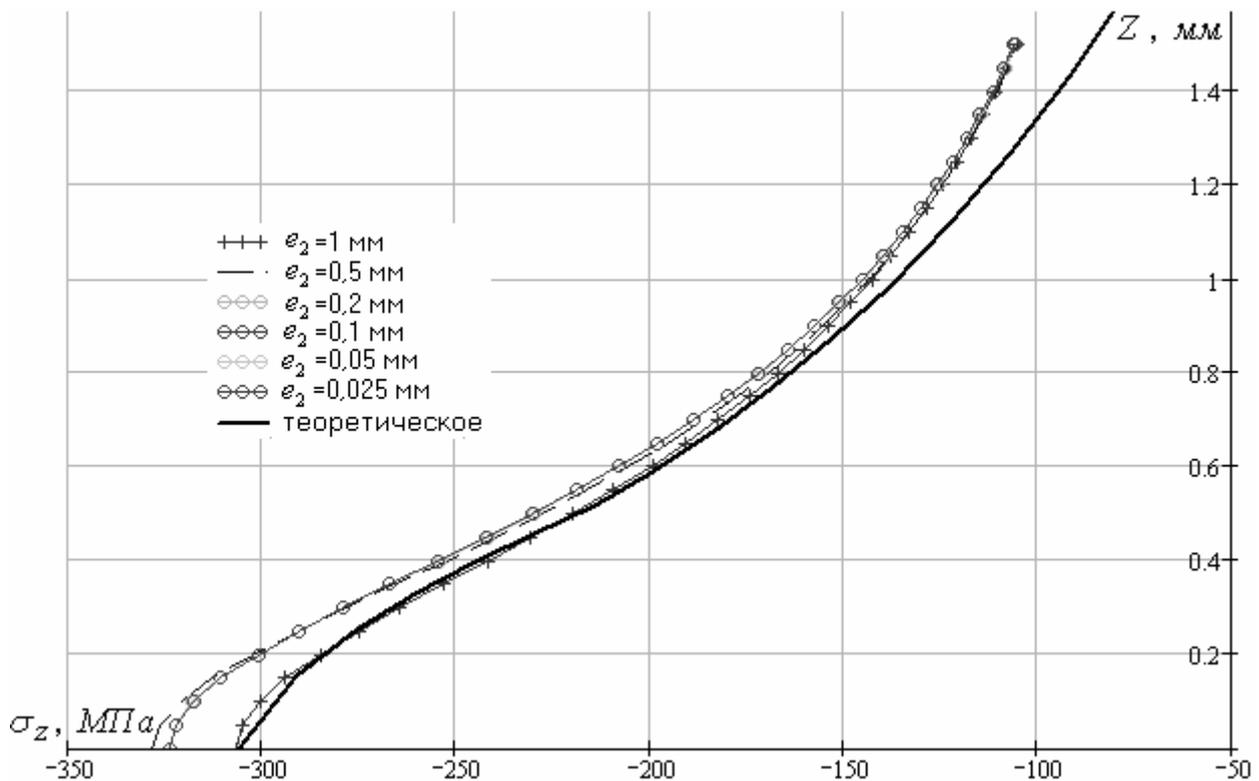


Рис.6. Распределение нормального напряжения  $\sigma_z$  вдоль оси Z при

$$e_1 = 0,05 \text{ мм}$$

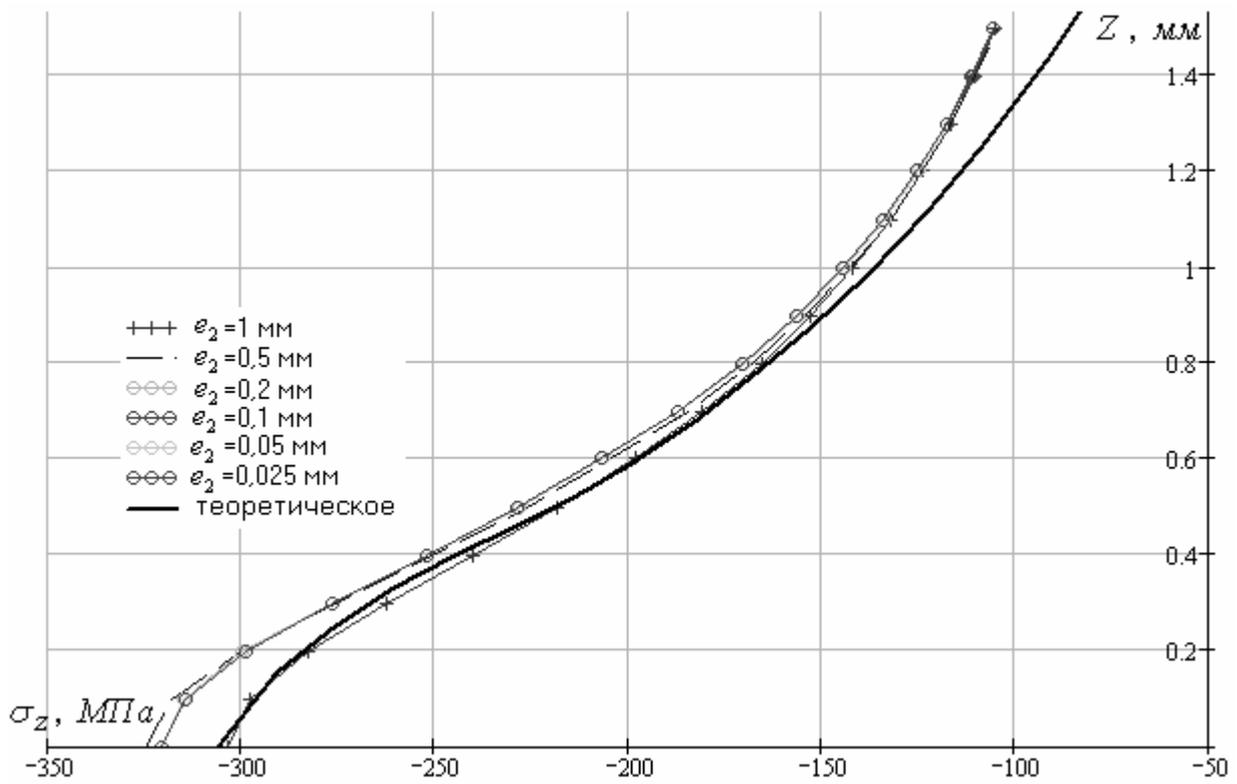


Рис. 7. Распределение нормального напряжения  $\sigma_z$  вдоль оси Z при  $e_1 = 0,10$  мм

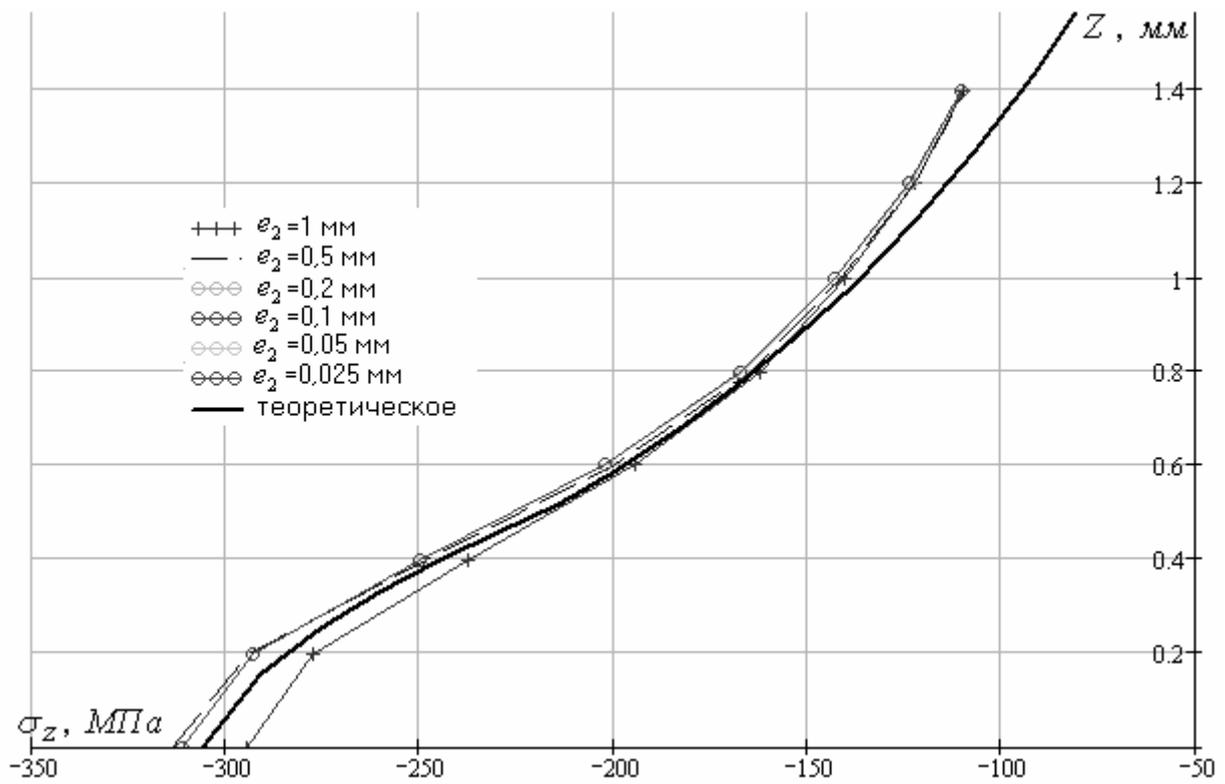


Рис. 8. Распределение нормального напряжения  $\sigma_z$  вдоль оси Z при  $e_1 = 0,20$  мм

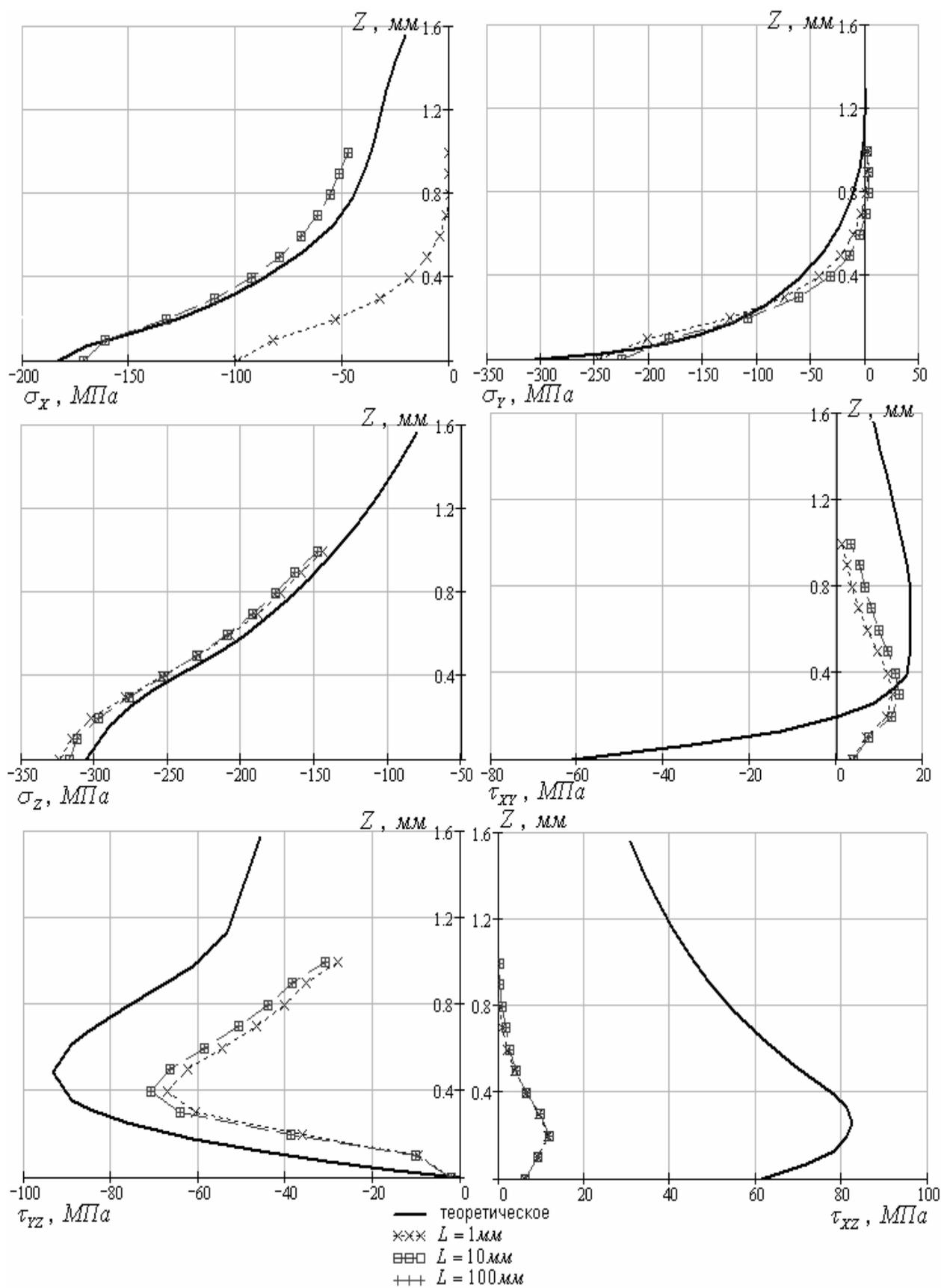


Рис. 9. Распределение напряжений вдоль оси Z

## **Выводы**

1. Проанализированы возможности программного пакета MSC.NASTRAN по расчету задач контактного взаимодействия методом конечных элементов.
2. Разработана методика определения контактных напряжений для твердотельных конструкций.

## **Список литературы**

1. Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969. – 242 с.
2. Рычков С.П. MSC.visualNastran для Windows. – М.:ИТ Пресс, 2004 – 552 с.
3. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2003. – 448 с.
4. Справочник машиностроителя / Ачеркан Н.С., Вукалович М.П., Кудрявцев В.Н. и др. – М.: Машгиз, 1962. – 654 с.
5. Высотский А.В. Нелинейный контактный анализ сборной конструкции ротора с учетом предварительного стягивающего усилия с использованием GAP элемента системе MSC.Nastran. Руководство пользователя. – М. 2003. – 48 с.

## **Экспериментальное исследование влияния последовательного упрочнения пластин в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на их усталостную долговечность**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
ОАО Украинский научно-исследовательский институт  
авиационных технологий*

Крылья современных самолетов транспортной категории, как правило, имеют кессонную конструкцию. Внутри кессона размещают топливные баки-кессоны. Для уменьшения невырабатываемого и несливаемого остатков топлива в баках-кессонах в вертикальных полках стрингерного набора нижних панелей выполняют отверстия для перетекания топлива [1].

Как показывает практика ресурсных испытаний, эти отверстия являются очагами усталостных трещин и во многих случаях ограничивают ресурс конструкции крыла. Вид таких разрушений носит многоочаговый характер с частичным или полным разрушением многих ребер, часто без выхода усталостных трещин на внешнюю поверхность обшивки крыла. Поэтому задача разработки надежного способа повышения выносливости зон конструкции с нерегулярностями типа отверстий для перетекания топлива и дренажа до уровня выносливости регулярных зон нижних панелей крыла приобрела большую актуальность [1, 2, 3].

В работах [4, 5] приведены методы упрочнения пластин с одним отверстием – раскаткой, дорнованием и глубоким пластическим деформированием, однако в элементах конструкций самолетов применяют и групповые отверстия. Поэтому вопрос влияния различных методов упрочнения и их комбинаций на долговечность пластин с группой отверстий требует проведения численных и экспериментальных исследований.

В данной работе предложены два комбинированных метода повышения усталостной долговечности пластин с отверстиями:

- последовательное применение раскатки и барьерного обжатия;
- последовательное применение дорнования и барьерного обжатия.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований, связанных с определением влияния последовательного упрочнения пластины с тремя отверстиями диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм) в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на характеристики их усталостной долговечности.

В рамках решения данной задачи, а также получения коэффициентов увеличения долговечности необходимо было провести также экспериментальные исследования характеристик усталостной долговечности базовых образцов – пластины с одним отверстием и пластины с тремя неупрочненными отверстиями.

Для экспериментальных исследований по определению характеристик усталостной долговечности разработаны стандартные образцы: пластина с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) (рис. 1), пластина с тремя отверстиями диаметром 8 мм

(расстояние между центрами отверстий – 12 мм), неупрочненная (рис. 2) и упрочненная (рис. 3) в зоне отверстий. Для устранения заусенцев, получаемых после сверления отверстий, на всех отверстиях снята фаска размером  $0,5 \times 45^\circ$ . Толщина образца пластины – 4,5 мм.

Форма и размеры образца для проведения испытаний разработаны в соответствии с ГОСТ 25.502-79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов: Методы испытания на усталость».

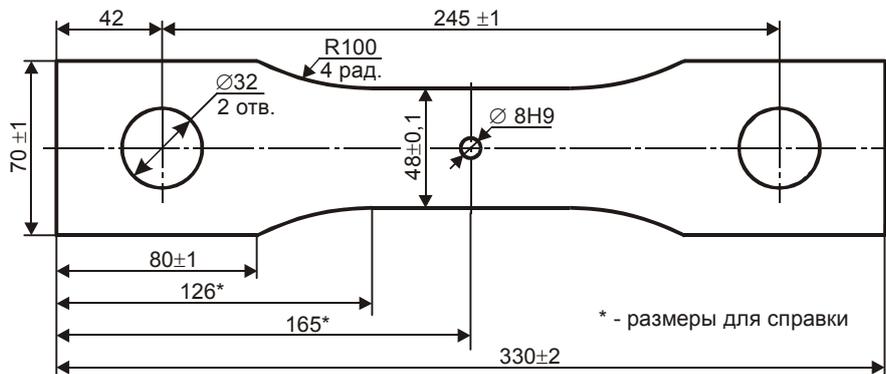


Рис. 1. Пластина с одним отверстием  $\varnothing 8$  мм

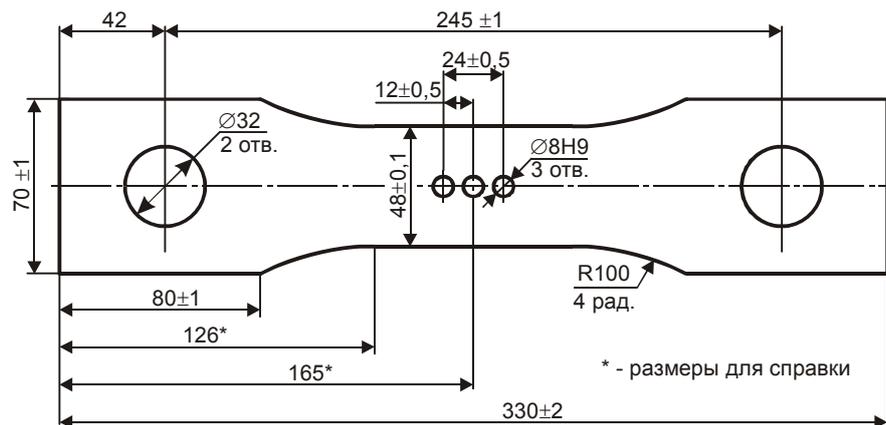


Рис. 2. Пластина с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм

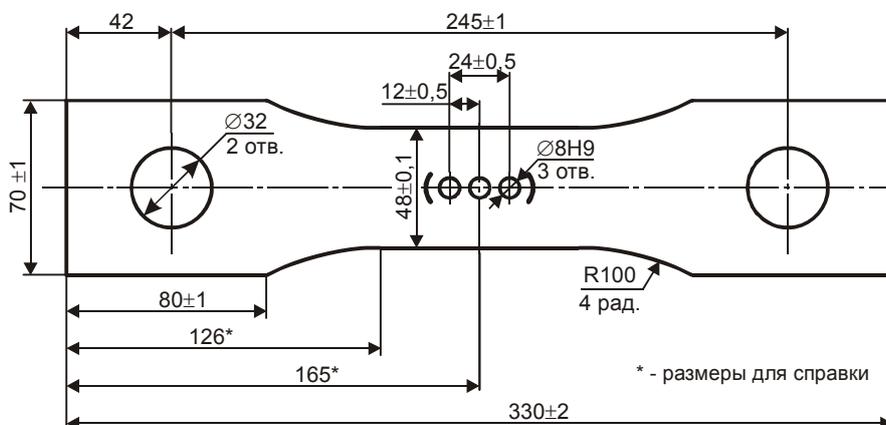


Рис. 3. Пластина с тремя отверстиями  $\varnothing 8$  мм, упрочненная в зоне отверстий

Заготовки образцов для проведения усталостных испытаний пластин с отверстиями были изготовлены в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» из прессованного швеллера (материал Д16Т) путем механического фрезерования по контуру.

Отверстия в неупрочненных пластинах выполнялись в ХАИ. Отверстия, упрочнение стенок отверстий раскаткой и дорнованием, барьерное обжатие пластин в зоне отверстий в виде лунок сегментной конфигурации выполнялись в ОАО УкрНИИАТ.

Для проведения усталостных испытаний были подготовлены следующие образцы:

- пластина с одним отверстием, не упрочненная в зоне отверстия (рис. 4);
- пластина с тремя отверстиями, не упрочненная в зоне отверстий (рис. 5);
- пластина с тремя отверстиями, упрочненная в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации;
- пластина с тремя отверстиями, упрочненная в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерным обжатием в виде лунок сегментной конфигурации (рис. 6).



Рис. 4. Пластина с одним неупрочненным отверстием

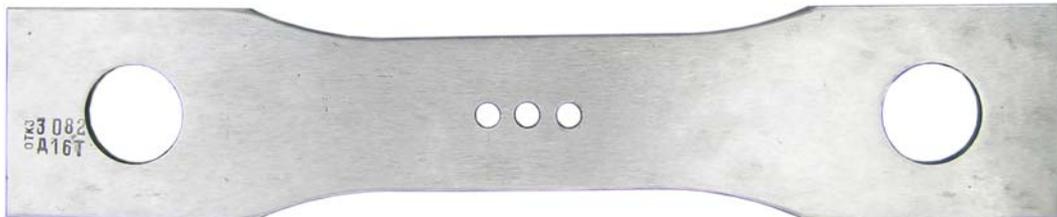


Рис. 5. Пластина с тремя неупрочненными отверстиями



Рис. 6. Пластина с тремя отверстиями, упрочненная в зоне отверстий

Испытания образцов пластин с отверстиями проведены на электромеханической машине УММ-02 (рис. 7) в проблемной научно-исследовательской лаборатории «Прочность» Национального аэрокосмического университета

им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». В испытательной машине УММ-02 образцы пластин нагружали одноосными переменными циклическими нагрузками. Частота нагружения составляла 12 Гц.



Рис. 7. Машина для проведения усталостных испытаний УММ-02

Образцы пластин испытывали на уровне циклического нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа.

На данном уровне нагружения было испытано три образца пластин с одним отверстием. Усталостное разрушение происходило в сечении по оси отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 1. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 8.

Таблица 1

Результаты усталостных испытаний пластин с одним отверстием при

$$\sigma_{\text{бр max}}^0 = 150 \text{ МПа} (\sigma_{\text{бр min}} = 0 \text{ МПа}, \sigma_{\text{бр max}} = 150 \text{ МПа})$$

Номер образца	Марка сплава	Истинные размеры пластины, мм		$\sigma_{\text{бр max}}^0$ , МПа	<b>N</b> , кол. циклов
		B	$\delta$		
1-1	Д16Т	47,8	4,55	150	40 000
1-2		47,6	4,54	150	48 000
1-3		48,2	4,55	150	69 000
Среднее значение					<b>52 000</b>

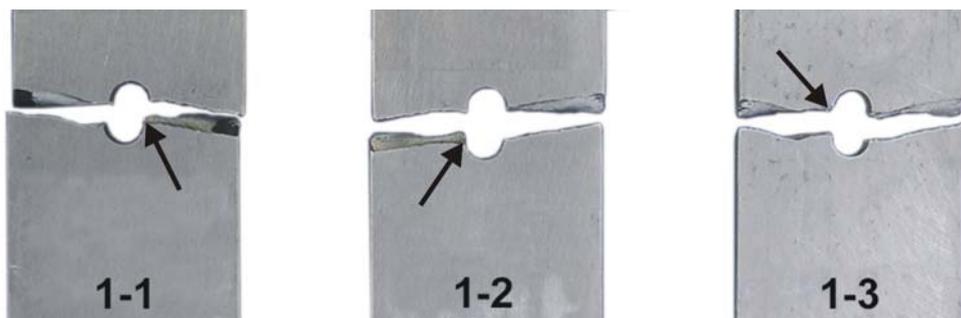


Рис. 8. Характер усталостного разрушения образцов пластин с одним отверстием ( $B/d = 48/8 = 6$ ) из прессованного профиля (материал Д16Т) на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа:  $\longrightarrow$  – зона начала усталостного разрушения

На данном уровне нагружения было испытано три образца пластин с тремя отверстиями, не упрочненных в зоне отверстий. Усталостное разрушение происходило в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникало в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 2. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 9.

Таблица 2

Результаты усталостных испытаний пластин с тремя неупрочненными отверстиями при  $\sigma_{\text{бр max}}^0 = 150$  МПа ( $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа)

Номер образца	Марка сплава	Истинные размеры пластины, мм		$\sigma_{\text{бр max}}^0$ , МПа	N, кол. циклов
		B	$\delta$		
2-1	Д16Т	48,2	4,5	150	80 000
2-2		47,3	4,56	150	104 000
2-3		46,9	4,47	150	118 700
Среднее значение					<b>101 000</b>

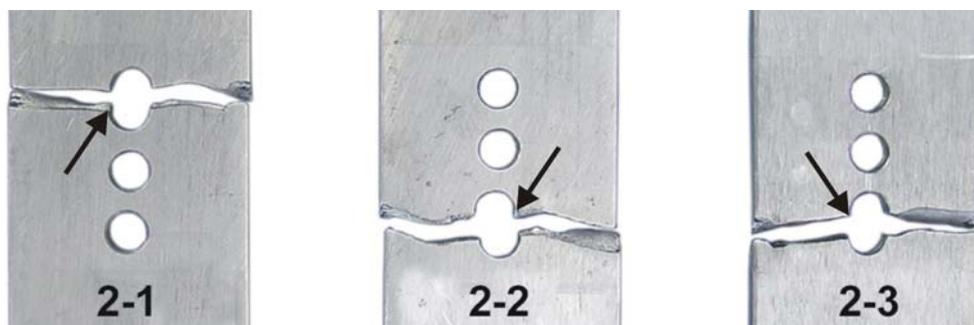


Рис. 9. Характер усталостного разрушения образцов пластин с тремя неупрочненными отверстиями ( $B/d = 48/8 = 6$ ) из прессованного профиля (материал Д16Т) на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа:

$\longrightarrow$  – зона начала усталостного разрушения

При упрочнении пластины в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерного обжата было испытано три образца: разрушение образца №3-1 происходило от поверхности образца в зоне крайнего отверстия, разрушение образца №3-2 – от поверхности образца в зоне крайнего отверстия и лунки сегментной конфигурации, разрушение образца №3-3 – от фреттинг-коррозии по захватам. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 3. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 10.

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний пластин с тремя отверстиями, упрочненных в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерного обжата в виде лунок сегментной конфигурации при  $\sigma_{\text{бр max}}^0 = 150$  МПа ( $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа)

Номер образца	Истинные размеры пластины, мм		Глубина лунки при барьерном обжате, мм	$\sigma_{\text{бр max}}^0$ , МПа	N, кол. циклов
	B	$\delta$			
3-1	48,2	4,54	0,34	150	670 000
3-2	47,5	4,54	0,32	150	449 000
3-3	48,1	4,37	0,32	150	763 000↑
Среднее значение					<b>627 000</b>

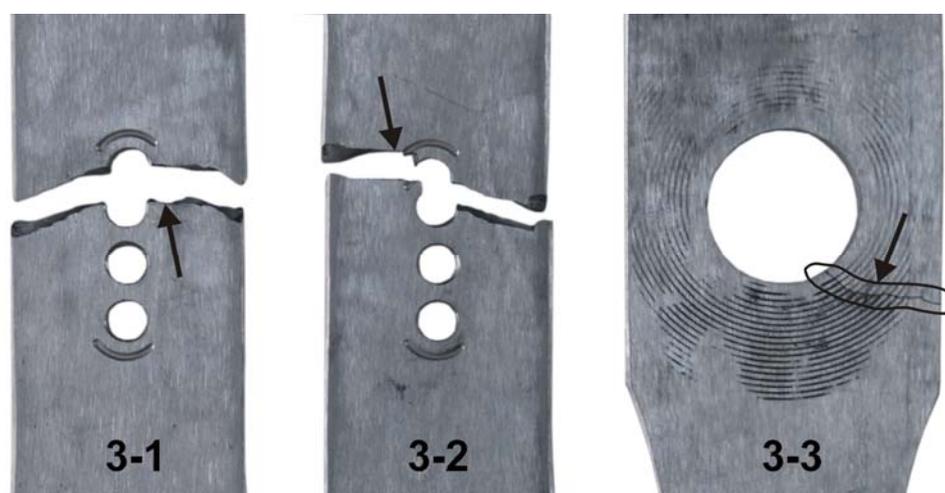


Рис. 10. Характер усталостного разрушения образцов пластин с тремя отверстиями, упрочнённых в зоне отверстий последовательным применением раскатки с относительным натягом 0,4% и барьерного обжата в виде лунок сегментной конфигурации из прессованного профиля (материал Д16Т)

на уровне нагружения  $\sigma_{\text{бр min}} = 0$  МПа,  $\sigma_{\text{бр max}} = 150$  МПа:

→ – зона начала усталостного разрушения

При упрочнении пластины в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерного обжатия было испытано три образца: разрушение образца №4-1 произошло от фреттинг-коррозии по захватам, разрушение образца №4-2 – от поверхности образца в зоне радиусного перехода, разрушение образца №4-3 – в сечении по оси крайнего отверстия, и оно возникло в зоне конического перехода фаски в цилиндрическую часть отверстия. Результаты усталостных испытаний образцов представлены в табл. 4. Зоны и характер усталостных разрушений исследованных образцов показаны на рис. 11.

Таблица 4

Результаты усталостных испытаний пластин с тремя отверстиями, упрочненных в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации при  $\sigma_{бр\ max}^0 = 150$  МПа ( $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа)

Номер образца	Истинные размеры пластины, мм		Глубина лунки при барьерном обжатии, мм	$\sigma_{бр\ max}^0$ , МПа	N, кол. циклов
	B	$\delta$			
4-1	47,6	4,39	0,29	150	1 539 000↑
4-2	47,8	4,36	0,31	150	753 000↑
4-3	48,0	4,40	0,32	150	1 115 000
Среднее значение					<b>1 136 000</b>



Рис. 11. Характер усталостного разрушения образцов пластин с тремя отверстиями, упрочнённых в зоне отверстий последовательным применением дорнования с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации из прессованного профиля (материал Д16Т)

на уровне нагружения  $\sigma_{бр\ min} = 0$  МПа,  $\sigma_{бр\ max} = 150$  МПа:

→ – зона начала усталостного разрушения

На рис. 12. показаны номограммы влияния методов упрочнения на усталостную долговечность пластин с отверстиями.

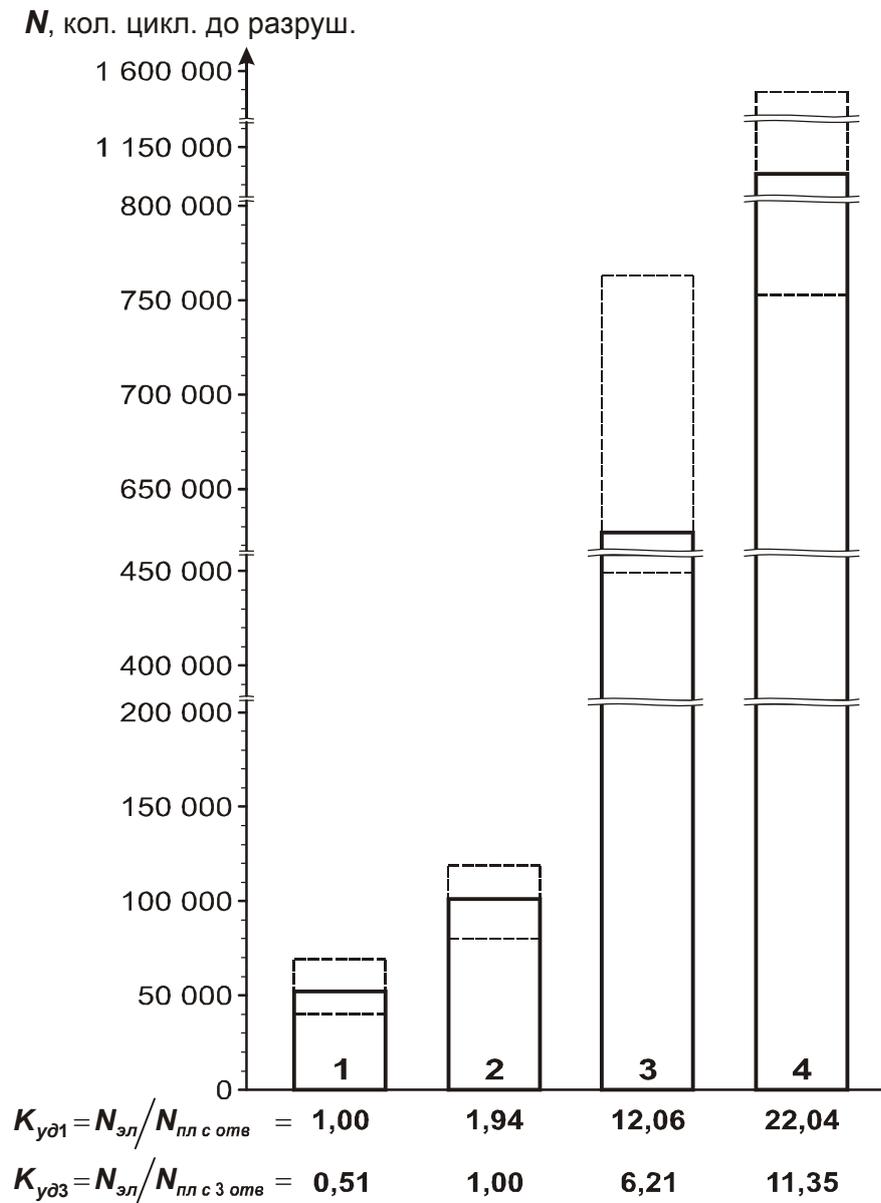


Рис. 12. Влияние количества отверстий, последовательного применения раскатки и барьерного обжатия, дорнования и барьерного обжатия на долговечность пластин с отверстиями при  $\sigma_{бр max}^0 = 150$  МПа:

- 1 - пластина с одним отверстием ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм из материала Д16Т;
- 2 - пластина с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), не упрочнённая в зоне отверстий;
- 3 - пластина с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), упрочнённая в зоне отверстий последовательным применением раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации;
- 4 - пластина с тремя отверстиями ( $B/d = 6$ ) диаметром 8 мм (расстояние между центрами отверстий – 12 мм), упрочнённая в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и методом барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации

В результате усталостных испытаний установлено:

- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с одним отверстием в 12,06 раза;
- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением раскатки стенок отверстий с относительным натягом 0,4% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с тремя неупрочненными отверстиями в 6,21 раза;
- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с одним отверстием в 22,04 раза;
- усталостная долговечность пластины с тремя отверстиями, упрочнённой в зоне отверстий последовательным применением дорнования стенок отверстий с относительным натягом 2% и барьерного обжатия в виде лунок сегментной конфигурации, выше усталостной долговечности пластины с тремя неупрочненными отверстиями в 11,35 раза.

Полученные результаты целесообразно применять при выборе методов упрочнения реальных конструкций планера самолета, при этом необходимо также проводить дальнейшие испытания на образцах, моделирующих участки панелей крыла.

### Список литературы

1. Сопrotивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
2. Экспериментальные исследования влияния конструктивных и технологических факторов на выносливость типовых элементов авиационных конструкций / Олькин Б.И., Гиванова Н.И., Родченко Т.С., Масюк А.М., Щеглова Н.И., Бартьенева Г.Ф. //Труды ЦАГИ. - 1980. - 86 с.
3. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива / В.П.Рычик, Е.А.Литвиненко, Н.Т.Остапенко, Е.Т.Василевский // Труды научно-технической конференции по выносливости и ресурсу авиационных конструкций (ноябрь 1976). Под ред. А.З. Воробьева и Н. Г. Белого.– С. 100-103.
4. Технология выполнения высокоресурсных соединений / Пширков В.Ф., Робаковский Я.Н., Тарасов А.С., Вильский В.А., Бурау И.В. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
5. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.

## Изучение биомеханического взаимодействия имплантатов и опорных тканей челюсти с применением метода конечных элементов

*Национальный аэрокосмический университет им. Жуковского "ХАИ"  
\*Карлов университет, Чехия*

### Введение

Имплантация является одним из основных методов ортопедической реконструкции в стоматологии. Его история насчитывает тысячелетия (рис. 1), но научное изучение метода начато в 60-х гг. [1], широкое клиническое применение – в 80-х гг. 20-го века. Эффективность дентальной имплантации в настоящее время составляет 80 % на верхней и 90 % на нижней челюсти [2].

Одной из основных составляющих столь высоких показателей является продолжающееся совершенствование конструкции имплантатов для обеспечения механического нагружения костных тканей, близкого к интактному (рис. 2-4), что способствует оптимальному течению восстановительных процессов и в значительной мере определяет эффективность дентальной имплантации.



Рис. 1 Часть морской раковины, установленной древнеегипетским стоматологом в челюсть для замены отсутствующего зуба [3]

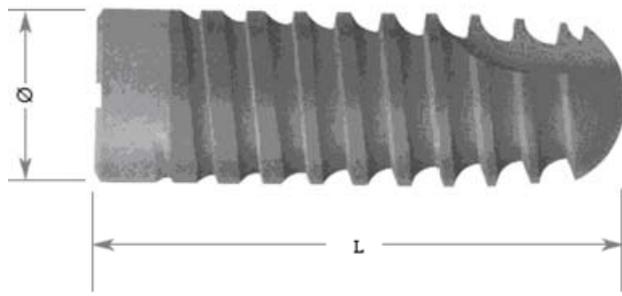


Рис. 2 Современные резьбовые имплантаты с навинченными абатментами



Рис. 3 Резьбовый имплантат, установленный в нижнюю челюсть

Решение актуальной задачи создания имплантата оптимальной формы в значительной степени определяется возможностями моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) дентальной системы (ДС) "имплантат-кость", основанного на численных методах исследования, в частности, применении для этих целей метода конечных элементов (МКЭ) [4-13]. МКЭ наиболее универсален с точки зрения моделирования разнообразной геометрии ДС, включения в расчет различных свойств материалов её составных частей, широты моделирования нагрузок и граничных условий [9-15]. Поскольку НДС в системе "имплантат-кость" сильно локализовано (рис. 5), а успех эксплуатации имплантата в конечном счете определяется уровнем напряжений, деформаций, а также контактных давлений на границе "имплантат-кость", точность моделирования НДС определяется уровнем адекватности конечноэлементной (КЭ) модели, разработанной для проведения



Ø \ L	8 mm	9.5 mm	11 mm	14 mm	17 mm
3.5 mm	A8	A9.5	A11	A14	A17
4.5 mm	B8	B9.5	B11	B14	B17
5.5 mm	C8	C9.5	C11	C14	C17
7.0 mm	D8*	D9.5*	D11*	D14*	

Рис. 4 Каталог резьбовых имплантатов типа Ankylos

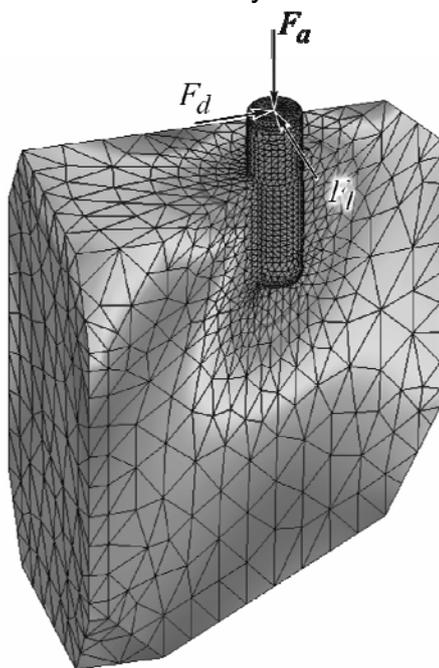


Рис. 5 Локализация НДС в зоне “цилиндрический имплантат – кортикальная кость” при вертикальном и боковом нагружении (нагрузки  $F_a = 114,0$  Н,  $F_d = 23,4$  Н,  $F_l = 17,3$  Н определены по методике [13])

таких исследований и апробированной на практике конкретных вычислительных процедур. При этом последние существенно ограничиваются ресурсами вычислительных систем.

Цель настоящего исследования – разработать и апробировать в исследованиях НДС трехмерную геометрическую и КЭ модель соединенного с костной тканью челюсти имплантата, которая позволила бы с высокой точностью моделировать локальное НДС в области контакта имплантата с костью на примере нижней челюсти в зоне моляра.

Поставленная цель включает прежде всего определение минимальной с точки зрения описания полноты локализации НДС длины участка кости (форма и максимальные размеры поперечного сечения нижней челюсти в этом месте взяты из практики и соответствуют строению зубов конкретного пациента [14, 15]). Важным является обоснование минимально необходимого числа КЭ, а также разработка системы выбора их вида и размеров, обеспечивающей экономию ресурсов ЭВМ. Большое влияние на результаты исследований оказывает также точность описания механических свойств материалов составных частей ДС, характеризующихся широким спектром значений (табл. 1 [15]), а также точность описания условий соединения имплантата с костью (т.н. остеоинтеграция).

Табл. 1. Свойства материалов, используемых в конечноэлементных исследованиях дентальных имплантатов [15]

Материал	Модуль упругости (МПа)	Коэффициент Пуассона	Автор
Кортикальная кость	2727	0.30	Rice et al <sup>18</sup>
	$1.0 \times 10^4$	0.30	Farah et al <sup>16</sup>
	$1.34 \times 10^4$	0.30	Cook et al <sup>19</sup>

	$1.5 \times 10^4$	0.30	Cowin <sup>20</sup>
Губчатая кость	150	0.30	Cowin <sup>20</sup>
	250	0.30	MacGregor et al <sup>17</sup>
	790	0.30	Knoell <sup>21</sup>
	$1.37 \times 10^3$	0.31	Borchers and Reichart <sup>22</sup>
Титановый сплав Ti-6Al-4V	$110 \times 10^3$	0.33	Colling <sup>23</sup>

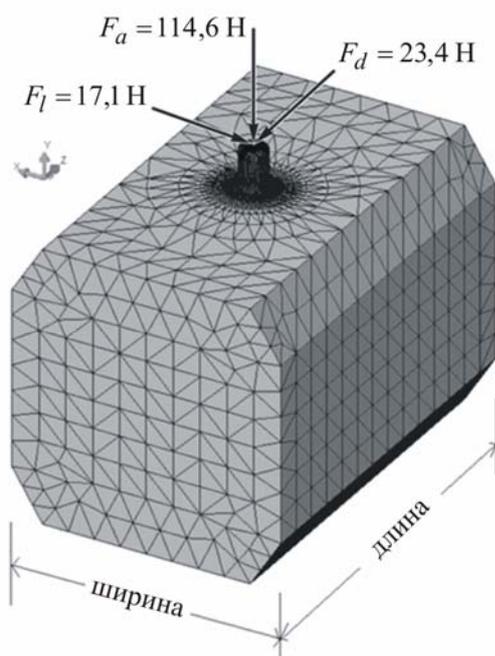


Рис. 6 Сетка КЭ на трехмерной модели элемента кости нижней челюсти с внедренным имплантом. Стрелками указаны действующие усилия 17,1 Н, 114,6 Н и 23,4 Н [24], приложенные в язычно-щечном, осевом и передне-заднем направлениях соответственно. Усилия приложены в центре имплантата на расстоянии 4,5 мм от верхней границы кости

## Материалы и методы исследования

Трехмерная твердотельная модель костной структуры с цилиндрическим остеоинтегрированным имплантом (рис. 6) была выбрана аналогичной [13]. Она была использована для создания трехмерной КЭ модели ДС с первоначальной базовой длиной  $l_0 = 20$  мм (количество КЭ – 387000). Показатели НДС (компоненты напряжений, деформаций, перемещений) вычисляли с применением МКЭ. Его суть [25, 26] состоит в том, что искомую непрерывную функцию, описывающую распределение по объему деформированного твердого тела (ДТТ) того или иного параметра НДС (перемещения, деформации, напряжения), аппроксимируют полиномами, представляющими собой множество кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами.

Точность численного решения определяется видом аппроксимирующей функции (например, степенью полинома), а также размером КЭ данного вида (например, тетраэдр). Чем качественнее аппроксимация внутри элемента (то есть выше степень аппроксимирующего полинома) и чем больше их количество, тем точнее кусочно-непрерывная

совокупность функций описывает искомую функцию распределения физической величины, характеризующей НДС (напряжение, деформация, перемещение).

Простейшим типом КЭ на плоскости является треугольный элемент (в пространстве – тетраэдр) с линейной аппроксимацией внутри него. При увеличении числа узлов в КЭ появляется возможность улучшить аппроксимацию за счет повышения степени аппроксимирующего полинома. Более того, увеличение числа узлов в КЭ позволяет изменять геометрические очертания элементов (вводить в рассмотрение КЭ с криволинейными границами) и улучшает сопряжение соседних элементов (на границе между элементами кусочно-непрерывные функции могут

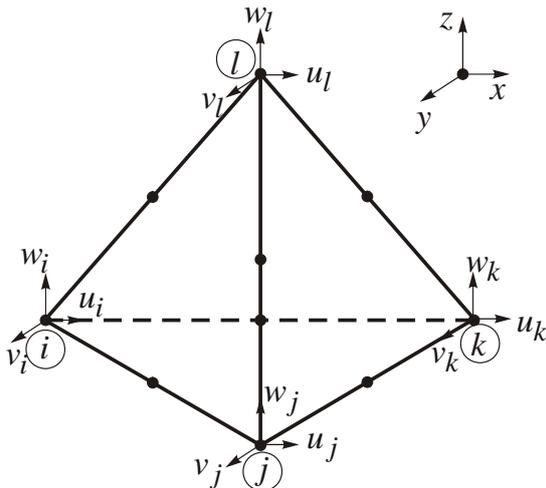


Рис. 7 Схема конечного элемента, используемого при дискретизации геометрической модели ДС “имплантат-кость” [26]

дискретизацию геометрической модели (3D) проводили с использованием симплекс-элемента (тетраэдр) (рис. 7) с параболической интерполяцией искомой функции перемещений  $u(x, y, z)$ ,  $v(x, y, z)$ ,  $w(x, y, z)$ , вычисляемых в вершинах тетраэдра и срединных точках его ребер, т. к. для аппроксимации функции внутри элемента использовались полиномы второй степени.

В исследованиях были использованы имплантаты в форме цилиндра с размерами, соответствующими каталогу фирмы Ankylos [27] – с диаметром 3,8 мм и длиной 14 мм.

В расчетной модели все материалы предполагались изотропными, однородными и линейно упругими, несмотря на имеющую место анизотропию кортикальной кости в продольном и поперечном направлениях [15]. Имплантат и фрагмент кости полагали жестко соединенными по всей поверхности их контакта (модель полной остеоинтеграции).

Механические свойства титанового имплантата и кортикальной (компактной) кости (предполагалось, что в настоящих исследованиях применима упрощенная физическая модель кости челюсти, состоящая исключительно из кортикальных клеток) были приняты аналогично [15]: титан: модуль продольной упругости  $E_T = 1,1 \times 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,35$ ; соответственно для кортикальной кости:  $E_k = 0,137 \times 10^5$  МПа,  $\mu = 0,30$ .

На результаты численного расчета НДС существенно влияет точность моделирования внешних нагрузок на имплантат. По величине и направлению они изменяются в широких пределах, а вектор суммарного окклюзионного усилия ориентирован относительно продольной оси имплантата произвольно. Согласно работе [28] наибольший по величине компонент окклюзионного нагружения действует в вертикальном направлении и по результатам измерений [29] колеблется от 77 до 2440 Н. Боковая (язычно-щечная) составляющая существенно ниже и не превышает 100 Н [29]. При использовании одиночного имплантата в качестве

иметь одинаковые значения производных, то есть искомая функция в случае параболической аппроксимации изменяется плавно, а при линейной – скачкообразно. Такой подход к улучшению качества получаемого решения приводит к усложнению (по сравнению с линейными элементами) алгоритма вычисления матрицы жесткости, т. к. при этом приходится проводить численную процедуру интегрирования, что одновременно приводит и к некоторому снижению точности вычислений. Этих же результатов можно достичь простым увеличением числа элементов, но более простых. Чаще всего вычислители идут по второму пути, учитывая постоянно растущие возможности процессоров. В настоящих исследованиях

опоры для дентального протеза появляется дополнительный изгибающий момент, достигающий 4 Н·м [30].

Наиболее точная модель внешних нагрузок должна включать совместное действие всех компонент окклюзионной нагрузки. В настоящих исследованиях использована наиболее полная система внешних нагрузок на имплантат, учитывающая наличие всех составляющих в пропорции, установленной экспериментально в [24]: вертикальная  $F_a = 114,6$  Н, язычно-щечная  $F_l = 17,1$  Н, передне-задняя  $F_d = 23,4$  Н.

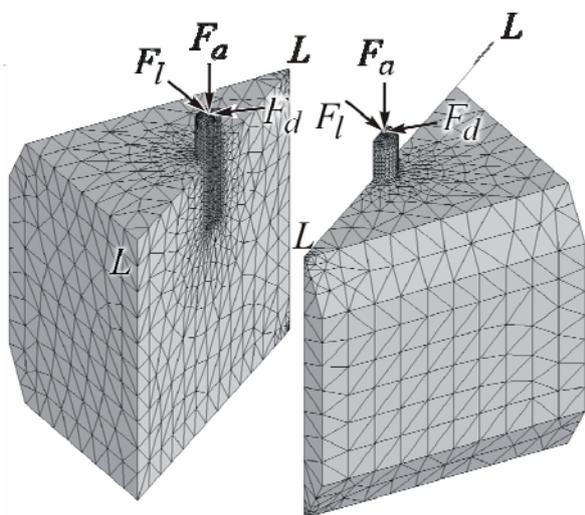


Рис. 8 Конечно-элементная модель дентальной системы “имплантат-кость” с выделением плоскости максимального нагружения L-L

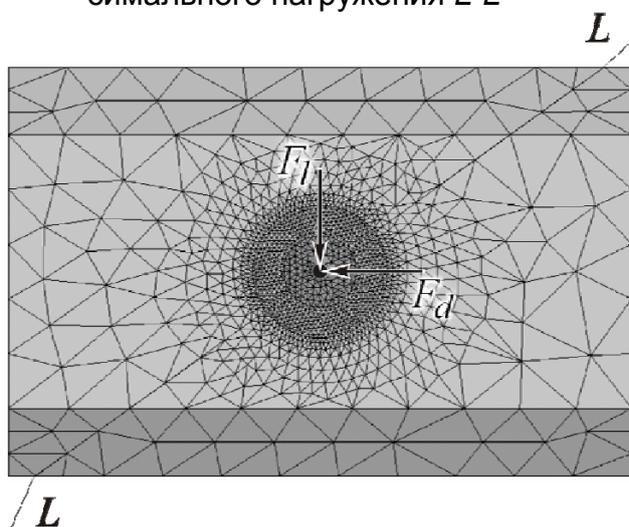


Рис. 9 Определение плоскости максимального нагружения L-L, в которой действует горизонтальная сила

$$F_h = \sqrt{F_l^2 + F_d^2}$$

## Результаты исследований

### 1. Определение плоскости максимального нагружения

В результате суммирования двух горизонтальных компонент окклюзионной нагрузки на ДС “имплантат-кость” (рис. 8) можно определить силовую плоскость L-L (см. также рис. 9, 10), в которой будут действовать максимальные напряжения. Для исследования параметров НДС разбиение на КЭ производили отдельно для левой и правой подборок исследуемой ДС, разделенных плоскостью L-L, с последующим их соединением.

Нами изучены распределения компонент НДС, а также перемещений точек границы контакта имплантата с костной тканью в плоскости максимального нагружения. Показано, что максимальные эквивалентные напряжения Мизеса в плоскости максимального нагружения (зона сжатия) достигают 26 МПа при окклюзионном нагружении  $F_a = 114,6$  Н,  $F_l = 17,1$  Н,  $F_d = 23,4$  Н (по данным [30] предел прочности при сжатии кортикальной кости равен 170 МПа). На рис. 10 представлена схема деформирования системы “имплантат-кость” в плоскости максимального нагружения L-L (увеличено), иллюстрирующая локализацию зоны максимальных эквивалентных напряжений.

## 2. Выбор представительного цилиндра для обеспечения необходимой точности вычисления локализованного НДС “имплантат-кость”

Для детального изучения НДС локализованную зону кости, прилегающую к имплантату и принадлежащую плоскости максимального нагружения, необходимо разбить на КЭ достаточно малых размеров. В предшествующих исследованиях (например, [13]) размер КЭ был выбран равным  $a = 0,5$  мм с равномерным их распределением по объему кости. Как показали наши исследования, такая точность недостаточна для оценки НДС исследуемой ДС, а дальнейшее уменьшение размеров КЭ ограничивается возможностями ЭВМ. Так, например, для элемента кости с размерами  $30 \times 30 \times 20$  мм, а также имплантата с диаметром  $d = 2,9$  мм и длиной  $l = 11,36$  мм при размере КЭ  $a = 0,6$  мм общее число КЭ равно 387000.

Для решения поставленных задач мы использовали неравномерные сетки, загущенные в области контакта имплантата с костной тканью. При этом возможностей автоматического неравномерного разбиения сеток, предлагаемого ПО Cosmos, ANSYS и др., недостаточно, в первую очередь для решения контактных задач, использующих итерационные алгоритмы, поскольку погрешности выполнения условия непроникновения имплантата в кость как правило зависят от максимального размера КЭ.

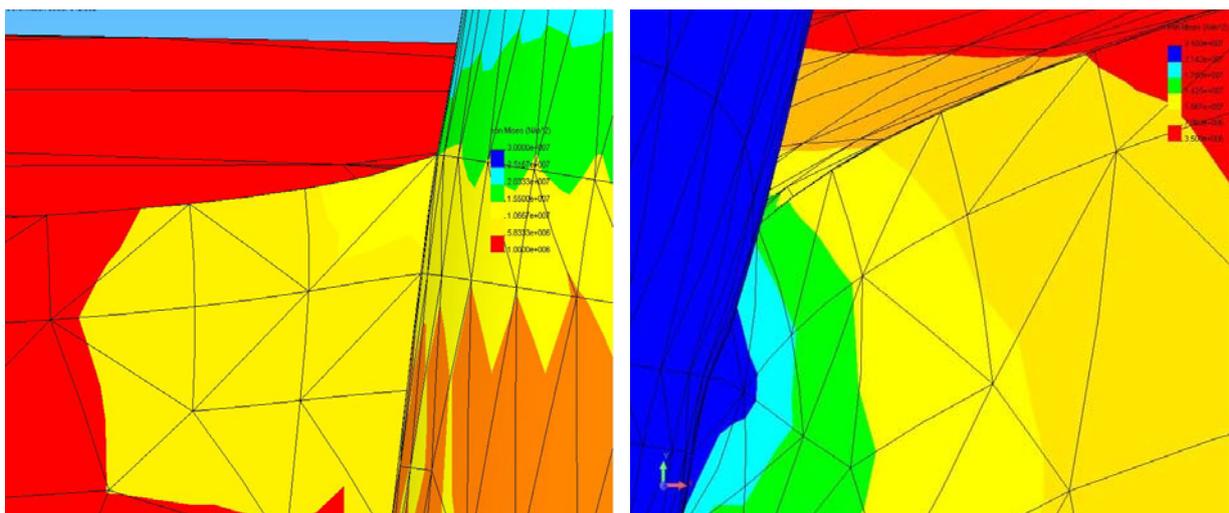


Рис. 10 Схема деформирования системы “имплантат-кость” в плоскости максимального нагружения  $L-L$ . Слева – зона растяжения, справа – зона сжатия. Толщина поверхностного монослоя конечных элементов  $t = 0,05$  мм (увеличено)

В наших исследованиях использована методика создания неравномерных сеток КЭ, т.е. использования КЭ с наименьшими размерами на границе “имплантат-кость”. Её суть состоит в выделении вокруг имплантата представительного цилиндра толщиной  $\alpha = (d_0 - d_i)/2$  (рис. 11). Для определения параметра  $\alpha$ , обеспечивающего локализацию 85...90% НДС внутри представительного цилиндра, нами исследованы зависимости распределения эквивалентных напряжений Мизеса по 4 линиям  $A, B, C, D$  пересечения плоскости максимального нагружения с представительным цилиндром (рис. 11). Исходные данные задачи: размер КЭ в имплантате  $a_i = 0,3$  мм; размер КЭ в области представительного цилиндра

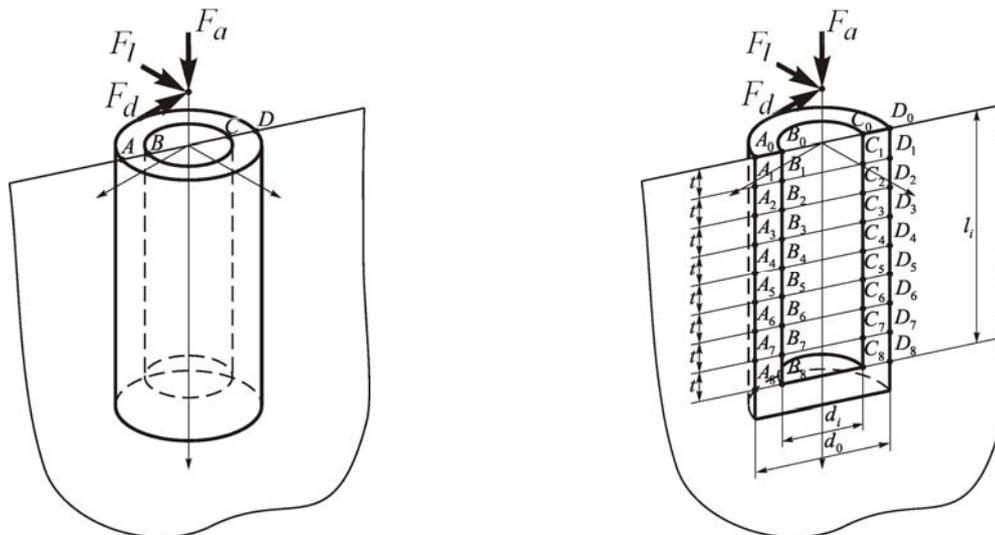


Рис. 11 Выделение представительного цилиндра в окрестности имплантата и линий исследования НДС в плоскости максимального нагружения L-L

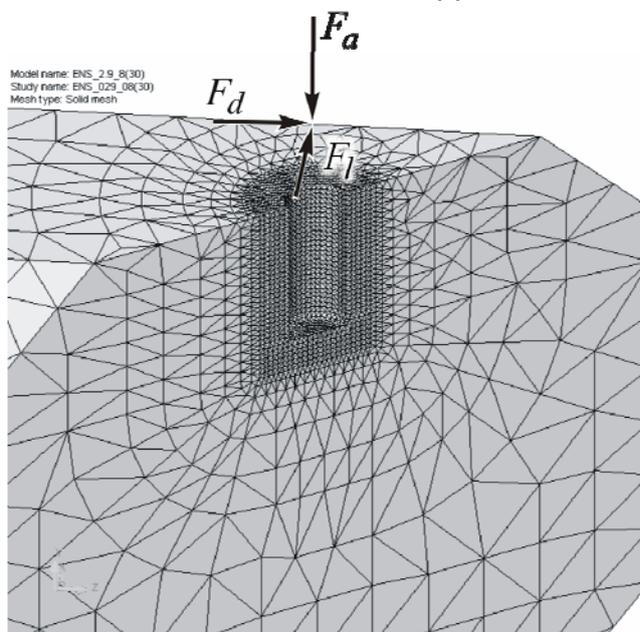


Рис. 12 Неравномерная сетка КЭ для исследования НДС ДС "имплантат-кость" с выделением представительного цилиндра. Размеры кости:  $30 \times 30 \times 20$  мм, размеры имплантата:  $l = 11,36$  мм,  $d = 3,5$  мм. Размер КЭ внутри имплантата  $a_i = 0,3$  мм, минимальный размер КЭ внутри представительного цилиндра  $a_c = 0,25$  мм, максимальный размер КЭ кости  $a_b = 2$  мм,  $\alpha = 1,5$  мм. Общее число КЭ 214064

$a_c = 0,25$  мм; размер КЭ на поверхности кости  $a_b = 2$  мм. КЭ модель задачи представлена на рис. 12.

В результате доказано, что при  $\alpha = 1,5$  мм и окклюзионном нагружении [24] для наиболее опасного с точки зрения НДС имплантата ( $d = 3,5$  мм,  $l = 11,36$  мм [27]) 85% НДС локализовано в пределах представительного цилиндра, что позволяет использовать созданную КЭ модель в дальнейших исследованиях, поскольку время расчёта при этом изменяется незначительно (8-12 мин). В дальнейших исследованиях толщина представительного цилиндра выбрана равной 1,5 мм.

### 3. Выбор необходимых размеров КЭ

Локализация НДС в зоне кости, прилегающей к имплантату, а также выделение плоскости максимального нагружения требуют выбора такого размера КЭ в зоне взаимодействия имплантата с костью, который

обеспечивал бы необходимую точность вычисления компонент НДС.

С использованием КЭ модели, включающей представительный цилиндр (рис. 12), нами выполнены исследования по влиянию размера КЭ внутри него на

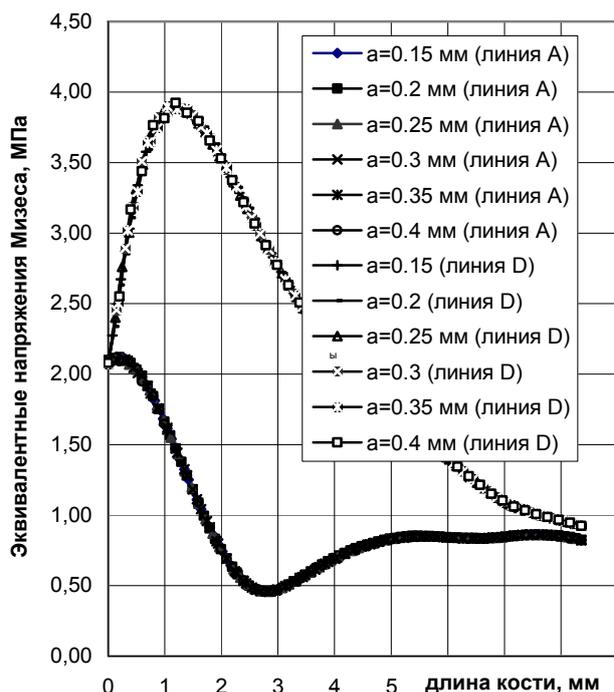


Рис. 13 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по линиям пересечения плоскости максимального нагружения  $L-L$  с поверхностью представительного цилиндра (линии  $A$  и  $D$  на рис. 11) для различных размеров КЭ

величину эквивалентных напряжений Мизеса, определенных в точках линии пересечения плоскости максимального нагружения  $L-L$  с поверхностью цилиндра (линии  $A$  и  $D$  на рис. 11).

Расчеты выполнены для имплантата длиной  $l = 11,36$  мм и диаметром  $d = 2,9$  мм (глубина внедрения в кость  $6,86$  мм). Результаты этого численного эксперимента с использованием КЭ с размерами  $a = 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40$  мм представлены на рис. 13, из которого следует, что при изменении размера КЭ в пределах от  $0,15$  до  $0,4$  мм он не оказывает существенного влияния на эквивалентные напряжения. Поскольку уменьшение размера КЭ приводит к существенному увеличению необходимых ресурсов ЭВМ, для дальнейших расчетов было выбрано  $a \leq 0,25$  мм.

#### 4. Определение минимально необходимой длины кости в геометрической модели ДС "имплантат-кость"

Выбор условий опирания торцев участка кости, используемого при моделировании НДС ДС "имплантат-кость", существенно влияет на значения параметров НДС в исследуемой области. С этой точки зрения длину кости в КЭ модели следует выбрать достаточной для того, чтобы вид защемления торцев не влиял на распределение НДС на границе "имплантат-кость".

В исследованиях по оценке влияния длины кости на НДС ДС при построении ее геометрической модели предварительно был выделен внутренний представительный цилиндр толщиной до  $1,5$  мм, позволяющий выделить внутри него КЭ с размерами  $a_c = 0,25$  мм (см. рис 12). Цель численного эксперимента – установление зависимости эквивалентных напряжений Мизеса (по линиям  $A$  и  $D$  на рис. 11) от длины кости, принятой в её расчётной модели. Результаты вычислений представлены на рис. 14, из которого следует, что при увеличении длины кости более  $30$  мм значения эквивалентных напряжений в области локализованного НДС не зависят от её длины при различных условиях опирания торцев. На основании этого для дальнейших исследований принято  $l = 30$  мм.

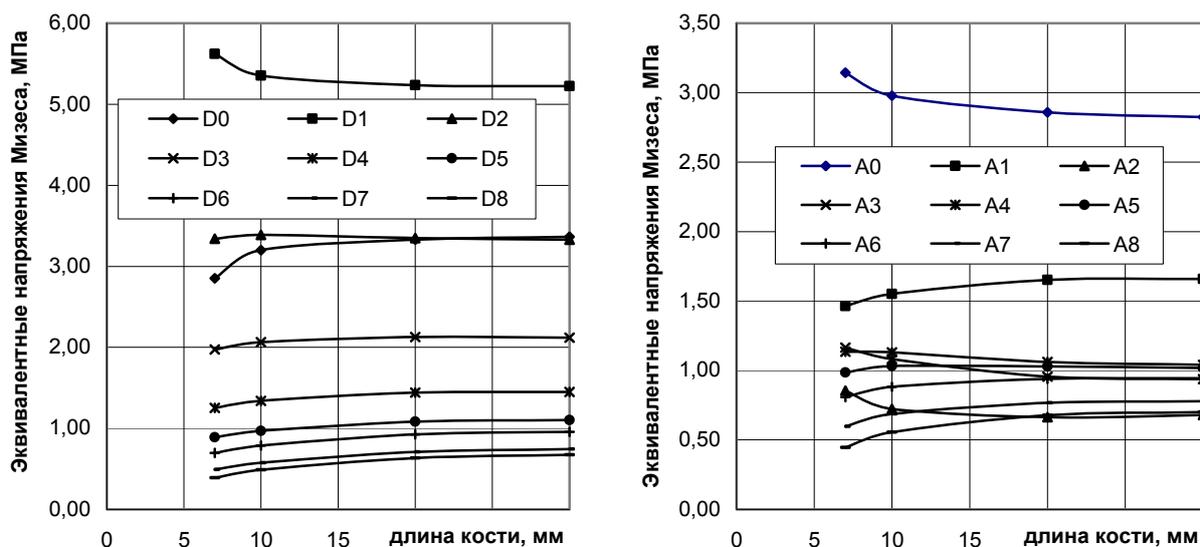


Рис. 14 Эквивалентные напряжения Мизеса в различных точках линий *A* и *D* при различной длине кости (слева – точки линии *D*, справа – точки линии *A* в соответствии с рис. 11)

### 5. Методика повышения точности вычисления параметров НДС на границе “имплантат-кость”

Выше было показано, что НДС в зоне контакта имплантата с костью локализовано в весьма узкой области. При окклюзионном нагружении системой сил  $F_a$ ,  $F_l$ ,  $F_d$  [24] её размеры можно оценить по рис. 15. Максимально нагруженными являются костные ткани, лежащие на границе “имплантат-кость” вблизи поверхности кости.

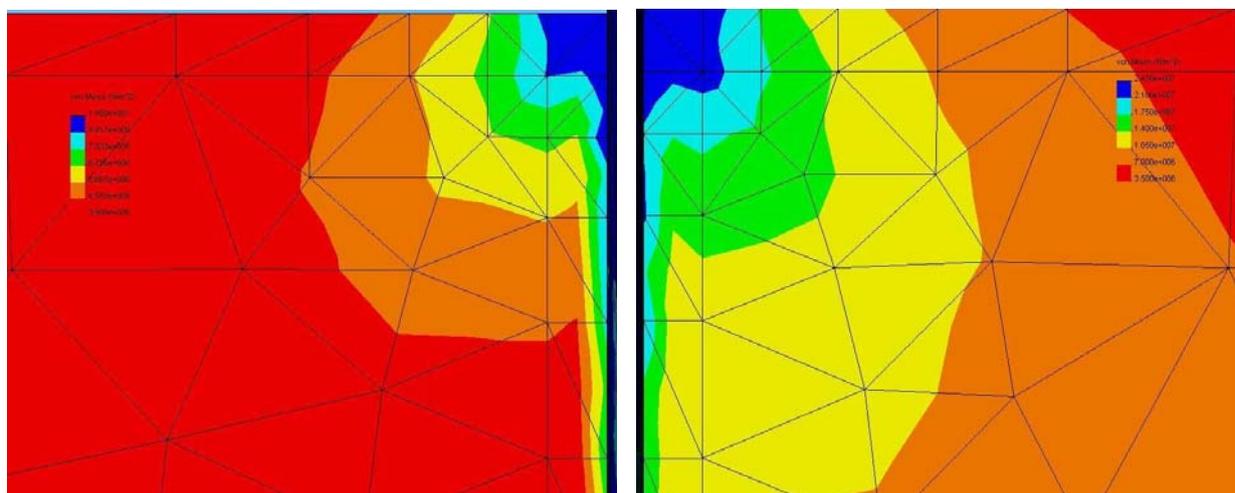


Рис. 15 Локализация НДС в зоне контакта имплантата с поверхностью кости в плоскости максимального нагружения (рис. 11). Минимальный размер КЭ  $a = 0,05$  мм. Слева – зона растяжения, справа – зона сжатия

Поскольку именно благоприятное биомеханическое состояние костной ткани определяет успех остеоинтеграции, важно максимально точно определить параметры НДС в этой локализованной зоне контакта. Поскольку в МКЭ напряжения вычисляются внутри КЭ, для повышения точности их вычисления на границе “им-

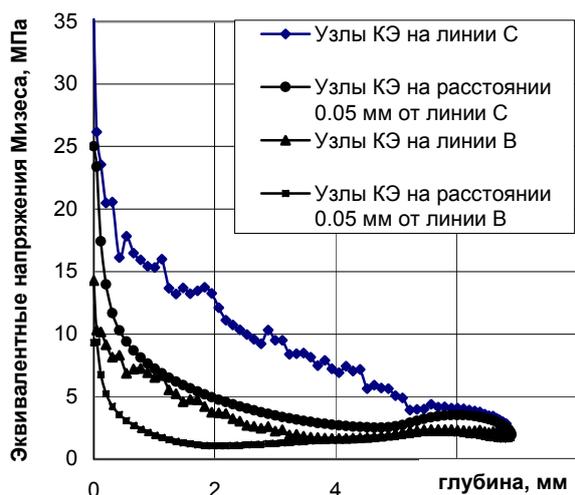


Рис. 16 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по линиям пересечения плоскости наибольшего нагружения и поверхности имплантата (линии *B* и *C* на рис. 11) при использовании значений, вычисленных в узлах, лежащих на линиях *B* и *C*. Для сравнения показаны графики, в которых использованы значения в узлах, близлежащих к линиям *B* и *C*. Размер КЭ  $a = 0,12$  мм

$B_0$  и  $C_0$  на рис. 11) отличаются при этом более чем на 40%. Для повышения точности вычисления параметров НДС в точках на границе “имплантат-кость” нами разработана методика, заключающаяся в выделении вокруг имплантата внутри представительного цилиндра дополнительного слоя с толщиной, определяемой минимально возможным размером КЭ для данной геометрии имплантата. Схема такого численного эксперимента для цилиндрического имплантата представлена на рис. 17, а для имплантата типа Ankylos – на рис. 18. Выполнены исследования по определению необходимой толщины дополнительного слоя и соответствующих ей размеров КЭ.

В качестве критерия выбора толщины такого слоя выбрано (10...12%) отличие эквивалентных напряжений Мизеса в срединной поверхности дополнительного слоя от истинных значений, вычисленных на границе “имплантат-кость”. Мы исследовали графики распределения эквивалентных напряжений Мизеса по радиусу на двух уровнях ДС: 1-м, лежащем на глубине 0,05 мм от поверхности кости и 2-м, на глубине 4,0 мм от поверхности кости с использованием ПО ANSYS.

Для этого численного эксперимента предложена геометрическая модель исследуемой ДС, представленная на рис. 19. Показано, что дополнительный слой толщиной 0,05 мм обеспечивает отклонение приближенных значений параметров НДС от точных решений, полученных с использованием ПО ANSYS не более чем на 12% на уровне 1 (глубина 0,05 мм) и не более чем 7% на уровне 2 (глубина 4,0 мм). Указанная толщина дополнительного слоя может быть рекомендована в исследованиях НДС биомеханических систем сложной геометрической формы.

плантат-кость” следует стремиться к уменьшению размеров граничных КЭ. Как правило, для однородного материала вычисление напряжений в узлах КЭ сетки производят путем осреднения их значений, вычисленных в окружающих узел элементах. Если использовать этот подход для вычисления напряжений в узлах лежащих на границе контакта двух разнородных тел (кость-металл), то в вычисления оказываются вовлеченными упругие характеристики обоих материалов, что не отражает истинную картину напряженного состояния в каждом из них и приводит к осцилляциям решений (рис. 16, линии  $\blacklozenge$  и  $\blacktriangle$ ).

Использование для определения параметров НДС узлов КЭ сетки, близлежащих к границе “имплантат-кость”, устраняет осцилляции и позволяет более точно определить НДС на границе “имплантат-кость” (рис. 16, линии  $\bullet$  и  $\blacksquare$ ). Однако максимальные значения эквивалентных напряжений в поверхностных точках линий *B* и *C* (см. точки

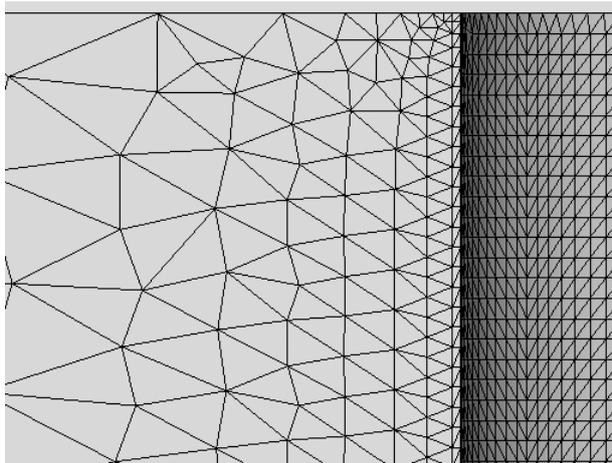


Рис. 17 КЭ модель ДС “цилиндрический имплантат-кость” с выделением дополнительного слоя толщиной 0,05 мм и размером КЭ  $a = 0,12$  мм

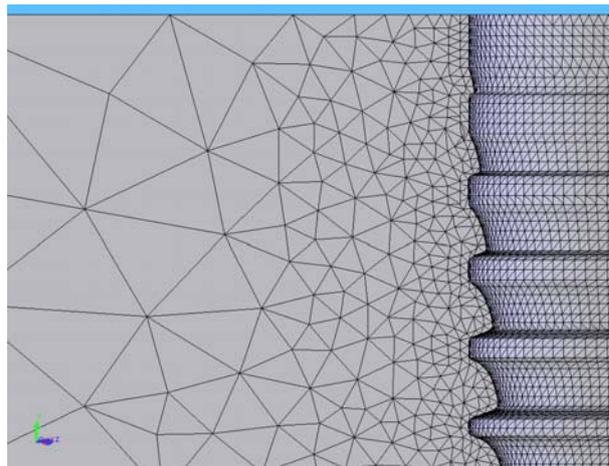


Рис. 18 КЭ модель ДС “Ankylos имплантат-кость” с выделением дополнительного слоя толщиной 0,1 мм и размером КЭ  $a = 0,12$  мм

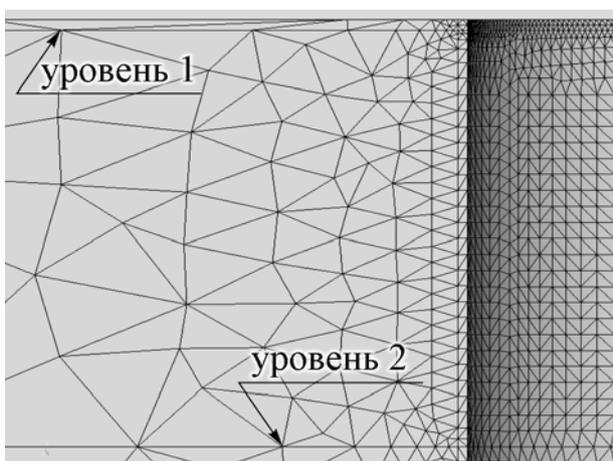


Рис. 19 КЭ модель ДС с выделением на глубине  $t_1 = 0,05$  мм и  $t_2 = 4,0$  мм двух горизонтальных уровней для исследования распределения эквивалентных напряжений по радиусу и обоснования выбора толщины дополнительного слоя

## 6. Моделирование дезостеоинтеграционных процессов в соединении “имплантат-кость”

Основоположник дентальной имплантологии Branemark P-J в 70-е годы экспериментально доказал, что титановые имплантаты в течение определенного срока после установки в ненагруженном состоянии плотно соединяются с костной тканью. Это дало основание большинству исследователей НДС ДС считать имплантат абсолютно жестко соединенным с костью. Однако имеющиеся до сих пор место неудачи в имплантации вынуждают изучать причины появления дезостеоинтеграции (disosseointegration) – процесса ослабления соединения поверхности имплантата с костью, который приводит к существенному перераспределению показателей

НДС в зоне контакта, что следует из рис. 20, 21, где представлено распределение эквивалентных напряжений Мизеса в плоскости наибольшего нагружения при условии идеальной остеоинтеграции и полной дезостеоинтеграции, а также из рис. 22, 23, где представлено распределение эквивалентных напряжений Мизеса по линиям контакта имплантата с костью в плоскости максимального нагружения (линии  $B$  и  $C$  на рис. 11). Графики получены по результатам вычислений с граничными условиями, соответствующими идеальной остеоинтеграции (абсолютно жесткое соединение имплантата с костью по всей поверхности контакта), а также полной дезостеоинтеграции (имплантат установлен в кость без зазора).

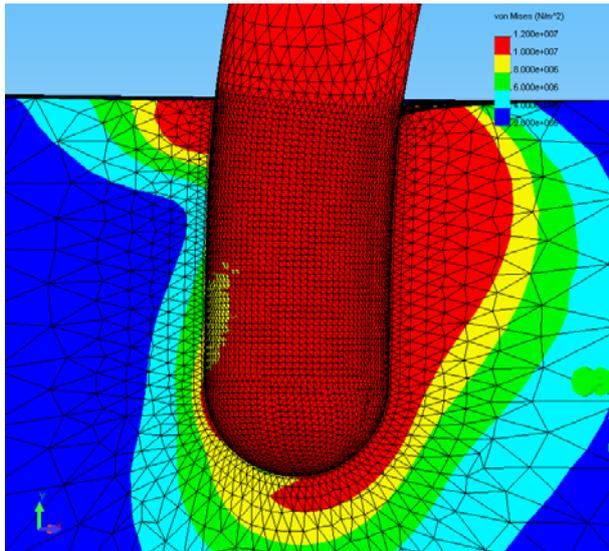


Рис. 20 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в плоскости максимального нагружения (рис. 11) в условиях идеальной остеоинтеграции (увеличено)

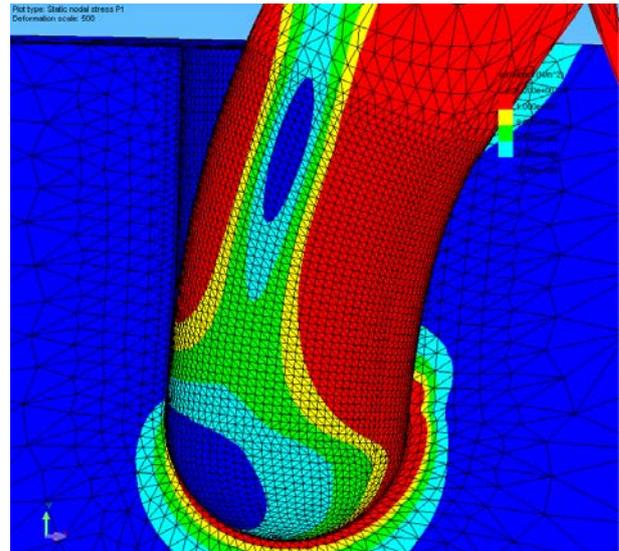


Рис. 21 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса в плоскости максимального нагружения (рис. 11) в условиях полной дезостеоинтеграции (увеличено)

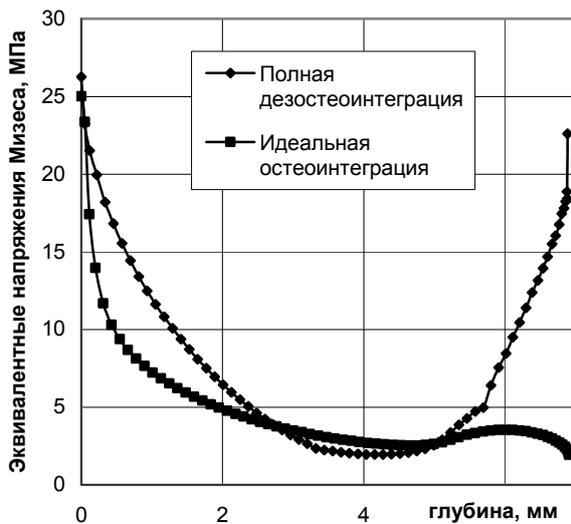


Рис. 22 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по линии контакта имплантата с костью (зона сжатия) для условий идеальной остеоинтеграции и полной дезостеоинтеграции

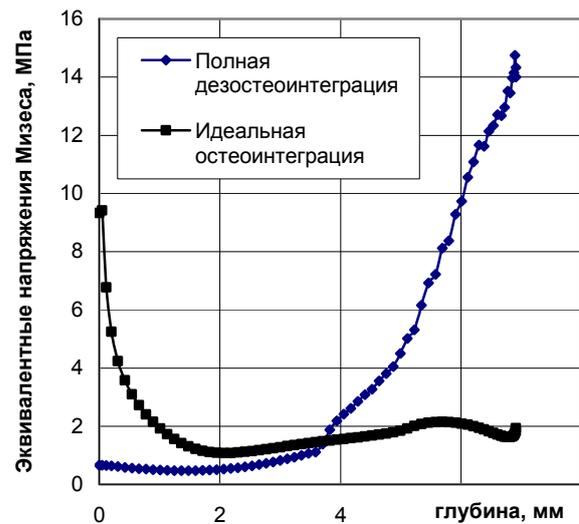


Рис. 23 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по линии контакта имплантата с костью (зона растяжения) для условий идеальной остеоинтеграции и полной дезостеоинтеграции

Дезостеоинтеграция приводит к появлению зазоров в области шейки (зона растяжения) или у корня имплантата (зона сжатия), т.е. рассоединению элементов ДС при ослаблении связи между ними. Очаги максимальных эквивалентных напряжений появляются не только у шейки имплантата (эффект достаточно хорошо изучен, например в [30]), а и в корневой части (полусферический подпятник). Опасность появления новой зоны больших локальных напряжений состоит в том, что, как правило, корневая часть имплантата (подпятник) опирается на губчатую

кость, предельные напряжения которой во много раз ниже, чем у кортикальной (см. табл. 1). Практическая важность полученных результатов состоит в том, что пациенты со сниженными прочностными свойствами кости должны подвергать установленные имплантаты внешнему нагружению только после достижения полной остеоинтеграции, либо использовать имплантаты с усиленной опорной корневой частью.

Физиологической причиной дезостеоинтеграции может быть не только разрастание у поверхности имплантата соединительной ткани значительно менее плотной и прочной, чем кость, но и уменьшение самой костной ткани в процессе эксплуатации имплантата. Основным физико-механическим параметром, описывающим текущее состояние кости, является ее модуль упругости (для изотропной и однородной модели ее материала), следовательно, его изменение в численной модели может быть связано с процессом изменения плотности материала. Нами предложена методика численного моделирования процесса дезостеоинтеграции и связанной с ней избыточной подвижности имплантата. Ее суть состоит в выделении в геометрической модели ДС “имплантат-кость” отдельного слоя, имитирующего область дезостеоинтеграции (толщиной  $\delta = 0,05$  мм) с переменными значениями модуля продольной упругости. Для 3-х различных значений модуля упругости  $E_1 = 1,37 \cdot 10^{10}$  Па,  $E_2 = 1,37 \cdot 10^9$  Па,  $E_3 = 1,37 \cdot 10^8$  Па вычислены параметры НДС в зоне контакта имплантата с костной тканью. На рис. 24, 25 показаны графики распределения по радиусу на глубине  $t = 0,05$  мм (уровень 1 на рис. 19) параметров НДС кортикальной кости (рис. 24 – эквивалентные напряжения Мизеса, рис. 25 – горизонтальные перемещения). Выполненные расчеты подтверждают вывод о существенном влиянии механического состояния зоны соединения им-

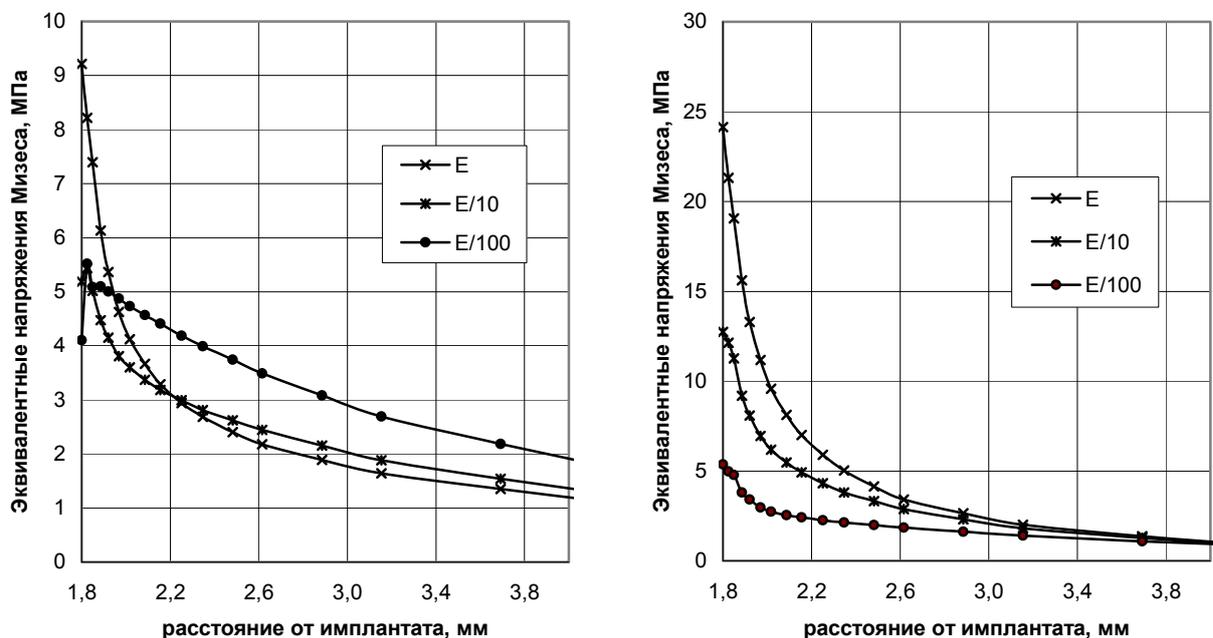


Рис. 24 Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по радиусу ДС, вычисленных в узлах, расположенных на глубине  $t = 0,05$  мм от поверхности кости, для различных значений модуля упругости дополнительного слоя, имитирующего уменьшение плотности кости (дезостеоинтеграция), при толщине дополнительного слоя  $\delta = 0,05$  мм (слева – растяжение, справа – сжатие)

плантата с костью на НДС локальной области кости, сопрягаемой с имплантатом, особенно у шейки имплантата, находящейся в зоне сжатия.

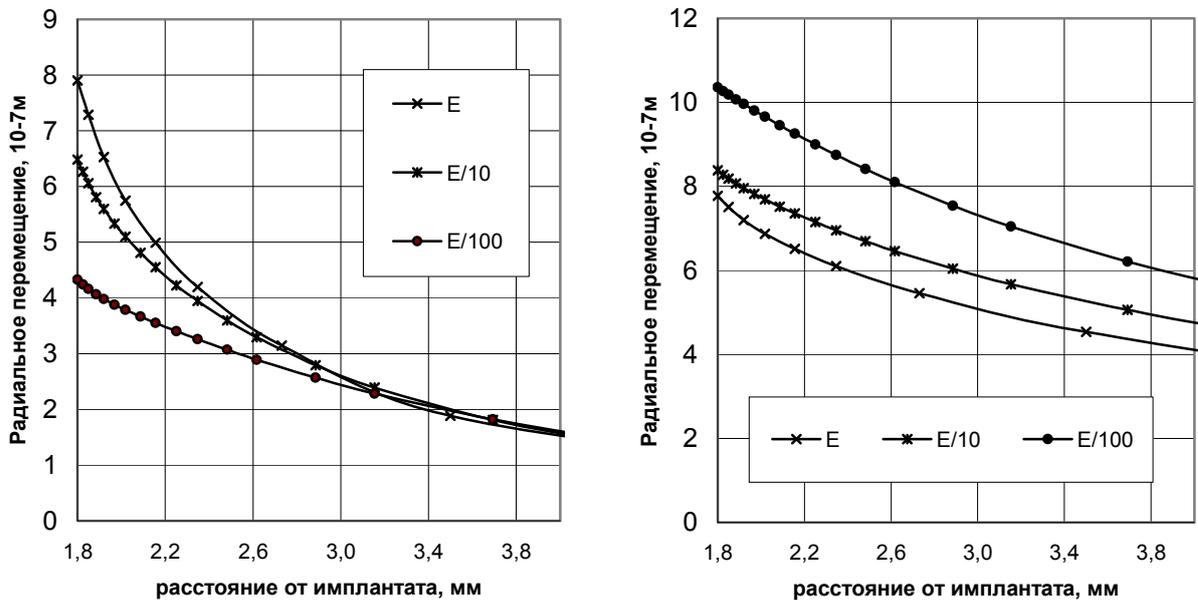


Рис. 25 Распределение по радиусу ДС горизонтальных перемещений, вычисленных в узлах, расположенных на глубине  $t = 0,05$  мм, для различных значений модуля упругости дополнительного слоя, имитирующих уменьшение плотности кости (дезостеоинтеграция), при толщине дополнительного слоя  $\delta = 0,05$  мм (слева – растяжение, справа – сжатие)

## 7. Проблема оценки прочности костной ткани

Разрушение локальной области кортикальной или губчатой кости в результате избыточных внешних нагрузок происходит в первую очередь из-за превышения действующих в них расчетных напряжений над пределом прочности материала костной ткани. Martin R.V. и сотр. [31] установили, что для кортикальной кости предел прочности при растяжении равен 100 МПа, а при сжатии 170 МПа.

Еще одним видом разрушения кости является ее размягчение в процессе эксплуатации, вызывающее появление избыточных деформаций. Rigsby D.F. и сотр. [28] установили физиологический уровень деформаций в пределах  $10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-3}$  е.о.д.

При оценке прочности локализованных зон кости необходимо иметь в виду, что напряженное состояние в опасных точках объемное. Следовательно, для создания математической модели предельного состояния материала кости (как более слабого элемента ДС “имплантат-кость”) следует использовать одну из теорий предельного состояния, разработанных до настоящего времени в механике деформируемого твердого тела (МДТТ). Ее выбор должен быть обоснован экспериментальными исследованиями физических причин и характера разрушения. Разные авторы используют различные теории прочности [30, 32, 33], но в настоящее время отсутствует методика обоснованного применения одной из них к описанию предельного состояния зоны соединения имплантата с костью.

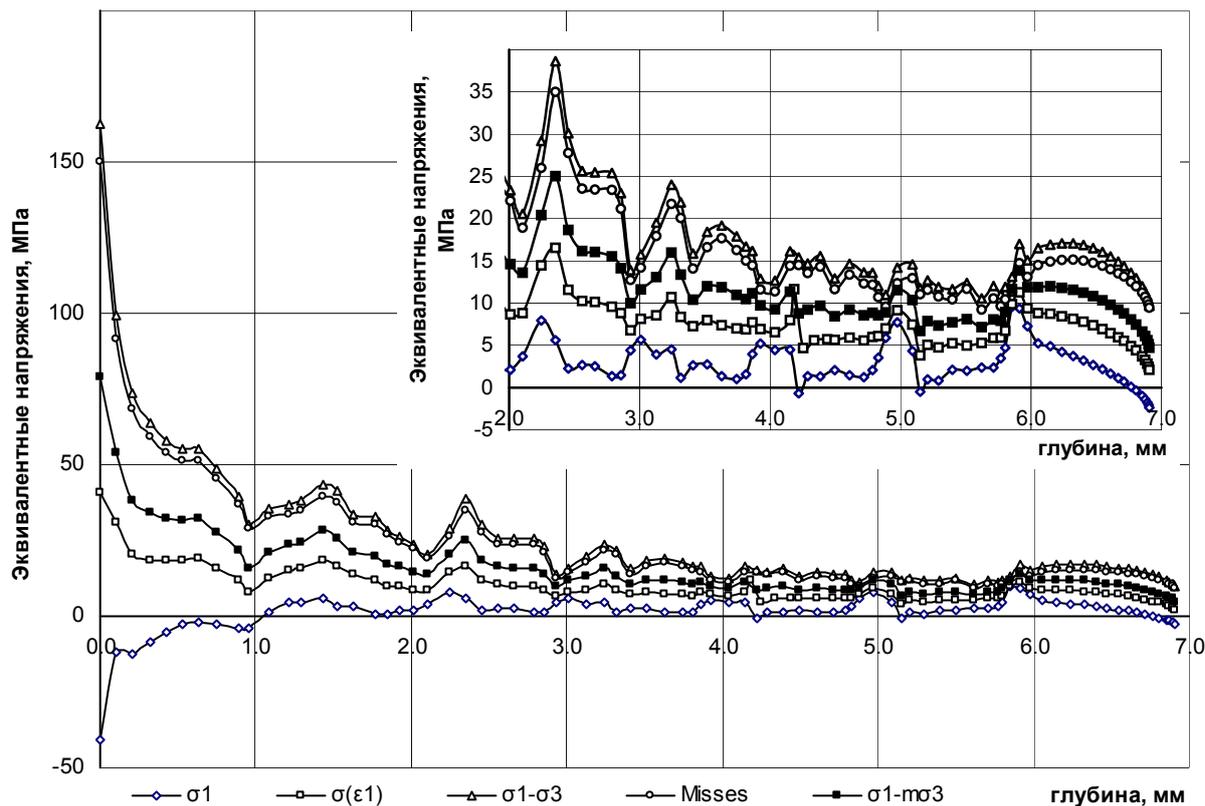


Рис. 26 Сравнение интенсивностей напряжений  $\sigma_{eq}$  (зона сжатия), вычисленных по различным теориям прочности для резьбового имплантата типа Ankylos

Выполненные нами сравнения эквивалентных напряжений по 1-5 теориям прочности для имплантата типа Ankylos (рис. 4,18) показывают различие в величине  $\sigma_{ЭКВ}$  (в зоне сжатия) в 3 раза (см. рис. 26).

На основании полученных результатов для решения проблем прочности костных тканей ДС следует применять ту теорию прочности, которая дает наибольшие значения эквивалентных напряжений и, следовательно, наименьший запас прочности.

## 8. Контактные давления в ДС “имплантат-кость” и проблема смятия костной ткани при окклюзионном нагружении

Эквивалентные напряжения не позволяют в полной мере оценить НДС исследуемой биомеханической системы, так как контактное взаимодействие между двумя телами с существенно различными характеристиками жесткости может привести к дезостеоинтеграции зоны контакта из-за потери прочности при смятии. Для изучения проблемы смятия необходимо исследование распределения контактных давлений по поверхности контакта, которые при окклюзионном нагружении силами  $F_a = 114,6$  Н,  $F_l = 17,1$  Н,  $F_d = 23,4$  Н в цилиндрическом имплантате с диаметром 3,5 мм достигают 20 МПа (рис. 27).

Для изучения контактных давлений нами использовано ПО ANSYS. Учитывая особенности моделирования контакта, были использованы следующие граничные условия: контактное тело (тело с бóльшим модулем упругости) – имплан-

тат, целевое тело – представительный цилиндр. В КЭ модели использовались элементы SOLID (рис. 28), CONTA и TARGE. Элемент SOLID был использован для моделирования КЭ сетки в кости и имплантате, а CONTA и TARGE – для создания контактной и целевой поверхностей соответственно. SOLID – 10-и узловой 3D элемент с 3 степенями свободы (перемещения по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) в каждом из них имеет форму ребер, описанную полиномом 2-й степени за счет узлов, расположенных посередине ребер. Элемент CONTA предназначен для создания контакта и скольжения между трехмерными целевыми и деформируемыми контактными поверхностями. Он описывает поверхность (границу) контактного тела, образованную КЭ 2-го порядка, как SOLID, и имеет механические свойства этих элементов. Элемент TARGE предназначен для создания различных целевых трехмерных поверхностей с сопряженными контактными поверхностями. Он описывает поверхность (границу) целевого тела.

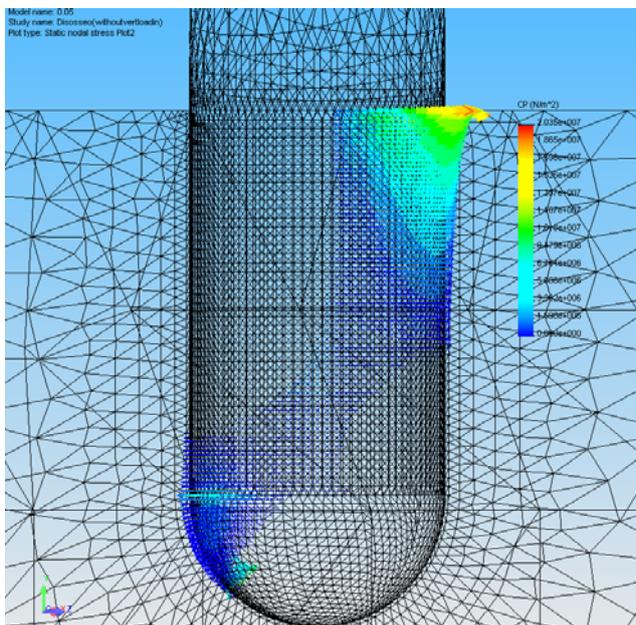


Рис. 27 Распределение контактного давления по линии контакта “имплантат-кость” в плоскости максимального нагружения ( $F_a = 114,6$  Н,  $F_l = 17,1$  Н,  $F_d = 23,4$  Н)

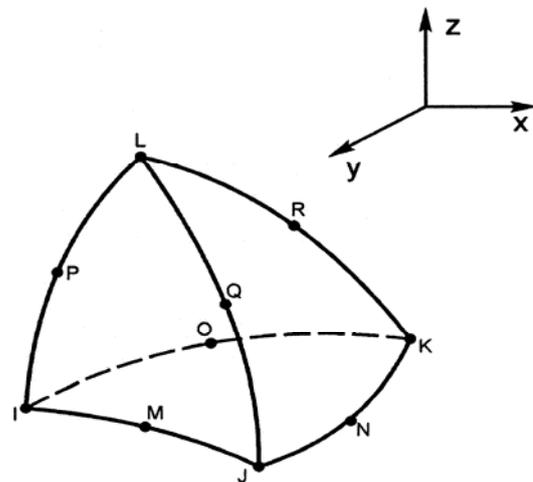


Рис. 28 Конечный элемент SOLID – 10 узлов с 3 степенями свободы в каждом (перемещения по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), кривизна ребра – полином 2-й степени

Нами выполнено сопоставление величин эквивалентных напряжений Мизеса (линия  $C$ ), а также контактного давления, вычисленного по линиям  $B$  и  $C$ , принадлежащих поверхности контакта (см. рис. 11). Результаты представлены на рис. 29. Несмотря на то, что максимальные эквивалентные напряжения на границе контакта не превышают 30 МПа, т.е. существенно ниже  $[\sigma]_c = 170$  МПа [30], максимальные контактные давления равны 23 МПа, что сопоставимо с допускаемыми напряжениями на смятие (при динамических нагрузках их принято считать равными  $((0,20 \dots 0,25)[\sigma]_c)$ ).

Полученные результаты подтверждают актуальность исследования контактных напряжений при изучении предельных возможностей ДС “имплантат-

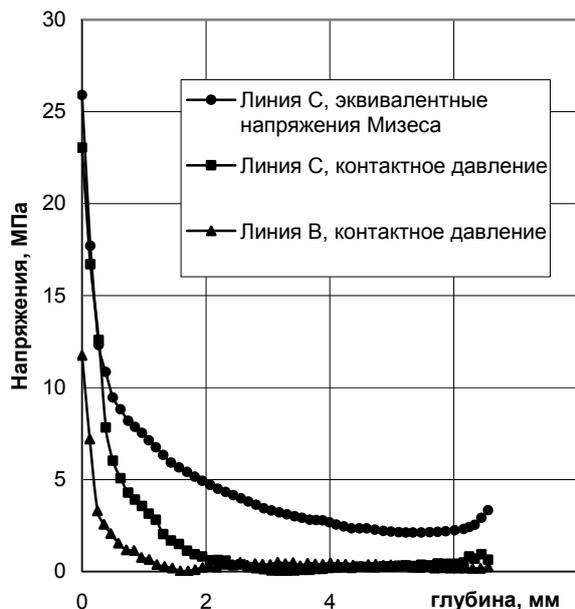


Рис. 29 Распределение по линии контакта “имплантат-кость” в плоскости максимального нагружения эквивалентных напряжений Мизеса (линия С) и контактного давления (линии С и D)

кость” и определении допустимых значений внешних нагрузок для имплантатов с конкретными геометрическими размерами и формой.

## 9. Выводы и обсуждение результатов

1. Создана уточненная математическая модель ДС “имплантат-кость”, позволяющая с высокой точностью исследовать НДС в зоне наибольших напряжений, что позволяет прогнозировать результат планируемой имплантации у конкретного пациента с точки зрения выбора типа и геометрических размеров индивидуального имплантата.

2. Высокая точность моделирования НДС элементов ДС может быть обеспечена прежде всего путем создания численной модели, включающей

точную геометрическую модель имплантата и участка челюсти, а также допускающей различные условия взаимодействия между ними – от полного контакта до возможного рассоединения.

3. Модель внешних нагрузок на имплантат должна, включать все компоненты окклюзионной нагрузки. Для повышения точности результатов моделирования необходимо предварительное определение плоскости максимального нагружения, в которой лежат потенциально опасные точки костной ткани.

4. Локализация потенциально опасных точек на линии пересечения поверхности контакта имплантата и кости с плоскостью максимального нагружения приводит к необходимости локального высококонцентрированного сгущения КЭ сеток в этой области, в первую очередь за счет создания вокруг имплантата представительного объема как дополнительного геометрического объекта.

5. Высокая точность вычисления компонент НДС на границе контакта может быть обеспечена путем создания внутри представительного объема дополнительного слоя предельно малой толщины с тем, чтобы максимально приблизить КЭ к границе контакта.

6. Реальная анизотропия механических свойств, а также неоднородность костных структур челюсти (кортикальная оболочка уникальной геометрии с заполнителем из губчатой кости) требует разработки новых подходов к созданию индивидуальной геометрической модели челюсти пациента по результатам компьютерно-томографического или магниторезонансного сканирования. Точность расче-

тов может быть существенно улучшена при переходе от линейно-упругих физических моделей материала слоев кости к более сложным, учитывающим не только анизотропию, но и реальную нелинейность механических свойств. При этом из-за широкого разброса значений упругих параметров, полученных различными исследователями, необходимо использовать в расчетах максимальные значения, которые обеспечивают наиболее высокий уровень напряжений. Перспективным направлением является коррекция значений упругих характеристик костных тканей пациента по измерению их плотности в компьютерной модели его челюсти при КТ -, ЯМР -, денситометрических исследованиях.

7. Использование большинством исследователей эквивалентных напряжений Мизеса в качестве меры опасности НДС в исследуемой точке не является альтернативным подходом [32], т.к. для специфичных тканей кости, отличающихся к тому же различным сопротивлением растяжению и сжатию, возможно также применение теорий наибольших нормальных напряжений и наибольших линейных деформаций [33], а также теории Мора. В этом случае правомерен подход, когда используют в условии прочности наибольшие из эквивалентных напряжений, вычисленных по различным теориям прочности.

8. Из-за существенного различия в механических свойствах материалов кости и имплантата необходим переход от анализа эквивалентных напряжений в области контакта имплантата с костными тканями к анализу напряжений смятия. Нами показано, что величины контактных давлений в области шейки имплантата сопоставимы с эквивалентными напряжениями Мизеса, тогда как допускаемые напряжения на смятие для конструкционных материалов, подвергаемых динамическому нагружению, в несколько раз ниже, чем допускаемые на сжатие.

9. Переход к исследованию контактных давлений на костные структуры приводит к необходимости пересмотра результатов всех тех исследований, которые использовали условия жесткого соединения имплантата с костью (bonded) и перехода к контактными постановкам задач об НДС. Последние требуют не только существенного увеличения ресурсов ЭВМ (поскольку решаются итерационными методами), но и локального уменьшения размеров КЭ до 0,05...0,10 мм [26].

10. Изучение дезостеоинтеграционных процессов в ДС показало, что за счет ослабления связи имплантата с костью возможно существенное перераспределение напряжений и деформаций в кости на границе "имплантат-кость", а также появление высоких напряжений в прилегающей к корню имплантата зоне губчатой кости с низкими механическими свойствами.

## Список литературы

1. Branemark P.-J., Breine U., Adell R., Hansson B.O., Lindstorm I., Ohlsson A. Intra-osseous anchorage of dental prostheses. 1. Experimental studies. *Scand J Plast & Reconst Surg*, 1969; 3: 81-100.
2. Боннер Ф. Современное состояние дентальной имплантологии. *Современная стоматология*, 2004; №1.
3. Параскевич В.Л. Дентальная имплантология. Основы теории и практики: научно-практическое пособие. – Минск: ООО “Юнипресс”, 2002.
4. Holmgren E.P., Seckinger R.J., Kilgren L.M., Mante F. Evaluating parameters of osseointegrated dental implants using finite element analysis - two dimensional comparative study examining the effects of implant diameter, implant shape, and load direction. *J Oral Impl* 1998; 24: 80-88.
5. Teixeira E.R., Sato Y., Akagawa Y., Shindoi N. A comparative evaluation of mandibular finite element models with different lengths and elements for implants biomechanics. *J Oral Rehabil*, 1998; 25: 299-303.
6. Akagawa Y., Wadamoto M., Sato Y., Tsuru H. The three-dimensional bone interface of an osseointegrated implant: method for study. *J Prosthet Dent*, 1992; 68: 813-816.
7. Middleton J., Jones M.L., Pande G.N. *Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering*, 1996; 1st edn., p. 125. Gordon and Breach Science, Amsterdam.
8. Bathe K.J. *Finite element procedures*. Upper Saddle River (NJ): Prentice-Hall, 1996; 148-377.
9. Meijer H.J., Starmans F.J.M., de Putter C., van Blitterswijk C.A. The influence of flexible coating on the bone stress around dental implants. *J Oral Rehabil*, 1995; 22: 105-111.
10. Meijer H.J., Starmans F.J.M., Steen W.H., Bosman F. A three-dimensional finite element analysis of the bone around dental implants in an edentulous human mandible. *Arch Oral Biol*, 1993; 38: 491-496.
11. Rieger M.R., Adams W.K., Kinzel G.L., Brose M.O. Finite element analysis of bone-adapted and bone-bonded endosseous implants. *J Prosthet Dent*, 1989; 62: 436-440.
12. Rieger M.R., Fareed K., Adams W.K., Tanquist R.A. Bone stress distribution for three endosseous implants. *J Prosthet Dent*, 1989; 61: 223-228.
13. Himmlova L., Dostalova T., Kacovsky A., Konvickova S. Influence of implant length and diameter on stress distribution: A finite element analysis. *J Prosthet Dent*, 2004; 9(1): 20-24.
14. Чумаченко Е.Н., Воложин А.И., Портной В.К., Маркин В.А. Гипотетическая модель биомеханического взаимодействия зубов и опорных тканей человека при различных значениях жевательной нагрузки. *Стоматология*, 1999; № 5.
15. Geng J.P., Tan K.B.C., Lui. G.R. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of literature. *J Prosthet Dent*, 2001; 85(6): 585-598.
16. Farah J.W., Craig R.G., Meroueh K.A. Finite element analysis of three- and four-unit bridges. *J Oral Rehabil*, 1989; 16: 603-611.
17. MacGregor A.R., Miller T.P., Farah J.W. Stress analysis of mandibular partial dentures with bounded and free-end saddles. *J Dent*, 1980; 8: 27-34.

18. Rice J.C., Cowin S.C., Bowman J.A. On the dependence of the elasticity and strength of cancellous bone on apparent density. *J Biomech*, 1988; 21: 155-168.
19. Cook S.D., Klawitter J.J., Weinstein A.M. A model for the implant-bone interface characteristics of porous dental implants. *J Dent Res* 1982; 61: 1006-1009.
20. Cowin S.C. *Bone mechanics*. Boca Raton (FL): CRC Press; 1989.
21. Knoell A.C. A mathematical model of an in vitro human mandible. *J Biomech* 1977; 10: 159-166.
22. Borchers L., Reichart P. Three-dimensional stress distribution around a dental implant at different stages of interface development. *J Dent Res* 1983; 62: 155-159.
23. Colling E.W. *The physical metallurgy of titanium alloys*. Metals Park (OH): American Society for Metals; 1984.
24. Mericske-Stern R., Piotti M., Sirtes G. 3-D in vivo force measurements on mandibular implants supporting overdentures: a comparative study. *Clin Oral Impl Res*, 1996; 7: 387-396.
25. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method. Volume 1: The Basis*. Fifth edition by Butterworth-Heinemann, 2000.
26. Васильев-Линецкий И.В., Деменко В.Ф., Несвит В.Ф. Методология численного моделирования напряженно-деформированного состояния коронки зуба человека при изучении механических аспектов проблемы патологической стираемости. – Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ “ХАИ”, 2005. – Вып. 26. – с. 139-168.
27. ANKYLOS Product Catalogue. Dentsply Friadent CeraMed, Jan 2006.
28. Rigsby D.F., Bidez M.W., Misch C.E. Bone Response to Mechanical Loads. In: Misch C.E., editor. *Contemporary implant dentistry*. 2nd ed. St. Louis: Mosby, 1998; 317-328.
29. Brunski J.B. Biomechanics of dental implants. In: Block M., Kent J.N., Guerra L.R., editors. *Implants in dentistry*. 1st ed. Philadelphia: W.B. Saunders, 1997; p. 63-71.
30. Bozkaya D., Muftu S., Muftu A. Evaluation of load transfer characteristics of five different implants in compact bone at different load levels by finite elements analysis. *J Prosthet Dent*, 2004; 92(6): 523-530.
31. Martin R.B., Burr D.B., Sharkey N.A. *Skeletal tissue mechanics*. 1st ed. New York: Springer, 1998; 127-78.
32. Hearn E.J. *Mechanics of materials. An introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann Linacre House, 1999.
33. Wiskott H.W., Belser U.C. Lack of integration of smooth titanium surfaces: a working hypothesis based on strains generated in the surrounding bone. *Clin Oral Impl Res*, 1999; 10: 429-444.

## **Оптимизация параметров волновой зубчатой передачи по предельному вращающему моменту**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

### **Введение**

Волновые зубчатые передачи (ВЗП) широко применяют в различных областях аэрокосмической техники. Это связано с преимуществами, которые можно получить благодаря таким механизмам. Объекты аэрокосмической техники часто работают в критических условиях, что выдвигает определенные требования в отношении их нагрузочной способности, КПД, точности и долговечности элементов этих систем. Как известно, при своей компактности и относительно небольшом весе ВЗП позволяют получить большое передаточное отношение, обеспечить высокую точность позиционирования и увеличить срок службы механизма. ВЗП применяют в приводах управления механизацией крыла, в механизмах движения солнечных батарей ИСЗ, в орбитальных телескопах и др.

В современных условиях актуальной является проблема автоматизации расчетов параметров ВЗП, а тем более оптимизации параметров передачи по определенным критериям. В данной статье будет рассмотрена оптимизация ВЗП по предельному вращающему моменту.

### **Формулирование проблемы**

Предельный вращающий момент является одним из основных параметров, характеризующих ВЗП. Оптимизация передачи по предельному вращающему моменту позволяет получить такой набор значений параметров, которые обеспечат оптимальную конфигурацию передачи. Данная процедура оптимизации представляет собой актуальную научно-техническую задачу и заслуживает самого пристального внимания при проектировании ВЗП.

В настоящее время известны некоторые публикации, касающиеся данной темы [3-5], однако они не связаны в полной мере с вопросом оптимизации ВЗП. Это объясняется тем, что описываемая проблематика достаточно нова и не была в должной мере исследована.

**Цель данной работы:** разработка математической и алгоритмической модели оптимизации ВЗП по предельному вращающему моменту и исследование влияния некоторых параметров передачи на значение целевой функции.

### **Решение проблемы**

Как известно, передача движения в ВЗП происходит по причине деформирования гибкого колеса и взаимодействия зубьев гибкого и жесткого колес. Возможность достижения волновой передачей предельного вращающего момента обусловлена проскоком зубьев гибкого колеса. Как показали проведенные ранее эксперименты [1], основными причинами проскока зубьев являются изменение начального бокового зазора между вершинами зубьев на входе в зацепление и появление интерференции из-за упругих перемещений зубьев при нагружении передачи (рис. 1).

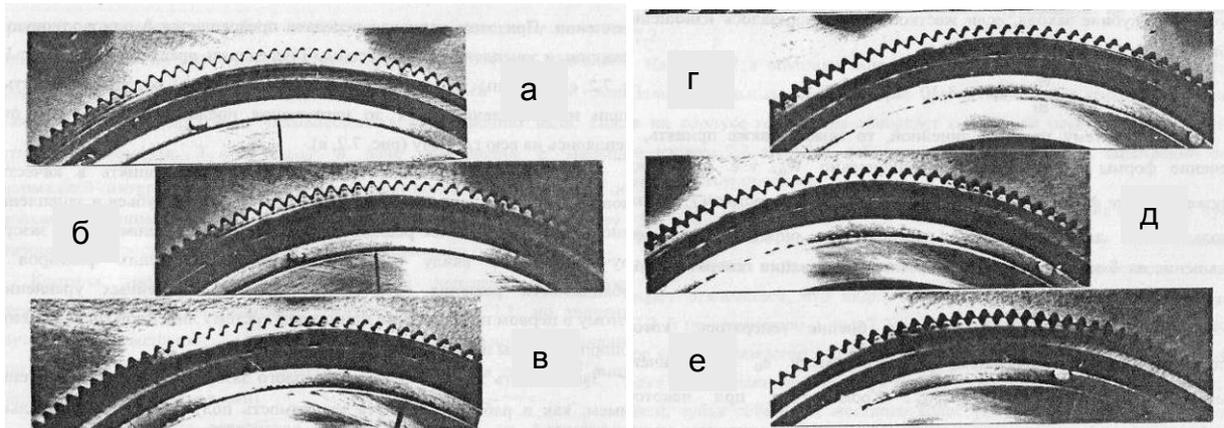


Рис. 1. Возникновение проскока зубьев

На рис. 1,а показано зацепление при нагружении передачи предельным моментом, но при неподвижном генераторе. Зубья гибкого колеса находятся в зацеплении всей активной частью профиля. Из-за того, что вращающий момент имеет предельное значение, зубья гибкого и жесткого колес начинают интерферировать. При вращении генератора зубья гибкого колеса, упираясь в зубья жесткого колеса, начинают отжиматься, что видно на рис 1,б. Генератор продолжает вращаться, что приводит к дальнейшему отжиманию зубьев гибкого колеса, которые выходят из зацепления с зубьями жесткого колеса (рис. 1,в,г,д). После этого зубья гибкого и жесткого колес упираются вершинами, жесткое колесо растягивается, вал генератора отклоняется и происходит проскок генератора вместе с гибким колесом, происходит также проскок зубьев в зацеплении. На рис. 1,е показано, как зубья гибкого и жесткого колес полностью вышли из зацепления.

Из сказанного выше становится понятным, насколько важно увеличить значение предельного вращающего момента, при котором передача сохраняет свою работоспособность и не происходит проскок зубьев.

Значение предельного вращающего момента определяется формулой [1]

$$T_{\text{пр}} = \frac{W_{0г} - 0,9 \cdot m - \Delta + 0,64h_d}{\frac{a_1 + a_2}{(h_d/m)^2} + \frac{\delta_0}{T_{\text{НОМ}}} + \frac{e}{T_{\text{НОМ}}}} \left( 1,75 - \frac{0,01}{\psi_{h1}} \right) \cdot \psi_L^{1/3}, \quad (1)$$

где  $W_{0г}$  – радиальная деформация, которая появляется без нагрузки;

$m$  – модуль зацепления;

$\Delta$  – зазор или натяг в зацеплении;

$h_d$  – глубина захода зубьев;

$a_1, a_2$  – коэффициенты податливости гибкого и жесткого колес;

$\delta_0$  – податливость генератора при номинальном вращающем моменте;

$e$  – биение генератора;

$T_{\text{НОМ}}$  – номинальный вращающий момент;

$\psi_{h1}, \psi_L$  – относительные зазоры.

Радиальная деформация без нагрузки определяется соотношением

$$W_{0г} = \frac{W_0}{1,05 \dots 1,4}, \quad (2)$$

где  $W_0$  – максимальная радиальная деформация гибкого колеса.

В свою очередь, максимальную радиальную деформацию можно рассчитать по зависимости

$$W_0 = W_0^* \cdot m, \quad (3)$$

где  $W_0^*$  – коэффициент радиальной деформации гибкого колеса, который, в свою очередь, определяется соотношением

$$W_0^* = 1,08 \left( \frac{i}{80} \right)^{0,23}, \quad (4)$$

где  $i$  – передаточное отношение ВЗП.

Коэффициенты податливости гибкого и жесткого колес получают по формулам

$$a_1 = \frac{19 \cdot b_{\Gamma}}{D_{\Pi}^2 h_1 G}; \quad a_2 = \frac{3,4}{D_{\Pi} E b_{\text{ж}}} \left( \frac{r_{\text{ж}}}{h_{\text{ж}}} \right)^3, \quad (5)$$

где  $b_{\Gamma}$  – ширина зубчатого венца гибкого колеса;

$D_{\Pi}$  – диаметр отверстия гибкого колеса;

$h_1$  – толщина стенки гибкого колеса под зубчатым венцом;

$G$  – модуль упругости материала гибкого колеса;

$E$  – модуль упругости материала жесткого колеса;

$b_{\text{ж}}$  – ширина жесткого колеса;

$r_{\text{ж}}$  – средний радиус жесткого колеса;

$h_{\text{ж}}$  – толщина жесткого колеса.

Для расчета  $b_{\Gamma}$  и  $b_{\text{ж}}$  рекомендуется использовать такую приближенную зависимость:

$$b_{\Gamma} = b_{\text{ж}} \approx 0,5 D_{\Pi}. \quad (6)$$

Толщину стенки гибкого колеса можно рассчитать по формуле

$$h_1 = 0,016 \cdot D_{\Pi} \left( \frac{i}{80} \right)^{0,3}. \quad (7)$$

Средний радиус жесткого колеса с достаточной точностью приравняем к радиусу основной окружности жесткого колеса:

$$r_{\text{ж}} \approx \frac{d_{\text{ВЖ}}}{2} = m Z_{\text{ж}} \cos \alpha. \quad (8)$$

где  $d_{\text{ВЖ}}$  – диаметр основной окружности жесткого колеса;

$Z_{\text{ж}}$  – число зубьев жесткого колеса;

$\alpha$  – угол исходного контура инструмента для нарезания зубьев.

Податливость генератора при номинальном вращающем моменте можно определить по таким зависимостям:

- для шарикового подшипника:

$$\delta_{\text{ош}} \approx 84 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{\frac{D_{\Pi}^4 [(i-10)/80]^{0,45}}{D_{\text{ш}} Z_{\text{ш}}^2}}, \quad (9)$$

где  $D_{\text{ш}}$  – диаметр шариков подшипника;

$Z_{\text{ш}}$  – число шариков;

- для роликового подшипника:

$$\delta_{\text{ор}} \approx \frac{22 \cdot 10^{-5}}{l_{\text{р}}^{0,8}} \left( \frac{D_{\Pi}^2}{Z_{\text{р}}} \right)^{0,9} \cdot [(i-10)/80]^{0,4}, \quad (10)$$

где  $l_{\text{р}}$  – длина роликов подшипника;

$Z_p$  – число роликов.

Биение генератора приближенно рассчитываем по формуле

$$e_0 \approx 0,0035\sqrt{D_{\Pi}}. \quad (11)$$

Как известно, модуль зацепления можно определить по зависимости

$$m = \frac{D_{\Pi}}{Z_{\Gamma}}, \quad (12)$$

где  $Z_{\Gamma}$  – число зубьев гибкого колеса.

Если принять, что  $|Z_{\Gamma} - Z_{\text{Ж}}| = 2$ , то можно записать:

$$Z_{\Gamma} = 2 \cdot i; \quad Z_{\text{Ж}} = 2 + Z_{\Gamma}. \quad (13)$$

Это касается такой схемы ВЗП, в которой гибкое колесо вращается и жесткое колесо неподвижно.

Номинальный вращающий момент для одноступенчатой волновой передачи рассчитывают по зависимости

$$T_{\text{НОМ}} = 2,28 \cdot 10^{-4} D_{\Pi}^3 [(i - 10)/80]^{0,45}. \quad (14)$$

Относительные зазоры определяются соотношениями

$$\psi_{h1} = \frac{h_1}{D_{\Pi}}; \quad \psi_L = \frac{L}{D_{\Pi}}, \quad (15)$$

где  $L$  – длина гибкого колеса.

Если применять терминологию, касающуюся оптимизации, то формула (1) является целевой функцией, значение которой необходимо максимизировать. Как видно из приведенных выше формул, можно выделить следующие аргументы целевой функции:

$h_d$  – глубина захода зубьев;

$L$  – длина гибкого колеса;

$h_{\text{Ж}}$  – толщина жесткого колеса;

$Z_{\text{Ш}}, D_{\text{Ш}}$  – число и диаметр шариков в случае применения шариковых подшипников;

$Z_p, l_p$  – число и длина роликов подшипника в случае использования роликовых подшипников.

В качестве констант оптимизации будут взяты следующие параметры:

$i$  – передаточное отношение;

$D_{\Pi}$  – диаметр отверстия гибкого колеса;

$E, G$  – модули упругости материала жесткого и гибкого колес.

Для проведения оптимизации нами был выбран метод Хука-Дживса, который также называется методом поиска по образцу. Данный метод позволяет обеспечить максимизацию целевой функции с достаточной точностью и скоростью. Программирование метода проведено на рабочей станции типа IBM PC с операционной системой MS Windows XP. В качестве среды программирования была взята система Borland Delphi 7.0.

Ниже приведен алгоритм данного метода (рис. 2) [2]. Данный алгоритм является достаточно адаптивным и может быть использован при решении многих оптимизационных задач. Подробнее остановимся на выполнении исследования функции в точке (рис. 3) [2].

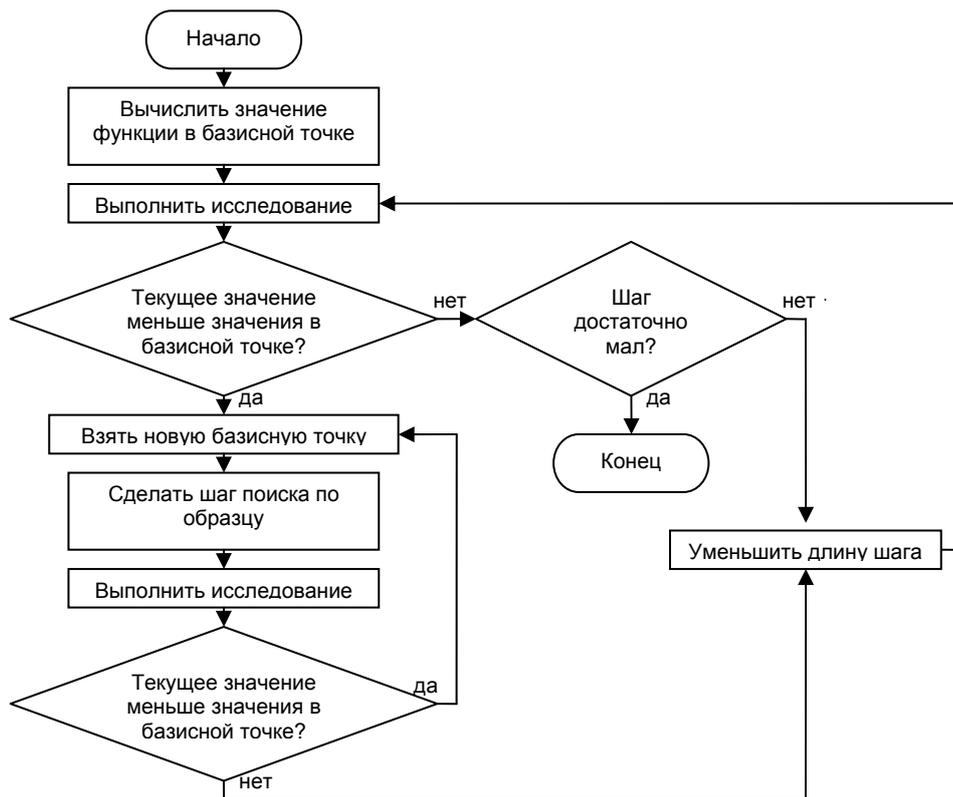


Рис. 2. Алгоритм метода Хука-Дживса

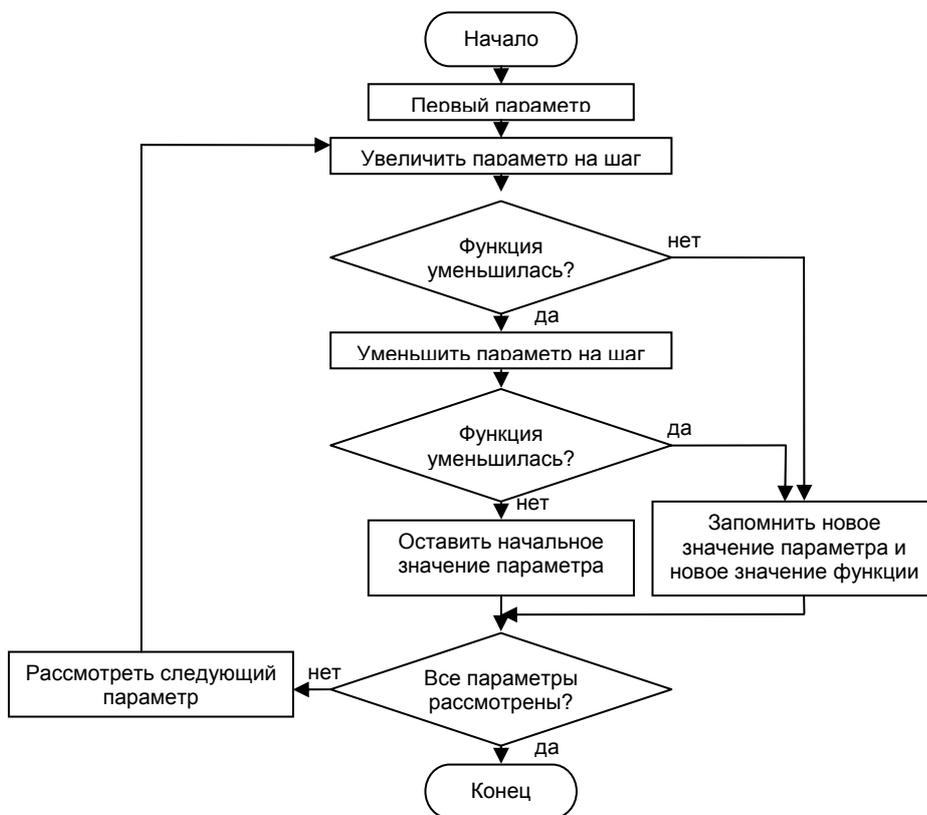


Рис. 3. Процедура исследования функции в точке

Результаты оптимизации целевой функции приведены в табл. 1. Оптимизация проведена при определенных параметрах констант оптимизации с точностью  $\epsilon=0,00001$ .

Таблица 1

Результаты оптимизации

Константы оптимизации					Параметры				
i	G, Н/мм <sup>2</sup>	E, Н/мм <sup>2</sup>	тип подшипника	D <sub>п</sub> , мм	h <sub>d</sub> , мм	L, мм	h <sub>к</sub> , мм	Z <sub>ш</sub> , мм	D <sub>в</sub> , мм
85	$8 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^5$	шариковый	121,5	0,9	135,4	17,2	8	45

Помимо максимизации целевой функции было исследовано влияние некоторых параметров на значение предельного вращающего момента. Графики результатов исследования показаны на рис. 4-6.

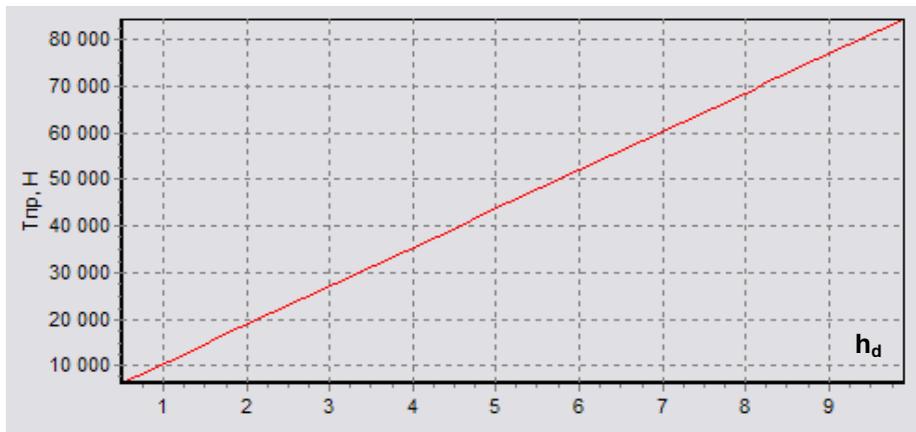


Рис. 4. Зависимость предельного вращающего момента от глубины захода зубьев при  $i=80$ ;  $E=2,1 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $G=8 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>;  $D_{п}=120$  мм;  $L=500$  мм;  $h_{к}=25$  мм; шариковый подшипник с  $Z_{ш}=20$  и  $D_{в}=6$  мм

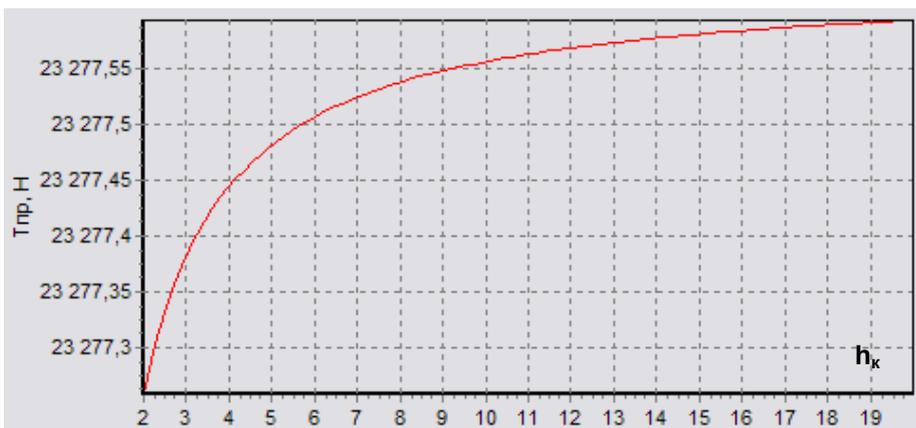


Рис. 5. Зависимость предельного вращающего момента от толщины жесткого колеса при  $i=80$ ;  $E=2,1 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $G=8 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>;  $D_{п}=120$  мм;  $L=500$  мм;  $h_{d}=3$  мм; шариковый подшипник с  $Z_{ш}=20$  и  $D_{в}=6$  мм

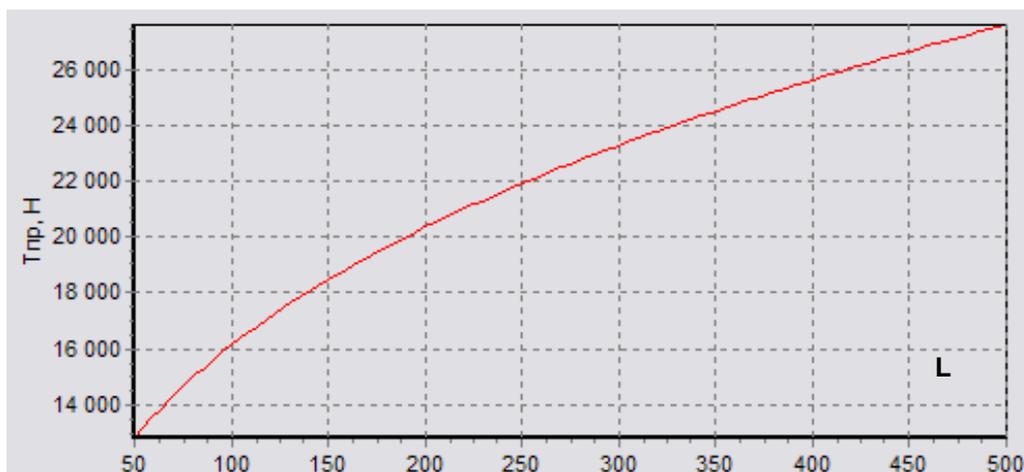


Рис. 6. Зависимость предельного вращающего момента от длины жесткого колеса при  $i=80$ ;  $E=2,1 \cdot 10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $G=8 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>;  $D_{\Pi}=120$  мм;  $h_d=3$  мм;  $h_k=25$  мм; шариковый подшипник с  $Z_{\text{ш}}=20$  и  $D_{\text{ш}}=6$  мм

### Заключение

1. Разработана и реализована методика проведения оптимизации параметров ВЗП по предельному вращающему моменту. Оптимизация заключается в максимизации значения целевой функции.

2. Получены результаты оптимизации при определенных значениях констант. Исследовано также влияние параметров ВЗП на значение целевой функции.

3. Разработано ПО, позволяющее автоматизировать процедуру оптимизации ВЗП по предельному вращающему моменту.

### Список литературы

1. Полетучий А.И. Теория и конструирование высокоэффективных волновых зубчатых механизмов: Монография. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2005.- 675 с.

2. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

3. МВТУ им. Баумана, кафедра РК-2. Учебно-методический комплекс по Теории Механизмов и Машин. Лекции. Лекция 18 [Электронный ресурс]: база данных методической и учебной информации. – Электрон. данные (1 файл). – Режим доступа: [http://tmm-umk.bmstu.ru/lectures/lect\\_18.htm](http://tmm-umk.bmstu.ru/lectures/lect_18.htm). – Загл. с экрана.

4. Мотор-редукторы. Мотор-барабаны. Редукторы. Колеса и муфты. Некоторые вопросы сборки волновых зубчатых редукторов [Электронный ресурс]: база данных технической информации. – Электрон. данные (1 файл). – Режим доступа: [http://www.gears.ru/bar\\_s\\_1.htm](http://www.gears.ru/bar_s_1.htm). – Загл. с экрана.

5. Безбородько В., Крючков А. САПР. Процесс или ритуал? // САПР и Графика. – 1998. – №9. – С.7-13.

## Зносостійкість розмірного ланцюга “вал генератора – гнучке колесо” силових хвильових зубчастих передач

*Національний технічний університет “ХПІ”*

Силові хвильові зубчасті передачі (СХЗП) знаходять широке застосування у приводах будівельної техніки. Розмірний ланцюг “вал генератора ГК” в процесі експлуатації зношується, причому в зоні багатоциклової витривалості, проте, боковина, як кінцевий елемент цього розмірного ланцюга найбільше піддається втомному руйнуванню.

В процесі зношування цього розмірного ланцюга збільшується амплітудно-частотна характеристика коливань і вала генератора хвиль і власне генератора, при цьому збільшується рівень еквівалентних  $\sigma_{\text{екв}}$  напружень, що діють на ГК і  $\sigma_{\text{екв}} \rightarrow \sigma_{-1}$ , і при досягненні їх рівності  $\sigma_{\text{екв}} = \sigma_{-1}$  в зоні циклової витривалості виникає втомна тріщина з врахуванням масштабного фактора, концентраторів напружень та показників якості контактних поверхонь, [1,2,3,4].

### Контактна теорія пружності при зношуванні розмірного ланцюга “вал генератора ГК”

Розглянемо відому, [1,2,3], контактну задачу при наявності зношування (модель Л. А. Галіна – О. Г. Приймакова), пов'язану з визначенням зносу визначеного на півпросторі початково зігнутою балкою. Пружним на півпросторі є по суті розмірний ланцюг “вал генератора ГК”, а зігнутою балкою слугує вал генератора, що здійснює коливання.

Вважатимемо, що швидкість зміни прогину  $\delta = \frac{d\varpi}{dt}$ , де  $\varpi$  – прогин балки (див. рис. 1,а) і визначається емпіричним співвідношенням гіпотези Престюка:

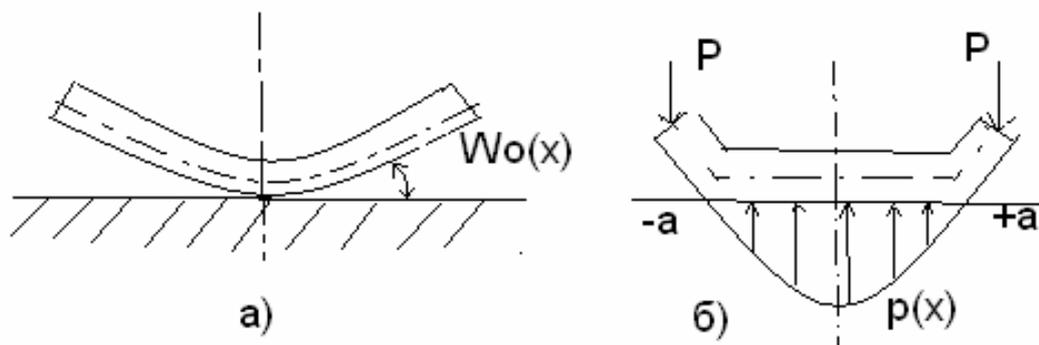


Рис. 1. Знос пружного напівпростору зігнутою балкою.

$$\delta = \frac{d\varpi}{dt} = \kappa^* v \tau = \kappa \sigma, \quad (1)$$

Де  $\kappa^*$  - коефіцієнт пропорційності між роботою сил тертя та кількістю видаленого матеріалу;  $\nu$  - усереднений модуль швидкості переміщення балки;  $\tau = \kappa^{**}\sigma$  – тангенційне зусилля згідно закону Кулона;

$\kappa^{**}$  - коефіцієнт тертя,  $\sigma$  – нормальне навантаження;  $\kappa = \kappa^{**}\nu\kappa^*$ .

Тиск на краях площини вважаємо рівним нулю, а в зоні контакту зменшується в часі.

Внаслідок зносу прогин  $w$  зменшується на величину:

$$w_0(x) - w(x, t) = \kappa \int_0^t p(x, t) dt, \quad (2)$$

Так як тиск  $p(x, t)$  та прогин  $w(x, t)$  пов'язані диференціальним рівнянням:

$$p(x, t) = EI \frac{d^4 w(x, t)}{dx^4}, \quad (3)$$

Де  $I$  – момент інерції перетину балки.

Із виразу (2) витікає інтегродиференціальне рівняння:

$$w(x, t) = w_0(x) - \kappa EI \frac{d^4}{dx^4} \int_0^t w(x, t) dt, \quad (4)$$

Це рівняння підстановкою  $w_\beta(x, t) = e^{-\beta t} w(x, t)$  може бути зведене до диференціального рівняння:

$$\frac{d^4 w_\beta(x^*)}{dx^{*4}} - \left(\frac{\pi}{\alpha}\right) \frac{\beta}{EI\kappa} w_\beta(x^*) = 0, \quad (5)$$

Де  $x^* = \frac{\pi}{\alpha} x$

Загальний розв'язок рівняння (5) має вигляд:

$$w_\beta(x^*) = \lambda_1 \sin \nu x^* + \lambda_2 \cos \nu x^* + \lambda_3 \operatorname{sh} \nu x^* + \lambda_4 \operatorname{ch} \nu x^*, \quad (6)$$

Де  $\lambda_1 \dots \lambda_4$  - коефіцієнти І. Ляпунова, параметр  $\nu = \left(\frac{\beta}{EI\kappa}\right)^{1/4} \frac{\pi}{\alpha}$ .

Визначаючи власні значення  $\nu_n$  та власні функції  $\varphi_n$  рівняння (5) та розкладаючи початкове значення  $w_0(x^*)$  в ряд по власних функціях:

$$w_0(x^*) = \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_n \varphi_n(x), \quad (7)$$

Отримаємо загальний розв'язок задачі:

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \kappa_n \exp\left(-\frac{\alpha^4 EI \kappa}{\pi^4} \nu_n^4 t\right) \varphi_n(x^*), \quad (8)$$

При цьому використано наступну крайову умову для визначення коефіцієнтів І. Ляпунова  $\lambda_1 \dots \lambda_4$ :  $w_\beta(x^*) = w'_\beta(x^*) = 0$  при  $x^* = \pm\pi$ .

Розв'язок диференціального рівняння (3) дає закон розподілу тиску  $p(x)$  під зігнутою балкою:

$$p(x) = -\frac{4P}{3\pi a^2} [(a^2 + 2x^2)\sqrt{a^2 - x^2}], \quad (9)$$

Згідно [5,6,7], відділення частинок зносу обумовлюється процесами структурної пошкодженості; інтенсивність поверхневого руйнування в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалу може бути представлена комплексом, [8,9]:

$$I \sim \left( HB^{\frac{1+\beta m}{1-\beta}} \cdot \varepsilon_0^m \right)^{-1}, \quad (10)$$

де:  $\beta$  - параметр шорсткості;  $m$  – показник фрикційної втоми в класичному рівнянні Велера;  $HB$  – твердість по Бріннелю. В [9] для однофазних полікристалічних тіл (конструкційні сталі) отримано залежність:

$$I \sim \left[ HB^{1.75} d^2 b^2 (\rho_{кр} - \rho_0)^2 \right]^{-1}, \quad (11)$$

де:  $d$  – діаметр контактуючого тіла,  $b$  – розмір плями контакту,  $\rho_{кр}$  – радіус критичної плями контакту,  $\rho_0$  – радіус початкової плями контакту.

Позначаючи праву частину співвідношення (11) через  $\Pi$ , як зроблено в [10], регресійне рівняння, що пов'язує зв'язок комплексу  $\Pi$  з інтенсивністю зношування  $I$ , приймає вигляд:

$$I = 0,51 \cdot 10^{-9} + 1,52 \cdot 10^{-20} \Pi, \quad (12)$$

Адекватність рівняння (12) там же перевірено по F-критерію.

Слід розуміти так, що до значення амплітуди коливань системи “вал генератора ГК”  $A_{max}$  слід додати значення  $\varpi(x, t)$  і, лише після цього, визначати кількість зміни циклів знако- і амплітудно-частотних навантажень, тобто:

$$A_{max} + \varpi(x, t) \sim n \Rightarrow N \Rightarrow \frac{c}{\sigma_{ска}^m}, \quad (13)$$

### Список літератури

1. Крагельский И.В., Непомнящий Е.Ф., Об усталостном механизме износа при упругом контакте. – Ан СССР, ОТН. – 1963. – Вып. 5. – с. 190-192.
2. ГОСТ 30480-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования. – М.: Изд.стандартов, 1997. – 60 с.
3. Костецкий Б.И., Колиниченко Н.В. Качество поверхности и трение в машинах. – К.: Техника, 1969. – 215 с.
4. Приймаков О.Г., Бобровицкий О.В., Лисяк О.О., Прогнозування надійності, довговічності та витривалості авіаційних матеріалів //Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2003” – Т.3. – К.: Вид. НАУ, 2003. – с. 32.39 – 32.42.
5. Приймаков О.Г., Бобровицкий О.В. Прогнозування витривалості авіаційних матеріалів. – Вестник науки и техники. – 2002. – Вып.4. с – 5 – 11.
6. Приймаков О.Г., Бобровицкий О.В. Прискорене визначення межі витривалості авіаційних матеріалів. – Вестник науки и техники. – 2003. – Вып..1. с. 4 – 8.
7. Приймаков О.Г., Бобровицкий О.В., Лисяк О.О. Циклічна довговічність деталей авіаційної техніки. – Открытие информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2003. Вып . 18. – с. 147 – 153.
8. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Бобровицкий О.В. Працездатність деталей авіаційної техніки з точки зору термодинаміки. – Вестник науки и техники – 2003. Вып. 4. – с. 21- 28.
9. Приймаков О.Г., Приймаков Г.О., Чотій Л.Ю. Розрахунок на повзучість деталей авіаційної техніки. – Вестник науки и техники – 2003. Вып. 4. – с. 28- 34.
10. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин //Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

## **Оценка вероятности потери технической устойчивости ракеты-носителя методом ускоренного статистического моделирования**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

### ***Постановка проблемы, цель работы***

Важным моментом при оценке управляемости ракеты-носителя (РН) является определение запаса технической устойчивости движения. Для решения этой задачи в работе [1] была разработана эталонная модель. Оценка вероятности технической устойчивости ракеты-носителя (РН) в вышеупомянутой работе произведена методом статистического моделирования. В результате проведенных исследований получен доверительный интервал вероятности потери устойчивости движения РН ( $Q_d \in [3.5 \cdot 10^{-5} \dots 6.1 \cdot 10^{-5}]$  при объеме статистического моделирования  $N=1000000$ ).

Метод оценки вероятности технической устойчивости РН, изложенный в работе [1], рассматривает устойчивость объекта на конечном интервале времени с учетом начальных возмущений и постоянно действующих возмущающих сил и моментов. Этот метод является наиболее подходящим для решения сложных вероятностных задач, т.к. позволяет учесть вероятностные характеристики большого количества параметров, имеющих случайные разбросы, и получить значение вероятности потери технической устойчивости, наиболее близкое к реальному значению, т.е. эталонное значение. Однако этот метод имеет существенный недостаток — большие затраты машинного времени на проведение эксперимента [1]. Эту проблему решает метод ускоренного статистического моделирования (УСМ) путем проведения моделирования с аппроксимирующей моделью исходной критериальной функции (КФ).

Целью данного исследования является определение приемлемости оценки вероятности потери технической устойчивости ракеты-носителя методом УСМ.

### ***Объект исследования***

Динамика ракеты в канале рыскания I ступени полета РН описывается системой дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. На этом участке ракета проходит максимальные скоростные напоры, и органы управления испытывают максимальную нагрузку. Поскольку основная загрузка органов управления на рассматриваемом этапе связана с парированием возмущающих моментов, то для сокращения времени проведения статистического моделирования в работе [1] рассматривались только уравнения моментов и автомата стабилизации. Для возможности сравнения полученных здесь результатов с эталонными [1] мы сохранили ту же динамическую схему.

$$\begin{aligned} a_{\psi\psi}(t) \cdot \psi + a_{\psi\delta}(t) \cdot \delta &= -M(t); \\ T_1 \cdot \delta' + \delta &= K_{\psi} \cdot \psi + K_{\psi'} \cdot \psi', \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\psi$  — координата, характеризующая вращение ракеты вокруг центра масс (угол рыскания);  $\delta$  — угол отклонения управляющих органов;  $a_{ij}(t)$  — функции, выражающие закон изменения параметров ракеты;  $T_1$  — постоянная времени автомата стабилизации (АС);  $K_\psi$  — коэффициент усиления по каналу рыскания,  $K_{\psi'} = T_d K_\psi$ ;  $T_d$  — постоянная времени дифференцирования;  $\bar{M}(t)$  — приведенный возмущающий момент в функции времени;  $\dot{\psi}_g$  — угол рыскания, измеряемый датчиком угла;  $K_z$  — коэффициент усиления по скорости отклонения центра масс. В этой системе  $\bar{M}(t) = a_{\psi z}(t) \cdot W(t)$ , где  $W(t)$  — ветровое воздействие на ракету.

Номинальные значения параметров системы (1) и их разбросы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение параметра	Наименование	Номинальное значение	Разброс, %
$K_\psi$	Коэффициент усиления по каналу рыскания	6	7
$T_d$	Постоянная времени дифференцирования	0,5	25
$T_1$	Постоянная времени АС	0,1108	20
$a_{\psi\psi}$	Функции выражающие закон изменения параметров ракеты	См. рис. 1	25
$a_{\psi\delta}$		См. рис. 2	10

Ветровые воздействия, учитывающие влияние случайных возмущений и начальных условий на устойчивость РН, представляются в виде канонического разложения [2]

$$W(t) = W_0(t) + \sum_i V_i \cdot \varphi_i(t), \quad (2)$$

где  $W_0(t)$  — систематическая составляющая скорости ветра;  $\varphi_i(t)$  — неслучайные функции, называемые координатными;  $V_i$  — стандартные случайные числа, распределенные по нормальному закону. Задавая  $V_i$  и подставляя их в (2) получим реализации профиля ветра с учетом высотной корреляции его значений.

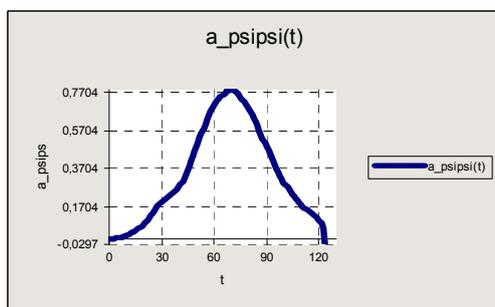


Рис. 1. Номинальное значение коэффициента  $a_{\psi\psi}(t)$

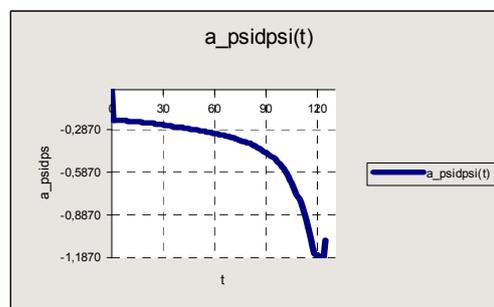


Рис. 2. Номинальное значение коэффициента  $a_{\psi\delta}(t)$

Графики изменения систематической составляющей ветра  $W_0(t)$  и среднего значения функций  $\varphi_i(t)$  показаны на рис. 3 и 4.

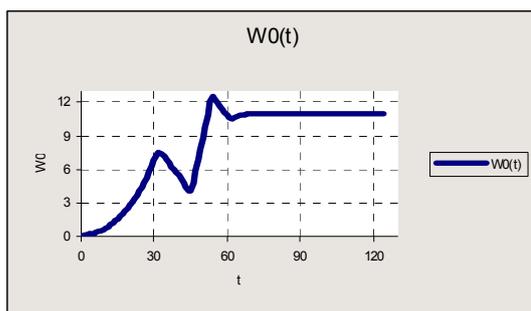


Рис. 3. Систематическая составляющая скорости ветра  $W_0(t)$

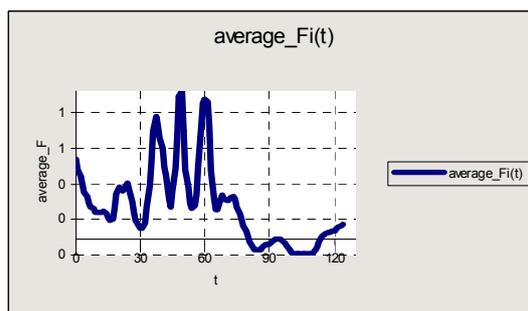


Рис. 4. Среднее значение координатных функций  $\varphi_i(t)$

Вероятность потери технической устойчивости будет определяться вероятностью выхода за допустимый уровень значения отклонения управляющих органов  $\delta(t)$ . В качестве условия технической устойчивости рассмотрим условие

$$|\delta(k, \eta, t)| < \Lambda, \quad (3)$$

где  $\delta$  — угол отклонения управляющих органов РН, эта критериальная функция (КФ) изменяется в зависимости от времени t и возмущений (параметрических  $\eta$  и внешних  $k$ );  $\Lambda$  — предельно допустимое значение угла отклонения  $\delta$ .

### **Методика исследования. Основные результаты**

Применение метода УСМ позволяет получить вероятность технической устойчивости с заданной точностью и значительно сокращает время моделирования по сравнению с обычным статистическим моделированием.

#### **Порядок оценки технической устойчивости РН методом УСМ:**

- 1) задание объема моделирования  $N$  и  $N_L$  — объема сохраняемых максимальных значений  $\delta(t)$ ;
- 2) генерация нормальных случайных чисел  $v_i$ ;
- 3) задание необходимых параметров системы дифференциальных уравнений (1) с учетом случайных разбросов параметров;
- 4) построение аппроксимирующих моделей КФ для всех моментов времени на исследуемом отрезке;
- 5) нахождение  $N_\Lambda$  максимальных реализаций КФ, вычисленных по аппроксимирующей модели;
- 6) сортировка и сохранение массивов случайных реализаций КФ и разбросов параметров, соответствующих найденным максимальным реализациям КФ;
- 7) решение системы уравнений (1) и сохранение полученного статистического материала;

- 8) сортировка полученного массива реализаций КФ для фиксированного момента времени и определение количества реализаций, превысивших допустимую границу устойчивости РН (см. условие (3));
- 9) определение вероятности потери технической устойчивости РН при заданных условиях:

$$Q = \frac{N_{\Lambda}}{N}, \quad (5)$$

где  $N_{\Lambda}$  — количество значений функции случайного аргумента, превысивших границу  $\Lambda$ ;  $N$  — объем моделирования.

Для оценки технической устойчивости на исследуемом интервале времени построены следующие граничные модели КФ[4]:

- классическая линейная модель (КЛМ);
- компланарная линейная модель (КНЛМ);
- секущая граничная линейная модель (СЛМ);
- квадратичная модель (КМ);
- многомерная аппроксимирующая квадратичная модель (МКМ).

Все линейные модели определены в виде [3,4]

$$\lambda(t) = \delta_0(t) + \sum_{i=1}^k \delta_i(t) \cdot v_i + \lambda_0(t) + \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot \eta_i,$$

где  $\lambda(t)$  — линейная модель КФ;  $\lambda_0(t)$  — значение КФ при нулевых разбросах;  $b_i(t)$  — коэффициенты линейных моделей КФ;  $\eta_i$  — случайные разбросы параметров,  $i = \overline{1, n}$  ( $n$  — количество параметров со случайными разбросами),  $\eta_i = v_i \cdot \sigma_i$ ,  $v_i$  — случайные числа, распределенные по нормальному закону,  $\sigma_i$  — с.к.о. разбросов параметров;  $\delta_0(t)$  — систематическая составляющая ветровых возмущений;  $\delta_i(t)$  — значение КФ при действии возмущения  $i$ -й функции  $\varphi_i(t)$ .

Квадратичная модель определена в виде

$$\lambda(t) = \delta_0(t) + \sum_{i=1}^k \delta_i(t) \cdot v_i + \lambda_0(t) + \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot \eta_i + \sum_{i=1}^n c_i(t) \cdot \eta_i^2,$$

где  $b_i(t)$  и  $c_i(t)$  — коэффициенты квадратичной модели КФ.

Модель многомерной аппроксимации КФ определена в виде

$$\lambda(t) = \delta_0(t) + \sum_{i=1}^k \delta_i(t) \cdot v_i + \lambda_0(t) + \sum_{i=1}^n b_i(t) \cdot \eta_i + \sum_{i=1}^n c_i(t) \cdot \eta_i^2 + \sum_{i < j} d_{ij}(t) \cdot \eta_i \cdot \eta_j,$$

где  $b_i(t)$ ,  $c_i(t)$  и  $d_{ij}(t)$  — коэффициенты модели КФ.

Полученные значения некоторых коэффициентов для линейных и квадратичных моделей представлены в виде графиков на рис. 5 - 14.

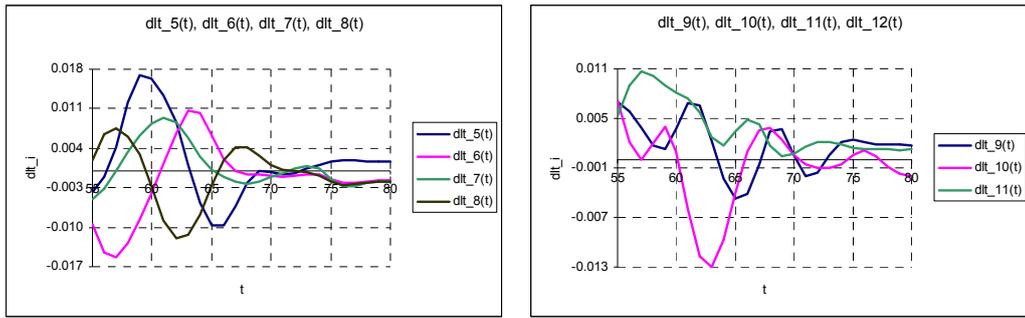


Рис. 5. Значения КФ при действии возмущения  $i$ -той  $\varphi_i(t)$  функции ( $\delta_i(t)$ ,  $i=1..11$ )

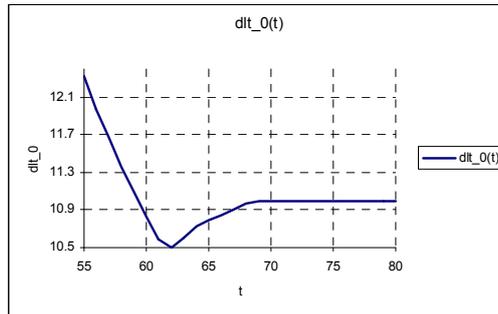


Рис. 6. Значение КФ при действии систематической составляющей ветровых возмущений  $\delta_0(t)$

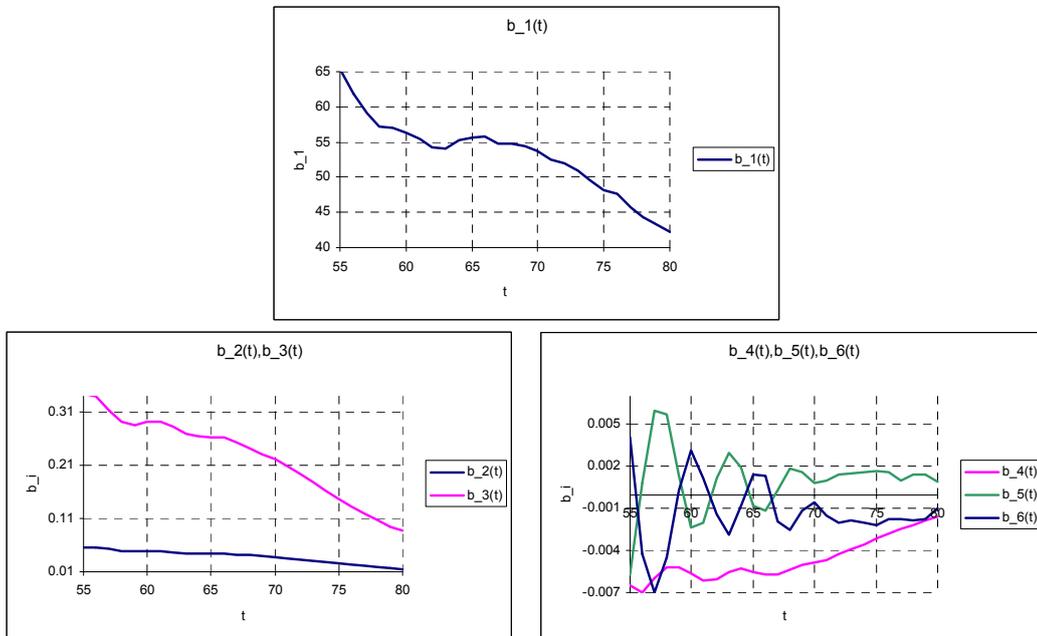


Рис. 7. Коэффициенты линейных моделей КФ  $b_i(t)$  для КЛМ и КНЛМ

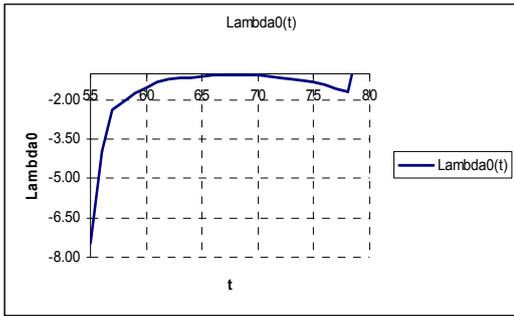


Рис. 8. Значение КФ при нулевых разбросах ( $\lambda_0(t)$ ) для КНЛМ

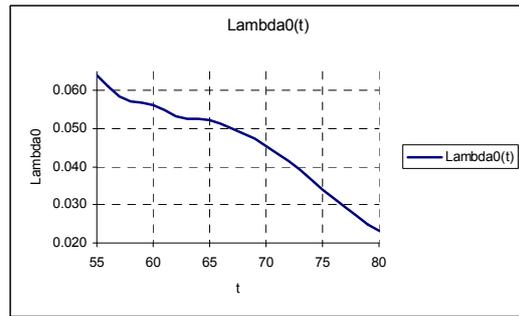


Рис. 9. Значение КФ при нулевых разбросах ( $\lambda_0(t)$ ) для КЛМ и СЛМ

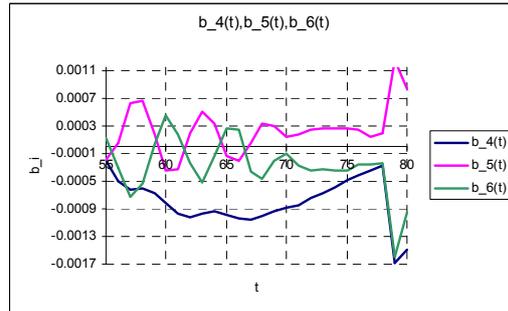
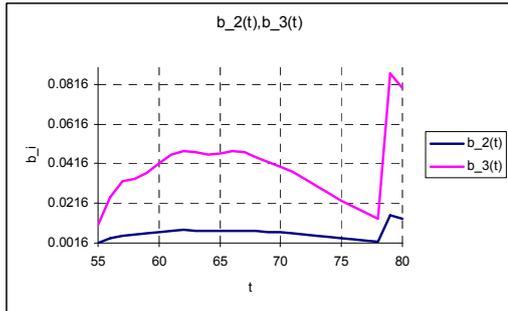


Рис. 10. Коэффициенты линейных моделей КФ  $b_i(t)$  для СЛМ

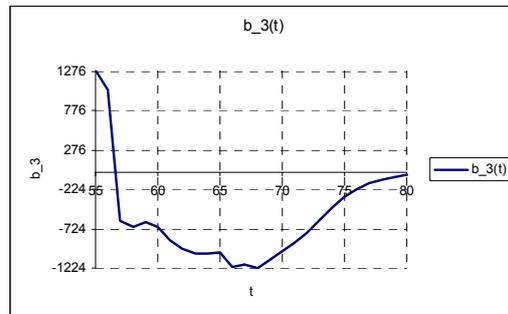
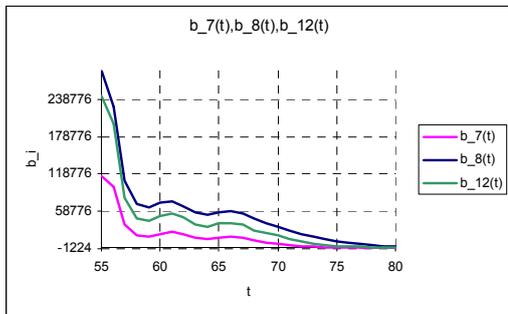
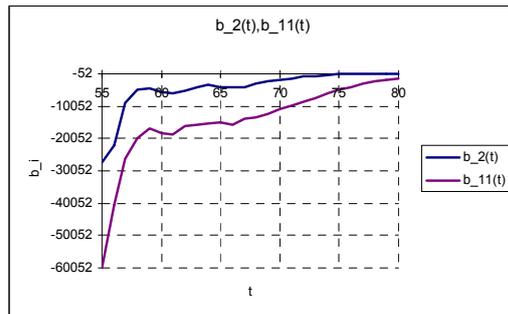
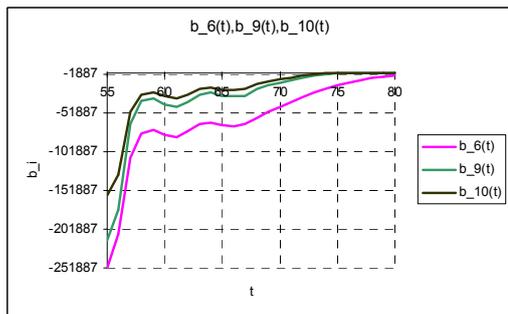
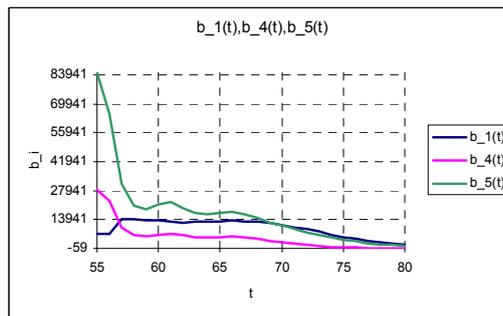


Рис. 11. Коэффициенты линейных моделей КФ  $b_i(t)$  для КМ

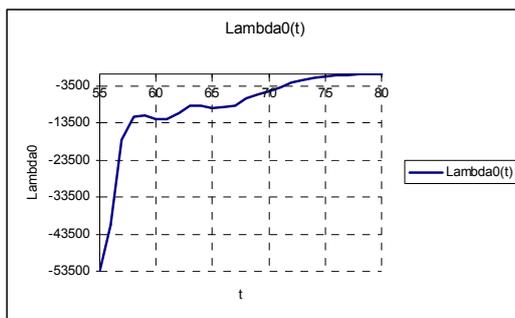


Рис. 12. Значение КФ при нулевых разбросах ( $\lambda_0(t)$ ) для КМ

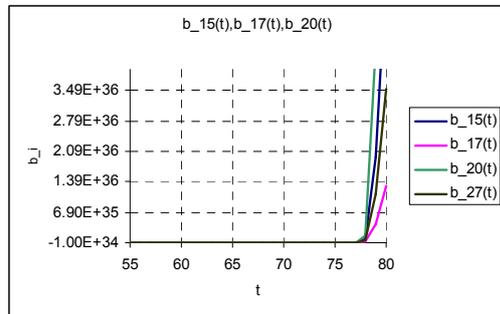
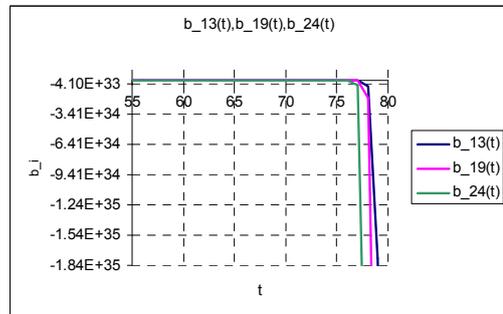
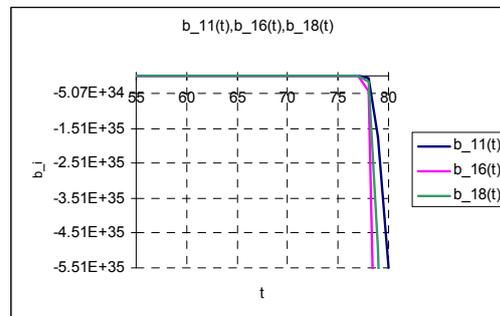
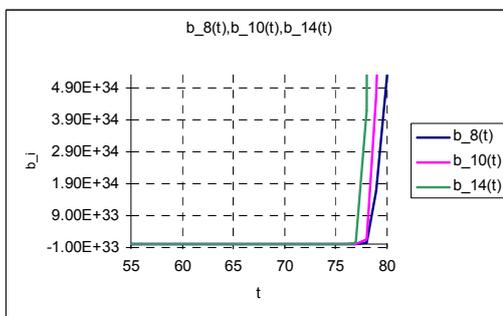
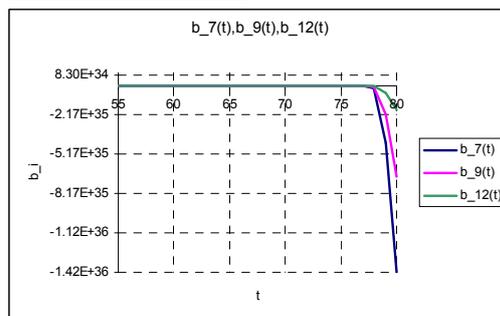
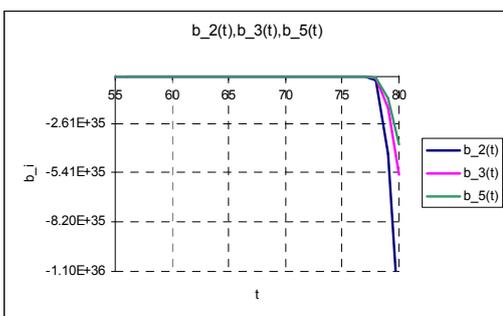
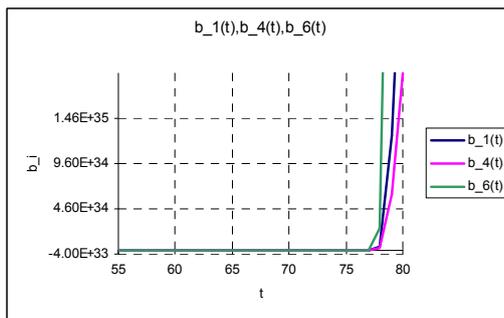


Рис. 13. Коэффициенты линейных моделей КФ  $b_i(t)$  для МКМ

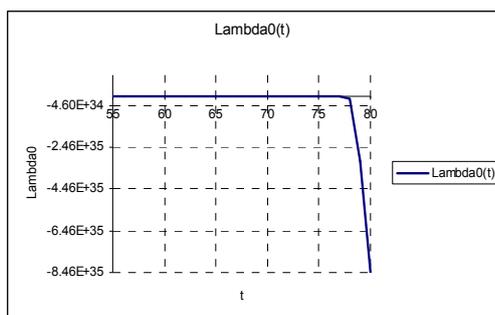


Рис. 14. Значение КФ при нулевых разбросах ( $\lambda_0(t)$ ) для МКМ

Как отмечалось выше, для оценки технической устойчивости исследуемого объекта построены граничные модели и проведено УСМ [5,6] на интервале времени  $t \in [30..85]$ . Моделирование осуществлялось в объеме  $N=1000000$ . В качестве предельно допустимого значения угла отклонения управляющих органов принято значение  $\Lambda=0,3$ . По полученному статистическому материалу определена вероятность потери технической устойчивости  $Q$  (5). Замеры затрат машинного времени показали, что для одинакового объема статистического материала УСМ заняло 30 минут, в то время как обычное статистическое моделирование проводилось примерно 240 часов.

В табл. 2 приведены полученные результаты.

Таблица 2

Способ моделирования	$N_\Lambda$	$Q$
КЛМ	2	2,0E-06
КНЛМ	2	2,0E-06
СЛМ	2	2,0E-06
КМ	30	3,0E-05
МКМ	72	7,2E-05

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показывает, что использование граничных линейных моделей при исследовании технической устойчивости методом УСМ является неприемлемым, т.к. приводит к большой погрешности конечного результата (отличие от эталонного результата на порядок). Модели КМ и МКМ позволяют получить весьма приемлемый по точности результат.

Поэтому для моделей КМ и МКМ определим объем моделирования с целью получения конечного результата с заданными точностью и доверительной вероятностью. Зададим точность конечного результата (вероятности потери технической устойчивости), равную 30% при доверительной вероятности  $P_d=0,95$  (традиционная для аэрокосмической техники доверительная вероятность).

Объем статистического моделирования вычислим по формуле [3]

$$N = \frac{U_d^2}{\beta^2 \cdot Q}, \quad (6)$$

где  $U_d$  — безразмерный аргумент функции Гаусса, соответствующий доверительной вероятности;  $Q$  — вероятность потери технической устойчивости РН;  $\beta$  — относительная погрешность  $Q$ . Для заданной точности 30% относительная погрешность  $\beta = 0.3$ .

Для заданной доверительной вероятности  $P_d = 0,95$  получаем:

$$U_d = \arg \Phi\left(\frac{1+P_d}{2}\right), \Phi — \text{функция Гаусса};$$

$$U_d = \arg \Phi\left(\frac{1+0.95}{2}\right) = 1,96.$$

По формуле (3) вычислим объемы моделирования:

- для КМ

$$N_{KM} = \frac{1.96^2}{0.3^2 \cdot 3 \cdot 10^{-5}} = 1.42 \cdot 10^6;$$

- для МКМ

$$N_{MKM} = \frac{1.96^2}{0.3^2 \cdot 7.2 \cdot 10^{-5}} = 5.93 \cdot 10^5.$$

В результате УСМ, проведенного для вычисленных объемов, получены следующие значения вероятности потери технической устойчивости:

- для КМ

$$Q_{KM} = 3.5 \cdot 10^{-5};$$

- для МКМ

$$Q_{MKM} = 5.2 \cdot 10^{-5}.$$

Таким образом, обе оценки вероятности потери технической устойчивости попадают в доверительный интервал, полученный для эталонной модели.

### **Выводы**

1. Для оценки вероятности потери технической устойчивости РН применение УСМ позволяет значительно сократить время моделирования. Для рассмотренного здесь примера выигрыш составил около 500 раз.
2. Использование квадратичных моделей и многомерных аппроксимирующих квадратичных моделей при проведении УСМ для оценки вероятности

потери технической устойчивости РН позволяет получить результат с заданной точностью при заданной доверительной вероятности.

3. Результаты УСМ, полученные с использованием линейных граничных моделей, могут быть использованы лишь на начальных этапах проектирования РН.

### Список литературы

1. Никифорова М.И. Эталонная модель для оценки вероятности потери технической устойчивости ракеты-носителя // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2007. – Вып. 35. - С. 30 - 36.
2. Игдалов И.М., Кучма Л.Д., Поляков Н.В., Шептун Ю.Д. Ракета как объект управления: Учебник /Под ред. акад. С.Н. Конюхова. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2004. –544 с.
3. Лежнина М.В., Сухоробрый В.Г. Проектная оценка вероятности достижения объектами аэрокосмической техники предельных состояний. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2005. – 184 с.
4. Лежнина М.В., Сухоробрый В.Г. Алгоритмы построения граничных линейных моделей критериальных функций для оценки вероятности работоспособности объектов аэрокосмической техники// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Х.: НАКУ «ХАИ». – 2002. – Вып. 12. - С. 63 - 74.
5. Сухоробрый В.Г. Оценка вероятности работоспособности технических объектов с помощью ускоренного статистического моделирования// Авиационно-космическая техника и технология. - Х.: ХАИ. – 2000. – Вып. 19. - С. 215 - 218.
6. Сухоробрый В.Г., Айзенберг Е.Я. Ускоренное статистическое моделирование для оценки вероятности устойчивости динамических систем со случайными параметрами // Математическое моделирование динамических процессов в системах с жидкостью. – К.: ИМ АН УССР. – 1988. – С. 128 – 136

## **Синтез алгоритма функционирования привода регулятора давления в программно-аппаратной модели контроля системы автоматизированного управления газораспределительной станцией**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Различные программно-аппаратные контрольно-проверочные комплексы, имитирующие функционирование управляемого объекта, строятся для организации контроля и проверки правильности функционирования систем автоматизированного управления (САУ) на этапе отработки режимов их работы, а также для определения соответствия многих технических параметров системы установленным допускам в случае отсутствия непосредственного доступа к управляемому объекту. Построение подобных электронных контрольно-проверочных комплексов осуществляется на основе предварительно спроектированной модели контроля, которая учитывает все особенности структуры САУ и режимы ее работы, а также особенности объекта, имитацию функционирования которого она осуществляет.

В нашем случае управляемым объектом является газораспределительная станция (ГРС), и для соответствующей ей САУ производится синтез модели контроля, на основе которой строится соответствующий контрольно-проверочный комплекс. ГРС выполняет функции обеспечения поставок природного газа из центральных газотранспортных магистралей, а также последующего его распределения между населенными пунктами (использование газа в бытовых целях) и различными промышленными предприятиями (использование газа в качестве сырья либо источника полезной энергии для различных видов работ). Данный тип объектов является одним из наиболее важных во всей энергетической инфраструктуре государства, и поэтому для обеспечения стабильного и безопасного функционирования ГРС в настоящее время интенсивно разрабатываются и внедряются новые виды САУ. Этот факт и определяет необходимость разработки электронных контрольно-проверочных комплексов, отвечающих всем современным требованиям. Наиболее оптимальным и удобным методом решения поставленных задач является синтез универсальной и гибкой модели контроля для построения на ее основе универсальных контрольно-проверочных комплексов.

Структура модели контроля представляет собой систему, состоящую из блока имитатора структуры объекта (моделируется в виде системы алгоритмов, отображающих работу оборудования) и блока имитатора процессов функционирования (проектируется в виде динамической математической модели режимов функционирования объектов). Подобная структура модели характеризуется достаточной достоверностью имитации объекта и удобством при дальнейшей практической реализации модели. Помимо этого, такой подход к синтезу имитационных моделей ранее не применялся при решении задач проектирования контрольно-проверочных комплексов.

Структуру модели контроля можно представить в виде блок-схемы, которая представлена на рис. 1.

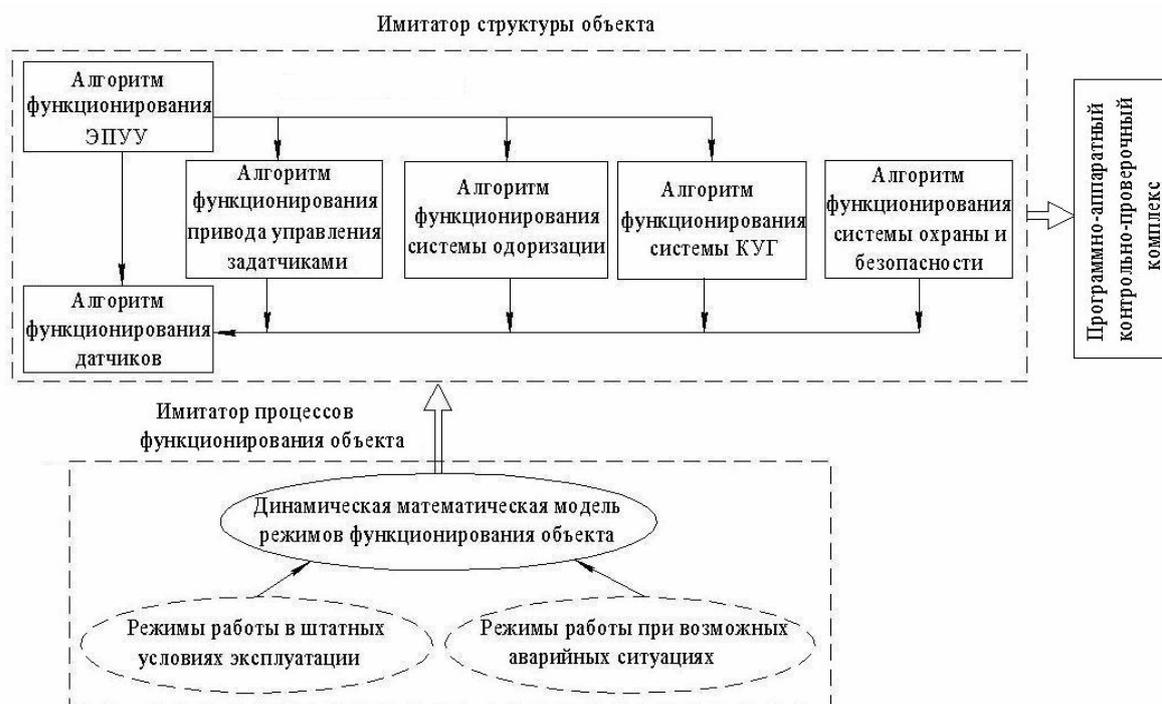


Рис. 1

В структуре объекта присутствует ряд некоторых однотипных видов оборудования, функционирующих по одинаковому алгоритму (в том числе и разрабатываемый алгоритм имитации работы привода регулятора давления), и поэтому для таких множеств однотипных устройств разрабатывается единый алгоритм, а при окончательном синтезе имитатора структуры объекта вышеуказанные перечни оборудования рассматриваются как  $n$ -мерные массивы алгоритмов.

Алгоритм имитации функционирования оборудования должен обеспечивать при дальнейшей его программно-аппаратной реализации максимальную достоверность воспроизведения законов функционирования и динамических характеристик исходного объекта. Также важным моментом при разработке подобных имитационных алгоритмов является получение гибкой структуры, необходимой для обеспечения возможности автоматической подстройки через САУ некоторых параметров и характеристик исходного оборудования.

Перед началом проектирования алгоритма следует произвести описание физического устройства и структуры данного типа оборудования, а также определить перечень переменных, необходимых для разработки. Переменные должны соответствовать возможным состояниям устройства и определенным состояниям управляющих сигналов, приходящих от САУ [1].

В нашем случае разрабатывается алгоритм имитации функционирования привода регулятора давления. Данное устройство является одним из составных частей комплекса регулятора давления, который, в свою очередь, служит одним из наиболее значимых типов оборудования во всей структуре ГРС. Одна из основных задач регулятора давления – организация подачи потоков газа потребителям с определенными значениями давления и объемного расхода газа по соответствующему потребителю в линиях редуцирования.

Привод регулятора давления является исполнительным механизмом в структуре регулятора и предназначен для организации выполнения команд, при-

ходящих от САУ, а также для индикации текущих значений некоторых характеристик. Данное устройство осуществляет непосредственное управление задатчиком давления, которое представляет собой механически регулируемое пневматическое пропускное устройство, обладающее возможностью задания на своем выходе определенных величин давлений протекающих газов. Основным принципом его функционирования является изменение собственной пропускной способности, значение которой, в свою очередь, зависит от положения задающего винта, для достижения на выходе устройства необходимой величины давления [3].

Структура привода состоит из управляющего модуля и механической исполнительной части. Также при разработке алгоритма необходимо учитывать функционирование элементов индикации значений характеристик (датчики давления), взаимодействующих с приводом.

Механическая составляющая структуры привода представлена редуктором, с помощью которого осуществляется изменение положения задающего винта задатчика давления, благодаря чему и происходит изменение значения давления на выходе устройства в данной линии редуцирования в соответствии с командой приходящей от САУ (больше/меньше). Управление вращением задающего винта осуществляется через шаговый двигатель (ШД), управление которым, в свою очередь, выполняет электронный модуль управления.

Модуль управления ШД построен на основе микроконтроллера семейства MCS-51, в котором и заложена программа управления двигателем. Модуль управления подключается непосредственно к САУ, от которого и поступают соответствующие команды. Далее эти команды обрабатываются и преобразуются в соответствующий управляющий сигнал для ШД, реакцией на который является изменение положения вала двигателя на определенную величину приращения. Вращение вала ШД через редуктор преобразуются во вращение задающего винта задатчика давления, благодаря чему и происходит изменение значения величины давления на выходе регулятора.

Для отображения текущего положения вала ШД, а следовательно, и задающего винта задатчика давления к модулю управления подключается резистор переменного сопротивления (потенциометр), изменение сопротивления которого в процессе работы будет пропорционально изменению положения винта. Таким образом, по текущему значению сопротивления и известному коэффициенту пропорциональности определяется положение винта задатчика. Шаговый двигатель обладает такой характеристикой, как минимальное приращение значения положения вала за один такт работы, и она напрямую зависит от возможной величины крутящего момента двигателя.

Во время функционирования привода регулятора возможны ситуации, при которых ШД не успевает завершить указанные командой действия при ее снятии, так как в этом случае одновременно со снятием команды происходит отключение питания ШД и он в последнем такте не успевает завершить действие. Во избежание этого необходимо между включением/отключением питания ШД и моментом подачи/снятия команды обеспечить временной запас не менее 100 мс. Все эти особенности динамической работы привода следует учесть при разработке алгоритма функционирования имитатора работы устройства, чтобы при дальнейшей его программной реализации наиболее точно отображались все динамические характеристики регулятора давления.

С учетом вышеуказанного временного запаса можно отобразить диаграмму выдачи команд на ШД из САУ, которая представлена на рис. 2.



Рис. 2

Как уже отмечалось, значение положения винта задатчика ( $L_{зад.}$ ) отображается с помощью резистора переменного сопротивления. По данному значению в соответствии с определенным коэффициентом пропорциональности, определяемым техническими характеристиками самого задатчика давления, фиксируется текущее значение величины давления газа на выходе прибора ( $P_{зад.}$ ). Далее по полученным значениям давлений на выходе задатчика определяется величина давления на выходе комплекса регуляторов давления всех текущих линий редуцирования в системе распределения по определенному потребителю ( $P_{вых.}$ ), которая, в свою очередь, зависит от характеристик и технических требований (максимально допустимое давления, удельный расход газа), предъявляемых текущим потребителем.

Для организации учета объема газа, протекающего в линии заданного потребителя к выходу системы регуляторов давления, подключается «замерная шайба», благодаря которой и осуществляется коммерческий учет газа (КУГ). Значение давления на выходе «замерной шайбы» ( $P_{куг}$ ) дублирует значение давления на выходе комплекса редуцирования по данному потребителю ( $P_{вых.}$ ) [3].

При разработке алгоритма имитации функционирования привода регулятора давления следует обеспечить организацию приращений значений всех вышеуказанных параметров по соответствующим зависимостям. При этом для обеспечения гибкости разрабатываемого алгоритма величины приращения выступают как переменные, значения которых во время инициализации работы алгоритма в модели контроля, после ее программно-аппаратной реализации, задаются из циклограммы функционирования, которая представляет собой перечень исходных значений характеристик оборудования управляемого объекта (ГРС), а также перечень значений необходимых переменных и программу функционирования всей имитационной модели [2].

Модель контроля предполагает динамическое функционирование алгоритма, поэтому требуется организация некоторого счетчика, с учетом которого будет работать алгоритм. В нашем случае наиболее удобно использование счетчика, производящего подсчет времени с дискретностью 100 мс (такой выбор осуществляется исходя из требований точности при работе ШД и главным образом зависит от крутящего момента и временных характеристик двигателя). Говоря более конкретно, это счетчики подсчета времени команды: длины команды «больше» (Сч.Бол.) и длины команды «меньше» (Сч.Мен.).

Для синтеза и последующей реализации алгоритма необходимо обозначить величины приращений используемых параметров:

- величина приращения при увеличении параметра в одну секунду:  
 $dL_{зад.Плюс}$ ,  $dP_{вых.Плюс}$ ,  $dP_{куг.Плюс}$ ,  $dP_{зад.Плюс}$ ;

- величина приращения при уменьшении параметра в одну секунду:  
 $dL_{зад}$  Минус,  $dP_{вых}$  Минус,  $dP_{куг}$  Минус,  $dP_{зад}$  Минус.

Помимо заданных переменных для достоверной имитации функционирования исходного оборудования при разработке алгоритма используются следующие параметры:

- $L_{зад}$  – положение винта задатчика в мм (0 – 15);
- $P_{вых}$  – давление на выходе ГРС (0 – 16) в  $кг/см^2$ ;
- $P_{куг}$  – давление на замерной шайбе (0 – 16) в  $кг/см^2$ ;
- $P_{зад}$  – давление на выходе задатчика (0 – 16) в  $кг/см^2$ ;
- $dMaxL_{зад}$  – величина допуска значения положения винта, при которой срабатывает концевик  $MAX(0,93)$  (в этом случае срабатывание происходит при величине  $MaxL_{зад} - 0,93$ );
- $dMinL_{зад}$  – величина допуска значения положения винта, при которой срабатывает концевик  $MIN(0,93)$  (в этом случае срабатывание происходит при величине  $MinL_{зад} + 0,93$ );
- коэффициент =10 (количество 100 мс тактов в одной секунде).

Таким образом, учитывая возможные состояния и временные параметры работы привода задатчика, а также наличие команд от САУ, назначается перечень условных переменных, которые будут использованы при синтезе алгоритма [2].

Данный перечень переменных с их возможными состояниями представлен в таблице.

Команда включения питания ШД (Ком.Вкл.Пит.)	Код	Состояние:
	0	нет
	1	есть
Команда «Больше» (Ком.Бол.)	Код	Состояние:
	0	нет
	1	есть
Команда «Меньше» (Ком.Мен.)	Код	Состояние:
	0	нет
	1	есть
Концевик-максимум (Концев.Мах.)	Код	Состояние:
	false	нет
	true	есть
Концевик-минимум (Концев.Min.)	Код	Состояние:
	false	нет
	true	есть

Согласно вышеуказанному перечню переменных, с учетом использования счетчиков (Сч.Бол.) и (Сч.Мен.), производящих подсчет времени с дискретностью 100 мс, а также принимая во внимание заданные величины приращений и обозна-

ченные параметры, синтезируется алгоритм функционирования модели привода задатчика давления, который представлен на рис. 3, 4.

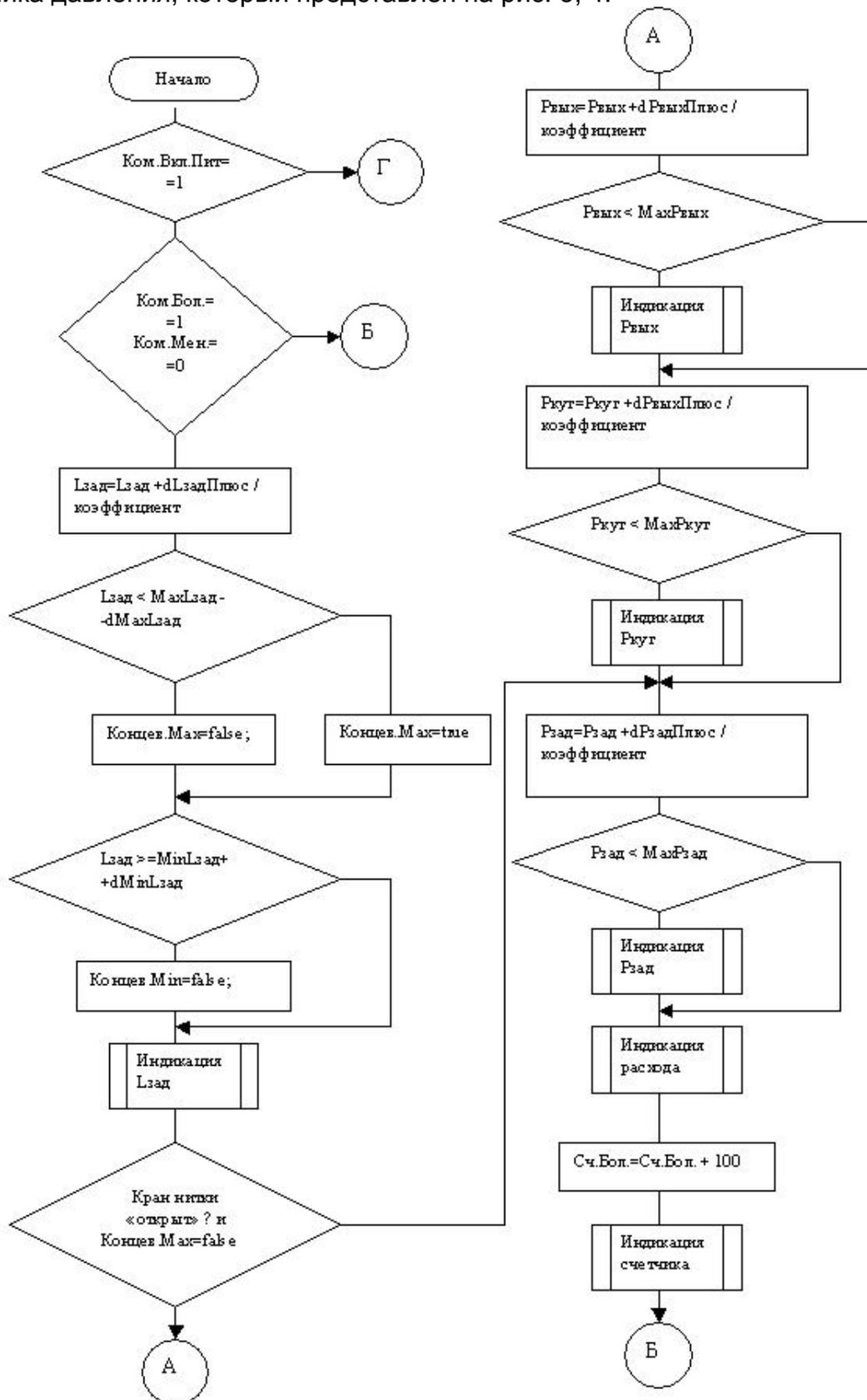


Рис. 3

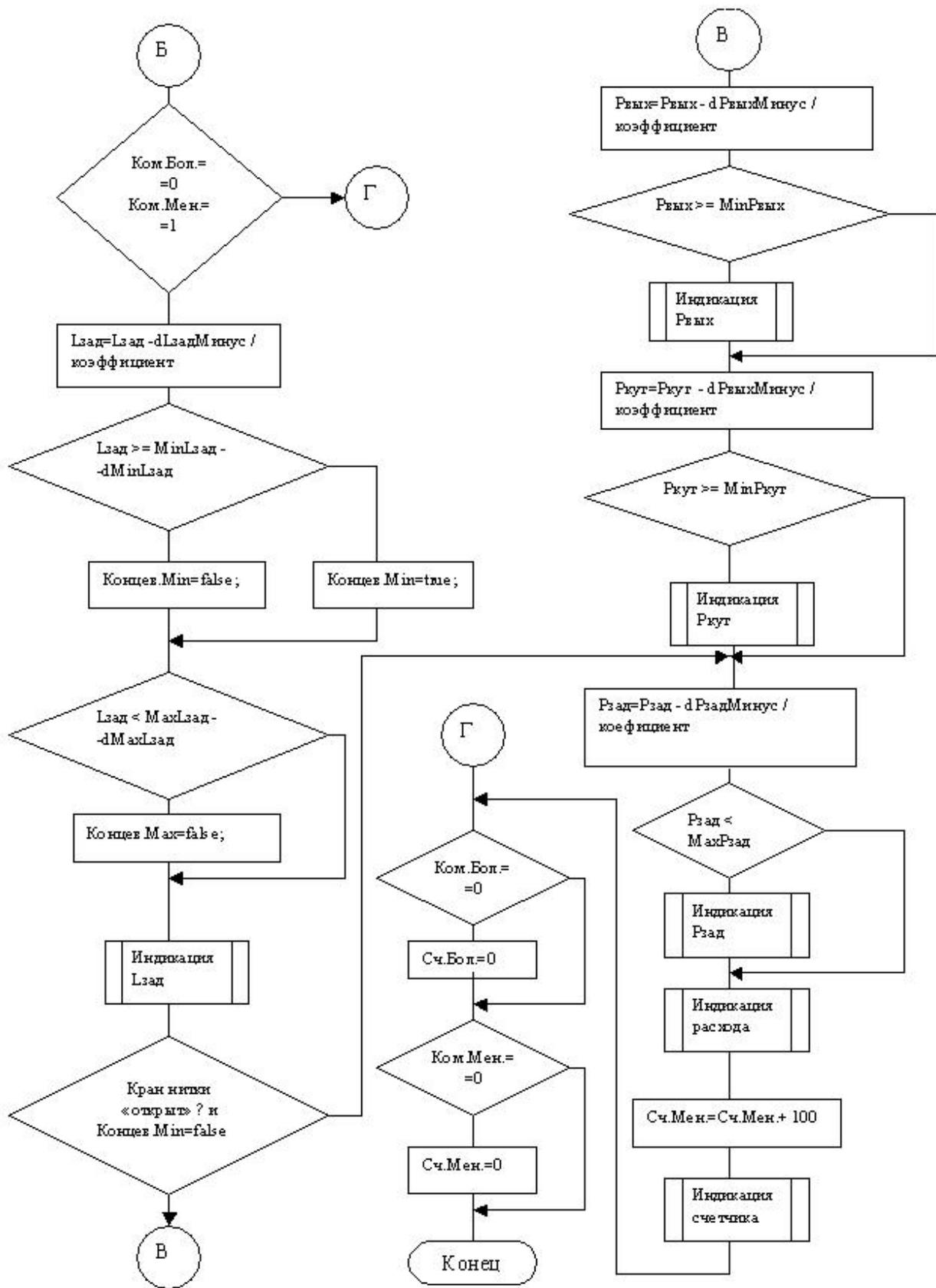


Рис. 4

Значение переменных алгоритма и текущие значения описанных параметров, а также закономерности соответствующих реакций объекта на команды, приходящие от САУ, при динамическом функционировании алгоритма поступают из так называемой циклограммы, которая представляет собой программу работы всей модели контроля и синтезируется на основе динамической математической модели функционирования объекта (ГРС).

Разрабатываемая программно-аппаратная модель контроля САУ ГРС, которая представляет собой систему взаимодействующих алгоритмов имитации работы оборудования, совместно с рассмотренной динамической математической моделью функционирования ГРС представляет собой универсальную и гибкую модель контроля для САУ. Синтезированный выше алгоритм функционирования привода задатчика построен с учетом всех требований, выдвигаемых при разработке программно-аппаратной модели контроля для САУ.

Полученный алгоритм позволяет производить имитацию работы привода регулятора давления. Основной особенностью данного алгоритма является обеспечение возможности автоматической подстройки выходного давления регулятора. Это достигается путем использования обратной связи, благодаря которой модель контроля корректирует входные характеристики и управляющие сигналы привода регулятора в зависимости от выходных значений регулятора. Этот момент очень важен при имитации аварийных ситуаций, в частности неисправности регулятора давления или разрыва линии редуцирования, так как в этом случае САУ автоматически подстраивает выходные параметры регулятора и модель контроля, в свою очередь, должна произвести имитацию соответствующей реакции регулятора и его привода, алгоритм функционирования которого и рассматривается.

При работе модели контроля в режиме штатных условий эксплуатации функционирование алгоритма имитатора привода регулятора должно соответствующим образом выполнять необходимые автоматические подстройки выходных параметров в зависимости от команд регулирования, приходящих из САУ. В случае же работы модели контроля в режиме возможных аварийных ситуаций при тех же управляющих сигналах алгоритм имитации функционирования привода регулятора должен отобразить неисправности регуляторов давления, вызывающих нерегулируемое увеличение или уменьшение расхода газа в линии редуцирования, путем соответствующих изменений выходных параметров. В процессе контроля и проверки работы САУ должны быть отработаны все режимы функционирования объекта, и поэтому в циклограмме в обязательном порядке присутствуют штатные и аварийные режимы работы регулятора давления, которые и позволяют симитировать разработанный алгоритм.

В итоге можно констатировать, что разработанный алгоритм достаточно достоверно отображает функционирование исходного оборудования, а также обеспечивает возможность имитации всех режимов работы. Помимо этого алгоритм характеризуется простотой и удобством его последующей программной реализации.

### **Список литературы**

1. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. М.: МЦНМО, 2000. – 632 с.
2. Шалыто А. А. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб: Наука, 2000. – 749 с.
3. Експлуатаційні характеристики газонафтового комплексу/ Під ред. В. В. Розгонюка К.: Росток, 1998. – 292 с.

## Элементы и устройства функциональной микроэлектроники. ПАВ-датчики: силочувствительные элементы

*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта,  
Харьковский национальный университет радиозлектроники*

### 1. Постановка задачи

В настоящий момент база функциональной микроэлектроники состоит из большого количества различных элементов и устройств. Для того, чтобы определить вектор и тенденции ее развития необходимо провести обзор характеристик различных элементов и устройств

### 2. Основная часть исследований.

В датчиках механических величин на ПАВ обычно используются чувствительные элементы (ЧЭ) с дифференциальным включением ПАВ-преобразователей. Недифференциальные схемы из-за проблем передачи ВЧ-сигнала практически не применяются. При конструировании силочувствительных элементов имеется большая свобода выбора топологии дифференциального преобразователя [1-3]. К основным вариантам относятся следующие:

1. Наиболее простой в технологическом отношении вариант ЧЭ содержит два ПАВ-преобразователя, образующие дифференциальную схему, которые сформованы на одной поверхности подложки. Однако здесь не всегда удается подвести измеряемое силовое воздействие так, чтобы ПАВ-элементы изменяли свои параметры дифференциально, т.е. в равной степени, но с противоположными знаками. Иногда приходится идти на уменьшение чувствительности, размещая один из преобразователей в зоне свободной от деформации. Преобразователи целесообразно выполнять идентичными для обеспечения подавления дрейфа нуля от температуры и упрощения электронной схемы. Принципиально в плоскости подложки возможно и неколлинеарное (под углом) размещение преобразователей. Однако, так как температурные характеристики ЛЗ или резонаторов определяются направлением распространения ПАВ, то в общем случае дифференциальная схема с неколлинеарными преобразователями не дает эффекта снижения температурной погрешности нуля. Добиться этого снижения можно двумя способами: выбором двух неколлинеарных направлений, характеризующихся равными температурными коэффициентами задержки (или температурными коэффициентами частоты); выбором среза подложки, обеспечивающим на ней по двум направлениям нулевые  $T_\tau$  (или  $T_f$ ). Особенности симметрии кристаллов пьезокварца дают широкий простор для реализации указанных способов. Примером может служить комбинация из двух ПАВ-преобразователей на подложке  $Y/+34^\circ$ , выполненных под углом  $90^\circ$ . Оба преобразователя обладают нулевым  $T_\tau$ , что позволяет создать дифференциальные силочувствительные элементы для контроля усилий типа сжатие - растяжение и усилий сдвига.

2. В ряде случаев выгодно размещение ПАВ преобразователей на двух плоскостях подложки. Технологически это сложнее по сравнению с планарным вариантом, однако практически это возможно и обеспечивает выигрыш в габаритах приборов. Имеются два варианта взаимной ориентации рабочих плоскостей: параллельная и непараллельная. В плане требований дифференциальности первый из них проще и получил достаточно широкое распространение.

3. Используют дважды дифференциальные схемы, которые содержат четыре ПАВ-преобразователя (два на одной плоскости, два на другой). Возможны варианты с двумя дискретными ЧЭ, а также с размещением всех четырех преобразователей в одной плоскости. Оптимально, когда рабочими являются все четыре элемента (два - с положительным наклоном характеристики, два - с отрицательным).

Благодаря локализации ПАВ в приповерхностном слое подложки, открывается возможность построения интегральных ЧЭ, в которых конструктивно объединяется целый ряд функциональных узлов датчиков. В результате реализуется интегрирование ЧЭ с элементами крепления и развязки от боковых компонентов, защиты от перегрузок, механического усиления, трансформации упругих напряжений. Типичная конструкция ПАВ-датчика силы "генераторного" типа изображена на рис.1. Линии задержки, используемые для стабилизации обоих генераторов 2,3, расположены на параллельных гранях жестко скрепленной с одной стороны пластины 1. Акустический поглотитель 4 исключает распространение волны за пределы резонирующей полости генераторов.

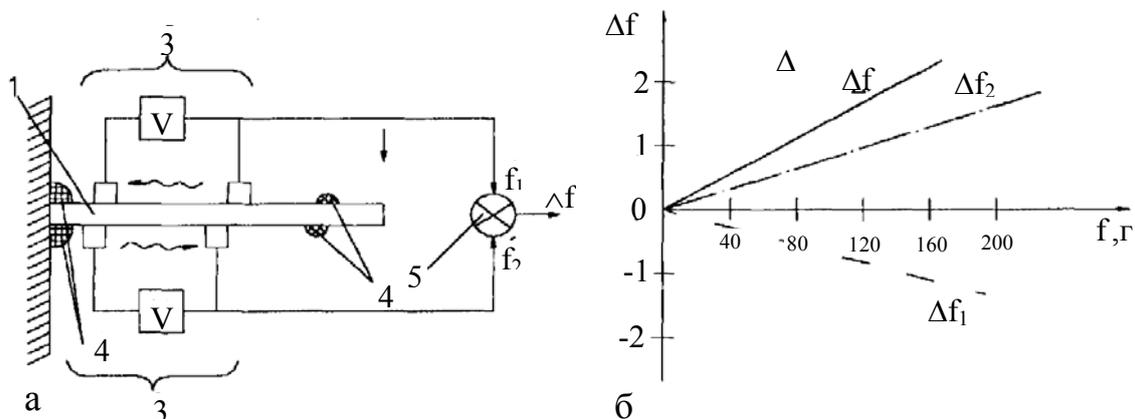


Рис. 1. ПАВ-датчик силы (тензодатчик): а) структурная схема; б) характеристики

При изгибе звукопровода в направлении приложения силы  $F$  в результате механической деформации частота нижнего генератора  $f_2$  растет, а верхнего  $f_1$  падает. Разностная частота  $\Delta f$ , выделяемая после смесителя 5, пропорциональна приложенному усилию; крутизна характеристики датчика составляет 18 Гц/г.

Решение проблемы увеличения выходного сигнала демонстрирует датчик силы с дополнительным спиральным преобразователем. Датчик состоит из пластины из ниобата лития У-среза, преобразователей ПАВ, в виде прямоугольных спиралей, усилителей преобразователей ПАВ встречно - штыревого типа, фазовых детекторов, дифференциального усилителя, поглотителя ПАВ. Преобразователи расположены на расстоянии  $\sim 4h$  от места крепления пластины, где  $h$  - толщина пластины, а преобразователи на таком же расстоянии от свободного конца

пластины. Период витков преобразователей поперек пластины выбирается таким образом, чтобы  $f_1 = f_2$ , где  $f_1$  и  $f_2$  - частоты акустического синхронизма для продольного и поперечного распространения волн, а расстояние  $L$  от кромок пластины 1 до геометрического центра преобразователей было кратно целому числу

длин полуволн  $L = \frac{n\lambda}{2} = \frac{nf_2}{2V_2}$ , где  $\lambda$  - длина волны,  $U_2$  - скорость распространения

волны в поперечном направлении. Период ВШП-структур приемных преобразователей равен периоду витков в преобразователях, расположенных в продольном направлении.

При подключении усилителей к преобразователям в результате отражения волн от кромок пластины возбуждаются стоячие волны. Наведенные при резонансе электрические заряды распределяются по соответствующим виткам спиральных преобразователей в результате на поверхностях пластины в продольном направлении возбуждаются бегущие волны, которые преобразуются приемными преобразователями в электрические сигналы. Разность фаз сигналов с выходов усилителей и преобразователей детектируется соответствующими фазовыми детекторами, а разность напряжений с выходных детекторов усиливается дифференциальным усилителем. Когда величина усилия равна нулю ( $F = 0$ ), напряжение на выходах детекторов незначительно отличаются, и сигнал с выхода усилителя имеет фиксированное значение. При нагружении чувствительного элемента силой ( $F \neq 0$ ) в зоне крепления пьезопластины возникают локальные механические напряжения, что вызывает изменение частот  $f_1$  и  $f_2$  автогенераторов (АГ) с "поперечными" резонаторами. Резонансные частоты автогенераторов изменяются на одну и ту же величину, но с противоположными знаками. Наряду с этим происходит деформация звукопровода между преобразователями с одной стороны пьезопластины с другой. При этом как девиация частоты, так и изменение запаздывания ПАВ вызывает увеличение результирующего фазового сдвига в каждой из половин датчика. Таким образом, при деформации пьезопластины силой изменяется напряжение на выходе фазовых детекторов и далее на выходе дифференциального усилителя. Принцип действия датчика можно пояснить также с помощью следующих соотношений. Считая, что амплитудная модуляция автогенераторов пренебрежимо мала, а амплитуды сигналов с первого и второго АГ, коэффициенты передачи соответствующих ЛЗ и фазовых детекторов незначительно отличаются друг от друга, выражение для напряжений с выходов первого и второго фазовых детекторов имеет вид

$$U_{o1} + \left\{ \Delta U_i \pm \Delta U_i [\Delta \varphi_i^{\cdot}(F)] + \Delta U_i [\Delta \varphi_i^{\cdot\cdot}(F)] \right\}, \quad (14)$$

где  $i = 1, 2$ ;  $U_{o1}$ ;  $U_{o2}$  - напряжения, соответствующие начальному фазовому сдвигу при  $F = 0$ ;  $\Delta U_i [\Delta \varphi_i^{\cdot}(F)]$  - приращение напряжения при  $F \neq 0$ , обусловленное изменением частоты АГ;  $\Delta U_i [\Delta \varphi_i^{\cdot\cdot}(F)]$  - приращение напряжения при  $F \neq 0$ , обусловленное изменением времени запаздывания ПАВ. Знаки "+" или "-" определяют приращение напряжения, соответствующее результирующему фазовому набегу ПАВ, распространяющихся на верхней или нижней поверхности пьезопластины. Например, при деформации растяжения на верхней и деформации сжатия на нижней поверхностях пьезопластины из ниобата лития У-среза с "поперечным" резонатором, расположенным вдоль оси Z и линиями задержки вдоль оси X, приращение напряжения имеют соответственно знаки "+" и "-". Результирующее напряжение на выходе дифференциального усилителя выражается как

$$U(F) = 2k\{\Delta U_i[\Delta\varphi'_i(F)] + \Delta U_i[\Delta\varphi''_i(F)]\}, \quad (15)$$

где  $k$  - коэффициент передачи усилителя.

Компоненты фазовых сдвигов  $\Delta\varphi_i(F)$  можно представить следующим образом. Фазовый сдвиг при  $F \neq 0$ , вызванный изменением резонансной частоты АГ, равен

$$\Delta\varphi'_i(F) = \left| 360^0 \Delta f_i(F) \tau_{3i}(F) \right|, \quad (16)$$

где  $\Delta f_i(F)$  - девиация частоты АГ;  $\tau_{3i} = \frac{l}{v}$  - время задержки;  $l$  - расстояние между центрами преобразователей 2, 6 и 3, 7;  $v$  - скорость волны.

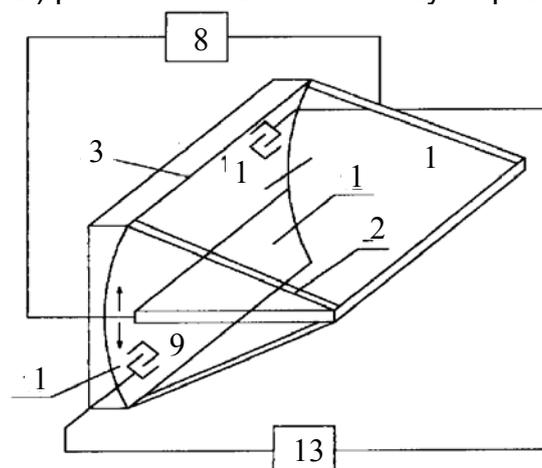
Фазовый сдвиг при  $F \neq 0$ , обусловленный изменением времени запаздывания волн, возбужденных преобразователями 2, 3 и принятых преобразователями 6, 7, равен

$$\Delta\varphi''_i(F) = \left| 360^0 M(\delta l - \delta V) \right|, \quad (17)$$

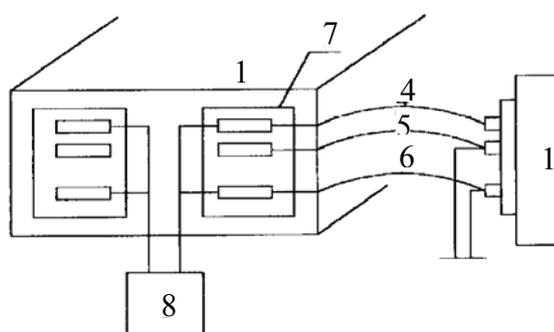
где  $\delta l = \Delta l / l$  - относительное изменение длины ЛЗ;  $\delta V = \Delta V / V$  - относительное изменение скорости ПАВ;  $M = l / \lambda$  - относительная длина линии задержки в длинах волн.

Из выражения (15) видно, что эффект увеличения выходного сигнала датчика достигается наряду с включением чувствительных элементов по дифференциальной схеме также за счет дополнительного фазового сдвига, обусловленного изменением частоты АГ. Величины изменения фазовых сдвигов, согласно (16) и (17), для указанной ориентации чувствительных элементов соизмеримы и, таким образом, результирующее изменение напряжения в каждой из половин датчика увеличивается в два раза. Наряду с этим при измерении статических усилий в устройстве используются и частотные выходы АГ, которые также могут быть соединены по дифференциальной схеме. Существенное повышение точности измерений может быть достигнуто с использованием структур полевых транзисторов с электродами в виде истоков, затворов и стоков. Устройство для измерения усилий, содержащее такие структуры, изображено на рис.2 (на рис.2,а - структурная схема устройства; на рис.2,б - вид на торец консольной пластины со стороны полевых транзисторов). Один торец упругого элемента в виде пьезопластины 1 закреплен неподвижно посредством упоров 2 относительно пьезопластины 3, и на его противоположном конце расположены истоки 4, затворы 5, стоки 6 структуры полевых транзисторов 7. Стоки 6 относительно истоков 4 (выходные электроды) подключены к отсчетному устройству 8. Источники ПАВ 9, 10, расположенные на противоположных концах параллельных отдельных звукопроводов 11, 12, подключены к генератору электрических сигналов 13. В исходном состоянии, когда на упругий элемент 1 не действует внешнее усилие, его торец с истоками и затворами 4, 5 находится на равном расстоянии от источников ПАВ 9, 10. В этом случае время распространения электрических сигналов от генератора 13 до истоков и затворов 4, 5 будет одинаковым. Прохождение ПАВ в звукопроводах 11, 12 пьезопластины 3 вызывает появление электростатических зарядов над истоками 4, затворами 5, которые усиливаются в структурах полевых транзисторов 7 и с их стоков и истоков 4 поступают на отсчетное устройство. Каждая структура полевых транзисторов 7, в которую входят исток 4, затвор 5, сток 6, расположена на торце

упругого элемента 1 отдельно над каждым звуководом 11, 12. Входные электроды (истоки и затворы) расположены ближе к звуководам, чем выходные



а



б

Рис. 2. Устройство для измерения усилий, содержащее структуры полевых транзисторов

электроды (стоки) на расстояние 0.1-1 мм. Поэтому электрические заряды, сформированные на пластине 3, оказывают воздействие в основном только на входные электроды (исток, затвор) полевых транзисторов 7, которые усиливают электрические сигналы с большим отношением сигнал/шум, что повышает точность измерения. Истоки и затворы расположены параллельно между собой на расстоянии, равном нечетному числу длин полуволн акустических колебаний в пьезопластине, что позволяет только в этом случае усиливать электрические сигналы структурами полевых транзисторов 7, а усиленные сигналы привязывать по фазе к колебаниям генератора 13, что также повышает точность измерения. Пьезопластина 3 выполнена с вогнутой цилиндрической поверхностью, на которой по окружности поверхности расположены два звукопровода 11, 12 с источниками ПАВ 9, 10 встречных направлений. При воздействии внешнего усилия (ускорения) торец упорного элемента 1 с истоками и затворами 4, 5 перемещаются над цилиндрической поверхностью звукопроводов 11, 12 и время распространения ПАВ в звукопроводе 11 (например) уменьшается, а в звукопроводе 12 увеличивается до истоков и затворов 4, 5. С истоков и стоков усиленные сигналы поступают в отсчетное устройство 8, которое пересчитывает величину изменения электрических сигналов (частоту, фазу, период) в единицы измеряемых усилий. Упругий элемент 1 перемещается по радиусу, равному радиусу вогнутой цилиндрической поверхно-

сти пьезопластины 3, и между истоками 4, затворами 5 и пьезопластиной сохраняется постоянный зазор (например, 0,01 мм), что способствует стабильности амплитуды выходных сигналов и точности измерения. Упругий элемент выполнен в виде тонкой пластины из плавленного кварца, механические свойства которого мало зависят от внешних факторов и температуры. Дифференциальное включение звукопроводов 11, 12 в отсчетное устройство 8 повышает точность измерений. Применение полевых транзисторов позволяет усиливать сигналы с большим отношением сигнал/шум, что уменьшает влияние внешних воздействий и повышает точность измерений. Конструкция ПАВ-датчика для измерения усилий представлена на рис. 3. Устройство содержит клиновидную пьезопластину 1 с выпуклыми рабочими поверхностями 2, 3, излучающие ВШП 4 и 5, плоские пьезопластины 6 и 7 с ВШП 8, фиксатор 9. Преобразователи 4, 5 формируют ПАВ, которая распространяется по поверхностям 2 и 3, переходит на поверхности пластин 6 и 7 в местах акустического контакта и попадает на преобразователи 8.

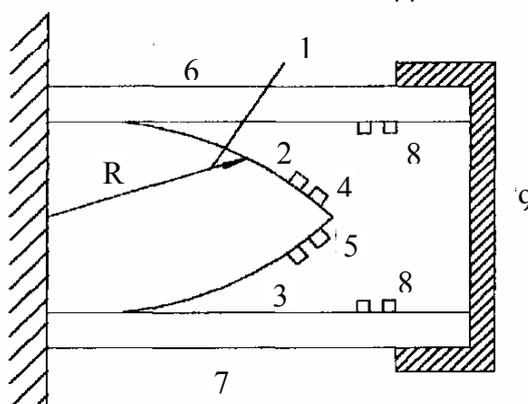


Рис. 3. Датчик усилий с выпуклыми рабочими поверхностями

В исходном состоянии время распространения ПАВ от 4 и 5 до 8 одинаково. Это дает возможность использовать дифференциальное включение каналов 4-8 и 5-8 и исключить влияние температуры на точность измерения. При воздействии внешнего усилия на 9 длина акустического канала 4-8, например, уменьшается, а канала 5-8 увеличивается за счет изгиба пластин 6 и 7 относительно 2 и 3. По изменению электрических сигналов судят по величине внешних усилий. Выпуклые поверхности 2 и 3 образованы радиусом, который увеличивается при движении к вершине, и может составлять, например, отношение 1:100. Можно повышать чувствительности датчика напряжения на ПАВ за счет уменьшения толщины подложки, к которой прикладывается измеряемое напряжение. Для  $f = 77$  МГц ПАВ-генератора на подложке толщиной 71 мкм из  $\text{LiNbO}_3$  Y-среза, повернутого на  $128^\circ$  относительно оси X, получена чувствительность по напряжению 95 Гц/В. Устройство способно измерять напряжения в пределах 10 мВ - 1000 В. ПАВ-датчик напряжения представляет собой ЛЗ (или резонатор) ПАВ, выполненные на подходящей пьезоэлектрической подложке. Выходной сигнал ЛЗ через соответствующий усилитель вводится обратно на ее вход, и в результате получается ПАВ-генератор, стабилизированный линией задержки. Напряжение, подлежащее измерению, прикладывается к ПАВ-генератору в качестве смещающего напряжения с помощью системы электродов. За исключением небольшой области вблизи преобразователей смещающее электрическое поле однородно вдоль пути распространения и равно  $E = U/h$ , где  $U$  - приложенное напряжение,  $h$  - толщина подложки. Смещающее напряжение вызывает изменение временной задержки ПАВ и,

следовательно, частоты генератора. Относительное изменение частоты генератора определяется выражением

$$\Delta f / f = \gamma E = (\gamma / h) U, \quad (18)$$

где  $\gamma$  - константа. Из выражения (18) следует, что чувствительность устройства по напряжению можно повысить, уменьшив толщину подложки.

В линиях задержки для экспериментальных устройств применялись ВШП из 15 штырей с периодичностью электродов 52.5 мкм и расстоянием между входным и выходным преобразователями 10 мм. Площадь электрода на нижней поверхности подложки составляла (13x4,5) мм. В качестве материала подложки выбран LiNbO<sub>3</sub>, так как этот материал характеризуется линейным и достаточно большим изменением временной задержки в зависимости от смещающего электрического поля. Толщина подложки определялась по входной емкости устройства, т.е. емкости между электродами. Благодаря широкому диапазону измерений в сочетании с линейностью характеристики, прямым преобразованием напряжения в частоту, температурной компенсацией и высоким входным сопротивлением датчик измерения напряжения на ПАВ может оказаться полезным в целом ряде применений.

### Список литературы

1. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. -М.: Энергоатомиздат, 1989. - 272с.
2. Материалы конференции „Акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах”. -Черкассы, 1990.
3. Рагульский К.М., Снитко В.Ю., Мизарена В.И. Виброизмерительные преобразователи на акустических волнах // Виброметрия. -М.: МДНТИ, 1982. - С.75-77.
4. Функціональна мікроелектроніка: Прилади із зарядовими пакетами, циліндричні магнітні домени, давачі: Навч. посібник / Ю.О. Гордієнко, М.І.Сліпченко, В.А.Хорунжий та ін. -Київ: ІСДО, 1966. -152с.
5. Како Н., Ямане Я. Датчики и микроЭВМ. Пер. с япон. / Под ред Т.Н.Горбунова. -Л.: Энергоатомиздат, 1986. -120с.
6. Акустоэлектроника. Спр. пособие / Поляков П.Ф., Хорунжий В.А. / Под ред П.Ф.Полякова. -Харьков, 2005. -852с.
7. Поверхностные акустические волны / Под. ред. А.Олинера. -М.: Мир, 1981. -390с.
8. ПАВ-датчики: общая характеристика преобразователей / Антонова В.А., Поляков П.Ф., Хорунжий В.А. (Элементы и устройства функциональной микроэлектроники. Ч.8.1). -Харьков, 2006.

## Метод кодування зображень в системах відео спостереження авіаційної бригади

*Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба;  
Управління захисту інформації та криптології  
штабу командування Повітряних Сил Збройних Сил України;  
ДНВП «Об'єднання Комунар» НТ СКБ «Полісвіт»*

### 1. Введення

Авіаційна бригада дислокується на значній території та має на озброєнні велику кількість важливих та небезпечних об'єктів. Тому до системи охорони і сигналізації потрібно приділяти велику увагу. Мережа стандарту IEEE 802.11 дозволяє побудувати систему дистанційного відеоспостереження. Це дозволяє зменшити кількість помилок, обумовлених помилковим сприйняттям інформації оператором та істотно знизити час, необхідний для аналізу і прийняття рішень. Однак, значна кількість відеокамер суттєво може збільшити трафік в мережі, що може призвести до її деградації. Обумовлено це значним обсягом відеоінформації, що досягає сотень Мбіт на одне сильнонасичене зображення при кодуванні кожного відліку 24 бітами (8 біт на колірний компонент). Це є основною причиною великої затримки в доведенні даних відеоспостереження, і, як наслідок, зниження ефективності їх функціонування.

Таким чином, **метою досліджень** є зменшення трафіку при збереженні відео потоку в мережі стандарту IEEE 802.11.

### 2. Формулювання проблеми

Знизити обсяги відео потоку дозволяють методи стиску зображень.

Проведений аналіз відомих методів стиску виявив, що:

- одна група методів характеризується низьким коефіцієнтом стиску (1,5-2 рази) сильнонасичених зображень, що складають основу відеоінформаційного обміну в БМЗ авбр;

- друга група методів (фрактальні методи) характеризується великим часом (до декількох годин) обробки даних.

Тому розробка нових методів стиску зображень мережі стандарту IEEE 802.11 потрібно проводити в напрямку зменшення часу перетворення одного класу статичних відеозображень до цифрового формату даних для їх оперативної передачі по каналу зв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити **науково-технічну задачу**, що полягає в розробці методів зменшення обчислювальної (часової) складності перетворень (компресії і декомпресії) статичних відеозображень в мережі стандарту IEEE 802.11.

### 3. Розробка методу кодування даних в мережі стандарту IEEE 802.11

Пропонуємий напрямок має наступні переваги:

- відбувається концентрація значної частини енергії зображення в невеликій кількості спектральних коефіцієнтів трансформанти;
- базис Уолша для сильнонасичених зображень відносно базису тригонометричних функцій забезпечує зменшення часової складності перетворення і зниження помилки апроксимації;
- арифметичне кодування трансформант перетворення Уолша скорочує статистичну надмірність.

Це означає, що перспективним напрямком удосконалювання методів стиску сильнонасичених зображень є застосування ортогональних перетворень на основі цілочисельних кусочно-постійних функцій і методів цілочисельного арифметичного кодування трансформант перетворення.

Для організації ефективного процесу стиску зображень на основі перетворення Уолша і арифметичного кодування необхідно врахувати такі особливості:

- найменший ступінь інформативності трансформант перетворення Уолша (найбільші потенційні можливості для скорочення статистичної надмірності) досягається для двовимірних блоків з однорідною структурною (для цього необхідно вибирати відповідні розміри блоків зображень і використовувати двовимірне дискретне ортогональне перетворення);
- найбільший ступінь стиску зображень досягається в результаті скорочення психовізуальної надмірності (для цього необхідно проаналізувати можливість використання додаткової квантизації компонент трансформант і можливі варіанти нормування);
- низькочастотні і високочастотні складові трансформанти дискретного перетворення Уолша (ДПУ) мають різні статистичні характеристики;
- на час обробки впливає не тільки швидкодія виконання машинних операцій, але і швидкість обміну між оперативною пам'яттю і зовнішнім пристроєм, що запам'ятовує.

Згідно особливостей обробки зображень на основі перетворення Уолша і арифметичного кодування, пропонується методи стиску і відновлення зображень з частковою втратою якості, засновані на арифметичному представленні компонентів дискретного двомірного перетворення Уолша.

Пропонується будувати метод стиску зображень на основі дискретного ортогонального перетворення Уолша з попередньою розбивкою вхідного зображення на блоки розмірністю 16x16 пікселів і цілочисельного арифметичного кодування.

Для додаткового підвищення значення коефіцієнта стиску використовується класифікаційне кодування трансформант перетворення Уолша, що засновано на роздільній обробці високочастотних і низькочастотних складових трансформант (рис. 1).

Це дозволяє врахувати особливості трансформант ДПУ:

- низькочастотні і високочастотні складові трансформант ортогональних перетворень несуть різну кількість інформації. Максимальне значення компонент ма-

триці перетворення приходить на перший елемент цієї матриці, розташований у верхньому лівому куті;

- закони розподілу ймовірностей появи значень низькочастотних і високочастотних компонентів трансформант перетворення ДПУ, виконаного для реалістичних зображень, апроксимуються відповідно до нормального закону і до закону розподілу Релея.

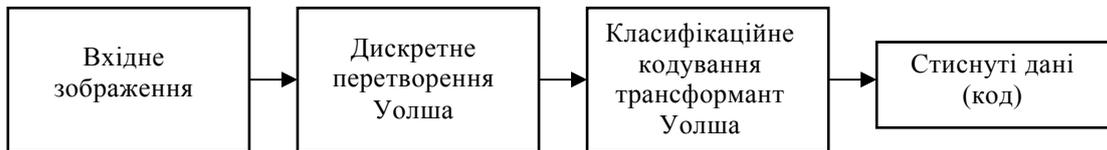


Рис. 1. Структурна схема методу класифікаційного арифметичного кодування

У результаті виконання ортогонального перетворення Уолша, крім зниження ступеня статистичних взаємозв'язків, здійснюється зниження динамічного діапазону компонент трансформант. Необхідно враховувати те, що низькочастотні складові є характеристикою середньої яскравості у фрагменту зображення. При цьому дана характеристика локальних фрагментів є щодо однорідної для сусідніх частин кадру зображення. У зв'язку з цим пропонується формувати масиви низькочастотних компонент. При виборі способу обробки низькочастотних компонент необхідно враховувати те, що людське око сприймає реалістичне зображення по частоті колірних меж. Звідси слідує важливість низькочастотних коефіцієнтів трансформанти ДПУ. Отже, втрата частини низькочастотних коефіцієнтів може привести до значної втрати інформації. Тому пропонується здійснювати стиск масивів низькочастотних компонент на основі виключення статистичної надмірності шляхом їх арифметичного кодування.

Для зменшення потужності алфавіту масиву низькочастотних складових, тобто для підвищення ступеня нерівномірності, необхідно здійснювати представлення низькочастотних компонент у різницевого виді. Це забезпечить зниження ступеня інформативності оброблюваного масиву і, як наслідок, підвищення ступеня стиску. Низькочастотні компоненти несуть інформацію про структурні частини фрагмента зображення, тому є важливими для правильної ідентифікації об'єктів. На прийомній стороні необхідно здійснити відновлення низькочастотних компонентів з мінімальною похибкою. Для цього вимагається додатково передавати інформацію про знак елементів різницевого представлення.

#### **4. Порівняльна оцінка коефіцієнту і часу стиску реалістичних зображень для розробленого й існуючих методів**

Для побудованого методу значення показника втрати якості при відновленні зображення не гірше 45дБ при оцінці на основі пікового співвідношення сигнал/шум, що говорить про прийнятну якість відновленого зображення. Коефіцієнт стиску для розробленого методу при обробці сильнонасичених зображень знаходиться приблизно на одному рівні з коефіцієнтом стиску для формату JPEG-2000 і

виграє перед JPEG на 38% (табл. 1). Найменша кількість операцій на виконання алгоритму стиску притаманна розробленому методу з врахуванням того, що тут присутні тільки цілочисельні арифметичні операції (табл. 2). Виграш за часом доведення стиснутих зображень на основі розробленого методу щодо відомих методів досягає в середньому 2 разів (рис. 2).

Таблиця 1.

Залежність коефіцієнта стиску від класу зображень

Метод стиску	Коефіцієнт стиску
Розроблений	5,4
JPEG	3,3
JPEG-2000	5,3

Даний виграш обумовлено тим, що при незначній різниці за коефіцієнтом стиску сильнонасичених зображень у порівнянні з методом JPEG-2000 для розробленого методу час обробки буде менше мінімум на 34%.

Таблиця 2.

Кількість і тип арифметичних операцій для виконання алгоритму стиску зображення розмірністю  $M \times N$  кольорової моделі RGB

Метод стиску	Операції додавання / віднімання	Тип операцій	Операції множення / ділення	Тип операцій
Розроблений	$6MN(\log_2 n + 4)$	Цілочисл.	$12MN$	Цілочисл.
JPEG	$6MN \log_2 n$	Дійсний	$6MN \log_2 n$	Дійсний
	$24MN$	Цілочисл.	-	-
JPEG 2000	$5,25MN$	Дійсний	$5,25MN$	Дійсний
	$24MN$	Цілочисл.	$12MN$	Цілочисл.

З ростом швидкості передачі даних по каналу зв'язку виграш за часом доведення для розробленого методу буде збільшуватися. Наприклад, щодо швидкості передачі по каналу зв'язку 256 Кбит/с для швидкості передачі 16 Мбит/с виграш за часом доведення збільшується на 70%. Такий характер збільшення ступеня виграшу за часом доведення пояснюється тим, що з ростом швидкості передачі по каналу зв'язку велику значимість починає грати час обробки зображень.

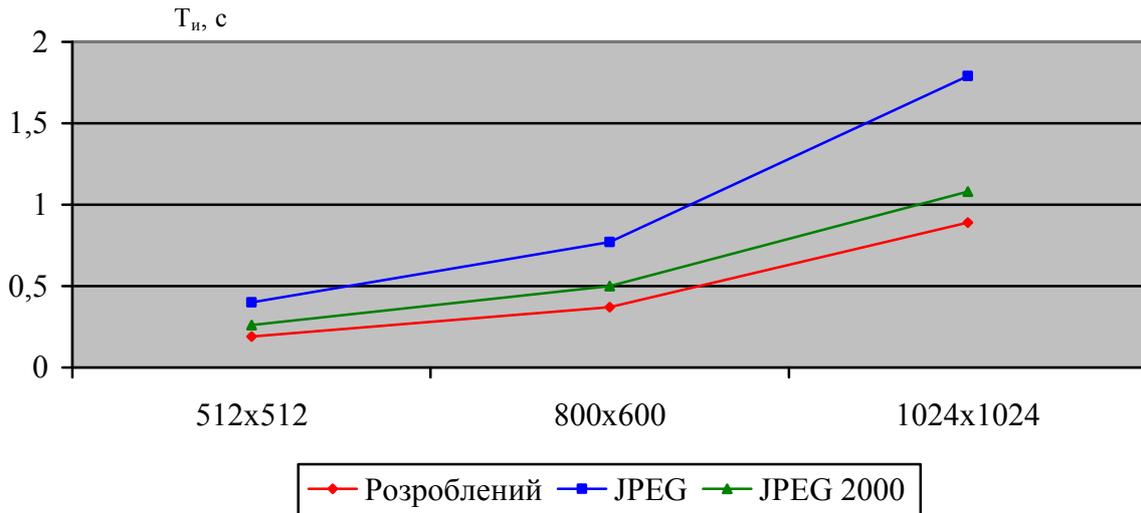


Рис. 2. Залежність часу доведення зображення по каналу зв'язку 16 Мбит/с при частоті процесора 800 МГц, від розмірності зображень

### Висновок

У результаті проведених досліджень розроблені методи стиску і відновлення кольорових цифрових зображень, засновані на класифікаційному арифметичному кодуванні і двомірному перетворенні Уолша. Розроблений метод стиску дозволяє підвищити ступінь стиску зображень та знизити час необхідний для виконання алгоритму стиску зображень у порівнянні з існуючими методами стиску. Розроблений метод відновлення забезпечує одержання зображень на прийомній стороні з прийнятною втратою якості.

Розроблені методи стиску і відновлення зображень для відношення сигнал/шум не нижче 45 дБ (що не помітно для людського ока), забезпечує:

- а) вигреш за коефіцієнтом стиску щодо методу реалізованого у форматі JPEG для сильнонасичених зображень у середньому на 38%;
- б) вигреш за часом доведення стиснутих зображень щодо відомих методів у середньому у 2 рази.

### Список литературы

1. Гонсанс Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. - М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Ватолин В.И., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2002. – 384 с.
3. Ахмед Н., Рао К.Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Под ред. И.Б. Фоменко. - М.: Связь, 1980. - 248 с.
4. Баранник В.В., Сидоренко М.Ф., Красноручький А.О. Метод кодування трансформант Уолша в системах моніторингу Землі // Системи обробки інформації. - 2007. – № 8(66). – С. 7 – 10.

## **СИНТАР-3 и СИНТАР 2007: сравнительный анализ систем разработки контроллерного ПО**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

### **Анализ новых требований**

СИНТАР 2007 является новым членом семейства СИНТАР и наследует основные идеи, технические решения и программные компоненты двух непосредственных предшественников: СИНТАР-3 [1] и СИНТАР-3М [2]. Поэтому здесь рассматриваются в основном новые требования по отношению к среде СИНТАР-3, поскольку именно эта САПР была внедрена и успешно использована в ряде работок ХГПЗ им. Шевченко и его смежников на протяжении последних пяти лет.

Новые требования к АСУ в целом могут быть сформулированы таким образом:

1. Существенное увеличение масштаба АСУ (до 100 шкафов).
2. Повышение надежности и живучести системы.
3. Повышение автономности и модифицируемости элементов АСУ.
4. Централизация опроса датчиков и ввода входных данных.

Для исполнения этих требований приняты следующие структурные решения:

1. Применить в структуре шкафов управления (ШУ) более мощные контроллеры для реализации основных алгоритмов управления и контроля, а также микроконтроллеры АРМ для решения задач обмена с устройствами связи с объектом и первичной обработки сигналов.
2. Для управления работой ПО контроллеров использовать ОСРВ QNX, для управления работой ПО АРМ – диспетчер собственной разработки.
3. Использовать трехкратное резервирование на уровне ШУ.
4. Выделить для ввода аналоговые данные с датчиков одного троированного ШУ и передавать эти данные ШУ-потребителям по локальной сети.

С учетом возможного переноса в новую среду разработки старых проектов на САПР эти требования проектируются таким образом:

1. Визуальное построение сетевой многоуровневой структуры АСУ со средствами определения полных сетевых и аппаратных адресов всех элементов и размещение на них программных разделов и сигналов.
2. Предоставление пользователю средств оперативного создания и изменения структуры БД сигналов, а также описания алгоритмов автогенерации сигналов.
3. Обеспечение многоплатформенности: возможность создания ПО для разных ОС (MS DOS, QNX и диспетчера АРМ) на одном из выходных языков – Free Pascal или C++.
4. Реализация задач под QNX в виде автономных приложений с возможностью замены отдельных задач без остановки работы ШУ.

Рассмотрим эти требования более детально.

## Концепция разработки

Среда СИНТАР-3 никак не связывала между собой базы данных, относящиеся к одной АСУ. Предполагалось, что это придаст известную гибкость при многократном применении ранее разработанных компонентов. Однако на деле это не принесло ожидаемого преимущества, а недостаток – налицо: если система «не знает», какие БД относятся к определенному АСУ, то эта забота ложится на пользователя. В условиях одновременной разработки и эксплуатации множества АСУ большим коллективом разработчиков это может привести к серьезной путанице.

Поэтому в среде СИНТАР 2007 для программ и данных пользователя введена новая структурная единица высшего уровня – *разработка*. Это замкнутая информационная структура, которая соответствует целой АСУ или ее части, разрабатываемой отдельной организацией или подразделением. Обмен между организациями может вестись только на уровне разработок.

Разработка представляет собой папку, которая включает:

- несколько (по числу шкафов управления) баз данных сигналов;
- несколько программных проектов;
- одну базу данных конфигураций;
- файл **Development.xml** с перечислением свойств и компонентов разработки.

Главная программа предоставляет полный набор операций над разработками, а также обеспечивает унифицированный пользовательский интерфейс для всех компонентов САПР. Редактор сигналов по указанным причинам также включен в этот интерфейс.

### База данных сигналов с управляемой структурой

Эксплуатация СИНТАР-3 показала, что ориентация на фиксированную структуру БД сигналов является одним из наиболее узких мест технологии. Это не удивительно: поскольку система управления процессами фактически является системой обработки сигналов, то база данных сигналов – это объект наиболее частых изменений. Проблема усугубляется необходимостью сопровождения ранее разработанных АСУ, находящихся на разных стадиях «эволюции».

Главное отличие нового редактора сигналов: пользователь самостоятельно определяет структуру базы данных (типы сигналов и их свойства) и при возникновении необходимости может ее изменять без потери данных. Программы редактора сигналов воспринимают БД любой структуры без доработок.

Автоматическая генерация сигналов также полностью определяется пользователем. Для сигналов любого типа он может перечислить типы автогенерируемых подчиненных сигналов и указать, каким образом и при каких условиях сервер БД должен реагировать на вставку, изменение или удаление основного сигнала.

Как и прежде, каждый шкаф управления имеет свою БД сигналов. Однако увеличение объема передаваемых сигналов между шкафами потребовало включения возможности экспорта выбранных сигналов из одной БД в другие. Свойства импортированных (внешних) сигналов можно изменять только в БД-источнике импорта. При открытии некоторой БД свойства внешних сигналов обновляются автоматически, синхронизируясь с БД-источника.

Принцип автоматической синхронизации поддерживается также редактором программ и генератором. Свойства используемых в программном проекте сигналов при открытии проекта редактором программ или генератором читаются непосредственно из БД сигналов, в которой они были созданы: внешние - из БД-источника импорта, внутренние – из текущей БД. Это избавляет от используемой в СИНТАР-3 команды сопоставления сигналов в программном проекте и БД сигналов.

Для использования в алгоритмах не только текущего значения сигнала, но и его свойств, описанных в БД, пользователь может описать сигнал как некоторую структуру и обращаться к соответствующим полям. Это исключает необходимость изменения программ при изменении свойств в БД сигналов: значения свойств наряду со значением сигнала заполняются из сервера данных контроллера с помощью программ системного ПО.

Для фильтрации с целью удобства просмотра и редактирования сигналов предусмотрена возможность их классификации. Пользователь вводит произвольное количество ключей, определяющих одну или несколько классификаций, например, по регуляторам, или «входной», «выходной», «программно-формируемый», «уставка», связывает ключи с сигналами и затем может задать фильтр как комбинацию некоторых ключей с использованием логических связей AND, OR, NOT. Свойства сигналов и их значения также могут быть включены в выражение фильтрации.

### **Визуальное построение конфигураций**

Конфигуратор СИНТАР 2007 объединяет функции прежних конфигуратора и редактора аппаратуры. Он способен обслуживать произвольное количество программно-аппаратных конфигураций, каждая из которых включает полную информацию о структуре и топологии локальной сети АСУ, размещении программных компонентов на контроллерах, распределении сигналов по линиям связи.

Конфигурация представляется в двух формах:

- древовидная структура аппаратных средств;
- иерархия вложенных схем.

Дерево аппаратных средств охватывает вершины всех уровней, начиная от уровней конфигурации, подсистемы, ШУ и заканчивая «посадочным местом» для одного сигнала. Вершина дерева в зависимости от типа может быть элементом нескольких сетей и, соответственно, имеет несколько сетевых адресов либо некоторый аппаратный адрес, идентифицирующий ее положение в пространстве аппаратных адресов данной конфигурации.

Интерфейс построения дерева позволяет:

- описывать свойства создаваемых вершин «вручную»;
- определять автоматическую генерацию вложенных вершин нескольких уровней с помощью шаблонов;
- создавать и многократно использовать типовые вершины-устройства.

Пользователь строит дерево конфигурации и определяет связи между вершинами. По этой информации конфигуратор автоматически рисует схемы всех уровней, на которых в виде вершин отражены схемы более низкого уровня, программируемые узлы сети и устройства, а также связи между ними. С помощью удобного интерфейса пользователь «заселяет» связи сигналами, выбираемыми из БД, возможно, с применением фильтрации.

В отличие от СИНТАР-3 редактор задач теперь включен в конфигуратор. Этим подчеркивается, что задача является конфигурационным, а не программным понятием [3]. Поскольку каждая ОС приписывает задачам свой набор свойств, интерфейс редактора задач изменяется в зависимости от выбранной пользователем платформы (MS DOS, QNX или ОС APM).

При размещении программ на узлах сети пользователь выбирает задачи, связывает их с узлами и наполняет разделами, выбирая последние из различных программных проектов. Минимальным размещаемым элементом ПО является не задача, как в СИНТАР-3, а программный раздел, объем которого пользователь определяет по своему усмотрению. Это дает возможность собирать программу одной задачи из проектов, разработанных на разных рабочих местах и, возможно, в разных организациях.

Таким образом, конфигуратор позволяет связать между собой аппаратуру, программное обеспечение и сигналы, а также получить визуальное представление программно-аппаратной структуры и локальной сети разрабатываемой АСУ.

### **Многоплатформенная генерация программ**

Новый генератор обеспечивает генерацию исходных текстов на одном из двух выходных языков, объектом Паскале или С++ для работы на одной из трех платформ: MS DOS, QNX или ОС APM.

Генератор разделен на две части:

- загрузку из баз данных, не зависящую от платформы;
- генератор кодов, зависящий от платформы и выходного языка.

Используя информацию из БД конфигураций, генератор создает исходные тексты для одного выбранного узла (платформа MS DOS/APM) или одной задачи выбранного узла (платформа QNX), извлекая заданные разделы из указанных пользователем программных проектов.

Для удобства ручной настройки со стороны пользователя при генерации некоторых файлов (например, главный файл задачи или make-файл) используются шаблоны. Это позволяет изменять содержание выходного файла без модификации генератора.

Скорость генерации по сравнению с генератором СИНТАР-3 возросла в 2-3 раза.

### **Новая технология выполнения работ**

Технология разработки любого продукта, не только программного, представляется как частично упорядоченное множество отдельных работ. Частичная упорядоченность означает, что для произвольно взятой пары работ либо существует ограничение на порядок выполнения, либо нет. Во втором случае работы этой пары могут быть выполнены в произвольном порядке, в том числе параллельно. Эта частичность порядка создает известную неразбериху, но в то же время дает некоторую свободу маневра.

Разработка реального продукта включает не только первоначальное создание, но и последующие доработки или модификации. Доработка, как правило, захватывает небольшую часть работ из общего множества работ данной технологии и тем самым нарушает общую последовательность. Тем не менее эта общая последовательность (возможно, с параллельными ветвями) должна существовать,

по крайней мере, для первоначального создания продукта. Можем назвать ее *основным потоком работ*.

Если перейти к технологии разработки ПО, поддерживаемой некоторой САПР, то работа – это некая команда или группа связанных команд пользовательского интерфейса, а основной поток работ – это тот стержень, на котором строится логика САПР.

Какие вообще работы выполняет САПР? Это работы двух видов: либо Вы вводите данные, которые она размещает в своих БД (это делают *редакторы*), либо Вы получаете на основе введенных данных некоторые преобразованные данные (это делают *генераторы*).

Хорошая технология не должна допускать дублирования ввода данных, по крайней мере, в основном потоке работ. При разработке большой системы дублированные работы выполняют разные люди, что не только увеличивает затраты труда, но и приводит к многочисленным несоответствиям.

Если применить в СИНТАР 2007 (укрупненный) основной поток работ, поддерживаемый СИНТАР-3, то с учетом структурных нововведений он бы выглядел так:

1. Создать разработку.
2. Создать в ней базы данных сигналов (по одной на ШУ).
3. Заполнить каждую БД сигналами.
4. Экспортировать межстоечные сигналы в другие БД разработки.
5. Создать программный проект.
6. Импортировать в него сигналы из некоторой БД.
7. Разработать исходники ПО с помощью редакторов САПР.
8. Повторить пункты 5 - 7 необходимое количество раз.
9. Создать конфигурацию.
10. Построить дерево аппаратуры (включающее ШУ).
11. Ввести связи между вершинами дерева (в том числе межстоечные).
12. Связать вершины дерева с программами.
13. Наполнить сигналами связи между вершинами.
14. Получить исполняемые файлы для (всех задач (QNX)) каждого узла.
15. Отладить конфигурацию.

Поскольку мы разбили общую БД сигналов на части, равные шкафам, то получается, что одна БД сигналов однозначно соответствует одному ШУ, так сказать, по определению. Поэтому работа 2 вносит в систему информацию о шкафах. Эта информация частично дублируется работой 10.

Работа 4 подразумевает знание межстоечных связей, и потому работа 11 частично дублирует информацию, полученную системой при выполнении работы 4.

Работа 6 устанавливает связь между БД сигналов (т.е. шкафом) и программным проектом. Та же информация повторно вводится работой 12.

Рассмотрим вариант основного потока работ, принятый в среде СИНТАР 2007:

1. Создать разработку.
2. Создать конфигурацию.
3. Построить дерево аппаратной структуры конфигурации (включающее ШУ). Создать базу данных сигналов ШУ (диалог появляется автоматически при создании ШУ и нужен только для указания БД-источника в случае копирования структуры БД).

4. Ввести связи между вершинами дерева (в том числе межстоечные).
5. Заполнить каждую БД сигналами.
6. Экспортировать межстоечные сигналы в другие БД разработки (другие БД определяются наличием связей между ШУ, определенных в 4).
7. Создать программный проект.
8. Импортировать в него сигналы из некоторой БД.
9. Разработать исходники ПО с помощью редакторов САПР.
10. Повторить пункты 7 - 9 необходимое количество раз.
11. Связать вершины дерева с программами (из проектов, связанных с данным ШУ через БД сигналов, см. п. 8).
12. Наполнить сигналами связи между вершинами (учитывая связи БД с ШУ, см. п. 3).
13. Получить исполняемые файлы для (всех задач (QNX)) каждого узла.
14. Отладить конфигурацию.

В этом потоке данные не дублируются, а только уточняются с учетом ранее выполненных работ. Это сокращает общую трудоемкость и снижает вероятность ошибок.

### **Выводы**

СИНТАР 2007 представляет собой SoftLogic-систему, рассчитанную на разработку крупномасштабных АСУ. Примерами областей применения могут служить АСУ атомных электростанций, магистральных продуктопроводов, транспортных систем.

СИНТАР 2007 поддерживает объектно-ориентированную технологию программирования, использование типовых программно-аппаратных структур, многоплатформенность и многозадачность. Все основные этапы разработки основаны на визуальном представлении проектируемых объектов.

Среда оснащена рядом специфических средств автоматизации, обусловленных потребностями крупной АСУ. Она поддерживает характерный для таких АСУ коллективный характер разработки с участием нескольких организаций.

### **Список литературы**

1. Сухоробрый В.Г., Гристан А.С., Джулгаков В.Г., Джулгаков Д.В.. САПР СИНТАР-3. Начало реализации концепции построения перспективных САПР систем сбора информации и управления технологическими процессами //Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». - 2004. – Вып. 21. – С. 83-91.
2. Сухоробрый В.Г., Гристан А.С., Джулгаков В.Г., Руденко К.И., Джулгаков Д.В., Иванов В.Е.. СИНТАР-3 Моно – САПР для одномашинной АСУ //Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ». – 2004. - Вып. 24. – С. 257 - 262.
3. International standard 1131-3, Part 3: Programming languages, IEC, Division Automatismes Programmables, First edition, 1993.

## Дослідження трибосполучень за допомогою сигналів електронно-акустичної емісії

*Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка*

Зносостійкість трибосполучень, а значить і їх надійність та довговічність – важлива науково-технічна проблема, що є одночасно актуальною і науково-корисною.

Метою цієї статті є розробка методології дослідження трибосполучень за допомогою відомого методу електронно-акустичної емісії (ЕАЕ).

Аналіз літературних джерел [1-19], доводить, що така науково-технічна проблема в такій постановці розв'язується вперше.

*Основні поняття ЕАЕ.* Основна термінологія та атрибутика сигналів ЕАЕ викладена чинному ДСТУ 27655-88 “Акустична емісія. Терміни, визначення та позначення” [1].

Аналіз літературних джерел та власний досвід авторів показує, що за допомогою сигналів ЕАЕ можна дослідити наступні фізико-механічні процеси [1, 2]:

- руйнування конструкційних матеріалів в процесі їх зношування при експлуатації;
- пластичне деформування;
- корозійне розтріскування під дією внутрішніх напружень та водневе окрихнення;
- процеси кристалізації та плавлення металів;
- магнітометричні ефекти, що викликаються зовнішнім зсувом границь магнітних доменів при зміні величини зовнішнього магнітного поля;
- фазові перетворення поліморфного типу, в тому числі мартенситні;
- утворення частинок другої фази при розпаді перенасичених твердих розчинів.

Процеси пластичної течії матеріалів, процеси зміцнення та утворення мікронесуцільностей досить вдало описуються з позиції теорії дислокацій (доменів – у випадку магніто механічних ефектів) [3 – 5].

Згідно сучасної трактовки цієї теорії можна виділити три варіанти отримання сигналів ЕАЕ. Зупинимось коротко на кожному з них.

*Переміщення дислокацій по лінії ковзання.* В цьому випадку дислокації рухаються під дією сили, що збільшується в часі, і мають можливість виходу на поверхню матеріалу чи границю зерна, імовірність гальмування на перешкодах чи анігіляції. Ці процеси характерні для стадії пластичної течії матеріалу в макромеханіці.

Розглянемо як формується імпульс збурення, для цього побудуємо модель сигналу ЕАЕ (див. рис. 1) при утворенні частинки зносу в умовах повного навантаження.

Матеріал зразка – ролика – вважається ізотропним за винятком малої області неоднорідності  $S_T \ll S$ , де утворюється частинка зносу. Область неоднорідності  $S_T$  знаходиться в деякій площині перерізу зразка  $S$ , що розміщена перпендикулярно осі  $X$ , як це показано в [6 – 9].

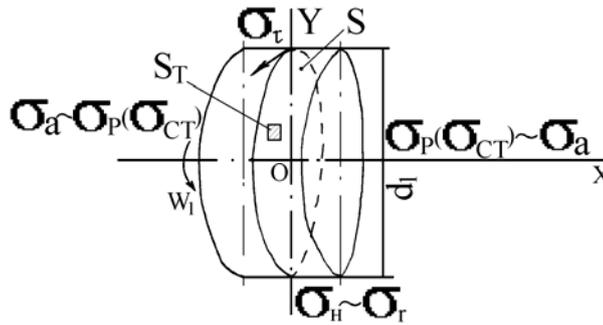


Рис.1. Напружено-деформований стан зразка (“ролик”) і утворення тріщини в області неоднорідності:  $S$  – переріз зразка;  $S_T$  – область неоднорідності в перерізі  $S$ ;  $\sigma_r = \sigma_H$  – радіальні (герцівські) напруження;  $\sigma_\tau$  – тангенціальні напруження під дією навантаження;  $\sigma_a$  – осьові напруження (розтягу – стиску).

НДС зразка визначає набір радіальних  $\sigma_r$ , тангенціальних  $\sigma_\tau$  та осьових  $\sigma_a$  напружень. Користуючись законом парності напружень та IV гіпотезою міцності, знайдемо еквівалентні (інтегральні) напруження  $\sigma_{екв}$ , що діють в перерізі  $S$ , зокрема, і на область неоднорідності  $S_T$

$$\sigma_{екв} = \sqrt{(\sigma_r^2 + \sigma_a^2) + 3\sigma_\tau^2}. \quad (1)$$

Дотримуючись умови суцільності речовини, розіб'ємо неоднорідну область  $S_T$  на правильні елементарні об'єми  $V_0$  кількістю  $N_0$ , масштаб яких  $m \ll \lambda$ , де  $\lambda$  – найменший розмір неоднорідності (дислокації) всередині  $S_T$ . Міцність цих об'ємів характеризується умовою  $\sigma_{екв} \leq [\sigma]$ , де  $[\sigma]$  – допустиме значення напружень. Міцність вказаних об'ємів описується розподілом вигляду [10 – 12]

$$P(\sigma_{екв}) = C \sigma_{екв}^\epsilon e^{-\epsilon \sigma_{екв}}, \quad (2)$$

де  $c, \epsilon$  – коефіцієнти, що залежать від фізико-механічних характеристик матеріалу з умовою  $c > 1, \epsilon \gg 1$  [13, 14].

При механічних випробуваннях і в пружній, і в пластичній областях навантаження зразка збільшують за лінійним законом в часі  $t$ , що відповідає класичному рівнянню Велера

$$\sigma_{екв} = \alpha T, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – швидкість навантаження [8, 9, 15];  $T$  – ресурс, можна покласти  $T = t$  руйнування.

Вважається, що руйнування кожного елементарного об'єму відбувається не консолідовано, а незалежно, при досягненні граничного значення  $\sigma_{екв} = [\sigma]$ .

Обробка експериментальних даних та рекомендації роботи [13, 16], дозволили отримати формулу, що пов'язує швидкість руйнування об'ємів з часом квантування  $t_{кв}$

$$\Phi(t_{кв}) = N_0 c \alpha^2 t_{кв}^\epsilon e^{-\epsilon \alpha t_{кв}}. \quad (4)$$

Аналіз (4) показує, що швидкість  $\Phi(t_{кв})$  цілком визначається розподілом  $P(\sigma_{екв})$  та параметром  $\alpha$ .

Руйнування кожного елементарного об'єму призводить до формування одиночного імпульсу збурення (рис. 2) амплітудою  $A$ .



Рис. 2. Параметри одиночного імпульсу збурення.

Амплітудне значення імпульсу збурення, що залежить від напруження  $\sigma_{\text{екв}}$ , може бути знайдено за формулою:

$$A(t, \tau) = A_0(t) h(\tau), \quad (5)$$

де  $A_0 = k \alpha t$  – амплітудне значення імпульсу збурення,  $k$  – коефіцієнт пропорційності [12, 16],  $h(\tau)$  – функція, що визначає часовий хід одиночного збурення, що однакова для всіх об'ємів і має одиночну амплітуду [17],  $\delta$  – тривалість збурення, що значно менша часу утворення частинки зносу (чи тріщини), який дорівнює часу квантування  $t_{\text{кв}}$ .

Так як величина  $\delta$  – мала, то результуюче зміщення буде визначатись сумою збурень з врахуванням кількості їх утворення в одиницю часу. Тоді, виходячи з (4) та (5), отримуємо амплітудне значення сигналу ЕАЕ, що відповідає відділенню частинки зносу

$$U_T(t) = U_0 \delta_0 \alpha^3 t_{\text{кв}}^2 e^{-\beta \alpha t_{\text{кв}}}, \quad (6)$$

де  $U_0 = N_0 cK$ ,  $\delta_0$  – параметр, числове значення якого визначається формою одиночного імпульсу збурення і має розмірність часу.

Якщо досліджується область пластичності чи пружно-пластичності, тоді замість допустимих напружень міцності слід скористатись допустимими напруженнями текучості  $[\sigma_T]$  чи пропорційності  $[\sigma_{\text{пл}}]$ , а в зоні крихкого руйнування – межею міцності  $\sigma_B$ .

Відрив дислокацій і подолання ними дефектів кристалічної структури при  $\sigma_{\text{екв}} \approx \sigma_T$  під час руху супроводжується імпульсами збурення. Кількість імпульсів, утворених однією дислокацією ( $n_1$ ), дорівнює відношенню відстані, що її пройшла дислокація –  $l = v_D t$ , де  $v_D$  – середня швидкість руху дислокації, яку вважаємо сталою до відстані, що проходить дислокація між двома актами випромінювання  $l_0$ . Тоді кількість імпульсів, створених однією дислокацією в одиницю часу дорівнює  $n_0 = n_1 / t = v_D / l_0$ , а число імпульсів, утворених усіма дислокаціями

$$n(t) = \frac{v_D}{l_0} N_D(t), \quad (7)$$

де  $N_D(t)$  – кількість рухливих дислокацій в залежності від часу [6].

Зокрема, зв'язок між щільністю рухливих дислокацій і відносною деформацією  $\varepsilon_{екв}$ , що відповідає рівню еквівалентних напружень  $\sigma_{екв}$ , має вигляд, що відповідає класичному рівнянню Велера:

$$N_D(\varepsilon_{екв}) = M \varepsilon_{екв} e^{-B \varepsilon_{екв}}, \quad (8)$$

де  $M$  і  $B$  – постійні, залежать від фізико-механічних характеристик матеріалів [9].

При лінійному зростанні навантаження, а значить і напруги  $\sigma_{екв}$ , можна записати, що  $\varepsilon_{екв} = \alpha_1 t$ , де  $\alpha_1$  – швидкість зміни відносної деформації. Враховуючи (7) та (8) і значення  $\varepsilon_{екв}$ , отримаємо формулу щодо зміни сигналу ЕАЕ в часі, тобто час квантування  $t_{кв}$

$$v_{\frac{D}{(T)}}(t_{кв}) = u_0 \alpha t_{кв} e^{-B \alpha t_{кв}}, \quad (9)$$

де  $u_0 = h_0 \delta_D V_D / l_0$ ;  $\delta_D$  – середня тривалість імпульсу збурення. За один оберт “ролика” відповідно

$$v_{\frac{D}{(T)}}(t_{кв})^* = \pi u_0 \alpha t_{кв}^* e^{-\alpha t_{кв}^* / 30 \omega_1}. \quad (10)$$

Слід відзначити, що описаний вище механізм формування сигналу ЕАЕ буде тотожним для кожного з трьох варіантів теорії дислокацій, різниця полягає, перш за все, в законі формування переднього і заднього фронтів імпульсу ЕАЕ.

Отже, для першого варіанту форма переднього фронту імпульсу ЕАЕ має вигляд [16, 18]

$$\sigma(t) = \rho C_t^2 \sin^2 \varphi \sqrt{\frac{a}{l C_1^2}} \left( \frac{v^*}{2} \right)^{3/2}, \quad (11)$$

де  $\varphi$  і  $l$  – координати розміщення джерела ЕАЕ відносно приймача сигналу;  $a$  – стала решітки металу чи сплаву;  $v^*$  – відносна швидкість дислокацій в момент анігіляції;  $\rho$  – щільність матеріалу;  $C_t$  – швидкість поперечної хвилі в матеріалі.

*Процеси прориву рухомою дислокацією перешкод у вигляді дислокаційних скупчень границь зерен, неоднорідностей різного типу.*

У цьому випадку формування сигналу ЕАЕ має дві складові: передній фронт формується за рахунок розриву зв'язків і швидкої розгрузки матеріалу в області неоднорідностей. Задній фронт сигналу формується за рахунок релаксації напружень відразу ж після розриву зв'язків.

Форма імпульсу ЕАЕ описується виразом

$$\sigma(t) = \sigma_{max} \left( e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2} - 1 \right), \quad (11)$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  – постійні часу, що залежать від акустичних властивостей середовища, де виникло джерело сигналу ЕАЕ;  $\sigma_{max}$  – максимальне напруження в момент розриву зв'язків. При цьому виникає релаксаційний тип сигналу ЕАЕ.

Для акселераційного і релаксаційного процесів допускається, що в момент переходу починає діяти джерело напружень ступінчастої форми

$$S^*(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t < t' \\ 0, & \text{при } t > t' \end{cases} \quad (12)$$

де  $t'$  - момент часу переходу.

Повний сигнал виражається добутком  $S^*(t) \sigma(t)$ . Зокрема, для релаксаційного сигналу

$$\sigma(t) = \sigma_{max} \left( 1 + e^{-t/\tau_1} S^*(t) - e^{-t/\tau_2} \right). \quad (13)$$

Для акселераційного сигналу

$$\sigma(t) = \begin{cases} \sigma_{max} a t^k S^*(t), & \text{при } t < t', \\ \sigma_{max} e^{-t/\tau}, & \text{при } t > t' \end{cases}, \quad (14)$$

де  $a$  – множник, що забезпечує необхідну розмірність;  $k$  – коефіцієнт, що визначається фізичним процесом, при випромінюванні пружних хвиль  $k > 1$ ;  $S^*(t)$  – по (12).

Отже, в другому варіанті повний сигнал є стохастичною послідовністю імпульсів релаксаційного чи екселераційного типів.

Електро-емісійний образ  $u(t)$  цих двох типів показано на рис. 3.

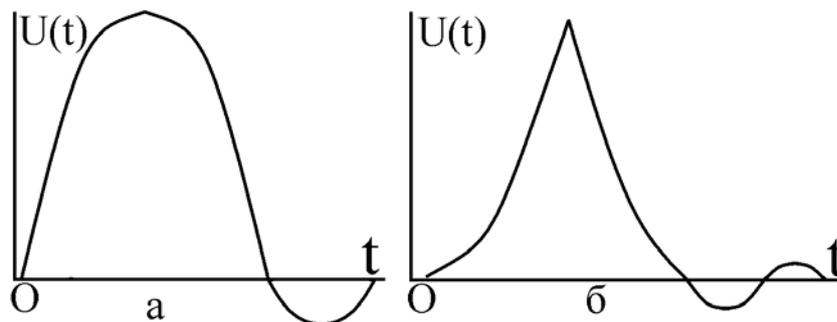


Рис. 3. Тип сигналів ЕАЕ: а – релаксаційний; б – акселераційний

*Процес випромінювання ЕАЕ при крихкому руйнуванні.*

В цьому третьому варіанті повний сигнал ЕАЕ формується із потоку елементарних акустичних імпульсів з врахуванням впливу середовища, в [18] отримаємо вираз

$$u(t) = at e^{-\alpha t}, \quad (15)$$

де  $\alpha$  – стала затухання потоку акустичних імпульсів, пов'язана з розмірами поля неоднорідності [12, 19];  $a$  – параметр кристалічної решітки.

Форма сигналу ЕАЕ при крихкому руйнуванні поверхні показана на рис. 4.

Загальний вигляд процесу квантування довільного процесу випромінювання ЕАЕ показано на рис. 5.

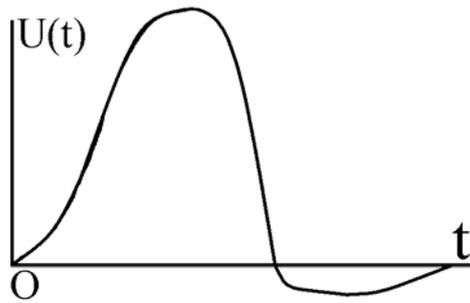


Рис. 4. Форма сигналу ЕАЕ при крихкому руйнуванні поверхні тертя.



Рис. 5. Загальний вигляд процесу квантування сигналу ЕАЕ  $u(t)$ .

*Інформаційні можливості основних параметрів ЕАЕ.*

Практичний вихід даного розділу полягає у виявленні та встановленні кореляційних зв'язків між параметрами ЕАЕ та трибологічними процесами зношування поверхонь тертя, в результаті чого і відбувається випромінювання сигналів ЕАЕ.

Як було показано вище, найпростіший вид такого зв'язку можна встановити за допомогою загальновизнаної формули Шеннона [6, 7].

Проте, спробуємо детально встановити, яку інформацію несе кожний параметр ЕАЕ, після цього реєстрація та статистична обробка.

1. Сумарний рахунок  $N$  несе інформацію про інтегральну пошкодженість трибосполучення в процесі зміни зовнішнього навантаження, плями контакту, інтенсивності зношування і т.п. По вигляду наростаючої залежності сумарного рахунку при збільшенні зовнішнього навантаження, наприклад, питомого тиску в зоні плями контакту. Можна судити про ступінь активності джерела ЕАЕ і визначити момент початку руйнування поверхні тертя (як в часі, так і в циклах фрикційного навантаження).

ЕАЕ є дискретним процесом по своїй природі, тому накопичення сумарного рахунку має вигляд ступінчастої функції (рис.5).

При збільшенні параметра навантаження на  $\Delta \Pi_i$  кількість перевищень порога дискримінації (сумарний рахунок) збільшується на  $\Delta N_i$ . Якщо початок координат перенести в точку появи перших сигналів ЕАЕ і апроксимувати дві послідовні точки  $(i - 1)$  та  $i$  на полігональній кривій росту  $N = f(\Pi)$ , то отримаємо залежність

$$N_i = A \Pi_i^{n_i}, \quad (16)$$

де  $A$  – коефіцієнт пропорційності;  $n_i$  – показник ступеня.

Для приросту сумарного рахунку із (16) отримаємо

$$\Delta N_i = n_i A \Pi_i^{n_i - 1} \Delta \Pi_i. \quad (17)$$

Поділивши (16) на (17) після алгебраїчних перетворень отримаємо формулу для  $n$

$$n_i = \frac{\Delta N_i \Pi_i}{\Delta \Pi_i N_i}. \quad (18)$$

По відношенню (18) можна судити про величину  $n$  в кожний із моментів приросту сумарного рахунку ЕАЕ. Сумарний рахунок є першим елементом класифікації джерел ЕАЕ в стандарті ASTM, [1, 2], згідно якого джерела ЕАЕ підрозділяють на три групи – А, В, С.

Полігона С при  $n \approx 1$  характеризує однорідний слабоактивний процес ЕАЕ з постійною інтенсивністю, джерело сигналу при цьому класифікується як активне при даному рівні навантаження.

Полігона В при  $1 < n < 6$  характеризує зростаючий процес генерації ЕАЕ з наростаючою інтенсивністю, джерело класифікується як критично активне при даному рівні навантаження.

Полігона А при  $n > 6$  характеризує зростаючий процес генерації ЕАЕ з катастрофічною інтенсивністю.

Отже, класифікація джерел ЕАЕ при зношуванні трибосполучень можна створити у відповідності до значень  $n$ :  $n < 1$  – джерело неактивне,  $n \approx 1$  – джерело стає активним,  $1 < n < 6$  – джерело критично активне,  $n > 6$  – джерело катастрофічно активне.

В роботі [12] доведено, що сумарний рахунок  $N$  пропорційний об'єму зношеного матеріалу і що

$$N = a K^m \approx \frac{1}{E} K^2, \quad (19)$$

де  $a$  – стала, що залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу і чуттєвості апаратури [3];  $K$  – коефіцієнт інтенсивності напружень;  $m$  – коефіцієнт, що залежить від класу матеріалу  $K = 4,6 \dots 11,9$ ;  $E$  – модуль Юнга матеріалу.

2. Швидкість рахунку  $\dot{N}$  є похідною від сумарного рахунку і показує швидкість розвитку пошкодження матеріалу в процесі зношування в даний момент часу. Зазвичай цей параметр реєструють спільно з сумарним рахунком  $N_i$ , вони доповнюють один одного в процесі аналізу результатів ЕАЕ.

3. Пікова (екстремальна) амплітуда  $A_{\Pi}$  окремих імпульсів ЕАЕ, а також енергія одиночних сигналів  $E_c$  є енергетичними показниками процесу зношування поверхонь тертя трибосистеми. Під напругою  $\sigma_{екв}$  втомна тріщина діаметром  $d$

руйнує об'єм  $\sim d^3$ . При щільності енергії  $\frac{\sigma_{екв}^2}{2E}$ , пікова амплітуда акустичного

зміщення  $A_{\Pi} = \frac{\sigma_{екв}^2 d^3}{t_p}$ , де  $t_p$  – час розкриття втомної тріщини;  $t_p = d/c$ , де  $c$  –

швидкість звуку в матеріалі. В роботі [4] отримано кореляційний зв'язок між піковою амплітудою  $A_{\Pi}$  і довжиною втомної тріщини  $l$  для конструкційних сталей у вигляді:

$$A_{\Pi} = 10^{-1,62} \times l^{1,42}, \quad (20)$$

З коефіцієнтом кореляції  $r = 0,988$ .

4. По амплітудному розподілу імпульсів ЕАЕ можна судити про тип деформації, що призводить до руйнування. При пластичній деформації амплітудний розподіл близький до експоненціального, а при крихкому руйнуванні – розподіл більш рівномірний зі збільшенням кількості імпульсів з великою амплітудою.

5. Реєстрація частотного параметра в методі ЕАЕ не несе безпосередньої інформації про фізичні процеси в зоні плями контакту трибосполучення по причині фільтрації високочастотної частини спектра імпульсів при проходженні імпульсів від місця виникнення до місця реєстрації. Крім того, істотні похибки вносять частотні характеристики перетворювача і самого вимірювального тракту. Проте, відносні зміни частотного параметра в процесі одного вимірювання можуть нести суттєву інформацію про механізм деформування поверхні тертя. Для матеріалів різних класів і типів застосовують критерій розділу імпульсів ЕАЕ по джерелу виникнення  $K_p$ :

$$K_p = \lg \left( \frac{E_c}{\tau^2} \right), \quad (21)$$

де  $E_c$  – енергія індивідуального сигналу ЕАЕ;  $\tau$  – тривалість цього сигналу.

Розрахунки параметрів сигналів ЕАЕ показали, що інформативними параметрами, які не залежать від швидкості процесів, що розвиваються, є: для крихкого руйнування – площа від сигналу ЕАЕ, що визначається площею утворюваної втомної тріщини; для пластичного руйнування – амплітуда і потужність сигналу ЕАЕ, що визначаються об'ємом деформованого матеріалу. При цьому тривалість сигналів ЕАЕ пропорційна тривалості досліджуваних процесів. Формули для розрахунку параметрів сигналів ЕАЕ при крихкому та пластичному руйнуванні (деформуванні) приведені в таблиці, де  $m, q$  – цілі числа порядку кількох одиниць.

Таблиця

Параметр сигналу ЕАЕ	Крихке руйнування	Пластичне руйнування
Тривалість переднього фронту	$\tau_{T_0} = \frac{2}{v \alpha_T}$	$\tau_{D_0} = \frac{1}{B \alpha_D}$
Тривалість сигналу $t_{кв}$	$\tau_{T_0} = \frac{2m}{v \alpha_T} = t_{кв}$	$\tau_{D_0} = \frac{q}{B \alpha_D} = t_{кв}$
Амплітуда	$u_{T_{max}} = 4u_0 \delta \alpha_T (v^2 e^2)^{-1}$	$u_{D_{max}} = u_0 (B e)^{-1}$
Площа під сигналом	$S_{u_T} = 2u_0 \delta \left( \frac{1}{v^3} \right)$	$E_D = u_0 \left( \frac{1}{B^2 \alpha_D} \right)$
Енергія сигналу	$E_T = \frac{3}{4} u_0^2 \delta^2 \alpha_T \left( \frac{1}{v^3} \right)$	$E_D = u_0^2 \left( \frac{1}{4 B^3 \alpha_D} \right)$
Потужність сигналу	$W_T = \frac{3}{8} u_0^2 \delta^2 \alpha_T^2 \left( \frac{1}{m v^4} \right)$	$W_D = u_0^2 \left( \frac{1}{4 q B^2} \right)$
Швидкість зміни	$v_T(t_{кв}) = u_0 \alpha_T t_{кв} e^{-v \alpha_T t_{кв}}$	$v_D(t_{кв}) = u_0 \alpha_D t_{кв} e^{-B \alpha_D t_{кв}}$

сигналу, швидкість зношування		
Швидкість зміни сигналу за 1 оберт “ролика”	$u_T^*(t_{кв}) = \frac{\pi u_0 \alpha_T t_{кв} e^{-\epsilon \alpha_T t_{кв}}}{30 w_I}$	$v_D^*(t_{кв}) = \frac{\pi u_0 \alpha_D t_{кв} e^{-B \alpha_D t_{кв}}}{30 w_I}$

*Оцінка похибки вимірювання методом ЕАЕ.*

Зазвичай виділяють три групи похибок: інструментальні, методичні та похибки статистичного характеру. Проте, в випадку вимірювання методом ЕАЕ вирізняються, окрім вказаних, похибки квантування по часу квантування і по рівню квантування, статистичні похибки із-за кінцевої тривалості спостереження випадкового процесу. Решта похибок мають конкретний, несистемний характер і загалом несуттєво впливають на результати вимірювання за методом ЕАЕ [17].

При квантуванні по часу сигнал фіксується тільки в деякі моменти часу; у випадку обмеженості спектра сигналу використовується теорема Котельникова, згідно якої будь-який безперервний сигнал повністю визначається своїми дискретними значеннями в моменти відліку, що відстоять один від одного на інтервал

$$\Delta t_{max} = \frac{\pi}{w_B} = \frac{1}{2} f_e, \quad (22)$$

де  $\Delta t_{max}$  – максимальний крок квантування;  $w_B$  – верхня гранична кутова частота (рад/с);  $f_e$  – верхня гранична часова частота (Гц).

Математично теорема Котельникова має вигляд:

$$X(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} X(K \Delta t) \frac{\sin w_B (t - K \Delta t)}{w_B (t - K \Delta t)}, \quad (23)$$

де  $X(t)$  – безперервний сигнал ЕАЕ.

При цьому верхню граничну часову частоту  $f_e$  визначимо через мінімальні геометричні інтервали:  $f_B = \frac{v}{T_{min}}$ , де  $v$  – швидкість переміщення мірального інструмента відносно об'єкта дослідження.

При заданій частоті реєстрації  $f$  (частоті імпульсної модуляції) крок квантування по часу  $\Delta t$  виражений, як правило, в мкм:

$$\Delta t \leq \frac{T_{min}}{2} = \frac{v}{2 f_B}. \quad (24)$$

Варіюючи значеннями  $v$  та  $f$  можна змінювати крок квантування в потрібних межах згідно (24).

Числові розрахунки згідно [6, 16] показують, що при відносній похибці амплітуди сигналу порядку 1% відносна точність кроку квантування по часу дорівнює  $\approx 0,1\%$ .

При квантуванні сигналу ЕАЕ по рівню виникає помилка в значеннях, що передаються, яка обумовлена заміною реального значення сигналу дозволеним рівнем. Ця похибка не може бути усунена і є неминучим наслідком квантування. При цьому можна вважати, що квантовий сигнал  $X_K(t)$  є сума реального сигналу  $X(t)$  та похибки  $\Delta X_K$ :

$$X_K(t) = X(t) + \Delta X_K \quad (25)$$

а операцію квантування трактувати як проходження сигналу через перешкоду  $X_K$ , що називають "шумом квантування".

Максимальна похибка квантування по рівню  $G_{max} = \delta/2$ , де  $\delta$  – крок квантування по рівню, а дисперсія шуму квантування при дискретному кроці квантування:  $D_\delta = \delta^2 / 12$ .

В [4] показано, що при  $\delta = X_{max} / 100$ , коефіцієнт варіації  $V_\delta$  за рахунок квантування по рівню:

$$V_\delta = \frac{\sigma_{\delta}}{X} 100\% = \frac{X_{max} 100}{100 \sqrt{12} X_{max}/2} \approx 0,7\%.$$

Статистична похибка із-за кінцевої тривалості спостереження випадкового процесу без знання виду кореляційної функції  $\delta_F$  може бути знайдено по формулі [12]:

$$\delta_F \sqrt{\theta} = \frac{\sqrt{2 \sum_1^n \frac{1}{v!} \left[ \Phi_v \left( \frac{X}{\sigma_x} \right) \right]}}{\left[ \Phi \left( \frac{X}{\sigma_x} \right) \right]}, \quad (26)$$

В (26):  $\theta = T / T_{кк}$ ,  $T$  – тривалість спостереження;  $T_{кк}$  – інтервал кореляції досліджуваної функції  $X(t)$ ;  $\Phi_v(\xi)$  –  $v$ -а похідна від інтеграла імовірності  $\Phi(\xi)$ :

$$\Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\xi^2} d\xi; \quad \xi = \frac{X}{\sigma_x}. \quad (27)$$

Визначення  $\Phi_v(\xi)$  здійснюють за допомогою поліномів Ерміта [6]. Практичні розрахунки показують, що похибка  $\delta_F$  в середньому не перевищує 1,2%.

У роботах [4, 8] показано, що при обмеженні тривалості сигналів ЕАЕ при  $m = 5$  і  $q = 8$  (див. табл. 1), величина похибки енергії і потужності сигналів при крихкому і пластичному руйнуванні не перевищує 0,002%. Отже, метод вимірювання за допомогою ЕАЕ достатньо точний, і похибки системного характеру несуттєво впливають на нього.

## Висновки

1. З'ясовано, як анізотропія властивостей матеріалу поверхні тертя впливає на швидкість поширення сигналу ЕАЕ, а значить і на його якість.
2. Кваліфіковано сигнали ЕАЕ та показано інформаційні можливості основних параметрів ЕАЕ, показано як досліджувати інтенсивність зношування.
3. Виявлено і встановлено розрахункові залежності для сигналів ЕАЕ при крихкому та пластичному руйнуванні трибосполучень з оцінкою похибки вимірювання методом ЕАЕ.

## Список літератури

1. ГОСТ 27655 – 88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. – М.: Изд. Стандартов, 1988. – 24 с.
2. РД-03-131-97. Правила организации и проведения АЭ контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М.: Изд. стандартов, 1996. – 40 с.
3. Коллинз Д. Повреждения материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1983. – 615 с.
4. Wadley H. N., Scudry C. B., Speake I.H. Acoustic Emission for Physical Examination of Metals // Int. Met. Rev., 1980. – 25. – №2. – P. 41 – 64.
5. Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
6. Кордонский Х.Б., Харыч Г.М., Артамоновский В.П., Непомнящий Е.Ф. Вероятностный анализ процесса изнашивания. – М.: Наука, 1978. – 56 с.
7. Приймаков О.Г. Модель фрикційної втоми при абразивному зношуванні. – Проблеми трибології. – 2005. – №1. – С. 39 – 47.
8. Davies R. Procuding of the Symposium on Friction and Wear. – Detroit, 1957. – Amsterdam, 1960. – 174 p.
9. Rghtmire B. Statistical Analysis of a Wear Process. – Transactions of ASME, 1967. – vol. 79. – №6. – P. 1242 – 1246.
10. Рейзер Ю.П., Леонов М.Я. Физические основы теории трещин хрупкого разрушения. – М.: УФН, 1970. – Т.100. – №2. – 329 с.
11. Журков С.Н., Томашевский Э.Е. Зависимость долговечности от напряжения. – М.: ЖТФ, 1955. – Т.25. – №1. – С. 66 – 73.
12. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
13. Archard J. Single Contacts and Multiple Encounters. – Journal of Applied Physics, 1961. – vol. 32. – №8. – P. 1420 – 1425.
14. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
15. Подгорный А.Н. Ползучесть элементов в машиностроительных конструкциях. – К.: Наукова думка, 1984. – 262 с.
16. Mulhearn T., Samuels L. The Abrasion of Metals: a Model of Process. – Wear, 1962. – vol. 5. – P. 478 – 498.
17. Патон Б.Е. Об основных направлениях работ в области акустической эмиссии. Акустическая эмиссия материалов и конструкций. // 1 – ая Всесоюзная конференция. – Ч.1. – Ростов-на-Дону. – Изд. Ростовского ун – та, 1989. – 192 с.
18. Ратнер С.Б. Об энергии активации процесса механического разрушения полимеров. – ДАН СССР, 1968. – Т. 183. – №6. – С.1297 – 1300.
19. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов. – М.: изд. РАН, 1992. – 160 с.

## Применимость XML в системах CMS

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Преимущества использования спецификаций XML для управления содержимым web-страниц для разработчиков вполне понятны и неоспоримы. Нельзя сказать, что XML-технологии остаются на передовых позициях, как очень гибко программируемые, но все же применяются они достаточно часто. XML можно выбирать в качестве основы web-проектов, и если его внедрять правильно, то можно добиться огромной пользы. Внедрение XML может поставить CMS системы, как и любое web-решение, на новый уровень.

Необходимо сделать разбор используемых терминов. По своей сути, XML – это язык описания документов. Его основная функция – представить документ в виде иерархической структуры данных. Основным понятием языка является узел. Существует несколько типов узлов, каждый из которых имеет свой синтаксис. Узлы включают в себя другие узлы, образуя, таким образом, дерево документа. Расширяемый язык стилей XSL – это способ представления документов в формате XML, называемый также XSLT (Transformation), процесс, используемый для выборки и форматирования данных. Преимущество этих языков заключается в том, что они применимы к данным любого типа. В то же время каждая технология выполняет свою задачу. На примере web-решения можно распределить задачи технологий следующим образом: XML отвечает за содержимое страницы сайта, его информационное наполнение, надстройка XSL позволяет делать верстку страниц, работать над дизайном посредством манипуляций таблиц и стилей для страниц, XSLT же будет отвечать за преобразование содержимого в необходимый формат.

Технология XML обеспечивает гибкость благодаря универсальному формату структурирования и хранения информационного наполнения сайта. XML действительно имеет большое преимущество перед многими технологиями, поскольку позволяет разбить информацию на части на уровне кода, использовать содержимое и с легкостью контролировать формат, дизайн и визуальное представление сайта.

Несмотря на несомненное сходство между связью таких технологий, как XML и XSL, HTML и CSS, основное отличие заключается в преобразовательной способности XSL, позволяющей полностью контролировать содержимое, представление, формат и даже тип выводимого файла. Используя XSLT, можно группировать, сортировать и обрабатывать информационное наполнение вплоть до момента генерации и вывода файла. Таким образом, возможности технологии XML и ее расширений далеко превосходят возможности той же связки технологий HTML и CSS и могут применяться практически к любому типу файлов.

Еще один важный момент с точки зрения программиста заключается в том, что данные для обработки XML могут создаваться из файлов, хранящихся в глобальной сети или домашней локальной сети, или просто виртуальной в рамках одного рабочего места. К примеру, XML файл, содержащий информацию о сотруднике, может быть выдан базой данных предприятия в сети городского масштаба, позволяя отображаться на сайтах каждого отделения или филиала.

Необходимо разобраться с возможностью управления контентом сайтов, используя XML и XSL. Перенастройка содержимого представляет собой примене-

ние технологий XML и XSL для создания разделов или частей содержимого, которые гибко могут быть использованы неоднократно и переформатированы под различные потребности программиста.

Для примера можно взять любой блок данных в формате XML, который нужно использовать для двух совершенно разных файлов, являющихся результатом некоторой функциональности web-решения. Так как между стилями XSL и получаемым файлом существует полное соответствие, можно просто создать два разных файла, содержащих инструкции по выводу двух разных выходных файлов. Один из них будет сгенерированным файлом web-страницы, другой же будет, например, файлом в формате технологии поддержки версий CSV с таким же содержанием для использования в таблице (электронной таблице MS Excel). В результате обработки содержимого в формате XML, связанного с обоими уникальными файлами формата XSL, механизмом XSLT, поддерживаемым системой управления содержимым, получается XHTML-страница и файл CSV с одинаковым содержанием!

В качестве наглядного и более оторванного от теории примера можно привести справочник контактов рабочего состава предприятия. Он выполняется на локальной web-странице и содержит имена, номера телефонов и фотографии каждого сотрудника, а также в файле CSV, представляющем собой электронную таблицу с той же самой информацией, но без удобного визуального форматирования. Технология позволяет формировать таблицу стилей XSL для генерации PDF файла, преобразованного XML, и при этом неформатированного текста, а также, теоретически, любого файла, который только можно себе вообразить.

Ленты новостей, списки организаций, логи событий, блогговые заметки также можно было бы привести в качестве практического примера перенастройки информации под разнотипные результативные файлы. Вот так можно коротко описать основное качественное отличие технологий XML и XSL от большинства технологий.

Количество web-содержимого в формате XML растет с каждым днем. Отчасти популярность XML зависит от появления такой технологии, как RSS, предназначенной для описания лент новостей, блогов и прочих сетевых информационных ресурсов. Содержимое в формате XML доступно извне, и его применение, естественно, выходит за рамки сводок погоды, оглавлений или ссылок информационных порталов и биржевых новостей.

Общедоступность данных в формате XML применяется для отображения карт местности, исследований и большого разнообразия тематической информации. Вся эта информация, находясь внутри XML документа, может автоматически группироваться, сортироваться, комбинироваться и модифицироваться как угодно, согласно дизайну и представлению web-проекта.

В частности, информация, представленная как XML блок в виде ленты новостей, может передаваться в виде почтовых или других быстрых сообщений пользователям, согласившимся получать такую информацию. Можно в виде RSS создать массовую рассылку SMS-сообщений, уведомляющих пользователей мобильной сети о каких-либо новостях, акциях или изменениях тарифных планов и т.п. Данный пример очень часто используется в наши дни. Более интересен вариант предупреждения сотрудников о закрытии офиса на какой-либо срок или предприятия вследствие природного катаклизма, отключения электричества или по другой не менее важной причине. Таким образом, трудно недооценить результат внедрения такой технологии для экономии времени и затрат, учитывая мобиль-

ный аспект метода массового оповещения, а также положительное отношение к нему людей и средств массовой информации.

Много было сказано о возможности разделять дизайн и информационное наполнение web-решения. Действительно, технологии XML и XSL дают возможность отделить информационное наполнение от дизайна. Спецификация XML нужна для структуризации и описания содержимого, в то время как работа с дизайном осуществляется таблицами стилей XSL. Такое разграничение задач позволяет дизайнерам создавать верстку, дизайн и информационную архитектуру в соответствии с каждодневными потребностями, а затем при необходимости просто изменить или переназначить таблицу стилей XSL, используемую для управления дизайном, и получается совершенно иное представление информации.

На практике для управления дизайном редко используется одна таблица стилей. Например, одна из них предназначена для управления представлением домашней, главной страницей, другая используется для всех остальных страниц. Для современных информационно-развлекательных сайтов каждый раздел, отличающийся по своей функциональности, может иметь свою таблицу управления для форума, для раздела управления профилем, даже для раздела всего лишь регистрации пользователя и т.д. Каскадные таблицы стилей (CSS) встроены в модель XML и XSL. Эта технология дает более широкие возможности управления, чем просто использование CSS. Технология XSL позволяет включать в проект CSS-файлы, что дает возможность с легкостью модифицировать web-ориентированные данные, к примеру, XHTML-страницу.

Что же касается систем управления контентом, то использование XML в них – сейчас не новость. Его преимущества в течение многих лет наглядно демонстрируют результаты обзоров тематических изданий, средства массовой информации, сайты, направленные на электронную коммерцию и т.п. Казалось бы, описана идеальная технология в качестве базовой для CMS. Однако повсеместное применение сдерживает ряд факторов. Из них просто психологическая инерция – не самый ведущий фактор. Описание функциональности сайта с помощью технологий XSLT - весьма трудоемкая задача. Кроме того, XSL-шаблон слишком зависим от XML-документа с данными, что ограничивает гибкость решений на основе данной технологии. Некоторые «покупные» или «коробочные» системы управления контентом, использующие связку технологий XML и XSL, нередко навязывают свои правила пользователю, что приводит к необходимости в корне изменять представление сайта, нередко прибегая к изменению кода получаемой страницы и способу ее реализации. Более гибкие CMS системы позволяют управлять любыми типами содержимого в рамках одного проекта. Можно использовать информацию, содержащуюся в структурированном XML файле, а также все множество web-содержимого, не прибегая к преобразованию или принудительному перемещению информации.

Достоинства систем управления содержимым, использующих технологии XML и XSL, весьма многочисленны и доступны. Внедрение XML и XSL нужно рассматривать как эволюционный процесс, который требует развития стратегии XML.

### **Список литературы**

1. Дейтел Х., Дейтел П., Садху П. Как программировать на XML – 2-е изд. – Бинном. Лаборатория знаний, 2006. – 944 с.
2. Котеров Д.В., Костарев А. Ф. PHP5. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 1120 с.

## **Синтез и минимизация базы вероятных квантов знаний в курсе «Основы систем искусственного интеллекта»**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

### **Введение**

В отличие от моделирования функций человеческого мозга посредством обучаемых нейронных сетей для принятия решений квантовый метод инженерии знаний моделирует генерацию человеческих причинно-следственных суждений от посылок к следствиям при поиске решений в условиях неопределенности. Вместо нахождения весов синаптических связей нейронов при заданной топологии нейронной сети квантовый метод обеспечивает восстановление заранее не известной топологии квантовой сети и нахождение вероятностных оценок достоверности ее вершин – вероятных квантов ( $v$ -квантов). Обученная и оптимизированная по избыточности квантовая сеть одновременно служит базой вероятных квантов знаний (БвкЗ) и механизмом вывода идентификационных и прогнозных решений с вычислением показателей их достоверности.

Метод вероятных алгоритмических квантов знаний является одной из тем учебной программы по курсу «Основы систем искусственного интеллекта», который читается для студентов специальности «Программное обеспечение автоматизированных систем» в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

### **Анализ публикаций**

В методе разноуровневых алгоритмических вероятностных квантов ( $v$ -квантов) знаний [1 - 5] для принятия идентификационных и прогнозных решений процесс обучения лежит на «инженере по знаниям», который должен формализовать полученные от экспертов предметной области сценарные примеры обучающих знаний (СПОЗ) – рассуждения экспертов в данной предметной области от посылок к следствиям – в виде продукционных строк (ЕСЛИ ... ТО ...) с помощью, например, «личных карточек» классов объектов [6]. Далее СПОЗ автоматически преобразуются в логическую сеть вероятных рассуждений (ЛСВР), математически описываемую с помощью ориентированного графа  $G_1$ . Для того чтобы установить возможность останова процесса обучения, к построенной логической сети применяют алгоритм Демукрона для поиска порядковой функции графа  $G_1$ . Если в результате распределения вершин графа  $G_1$  по уровням будут найдены так называемые «висячие» вершины, т.е. такие, которые не имеют связи с целевыми вершинами, то процесс обучения продолжается до полного их устранения. После того, как процесс обучения будет завершён, ЛСВР автоматически трансформируется в  $v$ -квантовую сеть вывода решений ( $v$ -КСВР), которая является одновременно оперативной базой  $v$ -квантов знаний и механизмом принятия идентификационных и прогнозных решений.

Дадим формальное определение логической сети вероятных рассуждений.

**Определение 1.** Обучаемой ЛСВР называется ориентированный граф

$G_1 = (E_1, \Gamma_1)$ , синтезируемый по описаниям выделенных классов в виде продукционных строк посредством алгоритма АЛОБУЧ [1 - 5] и обладающий порядковой функцией  $\Pi(X_i) \forall X_i \in E_1$ , определенной на подмножествах-уровнях  $N_1, N_2, \dots, N_k \subset E_1$  вершин, а также следующими свойствами:

- все вершины (узлы сети)  $X_i \in E_1 (1 \leq i \leq n)$  отвечают классам объектов конкретной предметной области, а дуги из  $\Gamma_1 : E_1 \rightarrow E_1$  указывают на причинно-следственные связи между узлами с логическими связками «И», «ИЛИ», «НЕ»;

- все узлы  $X_i \in N_1 \subset E_1$  при  $\Gamma_1^{-1}N_1 = \emptyset$  соответствуют входной информации  $X_i (1 \leq i \leq n_v)$  относительно некоторых подклассов  $\Omega_j^i (1 \leq j \leq p)$  с заданной ПД импликации  $\rho(\rightarrow \Omega_j^i)$ ;

- все узлы  $X_i \in N_k \subset E_1$  при  $\Gamma_1 N_k = \emptyset$  являются выходными распознаваемыми узлами-классами  $\Omega_j (1 \leq j \leq \vartheta)$  с вычисляемыми ПД  $\rho(\Omega_j)$ , а все вершины промежуточных уровней между  $N_1$  и  $N_k$  отвечают вспомогательным классам  $\Omega_j^i$ .

Синтезированная ЛСВР в режиме обучения подлежит трансформации в v-КСВР с помощью специального алгоритма АЛАКВА [1 - 5], который автоматически определяет не заданное заранее число v-квантов v-КСВР и не известное наперед число уровней графа  $G_v$ , соответствующего v-КСВР.

**Определение 2.** Целенаправленной v-КСВР называется результат преобразования графа  $G_1 = (E_1, \Gamma_1)$  посредством алгоритма АЛАКВА в граф  $G_v = (E_v, \Gamma_v)$ , обладающий следующими свойствами:

- все вершины  $X_i \in E_v$  отвечают сгенерированным разноуровневым v-квантам, содержащим описания классов объектов конкретной предметной области, а дуги  $u_{ij} \in \Gamma_v$  указывают на логические связи v-квантовых событий;

- все  $X_i \in N_1 \subset E_v, \Gamma_v^{-1}N_1 = \emptyset$  соответствуют входным vk-знаниям-посылкам с именами  $X_i (1 \leq i \leq n_v)$  относительно vk-знаний-классов с именами  $\Omega_j^i (1 \leq j \leq p)$  с заданными показателями достоверности  $\rho(\rightarrow \Omega_j^i)$ ;

- все  $X_i \in N_k \subset E_{vk}, \Gamma_v N_k = \emptyset$  являются целевыми vk-знаниями распознаваемых классов с именами  $\Omega_j (1 \leq j \leq \vartheta)$  и вычисляемыми ПД  $\rho(\Omega_j)$ , а все промежуточные вершины графа  $G_v$  отвечают вспомогательным vk-знаниям классов  $\Omega_j^i$ .

Назначение алгоритма АЛОПТ [1 - 5] состоит в оптимизации ЛСВР путём проверки ее на избыточность и исключения в ней избыточных по свёртке, а также по следствию v-квантов.

**Определение 3.** Свёрткой нескольких v-квантов называется единый v-квант, домены которого образованы из содержимого других претендующих на свёртку v-квантов по следующим правилам:

- а) единственная непустая компонента домена v-кванта-свёртки может быть заменена доменами претендующего v-кванта, если его имя совпадает с именем указанной компоненты;

- б) если домен v-кванта-свёртки содержит несколько компонент, то любую из них можно заменить только содержимым однодоменного претендующего v-кванта с соответствующим именем, компоненты которого связаны только связкой «ИЛИ».

**Определение 4.** Избыточным по следствию называется  $v$ -квант, который не избыточен по свёртке и логически следует из однородных ему других  $v$ -квантов.

**Определение 5.** Индуктивным выводом  $v$ -знаний называется алгоритмический процесс построения базы  $vk$ -знаний ( $Bvk3$ ) в виде  $v$ -КСВР на основе определений классов объектов  $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_9)$  из заданной предметной области.

Формальная модель описанного индуктивного вывода  $v$ -знаний из определений классов  $\Sigma_\Omega$  посредством специального алгоритма  $B$  имеет вид

$$IND_{\Sigma_\Omega}(vk_2\Sigma_\Omega; B; Bvk3) = vk_2\Sigma_\Omega \xrightarrow{B} Bvk3,$$

где в качестве оперативной  $Bvk3$  используется система логических функциональных закономерностей, представленных в  $v$ -квантовой форме.

### Постановка задачи

В статье ставятся задачи развития методики оптимизации  $v$ -квантовой сети вывода решений и демонстрации на реальном примере процессов ее синтеза и оптимизации.

### Описание предметной области

В качестве исходных неформализованных знаний экспертов возьмем пять «законов» денег из работы [7]:

1. Деньги будут приходить охотно и во все возрастающем количестве к каждому человеку, который будет откладывать не менее 1/10 части своего заработка, чтобы обеспечить свое состояние и состояние семьи в будущем.

2. Деньги работают усердно и с удовольствием на умного владельца, который находит для них прибыльное применение, умножая их количество так же, как растёт поголовье овец в стадах, пасущихся на лугу.

3. Деньги надёжно защищают осторожного владельца, который вкладывает их по совету умного человека, хорошо умеющего обращаться с ними.

4. Деньги ускользают от человека, если он вкладывает их в бизнес или в выполнение задач, с которыми сам он не знаком или которые не одобрены опытными людьми.

5. Деньги избегают человека, который заставляет их работать на получение нереальных доходов или который следует заманчивым советам ловкачей и махинаторов либо доверяется своей собственной неопытности и романтическим представлениям о вложении капитала.

### Синтез квантовой сети вероятностных квантов знаний

Для того, чтобы построить базу  $v$ -квантов знаний, которая будет делать вывод о правильности распределения денежных средств, из приведенных выше «законов» денег выделим следующие сценарные примеры обучающих знаний:

ЕСЛИ откладывать 10% от доходов И есть желание получить сверхприбыли ТО возможно получение пассивного дохода;

ЕСЛИ возможно получение пассивного дохода И нет финансовых трудностей ТО есть возможность вложения денег;

ЕСЛИ откладывать 10% от доходов ИЛИ есть возможность вложения денег ТО нет долгов;

ЕСЛИ откладывать 10% от доходов И нет долгов И возможна потеря капитала ТО требуется консультация опытных финансистов;

ЕСЛИ нет долгов И есть желание получить сверхприбыли ТО налицо финансовое благополучие и независимость;

ЕСЛИ нет долгов ИЛИ есть возможность вложения денег ИЛИ возможно получение пассивного дохода ИЛИ финансовое благополучие и независимость ТО налицо грамотное распределение доходов.

Введем обозначения для выделенных в СПОЗ посылок и следствий: E1 – откладывать 10% от доходов; E2 – есть желание получить сверхприбыль; E3 – нет финансовых трудностей; E4 – возможна потеря капитала; C1 – возможно получение пассивного дохода; C2 – есть возможность вложения денег; C3 – нет долгов; C4 – требуется консультация опытных финансистов; C5 – налицо финансовое благополучие и независимость; C6 – налицо грамотное распределение доходов.

Преобразуем выделенные СПОЗ в соответствии с введенными обозначениями (логическая связка «И» обозначается символом  $\wedge$ , а «ИЛИ» –  $\vee$ ):

$E1 \wedge E2 \rightarrow C1$ ;  $C1 \wedge E3 \rightarrow C2$ ;  $E1 \vee C2 \rightarrow C3$ ;  $E1 \wedge C3 \wedge E4 \rightarrow C4$ ;  
 $C3 \wedge E2 \rightarrow C5$ ;  $C3 \vee C2 \vee C1 \vee C5 \rightarrow C6$ .

Приведем ориентированный граф  $G_1 = (E_1, \Gamma_1)$ , соответствующий логической сети вероятных рассуждений (рис. 1).

Покажем как распределились вершины синтезированного графа ЛСВР по уровням (рис. 2).

Выполним квантование ЛСВР с целью получения  $\nu$ -квантовой сети вывода решений, представляемой графом  $G_\nu = (E_\nu, \Gamma_\nu)$  (рис. 3).

Опишем каждый из  $\nu$ -квантов  $\nu$ -КСВР (конъюнкция  $\wedge$  преобразуется в символ «:», а дизъюнкция  $\vee$  – «,»):

$\nu k_1 C1 = [E1:E2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $\nu k_1 C2 = [C1:E3:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $\nu k_1 C3 = [E1,C2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  
 $\nu k_1 C4 = [E1:C3:E4:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $\nu k_1 C5 = [C3:E2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  
 $\nu k_1 C6 = [C3,C2,C1,C5:(\rightarrow 1.0)]$ .

Заметим, что в круглых скобках () внутри  $\nu$ -кванта после символа  $\rightarrow$  указывается значение вероятности импликации, т.е. вероятности того, что если объект  $\omega$  обладает признаками, подчиненными логике  $\nu$ -кванта, то рассматриваемый объект  $\omega$  относится к классу  $C_j$  ( $1 \leq j \leq 6$ ).

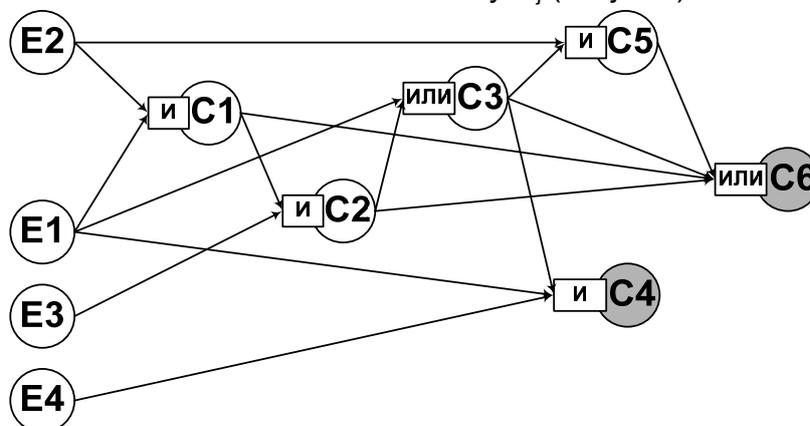


Рис. 1. Граф ЛСВР  $G_1 = (E_1, \Gamma_1)$

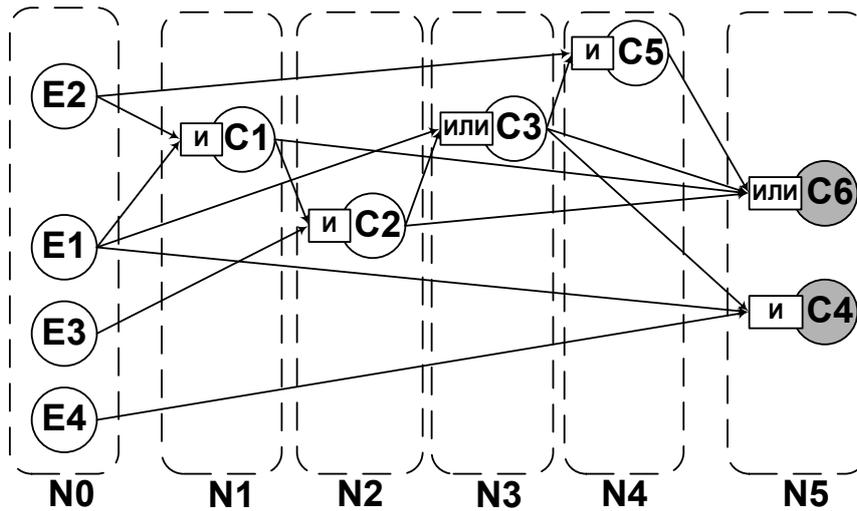


Рис. 2. Порядковая функция графа ЛСВР  $G_1 = (E_1, \Gamma_1)$

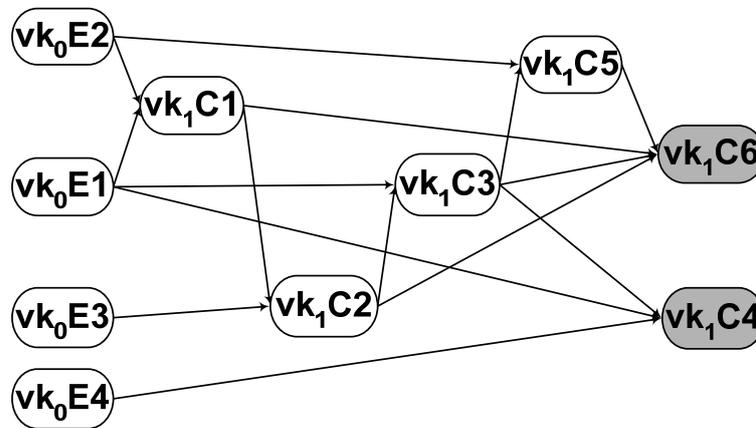


Рис. 3. Граф v-КСВР  $G_v = (E_v, \Gamma_v)$

### Минимизация квантовой сети вероятностных квантов знаний

Заметим, что синтезированная v-КСВР является избыточной, поэтому необходимо выполнить последовательную оптимизацию квантовой сети.

**Шаг 1.** Согласно определению 3 v-квант  $vk_1C3$  является избыточным по свертке. В результате удаления избыточного по свертке v-кванта  $vk_1C3$  v-КСВР преобразуется к виду, представленному на рис. 4, со значениями v-квантов:

$vk_1C1 = [E1:E2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $vk_1C2 = [C1:E3:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $vk_1C4 = [E1:E1,C2:E4:(\rightarrow 1.0)]$ ;  
 $vk_1C5 = [E1,C2:E2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $vk_1C6 = [E1,C2,C2,C1,C5:(\rightarrow 1.0)]$ .

**Шаг 2.** Согласно определению 3 v-квант  $vk_1C1$  является избыточным по свертке, однако удалить его невозможно, т.к. он входит в состав v-кванта  $vk_1C6$ . После внесенных изменений v-КСВР преобразуется к виду, представленному на рис. 5, со значениями v-квантов:

$vk_1C1 = [E1:E2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $vk_1C2 = [E1:E2:E3:(\rightarrow 1.0)]$ ;  
 $vk_1C4 = [E1:E1,C2:E4:(\rightarrow 1.0)]$ ;  $vk_1C5 = [E1,C2:E2:(\rightarrow 1.0)]$ ;  
 $vk_1C6 = [E1,C2,C2,C1,C5:(\rightarrow 1.0)]$ .

**Шаг 3.** Согласно определению 4 v-квант  $vk_1C1$  логически следует из v-кванта  $vk_1C5$ . В результате удаления избыточного по следствию v-кванта  $vk_1C1$

и переименования C1 на C5 в v-кванте vk<sub>1</sub>C6 v-КСВР преобразуется к виду, представленному на рис. 6, со значениями v-квантов:

$$vk_1C2=[E1:E2:E3:(\rightarrow 1.0)]; \quad vk_1C4=[E1: E1,C2:E4:(\rightarrow 1.0)];$$

$$vk_1C5=[E1,C2:E2:(\rightarrow 1.0)]; \quad vk_1C6=[E1,C2,C2,C5,C5:(\rightarrow 1.0)].$$

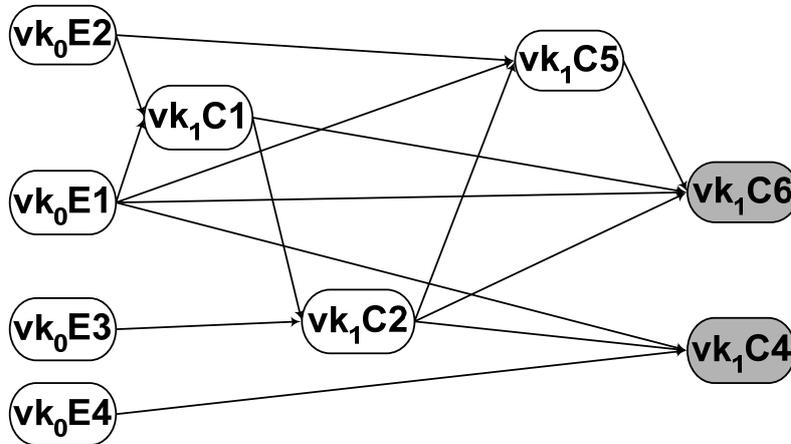


Рис. 4. Граф v-КСВР после 1-го шага оптимизации

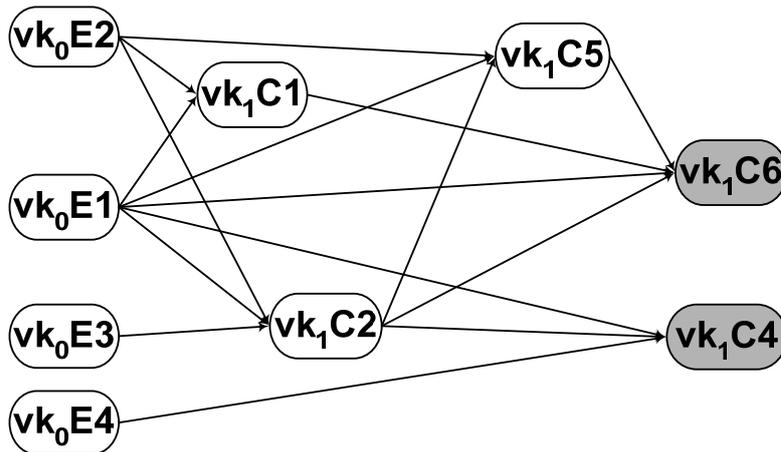


Рис. 5. Граф v-КСВР после 2-го шага оптимизации

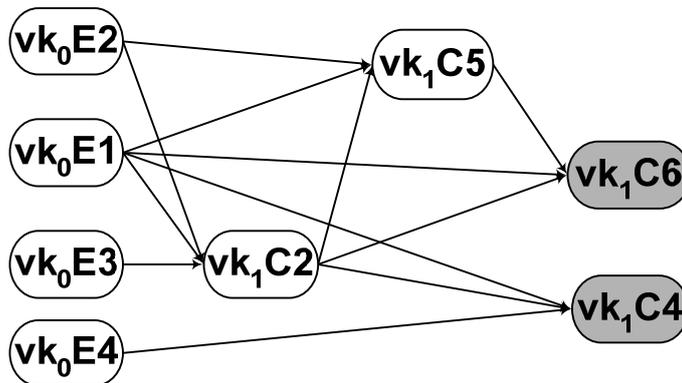


Рис. 6. Граф v-КСВР после 3-го шага оптимизации

**Шаг 4.** Заметим, что к v-кванту vk<sub>1</sub>C6 можно применить правило идемпотентности алгебры высказываний [8]:  $C2 \vee C2 = C2$  и  $C5 \vee C5 = C5$ . В результате применения данного правила граф v-КСВР не изменится, тогда как

содержимое  $v$ -кванта  $vk_1C6$  будет изменено:

$vk_1C2=[E1:E2:E3:(\rightarrow 1.0)]; vk_1C4=[E1:E1,C2:E4:(\rightarrow 1.0)];$

$vk_1C5=[E1,C2:E2:(\rightarrow 1.0)]; vk_1C6=[E1,C2,C5:(\rightarrow 1.0)].$

**Шаг 5.** А вот к первому и второму доменам  $v$ -кванта  $vk_1C4$  можно применить правило поглощения алгебры высказываний [8]:  $E1 \wedge (E1 \vee C2) = E1$ . В результате применения данного правила граф  $v$ -КСВР также не изменится, однако содержимое  $v$ -кванта  $vk_1C4$  будет изменено:

$vk_1C2=[E1:E2:E3:(\rightarrow 1.0)]; vk_1C4=[E1:E4:(\rightarrow 1.0)];$

$vk_1C5=[E1,C2:E2:(\rightarrow 1.0)]; vk_1C6=[E1,C2,C5:(\rightarrow 1.0)].$

Заметим, что в результате применения определений 3 и 4, а также ряда правил алгебры высказываний была получена безызбыточная  $v$ -КСВР (см. рис. 6).

### Выводы

Для поддержки принятия решений о правильности распределения денежных средств была синтезирована идентификационная база  $v$ -квантов знаний, которая относит объекты принятия решений (в данном случае людей) к двум классам  $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2\}$ , где  $\Omega_1$  – класс людей, которым требуется консультация опытных финансистов,  $\Omega_2$  – класс людей, у которых грамотное распределение доходов. Так как синтезированная  $v$ -КСВР оказалась избыточной, то необходима ее оптимизация по критериям безызбыточности – по свертке и логическому следствию  $v$ -квантов. Данные критерии являются классическими для  $v$ -квантового метода инженерии знаний. Однако оптимизация  $v$ -КСВР, удовлетворяющей данным критериям, может быть продолжена путем применения к ее  $v$ -квантам правил алгебры высказываний, т.к. внутри каждого  $v$ -кванта сокрыта логика рассуждений рассматриваемой предметной области, что и было сделано на примере использования правил идемпотентности и поглощения.

### Список литературы

1. Сироджа И.Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления. – К.: Наук. думка, 2002. – 427 с.
2. Сироджа И.Б., Петренко Т.Ю. Метод разноуровневых алгоритмических квантов знаний для принятия производственных решений при недостатке или нечёткости данных. – К.: Наук. думка, 2000. – 247 с.
3. Сироджа И.Б. Математическое и программное обеспечение интеллектуальных компьютерных систем: Учеб. пособие. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 101 с.
4. Сироджа И.Б. Метод вероятных алгоритмических квантов знаний для принятия решений и создания технологий искусственного интеллекта // Інформаційні технології і системи. – 2000. – №4. – С. 58 - 79.
5. Сироджа И.Б. Квантовые модели и методы инженерии знаний в задачах искусственного интеллекта // Искусственный интеллект. – 2002. – №3. – С.161 - 171.
6. Варфоломеева И.В. Квантовый метод обучения и принятия идентификационных решений на основе «личных карточек» классов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т „Харьк. авиац. ин-т”. – 2005. – Вып. 26. – С. 73 - 79.
7. Клейсон Дж.С. Самый богатый человек в Вавилоне. – М.: Орион, 2001. – 104 с.
8. Сироджа И.Б. Математическая логика и теория алгоритмов: Учеб. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2001. – 143 с.

## Прогнозная модель экспоненциального сглаживания с учетом неопределенности исходных данных

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

В ходе проведения маркетинговых исследований в целях прогнозирования тенденций развития бизнес-процессов возникают ситуации, когда не представляется возможным точное определение численных значений показателей, составляющих временной ряд. Это может быть связано с различными статистическими оценками, предоставляемыми экспертами в открытых источниках, отсутствием строгих границ, определяющих содержание тех или иных показателей исследуемых процессов. Таким образом, некоторые или все значения временного ряда могут быть представлены двумя числами, определяющими нижнее и верхнее значения показателя. Необходимо отметить, что вероятностные характеристики распределения внутри интервала, как правило, неизвестны и любое возможное значение параметра в нем следует считать равновероятным. В связи с этим возникают определенные затруднения в использовании методики прогнозирования на основе популярной модели экспоненциального сглаживания

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1}) = \alpha A_{t-1} + \sum_{i=1}^{t-2} \alpha(1-\alpha)^i A_{t-(i+1)} = \\ = \alpha A_{t-1} + \alpha(1-\alpha)A_{t-2} + \alpha(1-\alpha)^2 A_{t-3} + \alpha(1-\alpha)^3 A_{t-4} + \dots + \alpha(1-\alpha)^n A_{t-n}, \quad (1)$$

где  $F_t$  - прогноз,  $\alpha$  - вес или константа сглаживания ( $0 < \alpha < 1$ ),  $A_{t-(i+1)}$  - текущие значения исследуемого параметра для минувшего периода. Вместе с тем практическое применение метода не требует большой информационной базы и предполагает ее интенсивный анализ с точки зрения информационной ценности разных членов временной последовательности. Модели, которые описывают динамику показателя, имеют простое математическое формулирование, а адаптивная эволюция параметров разрешает отразить неоднородность и текучесть свойств временного ряда.

Для получения необходимого решения предлагается использовать математический аппарат интервальных вычислений. Обозначим  $[a_i] = [\underline{a}_i, \overline{a}_i]$  - интервальное число, где  $\underline{a}_i < a_i < \overline{a}_i$ ; ( $i = \overline{1, t}$ ).

Тогда

$$[F_t] = \alpha[A_{t-1}] + \sum_{i=1}^{t-2} \alpha(1-\alpha)^i [A_{t-(i+1)}]. \quad (2)$$

Иначе

$$[F_t, \overline{F}_t] = \alpha[\underline{A}_{t-1}, \overline{A}_{t-1}] + \sum_{i=1}^{t-2} \alpha(1-\alpha)^i [\underline{A}_{t-(i+1)}, \overline{A}_{t-(i+1)}]. \quad (3)$$

Таким образом, искомое прогнозное решение получается в виде интервального числа, характеризующего равновероятное нахождение показателя в определенном диапазоне.

С учетом того, что  $\underline{A}_i \geq 0, \overline{A}_i \geq 0, 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq (1-\alpha) \leq 1$ , можем записать

$$\underline{F}_t = \alpha \underline{A}_{t-1} + \sum_{i=1}^{t-2} \alpha(1-\alpha)^i \underline{A}_{t-(i+1)}; \quad (4)$$

$$\overline{F}_t = \alpha \overline{A}_{t-1} + \sum_{i=1}^{t-2} \alpha(1-\alpha)^i \overline{A}_{t-(i+1)}. \quad (5)$$

Одной из проблем использования метода экспоненциального сглаживания является выбор значения константы сглаживания  $\alpha$ . От численного значения константы  $\alpha$  зависит, насколько быстро будет уменьшаться вес предыдущих наблюдений и соответственно степень их влияния на уровень сглаживания. Чем большее значение константы сглаживания  $\alpha$ , тем меньше сказывается влияние предыдущих уровней и соответственно меньшим оказывается влияние экспоненциальной средней. Поиск компромиссного значения константы сглаживания составляет задачу оптимизации модели, один из путей решения которой предложен в [1]. Следует иметь в виду, что ретроспективный выбор константы сглаживания, проведенный по двум временным рядам, соответствующим нижним и верхним оценкам диапазона изменения исследуемой величины, может привести к различным прогнозным значениям константы сглаживания, которые обозначим как  $\underline{\alpha}$ ,  $\overline{\alpha}$ . Тогда

$$[\underline{F}_t, \overline{F}_t] = [\underline{\alpha} \underline{A}_{t-1} + \sum_{i=1}^{t-2} \underline{\alpha}(1-\underline{\alpha})^i \underline{A}_{t-(i+1)}, \overline{\alpha} \overline{A}_{t-1} + \sum_{i=1}^{t-2} \overline{\alpha}(1-\overline{\alpha})^i \overline{A}_{t-(i+1)}]. \quad (6)$$

Ретроспективный ряд констант сглаживания  $\underline{\alpha}_{t-1}, \underline{\alpha}_{t-2}, \underline{\alpha}_{t-3}, \dots; \overline{\alpha}_{t-1}, \overline{\alpha}_{t-2}, \overline{\alpha}_{t-3}, \dots$  находят из соотношений

$$\begin{aligned} \underline{\alpha}_1 \underline{A}_{t-2} + \sum_{i=2}^{t-2} \underline{\alpha}_1 (1-\underline{\alpha}_1)^i \underline{A}_{t-(i+2)} - \underline{A}_{t-1} &= 0; \\ \underline{\alpha}_2 \underline{A}_{t-3} + \sum_{i=3}^{t-2} \underline{\alpha}_2 (1-\underline{\alpha}_2)^i \underline{A}_{t-(i+3)} - \underline{A}_{t-2} &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \overline{\alpha}_1 \overline{A}_{t-2} + \sum_{i=2}^{t-2} \overline{\alpha}_1 (1-\overline{\alpha}_1)^i \overline{A}_{t-(i+2)} - \overline{A}_{t-1} &= 0; \\ \overline{\alpha}_2 \overline{A}_{t-3} + \sum_{i=3}^{t-2} \overline{\alpha}_2 (1-\overline{\alpha}_2)^i \overline{A}_{t-(i+3)} - \overline{A}_{t-2} &= 0; \end{aligned} \quad (8)$$

путем решения обратной задачи прогнозирования – нахождения значения константы сглаживания по известным предыдущим значениям временного ряда для выбранной модели экспоненциального сглаживания. Очевидно, что существование такого решения, удовлетворяющего условию  $0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq (1-\alpha) \leq 1$ , возможно не всегда. Условия его существования могут быть получены путем анализа полиномиальной формы:

$$d(\alpha_j) = \sum_{i=0}^m [\mathbf{a}_j(A_i)] \alpha_j^i = 0, \quad (9)$$

где  $A_i$  - значения временного ряда, заданные интервальными числами  $[A_i]$ .

Согласно теореме Харитоновна значение параметра  $\alpha_j$  для групп полиномов (7) и (8) будут принадлежать определенной области в том случае, если этой области будут принадлежать его значения для четырех угловых полиномов:

$$\begin{aligned} d_1(\alpha_j) &= \bar{a}_0 + \bar{a}_1 \alpha_j + \bar{a}_2 \alpha_j^2 + \bar{a}_3 \alpha_j^3 + \bar{a}_4 \alpha_j^4 + \dots, \\ d_2(\alpha_j) &= \bar{a}_0 + \bar{a}_1 \alpha_j + \bar{a}_2 \alpha_j^2 + \bar{a}_3 \alpha_j^3 + \bar{a}_4 \alpha_j^4 + \dots, \\ d_3(\alpha_j) &= \underline{a}_0 + \underline{a}_1 \alpha_j + \underline{a}_2 \alpha_j^2 + \underline{a}_3 \alpha_j^3 + \underline{a}_4 \alpha_j^4 + \dots, \\ d_4(\alpha_j) &= \underline{a}_0 + \underline{a}_1 \alpha_j + \underline{a}_2 \alpha_j^2 + \underline{a}_3 \alpha_j^3 + \underline{a}_4 \alpha_j^4 + \dots. \end{aligned} \quad (10)$$

Для оценки корней полинома эффективно использование алгебраических критериев Шура-Кона, Джури, Кларка, а также Леонара-Шипара и Рауса для соответствующим образом преобразованного полинома [2].

В частности, критерий Кларка предусматривает следующую процедуру анализа, отличающуюся наименьшим количеством вычислительных операций. Пусть  $D_n$  – квадратная матрица размером  $[n \times n]$ . Отделим от нее внешние, окаймляющие ее столбцы и строки и получим внутреннюю матрицу  $D_{n-2}$  размером  $[n-2] \times [n-2]$ .

Продолжая отделение, найдем внутреннюю матрицу  $D_{n-4}$  и т.д.

Квадратная матрица  $D_n$  размером  $[n \times n]$  называется внутренне положительной, если ее определитель и определители всех внутренних матриц положительны.

Согласно критерию Кларка корни полинома лежат внутри единичной окружности, если выполняются условия

$$\begin{aligned} A(1) = \sum_{i=0}^n b_i(\alpha_j) > 0; \quad A(-1) = \sum_{i=0}^n b_i(\alpha_j)(-1)^i > 0; \quad (11) \\ \det D_i^+ > 0; \quad \det D_i^- > 0; \quad i = n-1, n-3, \dots, \end{aligned}$$

где  $D_i^+$ ,  $D_i^-$  – внутренние матрицы для  $D_{n-1}^+$ ,  $D_{n-1}^-$ , алгоритм формирования которых имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} |(b_{j-i})_{k \times k} + b_{2n-i-j}|_{k \times k} > 0, \\ |(b_{j-i})_{k \times k} - b_{2n-i-j}|_{k \times k} > 0, \quad k = n-1, n-3, n-5, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Иначе:

$$D_{n-1}^- = \begin{vmatrix} b_n & b_{n-1} & \dots & \dots & b_2 - b_0 \\ 0 & b_n & \dots & \dots & b_3 - b_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -b_0 & \dots & \dots & b_{n-1} - b_{n-3} \\ -b_0 & -b_1 & \dots & \dots & b_n - b_{n-2} \end{vmatrix}, \quad (13)$$

$$D_{n-1}^+ = \begin{vmatrix} b_n & b_{n-1} & \dots & \dots & b_2 + b_0 \\ 0 & b_n & \dots & \dots & b_3 + b_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & b_0 & \dots & \dots & b_{n-1} + b_{n-3} \\ b_0 & b_1 & \dots & \dots & b_n + b_{n-2} \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Эти условия выполняются при расположении корней полиномов (10) внутри окружности единичного радиуса.

Расчет коэффициентов преобразованного полинома можно рассчитать в системе символьных вычислений с сохранением первичных параметров, так как

этот расчет сводится к операциям сложения известных интервальных коэффициентов исходного полинома.

Основная задача состоит в корректном выборе метода, обеспечивающем наибольшую вычислительную эффективность.

Рассмотрим формализованную процедуру адаптивного определения константы сглаживания для составления прогноза по временному ряду интервальных значений параметра исследуемого процесса.

Для решения поставленной задачи предлагается такая последовательность действий:

1. Определение константы сглаживания для прогноза в предыдущий момент времени  $(t-1)$  путем решения полиномиального уравнения относительно

$\alpha_{t-1}$ :

$$A_{t-1} = \alpha_{t-1} A_{t-2} + \sum_{i=1}^{t-2} \alpha_{t-1} (1 - \alpha_{t-1})^i A_{t-(i+2)},$$

где  $A_{t-i}$  ( $i=1..n$ ) – реальные значения параметра в моменты времени  $(t-i)$ ,  $n$  – длина временного ряда.

Если уравнение (4) имеет вещественные корни на интервале  $\alpha_{t-1} \in [0,1]$ , то это означает, что найденное значение  $\alpha_{t-1}$  позволило бы получить точный прогноз на момент времени  $(t-1)$ .

2. Последовательное повторение п.1 для значений исследуемого параметра во всей (или части) временной серии.

В результате получаем последовательность значений  $\alpha$  для выбранного интервала временной серии:

$$\{\alpha\} = \{\alpha_{t-1}, \alpha_{t-2}, \dots, \alpha_{t-k}\}.$$

3. Интерполируем полученную тенденцию на момент времени  $t$  для определения прогнозного значения  $\alpha_t$ .

Таким образом, анализируя временные серии, можно получить интервальные прогнозные значения исследуемого процесса с адаптацией настраиваемого параметра  $\alpha_t$  метода экспоненциального сглаживания.

*Пример.* Численные значения временного ряда на рассматриваемых интервалах времени сведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер интервала	1	2	3	4	5	6
Момент времени	$t-11$	$t-10$	$t-9$	$t-8$	$t-7$	$t-6$
Значение параметра [ $A_{t-i}$ ]	[3483, 3470]	[3651, 3638]	[3782, 3741]	[3893, 3859]	[3954, 3901]	[3999, 3924]
Номер интервала	7	8	9	10	11	12
Момент времени	$t-5$	$t-4$	$t-3$	$t-2$	$t-1$	$t$
Значение параметра [ $A_{t-i}$ ]	[3991, 3940]	[3942, 3901]	[3853, 3798]	[3739, 3687]	[3588, 3535]	$[\bar{F}_{12}, \underline{F}_{12}]$

Результаты ретроспективного анализа на пяти интервалах для верхних значений исследуемой величины сведены в табл. 2.

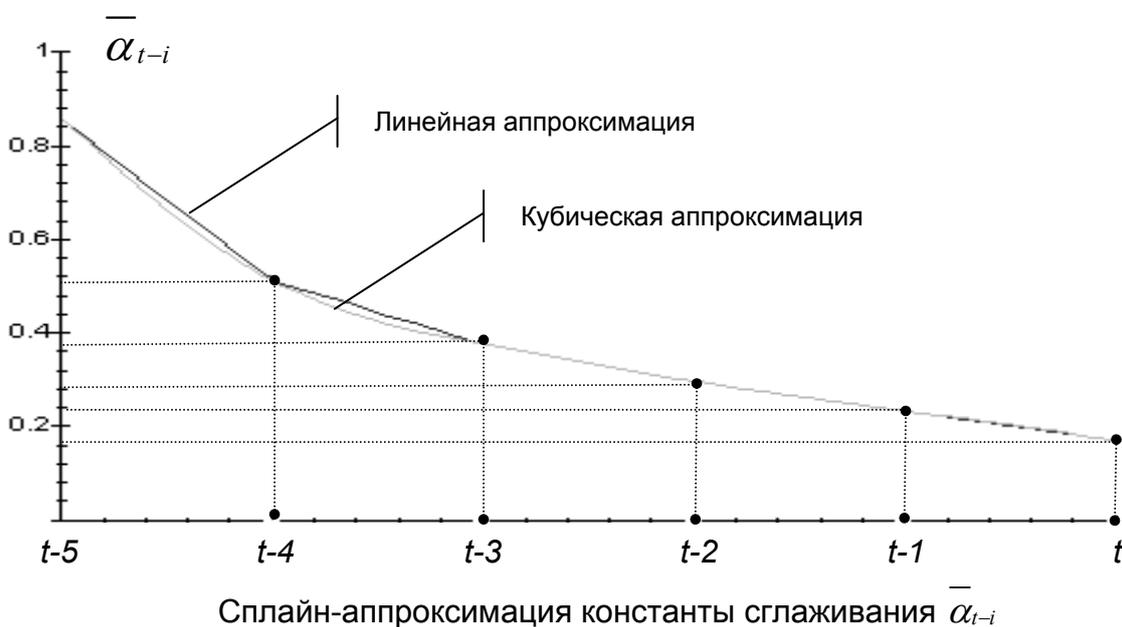
Таблица 2

Номер интервала	7	8	9	10	11	12
Значение параметра $\bar{\alpha}_{t-i}$	0,858	0,512	0,377	0,296	0,233	0.17

График изменения константы сглаживания  $\bar{\alpha}_{t-i}$ , построенный в ретроспективе по найденным ее значениям методом линейной и кубической сплайн-аппроксимации, изображен на рисунке.

Совпадающее прогнозное значение константы сглаживания для линейной и кубической аппроксимации составляет 0.17, что дает верхнее значение прогнозируемой величины на интервале № 12, равное

$$\bar{F}_{12} = A_{11}\bar{\alpha}_{12} + A_{10}\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12}) + A_9\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^2 + A_8\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^3 + A_7\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^4 + A_6\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^5 + A_5\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^6 + A_4\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^7 + A_3\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^8 + A_2\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^9 + A_1\bar{\alpha}_{12}(1-\bar{\alpha}_{12})^{10} = 3313.$$



Предложенная процедура реализована инструментальными средствами интегрированного математического пакета MAPLE, обеспечивающего все аналитические вычисления и необходимые средства визуализации.

### Список литературы

1. Вартанян В.М., Кононенко А.В., Романенков Ю.А. Формирование математической модели прогноза с использованием экспоненциального сглаживания // Розвиток наукових досліджень 2005: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, м. Полтава, 7-9 листопада 2005 р.: - Полтава: ІнтерГрафіка, 2005. – Т. 9. - С. 33-35.

2. Аглекраїчні критерії локалізації коренів полінома у заданих областях комплексної площини. / Вартанян В.М., Федоренко Н.М., Романенков Ю.А. та ін. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2005. - № 3 (19). – С. 82 – 87.

## Компьютерное моделирование чувствительности измеряемых параметров к изменению формы

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины*

В данной работе рассматриваются вопросы решения прямых и обратных задач формообразования связанные с погрешностями формы, возникающие из-за того, что интуитивное понятие формы не выражено через параметры и величины, которые можно измерить. Проблема определения точности формы (соответствия формы изготовленной детали ее математической модели) в современном машиностроении решается с помощью задания допусков на линейные размеры детали. Однако форма детали определяется ее линейными размерами только в случае абсолютно точного воспроизведения размеров, т.е. нулевого допуска на эти размеры, реализация которого в условиях машиностроительного производства невозможна.

Вопросу определения точности форм изготовленных деталей посвящены работы [0 – 0, 0 – 0], но даже появление стандартов [0, 0], в которых дано определение отклонения и допуска формы заданного профиля, не прояснило ситуации. Рассмотрим указанную проблему на примерах описаний отклонений формы, приведенных в работах [0, 0].

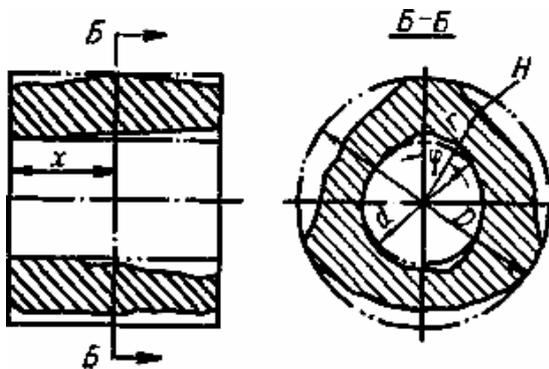


Рис. 1. Погрешности формы

В работе [0] указано, что погрешности формы детали вызывают неравенство размеров детали в одном и том же поперечном сечении (рис. 1). Как видно, с изменением угла  $\varphi$  и расстояния  $x$  величина радиуса  $r$  втулки изменяется. Однако размеры детали условно считают постоянными по всей ее длине. При этом за действительный размер охватывающей детали принимают наименьший, а охватываемой – наибольший размеры сечения детали, т.е. для отверстия детали (втулки) за действительный принимают размер  $d$ , а для вала – размер  $D$ . Однако что такое погрешность формы и как ее определять, авторы не указывают.

Более того, точность геометрических элементов криволинейной поверхности они определяют по двум условиям: 1) соответствие действительного сечения теоретическому и 2) положение контура сечения относительно теоретического, предполагая, что наружные контуры деталей сложной криволинейной формы задаются в виде таблиц значений точек контура в системе прямоугольных или полярных координат. Но в конечном итоге авторы определяют отклонение формы через отклонение криволинейного контура детали или агрегата, заданного такой теоретической таблицей, т.е. через  $\Delta y$  и  $\Delta x$ .

Аналогично определяется погрешность формы и в работе [4]. Так, термин «отклонение формы заданного профиля» толкуется как наибольшее отклонение  $\Delta$  точек реального профиля от номинального профиля, определяемое по нормали к

номинальному профилю в пределах нормируемого участка. Измерение отклонения по нормали к номинальному профилю требует измерительного устройства, способного выполнить такой вид измерения. Однако даже современные координатно-измерительные машины не имеют возможности проводить измерения в заданном направлении. Для этого при измерениях на координатно-измерительной машине необходимо базировать деталь так, чтобы нормаль в точке измерения совпала с вертикальной осью машины. Следовательно, такое базирование придется выполнять в каждой точке измерения, что делает невозможным контроль формы по данному определению.

Аналогично погрешность формы определяется и в остальных приведенных работах [1, 2, 6 – 11].

Таким образом, отсутствие определения формы через параметры, которые можно измерить с использованием современной измерительной техники, не позволяет определить соответствие изготовленной детали ее аналитическому эталону. Так как определение формы поверхности тесно связано с понятием формы линии, то для уменьшения трудности исследования сначала необходимо понять связь измеряемых параметров с формами линий.

Целью данной работы – исследование взаимовлияния измеряемых параметров и формы поверхности в условиях автоматического проведения контроля.

Одной из основных проблем измерения линейных размеров является определение точки касания измерительного инструмента и линии. Для стандартных форм в работе [12] даны схемы проведения измерений, гарантирующие правильность базирования линии и измерительного инструмента.

Рассмотрим схемы измерения форм кривых – окружности и эллипса – в условиях, соответствующих работе [12].

Пусть имеется два круговых цилиндра с диаметрами  $\varnothing D \pm \Delta$ ,  $D = 4,5$ ;  $\Delta = 0,5$ . Проанализируем результаты измерений диаметров этих цилиндров в стандартных условиях, приведенных на рис. 2. Очевидно, что эти цилиндры находятся в пределах допуска на изготовление, так как их размеры отличаются от номинального как раз на величину допуска.

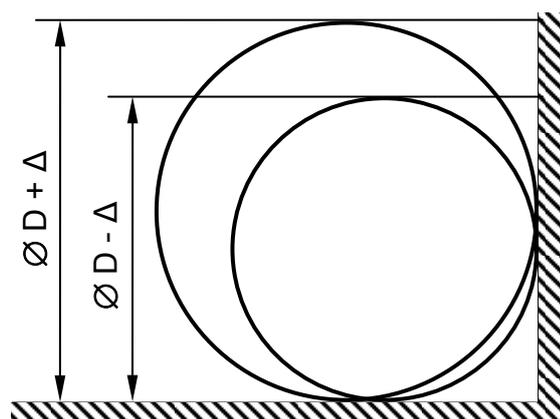


Рис. 2. Схема измерения диаметров цилиндров  $\varnothing D \pm \Delta$

Если для измерений координат образующей цилиндра использовать координатно-измерительную машину с наконечниками стандартной формы, представленными на рис. 3 [14], то окажется, что результаты отклонений координат цилин-

дров (рис. 4) выходят за величину допуска, в то время как их диаметры по условиям численного эксперимента отличаются на  $dg = 1$ .

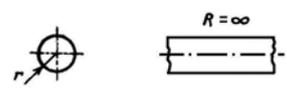
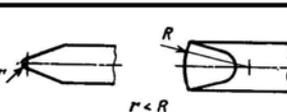
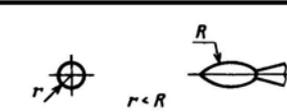
Форма измерительной поверхности	Изображение измерительного наконечника	Форма измеряемой поверхности (примеры)
Сферическая		Плоскость, внутренняя цилиндрическая поверхность
Цилиндрическая		Образующая наружных поверхностей тел вращения
Торидальная (гопоровидная)		Наружная цилиндрическая поверхность
Каплевидная		Внутренняя цилиндрическая поверхность
Плоская	$r = R = \infty$	Сферическая
Числовые значения радиусов, мм		
r	0,25 0,8 2,5 8 25 80 ∞	
R		

Рис. 3. Стандартные формы измерительных наконечников

Приведенный компьютерный эксперимент показывает, что сравнивать размеры, характеризующие форму детали, так, как это принято в человеко-ориентированном производстве, нельзя. Кроме того, предлагаемая в работе [12] форма измерительного наконечника для измерения наружных поверхностей тел вращения, как это показано в работе [13], имеет большую методическую погрешность.

Таким образом, оценить отклонение подобных форм прямым измерением вертикальных координат невозможно.

Рассмотрим компьютерный эксперимент по исследованию отклонения формы от номинальной в случае эллиптических цилиндров.

Исследование отклонения формы изучалось путем измерения вертикальных координат поверхности двух эллиптических цилиндров с последующим вычислением их отклонений. Образующие цилиндров представляют собой эллипсы с полуосями  $a_1 = 500$ ;  $b_1 = 300$  и  $a_2 = 400$ ;  $b_2 = 200$ . Моделировалось измерение вертикальных и горизонтальных координат поверхности непосредственно после изготовления. Погрешность базирования в данном эксперименте не рассматривалась. Результаты этого эксперимента приведены на рис. 5.

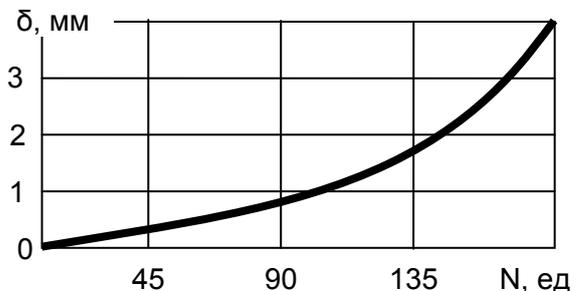


Рис. 4. Отклонение вертикальных координат измеряемых цилиндров

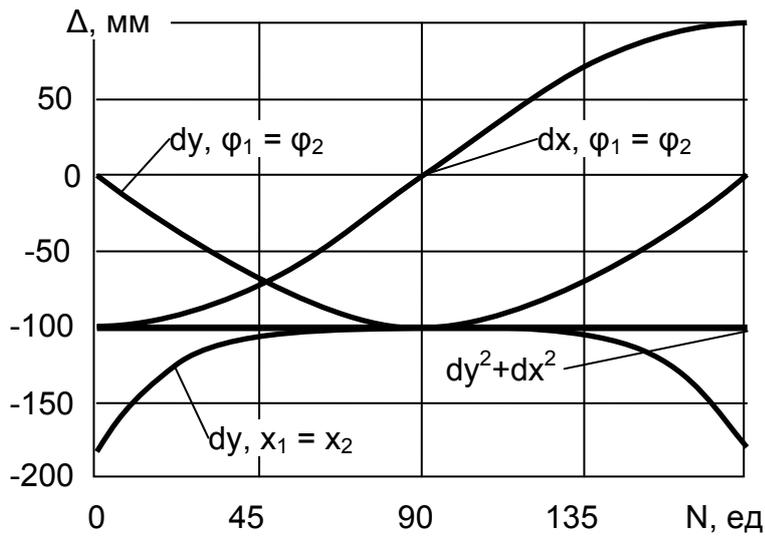


Рис. 5. Отклонения координат эллипса 2 от эллипса 1

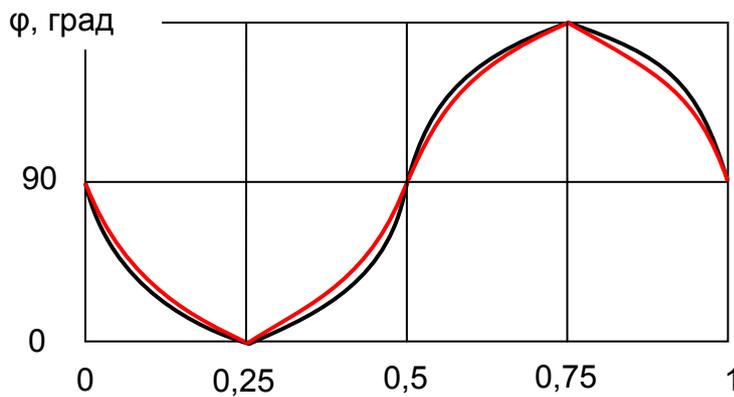


Рис. 6. Зависимость угла наклона касательной от приведенной длины дуги

определять центральный угол, то оказывается, что погрешность расчета значений углов, близких к вертикальным, намного превышает разумные погрешности и составляет несколько градусов. Это происходит по причине замены угла касательной углом хорды. Погрешность такой замены пояснена на рис. 7.

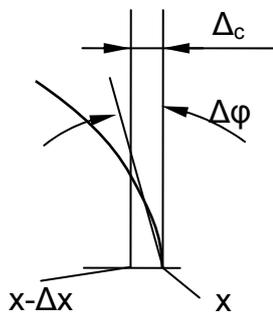


Рис. 7. Погрешность определения угла

этому может быть введена как параметр, зависимость от которого чувствительна к изменению формы.

Из рис. 5 видно, что критерий «сумма квадратов отклонений» наиболее чувствителен к форме: сумма квадратов отклонений по всему эллипсу 2 относительно к эллипсу 1 равна 1. Однако эти отклонения необходимо измерить при одном и том же центральном угле. Таким образом, для реализации измерений следует базировать оба эллиптических цилиндра так, чтобы была возможность их вращения относительно оси. Теоретически такое базирование возможно осуществить в патроне токарного станка с ЧПУ и провести измерения, изменяя угол базирования по программе.

Исследование поведения угла касательной в зависимости от приведенной длины кривой показало (рис. 6) хорошую чувствительность зависимости изменения угла касательной по приведенной длине дуги к изменению формы. Однако если у рассматриваемых цилиндров измерять значения вертикальных и горизонтальных координат и уже по ним

Проведенное исследование доказало, что параметрами формы могут быть выбраны величины, связанные с производными от номинальной поверхности. Достаточно информативными являются зависимости таких параметров от длины дуги. Как показал компьютерный эксперимент, длина дуги в процессе измерений может быть определена достаточно точно и по-

Следует заметить, что определение погрешности формы, вычисляемое как отклонение по нормали от номинала, не совсем корректно. В самом деле, такое определение ограничивает некоторую эквидистантную область вокруг номинальной поверхности, и поверхность любой формы с размерами, не выходящими за пределы этой эквидистантной области, будет удовлетворять директивным требованиям, хотя форма этой поверхности в общем случае не будет эквивалентна номинальной.

Таким образом, можно сделать вывод, что определение близости форм поверхностей относится к задаче косвенных измерений, и необходимо найти измеримые параметры, чувствительные к изменению формы.

### Список литературы

1. Балакшин Б. С. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1972. – 615 с.
2. Беликов С. И. Допуски, посадки и технические измерения в производстве летательных аппаратов / С. И. Беликов, Н. А. Докунина, Н. Н. Бурдина. - М.: Оборонгиз, 1963. – 292 с.
3. Барадокас А. А. Измерение криволинейных поверхностей на координатных измерительных машинах / А. А. Барадокас, З. Н. Бекентис, А. Ю. Каспарайтис, А. Б. Шукис // Станкостроение Литвы, – 1983. – № 15. – С. 121 – 127.
4. ГОСТ 24642-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения; Взамен ГОСТ 10356-63. – Введ. 01.07.81. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 112 с.
5. ГОСТ 24643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения; Взамен ГОСТ 10356-63 [в части разд. 3]. – Введ. 01.07.81. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 14 с.
6. Докунина Н. А. Методы и средства контроля геометрических параметров в самолетостроении. – М.: Оборонгиз, 1959. – 131 с.
7. Кудиков А. А. Сравнительная оценка технического уровня технологий формообразования и контроля в механообрабатывающем производстве // Вестник машиностроения. – 1998. - № 7. – С. 30 – 33.
8. Сорокин А. В. Пространственный размерный анализ радиальных зазоров между цилиндрическими поверхностями // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 6. – С. 59 – 64.
9. Сысоев Ю. С. Координатные методы определения параметров средней окружности при анализе профиля реальной поверхности // Измерительная техника. – 1995. – № 10. – С. 22 – 26.
10. Табацков В. П. К вопросу контроля геометрической формы параболической поверхности / В. П. Табацков, Э. Г. Бергер // Прикладная геометрия и инженерная графика. – 1988. – Вып. 45. – С. 73 – 75.
11. Чудов В. А. Размерный контроль в машиностроении / В. А. Чудов, Ф. В. Цидулко, Н. И. Фредгейм. – М.: Машиностроение, 1982. – 328 с.
12. Технология технического контроля в машиностроении / Под общ. ред. В. Н. Чупырина. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 400 с.
13. Мялица А. К. Технология проведения измерений при проверке сложнофасонной оснастки / А. К. Мялица, П. О. Науменко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАКУ "ХАИ". – 2002. – Вып. 13. – С. 33 – 37.
14. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: Справочник в 2 т. – М.: Издательство стандартов, 1989. – Т. 2: Контроль деталей. – 208 с.

## **Інформаційні технології з прогнозування екологічних і соціально-економічних наслідків ймовірних пожеж і потреби в силах, засобах і ресурсах для їх ефективної ліквідації або запобігання. Сучасний стан проблеми**

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»*

### **Вступ**

Комплекс проблем щодо забезпечення пожежної безпеки (ПБ) стоїть перед людством з давніх часів. З розвитком суспільства значними темпами зростала і кількість пожеж, наслідки яких характеризуються загибеллю і ураженням великої кількості людей, значними матеріальними збитками, істотним погіршенням стану довкілля. Виникла невідкладна суспільна потреба у забезпеченні ПБ не тільки особистого житла, а й цілих комплексів житлових і громадських будівель населених пунктів, будівель і споруд виробничого призначення, а згодом - окремих об'єктів економіки, господарських комплексів, великих міст, регіонів і держави в цілому. Тому вже у другій половині XIX сторіччя в багатьох країнах світу розпочалися регулярні наукові дослідження з метою забезпечення надійного захисту людей, матеріальних цінностей та об'єктів довкілля від впливу уражальних чинників пожежі (УЧП) [1].

З часом конкретизувалися певні основні наукові напрямки досліджень у галузі ПБ.

Перший напрямок – забезпечення захисту людей, матеріальних цінностей та об'єктів навколишнього природного середовища (НПС) шляхом вирішення комплексних проблем: попередження пожеж; забезпечення безпеки людей у разі виникнення пожеж; зниження можливих майнових втрат і зменшення негативних екологічних наслідків у разі виникнення пожеж.

Другий напрямок – забезпечення захисту людей і матеріальних цінностей підвищенням ефективності реагування на пожежу шляхом вирішення комплексних проблем: швидкого виклику пожежних підрозділів; забезпечення успішного рятування людей і матеріальних цінностей та ефективної локалізації та ліквідації пожеж (тобто розробки і впровадження: широкого спектру вогнегасних матеріалів (ВГМ), які забезпечать гарантоване припинення горіння будь-якого з існуючих і перспективних горючих матеріалів (ГМ); великого асортименту вогнегасних приладів (ВГПр) для забезпечення ефективного подавання ВГМ у вогнище пожежі; різноманітних типів і моделей автоцистерн, авто насосів та інших видів основних пожежних машин (оснащених указаними ВГПр) для забезпечення ефективного гасіння різних видів пожеж; різноманітних типів і моделей авто драбин, автопідйомників, інших спеціальних пожежних машин, техніки газодимозахисної служби, гідроелеваторів та ін. для забезпечення успішного рятування людей; способів, методів і технологій завчасного створення і своєчасного направлення на місце конкретної пожежі угруповання пожежних підрозділів (УПП), кількісний і якісний склад якого може забезпечити гарантоване рятування людей та ефективну локалізацію та ліквідацію цієї пожежі).

## 1. Задача і методи дослідження

Найважливіші результати досліджень за вказаними науковими напрямками у галузі ПБ стали основою для розроблення законодавчих актів, державних і міждержавних стандартів з питань захисту від пожежі, державних будівельних норм, правил улаштування електроустановок, інших нормативно-правових документів. Ці результати відображені також у величезній кількості патентів на способи і пристрої для попередження і гасіння пожеж, у монографіях, наукових статтях, інших видах літературних джерел з питань ПБ.

Однак, незважаючи на безперечні досягнення в теорії та практиці забезпечення ПБ, кількість пожеж у розвинених країнах світу залишається надто великою, а їх наслідки - жахливими. Так, наприклад, унаслідок впливу УЧП 45000...60000 пожеж, які щорічно виникають в Україні, гинуть і отримують тяжкі ураження близько 6000 осіб, знищується вогнем понад 20000 будівель і споруд, більше 2500 одиниць техніки, а тільки прямі збитки сягають 500 млн. грн [2]. При цьому основною причиною таких тяжких наслідків є запізнення введення в дію УПП, кількісний і якісний склад сил і засобів якого був би достатнім для забезпечення успішного рятування людей і матеріальних цінностей та ефективної локалізації та ліквідації кожної з конкретних пожеж. Таке запізнення виникає через відсутність у органів управління пожежної охорони (на момент надходження оповіщення про виникнення чергової конкретної пожежі) інформації, конче необхідної для своєчасного створення і направлення на місце пожежі адекватного їй (за складом і чисельністю) УПП.

Така інформація повинна містити відомості щодо потрібної кількості:

- основних пожежних машин –  $N_{\text{осн.пож.маш}}$ , одиниць (за типами і моделями автоцистерн, автонасосів і т. ін.) для забезпечення ефективної локалізації та ліквідації конкретної пожежі;
- рятувальників –  $N_{\text{рят}}$ , осіб, для забезпечення ефективного пошуку уражених, видалення їх за межі зони можливого ураження конкретної пожежі –  $ЗМУ_{\text{конкр. пож}}$  і надання ураженим негайної медичної допомоги (НМД) у зоні пожежі;
- засобів особистого захисту уражених –  $N_{\text{зоЗ ур}}$ , комплектів, для забезпечення їх ефективного захисту від впливу УЧП у процесі видалення за межі  $ЗМУ_{\text{конкр. пож}}$ ;
- засобів надання НМД ураженим у зоні пожежі –  $N_{\text{НМД}}$ , комплектів;
- санітарних машин –  $N_{\text{сан.маш}}$ , одиниць, для забезпечення екстреної евакуації тяжкоуражених до спеціальних лікувальних закладів;
- спеціальних пожежних машин –  $N_{\text{спец.пож.маш}}$ , одиниць (за типами і моделями автодрабин, автопідйомників, техніки газодимозахисної служби, гідроелеваторів і т. ін.) для забезпечення: повітряної евакуації людей; наближення пожежників з вогнегасними приладами до вогнищ пожежі, розташованих на значній висоті; знедимлення приміщень і шляхів «штатної» евакуації; видалення води із затоплених приміщень тощо.

При цьому слід мати на увазі таке:

1. Потрібна кількість основних пожежних машин -  $N_{\text{осн.пож.маш}}$ , одиниць, залежить від форми, просторового розташування та величин сумарної площі охоплених вогнем горючих елементів будівлі (споруди і т. ін.) –  $\Sigma S_{\text{ЗГ конкр.пож}}$ ,  $\text{м}^2$ , у зоні горіння конкретної пожежі –  $ЗГ_{\text{конкр.пож}}$  і (або) її периметра  $П_{\text{ЗГ конкр.пож}}$ ,  $\text{м}$ , а також від типу і моделі пожежних машин, які визначаються видом горючих матеріалів –  $ГМ$  у  $ЗГ_{\text{конкр.пож}}$ . Таким чином  $N_{\text{осн.пож.маш}}$  (за типами і моделями) =  $f$

(форми, геометричних розмірів і просторового розташування  $Z\Gamma_{\text{конкр.пож}}$  та виду ГМ).

2. Потрібна кількість рятівників -  $N_{\text{рят}}$ , осіб, залежить від величини загальних ( $M_{\text{заг.конкр.пож}}$ , осіб) і санітарних ( $M_{\text{сан.конкр.пож}}$ , осіб) втрат людей внаслідок впливу УЧП конкретної пожежі. В свою чергу, величини  $M_{\text{заг.конкр.пож}}$  і  $M_{\text{сан.конкр.пож}}$  визначаються кількістю осіб виробничого персоналу найбільшої працюючої зміни об'єкта господарювання –  $N_{\text{НПЗ в ЗМУ}}$ , осіб (або населення –  $N_{\text{нас. в ЗМУ}}$ ), робочі місця (місця перебування) яких опинилися в межах  $ZMU_{\text{конкр.пож}}$ . Таким чином,  $M_{\text{заг.конкр.пож}} = f(N_{\text{НПЗ в ЗМУ}}$  (або  $N_{\text{нас. в ЗМУ}}$ ), форми, геометричних розмірів і просторового розташування  $ZMU_{\text{конкр.пож}}$ ) і  $M_{\text{сан.конкр.пож}} = f(N_{\text{НПЗ в ЗМУ}}$  (або  $N_{\text{нас. в ЗМУ}}$ ), форми, геометричних розмірів і просторового розташування  $ZMU_{\text{конкр.пож}}$ ).

3. Потрібна кількість засобів особистого захисту уражених –  $N_{\text{ЗОЗ ур}}$ , комплектів, засобів надання негайної медичної допомоги –  $N_{\text{НМД}}$ , комплект, і санітарних машин –  $N_{\text{сан.маш}}$ , одиниць, залежать від величини  $M_{\text{сан.конкр.пож}}$ . Таким чином,  $N_{\text{ЗОЗ ур}} = f(M_{\text{сан.конкр.пож}})$ ,  $N_{\text{НМД}} = f(M_{\text{сан.конкр.пож}})$ ,  $N_{\text{сан.маш}} = f(M_{\text{сан.конкр.пож}})$ .

4 Потрібна кількість (за типами і моделями) автодрабин –  $N_{\text{Ад}}$ , одиниць, інших спеціальних пожежних машин, техніки газодимозахисної служби, гідроелеваторів та ін. визначаються особливостями організації рятування людей і гасіння пожежі на кожній конкретній будівлі чи споруді (залежно від особливостей її архітектурно-будівельного вирішення). Таким чином,  $N_{\text{спец.пож.маш}} = f(\text{форми, геометричних розмірів і просторового розташування } Z\Gamma_{\text{конкр.пож}} \text{ і } ZMU_{\text{конкр.пож}})$ .

Отже, інформацію щодо потреби в силах, засобах і ресурсах УПП, призначеного для ефективного рятування людей, локалізації та ліквідації конкретної пожежі можна здобути принципово тільки на основі даних про соціально-економічні наслідки цієї пожежі (тобто про величини  $\Sigma S_{Z\Gamma_{\text{конкр.пож}}}$ ,  $M^2$ ,  $P_{Z\Gamma_{\text{конкр.пож}}}$ ,  $M$ ,  $M_{\text{заг.конкр.пож}}$ , осіб і  $M_{\text{заг.конкр.пож}}$ , осіб), які безпосередньо залежать від форми, геометричних розмірів і просторового розташування зони горіння –  $Z\Gamma_{\text{конкр.пож}}$  і зони можливого ураження –  $ZMU_{\text{конкр.пож}}$  цієї пожежі.

Своєчасне створення і направлення на місце конкретної пожежі адекватного їй (за кількісним і кісним складом) угруповання пожежних підрозділів можна забезпечити тільки за умови надання органам управління пожежної охорони всього обсягу описаної вище інформації завчасно (тобто за деякий час до моменту виникнення цієї пожежі). Здійснити це можливо тільки застосуванням перспективного способу прогнозування потреби в силах, засобах і ресурсах для ефективної ліквідації конкретної ймовірної пожежі на основі результатів прогнозу можливих соціально-економічних наслідків цієї пожежі.

Зважаючи на величезні людські втрати і матеріальні збитки внаслідок впливу УЧП, дуже актуальними є такі основні завдання у сфері підвищення рівня ПБ об'єктів господарювання і об'єктів житлово-комунального комплексу:

1. Забезпечення достовірного прогнозування можливих екологічних і соціально-економічних наслідків будь-якого виду пожеж на будівлях (спорудах, інших складових) конкретних пожежонебезпечних об'єктів (ПНО) за даними про фактично існуючі у їх складі вид, агрегатний стан, основні теплофізичні та масовопросторові параметри горючих матеріалів (ГМ). Все це передбачає виконання протягом обмеженого терміну величезного обсягу робіт із здобування, збереження і наступного відтворення, наочного відображення та використання інформації щодо можливих форми, геометричних розмірів і просторового розташування (відносно робочих місць працюючих чи місць перебування населення) зон горіння  $Z\Gamma_{\text{йм.пож}}$  і зон можливого ураження  $ZMU_{\text{йм.пож}}$  кожної з

ймовірних пожеж, а також щодо можливих величин загальних ( $M_{\text{заг.йм.пож}}$ , осіб) і санітарних ( $M_{\text{сан.йм.пож}}$ , осіб) втрат людей і збитків ( $Z_{\text{йм.пож}}$ , МЗП) унаслідок впливу УЧП цих пожеж.

2. Забезпечення завчасного отримання достовірного прогнозу щодо потреби в силах, засобах і ресурсах угруповань пожежних підрозділів, що створюються для ефективного рятування людей, локалізації та ліквідації кожної із указаних вище ймовірних пожеж у разі найтяжкішого за наслідками варіанта її виникнення і розвитку. Все це передбачає виконання протягом обмеженого терміну величезного обсягу робіт із здобування, збереження і наступного відтворення, наочного відображення та використання інформації щодо максимально необхідних для успішної ліквідації кожної конкретної з таких пожеж значень величин  $N_{\text{осн.пож.маш.конкр.мах}}$  (за типами і моделями),  $N_{\text{рят.конкр.мах}}$ ,  $N_{\text{ЗОЗ ур.конкр.мах}}$ ,  $N_{\text{НМДконкр.мах}}$ ,  $N_{\text{сан.маш.конкр.мах}}$ ,  $N_{\text{спец.пож.маш.конкр.мах}}$  (за типами і моделями).

3. Забезпечення можливості здійснення оперативного корегування потреби конкретного УПП у силах, засобах і ресурсах для ефективно ліквідації конкретної пожежі, що виникла і розвивається за варіантом з менш тяжкими екологічними і соціально-економічними наслідками. Все це передбачає виконання протягом кількох десятків секунд величезного обсягу робіт із прогнозування нового (уточненого за даними пожежної розвідки у зоні цієї пожежі) менш потужного за кількісним і якісним складом УПП.

Описані вище завдання можуть бути успішно вирішені тільки універсальною комп'ютерною системою інформаційних технологій, яка реалізує перспективні способи прогнозування можливих екологічних і соціально-економічних наслідків імовірних пожеж і перспективні способи прогнозування потреби в силах, засобах і ресурсах конкретних УПП, призначених для ефективно ліквідації кожної з таких пожеж.

Тому задачею статті є глибоке вивчення і всебічний аналіз діючих законодавчих актів, нормативно-правових документів, міждержавних і державних стандартів, державних будівельних норм, правил улаштування електроустановок, патентів, монографій, наукових статей, матеріалів наукових конференцій, інших публікацій з питань забезпечення ПБ з метою виявлення відомостей щодо наявності та ступеня досконалості обґрунтованих вище способів прогнозування й інформаційних технологій. Для виконання цієї задачі в процесі дослідження вказаних вище джерел інформації найдоцільнішим є використання історичного методу і методів спостереження та системного аналізу.

## **2. Сучасний стан наукових розробок і практичних рекомендацій щодо заходів у сфері забезпечення пожежної безпеки**

Проведений системний аналіз змісту чинних Закону України «Про пожежну безпеку», «Правил пожежної безпеки в Україні», міждержавних і державних стандартів з питань захисту від пожеж (13.220), державних будівельних норм (ДБН), правил улаштування електроустановок (ПУЕ), норм технологічного проектування (НТП) і т. ін. показав, що в цих законодавчих актах і нормативно-правових документах не описано способи прогнозування можливих екологічних і соціально-економічних наслідків конкретних імовірних пожеж і способи прогнозування потреби в силах, засобах і ресурсах УПП, що створюються для ефективного рятування людей і матеріальних цінностей, локалізації та ліквідації

цих пожеж. У них також відсутні відомості щодо існування інформаційних технологій з реалізації вказаних способів прогнозування.

Ретельно проведений аналіз змісту близько 100 комплектів документів до авторських свідоцтв і патентів, зареєстрованих за рубриками Е 21 В 35/00, F 02 С 7/25, В 02 С 11/06, Е 21 F 5/00-5/20, Е 04 В 1/94-101/00, А 62 С 2/00-39/00, В 64 D 1/16, А 62 В 1/00-5/00, А 62 В 37/00 Міжнародного патентного класифікатора та ін., не виявив жодного опису способів прогнозування можливих наслідків пожеж і потреби в силах і засобах для їх ліквідації, а також жодного опису інформаційних технологій, призначених для реалізації зазначених способів.

Проаналізовано також кілька десятків монографій, підручників, наукових статей, матеріалів наукових конференцій, інших видів друкованих видань у галузі ПБ, які за змістом можна умовно поділити на такі групи:

- праці, присвячені висвітленню питань моніторингу і прогнозування пожеж у природних екологічних системах;
- результати наукових досліджень щодо прогнозування можливих екологічних і соціально-економічних наслідків пожеж на об'єктах господарювання і житлово-комунального сектора;
- праці з питань пожежної тактики і способів завчасного розрахунку потреби УПП у силах і засобах для забезпечення локалізації та ліквідації конкретної ймовірної пожежі.

Серед літературних джерел першої групи найінформативнішими виявилися праці [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9], в яких систематизовано викладено такі основні результати наукових досліджень у сфері моніторингу і прогнозування пожеж у природних екосистемах.

1. На основі визначень і методів механіки багатофазних середовищ розроблено фізичну і математичну моделі процесів виникнення і поширення лісових і торф'яних пожеж, обґрунтовано нові способи розрахунку основних параметрів протипожежних бар'єрів, розривів і мінералізованих смуг.

2. Розроблено і широко використовуються на практиці для визначення ступеня пожежної небезпеки конкретних ділянок природних екологічних систем: спосіб прогнозування пожежної небезпеки в лісах за умовами погоди; гідрологічний спосіб прогнозування лісових пожеж; спосіб прогнозування пожежної небезпеки лісів, торф'яників, степових і хлібних масивів за величиною нормалізованого вегетаційного індексу – NDVI (значення NDVI визначається методом обробки інформації багатоспектрального інфрачервоного сканера, встановленого на метеорологічному штучному супутнику Землі). З використанням таких космічних сканерів у наш час здійснюють також і моніторинг пожеж в природних екологічних системах.

3. Методика [7] дозволяє завчасно визначити:

- клас пожежної небезпеки конкретної ділянки лісу за умовами погоди в районі її розташування;
- можливі величини лінійних швидкостей розповсюдження фронту –  $V_{\text{фр}}$ , м/год, флангів –  $V_{\text{фл}}$ , м/год, і тилу –  $V_{\text{т}}$ , м/год, ймовірної низової лісової пожежі (з використанням спеціальних графіків залежно від швидкості вітру –  $V_{\text{в}}$ , м/с, класу горючості лісових насаджень і класу пожежної небезпеки погоди);
- можливі величини периметра –  $\Pi$ , м, і площі –  $S$ , га, зони горіння на заданий проміжок часу –  $t_{\text{лп}}$ , год, що пройшов після початку цієї лісової пожежі (ЛП);

- можливий ступінь пошкодження дерев після низових пожеж (залежно від їх породи і середнього діаметра стовбурів і середньої висоти нагару);

- можливу величину відсотка непридатної для реалізації деревини після верхових пожеж (залежно від ступеня пошкодження дерев).

4. У статті [8] описано методику прогнозування можливої форми, геометричних розмірів і просторового розташування зони горіння ймовірної лісової пожежі  $Z_{\Gamma_{\text{ймлп}}}$  залежно від відносної вологості повітря (%), швидкості та напрямку вітру ( $V_{\text{в}}$ , м/с), кута схилу території ділянки лісу ( $\lambda$ , град), питомого запасу лісових горючих матеріалів (g, т/га) та їх вологості (%). В цій статті рекомендується прогнозувати  $Z_{\Gamma_{\text{лп}}}$  у формі сектора круга (з центром у місці можливого займання ймовірної ЛП), величина кута при вершині якого –  $A$ , град, від швидкості вітру -  $V_{\text{в}}$ , а вісь симетрії збігається з напрямком вітру. При цьому основні параметри  $Z_{\Gamma_{\text{ймлп}}}$  (тобто просторове розташування її фронту, флангів і тилу, а також значення величин  $P$ , м, і  $S$ , м<sup>2</sup>) на заданий проміжок часу вільного горіння з моменту займання  $T_{\text{вг}}$ , с, розраховують з використанням наведених у статті формул і таблиць.

5. Стаття [9] присвячена висвітленню основних способів гасіння пожеж у природних екосистемах. У ній також наведено порядок проведення оперативних розрахунків подачі води на пожежу для визначення:

максимальної дальності подачі води насосом -  $L_{\text{max}}$ , м;

потрібної для цього кількості пожежних рукавів (з урахуванням рельєфу місцевості) –  $N_{\text{рук}}$ , одиниць;

потрібного напору на насосі при подачі води –  $H_{\text{нас}}$ , м;

потрібної кількості цистерн для підвезення води –  $N_{\text{цист}}$ , одиниць.

На жаль, навіть найперспективніші з описаних методик:

- призначені для прогнозування можливих форми, геометричних розмірів і просторового розташування тільки  $Z_{\Gamma_{\text{ймлп}}}$  і не передбачають завчасного визначення таких же параметрів  $Z_{\text{МУ}_{\text{ймлп}}}$  та інших екологічних і соціально-економічних наслідків імовірної лісової пожежі;

- реалізується «вручну» (без застосування ПЕОМ) і через необхідність використання при проведенні попередніх розрахунків великої кількості графіків (або табличних даних) характеризуються надто великими втратами часу на їхнє виконання.

Вказане унеможлиблює оперативне корегування попереднього прогнозу основних параметрів  $Z_{\Gamma_{\text{ймлп}}}$  за даними пожежної розвідки про фактично існуючі місця займання, швидкість і напрямок вітру, вологість лісових ГМ та ін.

Найінформативнішими серед літературних джерел другої групи виявилися публікації [10, 11, 12, 13 та ін.], в яких викладено такі наукові результати.

1. У методиці [10] наведено відомості щодо уражального впливу теплового випромінювання при вибуху газоподібної паливно-повітряної суміші (ППС) типу «вогненна куля» та у разі горіння розлиття рідких горючих матеріалів (РГМ). Зокрема, в ній наводяться формули для розрахунку можливих величин:

- радіуса «вогненної кулі» -  $R_{\text{вк}}$ , м, і часу її існування -  $T_{\text{існ}}$ , с;

- індексу дози теплового випромінювання –  $I_{\text{вк}}$  залежно від відстані до центра «вогненної кулі» -  $X$ , м (що дозволяє з використанням спеціального графіка визначати величину ймовірності смертельного ураження людей на цій відстані);

- поверхневої потужності теплового потоку -  $q_x$ , кВт/м<sup>2</sup>, залежно від відстані до центра «вогненної кулі» -  $X$ , м (що дозволяє визначити можливість спалахування «запасів» конкретного ГМ, розташованих на цій відстані).

В окремих таблицях наведено значення величин поверхневої потужності теплового потоку на поверхні «вогненної кулі» (з радіусом  $R_{BK} = 10$  м) –  $q_{BK}$ , кВт/м<sup>2</sup>, для конкретних видів ППС, а також критичні значення величин поверхневої потужності теплового потоку –  $q_{кр}$ , кВт/м<sup>2</sup>, при яких спалахують конкретні види ГМ.

У цій же методиці наведено формули для визначення можливих величин діаметра розлиття РГМ –  $d_{розл}$ , м, поверхневої потужності теплового потоку –  $q_{x розл} = f(X)$  та індексу дози теплового випромінювання –  $I_{x розл} = f(X)$  у разі горіння розлитого РГМ, а також таблицю із значеннями величин поверхневої потужності теплових потоків –  $q_{фак}$ , кВт/м<sup>2</sup>, на поверхнях факелів полум'я конкретних видів горючих рідин.

Однак ця методика не передбачає завчасного виявлення можливих форми, геометричних розмірів і просторового розташування ЗМУ ймовірної пожежі РГМ (або «вогненної кулі»), що унеможлиблює прогнозування можливих величин збитків (Зб, МЗП), загальних ( $M_{заг.йм.пож}$ , осіб) і санітарних ( $M_{сан.йм.пож}$ , осіб) втрат людей внаслідок впливу її УЧП.

2. В інших [11, 12, 13] публікаціях описано спосіб прогнозування можливих екологічних і соціально-економічних наслідків імовірних пожеж на будівлях (спорудах) ПНО. Цей спосіб дозволяє завчасно визначити можливі форми, геометричні розміри і просторове розташування зони горіння ( $ЗГ_{йм.пож}$ ) і зон можливого ураження ймовірної пожежі внаслідок впливу її теплового випромінювання ( $ЗМУ_{тепл.йм.пож}$ ) та хімічного забруднення продуктами згорання ( $ЗМУ_{хім.йм.пож}$ ), а також можливі величини збитків ( $Зб_{йм.пож}$ , МЗП), загальних ( $M_{заг.йм.пож}$ , осіб) і санітарних ( $M_{сан.йм.пож}$ , осіб) втрат людей внаслідок впливу цих УЧП. Проте метод реалізації цього способу (зокрема, щодо завчасного визначення основних параметрів  $ЗМУ_{тепл.йм.пож}$  і  $ЗМУ_{хім.йм.пож}$ , а отже, й величин  $Зб_{йм.пож}$ ,  $M_{заг.йм.пож}$  і  $M_{сан.йм.пож}$ ) потребують суттєвого уточнення і подальшого удосконалення. Крім того, вказана реалізація здійснюється без застосування ПЕОМ і характеризується надто великими втратами часу, що унеможлиблює оперативне корегування результатів попереднього прогнозування за даними пожежної розвідки.

Аналіз літературних джерел з питань пожежної тактики і способів завчасного розрахунку потреби УПП у силах і засобах для забезпечення локалізації та ліквідації конкретної ймовірної пожежі дозволив установити, що в наш час в Україні та за рубежом застосовується спосіб, описаний у праці [14].

Визначено [15], що найсуттєвішими недоліками цього способу є такі:

1. Принципова обмеженість (через величезні втрати часу) його застосування (тільки для особливо важливих ПНО і тільки для однієї з будівель (споруд) цих ПНО, пожежа на якій, на думку експертів, матиме найтяжкіші наслідки), бо всі розрахунки потреби в силах і засобах і всі документи «Оперативного плану гасіння пожежі» виконуються «вручну» на паперових носіях без використання ПЕОМ.

2. Принципова обмеженість отримуваної інформації, бо цим способом можна завчасно розрахувати тільки потрібну кількість основних пожежних машин –  $N_{осн.пож.маш}$ , одиниць. Завчасне визначення потрібної кількості спеціальних пожежних машин –  $N_{спец.пож.маш}$ , одиниць, потрібної кількості рятувальників –  $N_{рят}$ , осіб, потрібної кількості комплектів засобів особистого захисту уражених –  $N_{ЗОЗ ур}$  і засобів надання їм негайної медичної допомоги –  $N_{НМД}$ , а також потрібної кількості санітарних машин –  $N_{сан.маш}$ , одиниць, цим способом не передбачено.

3. Принципова неточність розрахунків потрібної кількості основних пожежних машин, бо при визначенні величини  $N_{\text{осн.пож.маш}}$  (в процесі реалізації цього способу) за параметри можливої ЗГ імовірної пожежі приймаються тільки площа горючої підлоги та периметр будівлі чи споруди і зовсім не враховуються інші будівельні конструкції (наприклад, перекриття, покрівля, заповнення віконних і дверних отворів та ін.), виконані з ГМ.

4. Велика ймовірність похибок у визначенні потрібної кількості, типів і моделей основних пожежних машин, бо всі вони визначаються вказаним способом за даними будівельно-проектної документації. Водночас абсолютна більшість існуючих будівель і споруд багатократно реконструювалась, ремонтувалась, добудовувалась і т. ін., що призвело до кардинальної зміни форми, геометричних розмірів і просторового розташування їхніх будівельно-конструктивних елементів, а також номенклатури використаних при цьому горючих матеріалів.

5. Принципова неможливість завчасного визначення можливих місць виникнення вторинних пожеж (ініційованих первинною пожежею) на сусідніх будівлях (спорудах) ПНО, а також форми, геометричних розмірів, просторового розташування й інших основних параметрів їхніх зон горіння, що унеможлиблює завчасне визначення додаткової потреби УПП у силах і засобах для забезпечення ефективної ліквідації вказаних вторинних пожеж.

## Висновки

1. У процесі проведеного системного аналізу чинних законодавчих актів і нормативно-правових документів, патентів на винаходи, опублікованих наукових праць, інших літературних джерел будь-яких відомостей щодо існування інформаційних технологій з прогнозування екологічних і соціально-економічних наслідків імовірних пожеж і потреби в силах, засобах і ресурсах для їх ефективної ліквідації або запобігання не виявлено.

2. Існуючі способи прогнозування можливих соціально-економічних наслідків імовірних пожеж і способи завчасного розрахунку потреби в силах і засобах не забезпечують надійної інформаційної підтримки для своєчасного прийняття управлінських рішень і здійснення організаційно-технічних заходів щодо забезпечення гарантованого рятування людей, ефективної локалізації та ліквідації кожної з таких пожеж через таке:

- недостатню інформативність (ці способи призначені для визначення потрібної величини  $N_{\text{осн.пож.маш}}$ , одиниць, і не передбачають визначення величин  $N_{\text{рят. осіб}}$ ,  $N_{\text{ЗОЗ ур}}$ , комплектів,  $N_{\text{НМД}}$ , комплектів,  $N_{\text{сан.маш}}$ , одиниць,  $N_{\text{спец.пож.маш}}$ , одиниць і т. ін.);

- недостатню оперативність (бо всі розрахунки і документи «Оперативного плану гасіння пожежі» виконуються «вручну» на паперових носіях і без застосування ПЕОМ, а тому в наш час оформлені тільки для окремих особливо важливих ПНО та й то тільки для однієї з будівель (споруд) цих ПНО);

- недостатню точність у визначенні потрібної кількості, типу і моделей основних пожежних машин (бо вказані розрахунки виконують без урахування форми, геометричних розмірів, просторового розташування, можливої площі горіння і виду ГМ всіх (без винятку) фактично існуючих будівельно-конструктивних елементів кожної з будівель (споруд) конкретного ПНО).

3. Зважаючи на дуже велику кількість загиблих і уражених, величезні матеріальні збитки, суттєве погіршення стану НПС унаслідок впливу УЧП десятків

тисяч пожеж, які щорічно виникають в Україні, невідкладним, злободенним і дуже актуальним завданням є розробка нового перспективного способу прогнозування потреби в силах, засобах і ресурсах ц системи інформаційних технологій з його реалізації, які забезпечать здобування всього обсягу інформації, конче потрібної для своєчасного створення і направлення на місце конкретної пожежі відповідного УПП, яке (за своїм якісним і кількісним складом і ресурсами) зможе забезпечити ефективне рятування людей і матеріальних цінностей, локалізацію і ліквідацію цієї пожежі.

### Список літератури

1. Красовський Г.Я., Клеєвська В.Л. Інформаційні моделі управління заходами у надзвичайних ситуаціях техногенного характеру, спричинених пожежами // Екологія і ресурси. – 2003. - Вип. 6. – С. 57 - 81.
2. Буравльов Є.П., Клеєвська В.Л. Екологічні та соціально-економічні наслідки пожеж // Екологія і ресурси. – 2006. – Вип. 15. – С. 128 - 131.
3. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. – 2002. - №4 – С. 41 - 89.
4. Методические указания по прогнозированию пожарной опасности в лесах по условиям погоды. – М.: Гидромеоиздат, 1975. –15 с.
5. Кулик В., Лобанов С. Гидрологический прогноз лесных пожаров и их предотвращение // Экологический вестник Приморья. – 2002. - С. 23 - 38.
6. Жеребцов Г.А. Использование данных AVHRR с ИСЗ NOAA для обнаружения лесных пожаров // «Исследование Земли из космоса» – 1995.- №5. С. 74 - 77.
7. Методика оценки последствий лесных пожаров // Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РС ЧС. Кн. 2. – М.: Изд-во МЧС России, - 1994. - С. 43 - 60.
8. Коротинський П. Горіла сосна, палала // Надзвичайна ситуація – 2002. - №3 - С. 48 - 51.
9. Коротинський П. Горіла сосна, палала // Надзвичайна ситуація – 2002. - №11, 12 - С. 50 - 52.
10. Методика оценки последствий аварий на пожаро-взрывоопасных объектах / Сборник методик по прогнозированию возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий в РС ЧС. Кн. 2. – М.: Изд-во МЧС России. - 1994. -С. 2 - 42.
11. Яковлев Л.Б. Методика прогнозування соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, спричинених пожежами. Навч. посібник. – Х.: Держ. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2000. – 32 с.
12. Техногенна безпека / Яковлев Л.Б., Кобрін В.М., Клеєвська В.Л. Довідник до виконання розділу дипломного проекту (дипломної роботи). – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2002. – 84 с.
13. Цивільний захист / Кобрін В.М., Вамболь С.О., Клеєвська В.Л., Яковлев Л.Б. Навч. посібник. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ», 2007. – 95 с.
14. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 287 с.
15. Опис до патенту на корисну модель «Спосіб прогнозування сил і засобів для ліквідації ймовірної пожежі на об'єкті» UA. МПК (2006). А 62 С 8/00. В.Л. Клеєвська, Л.Б. Яковлев. Заявлено 03.04.2007. Опубліковано 10.09.2007, Бюл. № 14. – 22 с.

## Экономические и потенциальные возможности энергосбережения в Украине

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Современное состояние энергоемкости ВВП Украины за последние пять лет характеризуется незначительными темпами снижения. В связи с этим особую значимость приобретают вопросы внедрения энергоэффективных технологий и оборудования во всех отраслях национальной экономики.

В соответствии с проектом «Основные направления энергетической стратегии Украины» к 2030 году ВВП достигнет 762,4 млрд грн при среднем темпе роста 4 % в год. Таким образом, ВВП возрастет в 2,7 раза по отношению к уровню 2005 года. При этом прогнозируемое потребление энергоносителей будет составлять 855,8 млн т у.т. [1].

Исходя из отмеченного, общий потенциал энергосбережения в экономике Украины в 2030 году составит 70,0 % от энергопотребления, или 570,3 млн т у.т., в том числе потенциал энергосбережения: по тепловой энергии – 67 млн т у.т., по электроэнергии – 200 млн т у.т. и по топливу – 300 млн т у.т. Если к 2030 году этот потенциал будет реализован в полном объеме, то уровень потребления традиционных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) останется на уровне 2005 года (2014 млн т у.т.), а это значительно уменьшит зависимость государства от импорта энергоресурсов.

Для реализации упомянутого выше потенциала расчетный объем капитальных вложений составит 150,8 млрд грн. За счет технологических сдвигов к 2030 году предусмотрено потребление энергоресурсов для производства электроэнергии в размере 330 г у.т./ кВт·ч и 165 кг у.т./ Гкал на производство тепла. Из мероприятий, реализация которых даст ощутимый эффект энергосбережения, следует выделить:

- внедрение средств силовой электроники (при капитальных вложениях в 195 млн грн потенциал энергосбережения может составить 11,5 млн т у.т.), которое следует определить как первоочередное;
- совершенствование систем теплоснабжения (5,1 млн т у.т. при затратах 2,2 млрд грн);
- использование вторичных энергоресурсов (4,5 млн т у.т.) [2,3].

Учитывая опыт стран мира, а также реальное состояние экономики Украины, одним из первоочередных мероприятий по внедрению экономических механизмов энергоэффективности и энергосбережения является государственное регулирование, а именно:

- установление прогрессивных норм удельных расходов энергоносителей;
- внедрение действенных экономических санкций за неэффективное использование энергоресурсов (повышенная плата, налоги, штрафы);
- повышенная административная ответственность в сфере энергоснабжения и энергоэффективности.

Только после осуществления этих мероприятий возможно применение экономических механизмов стимулирования – удешевление кредитов и освобождение от налогообложения части прибыли, полученной за счет внедрения энергоэффективных и сберегающих технологий [4].

Для функционирования экономических механизмов стимулирования

программ, проектов и ранее названных мероприятий могут быть использованы следующие средства:

- государственного и местного бюджетов (налоги, штрафы, повышенные тарифы за энергоресурсы);
- собственные финансы предприятий;
- кредитные средства и привлеченные инвестиции.

Основной задачей законодательства в области энергосбережения является создание благоприятных условий для эффективного использования ТЭР без непосредственного вмешательства в деятельность субъектов хозяйствования. Наиболее эффективный путь достижения этой цели – принятие проекта Закона Украины „Про енергоефективність”.

Помимо традиционных источников энергии широкое распространение в мире получили возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которые появились в конце 80-х годов XX столетия в некоторых странах, но значительное распространение они получили в начале XXI столетия.

Наиболее типичными инструментами влияния для использования нетрадиционных энергоносителей и биоэнергетики выступают целевые показатели, в частности: (обязательства, капитальные гранты, программы совершенствования производства энергии, навязанные цены, инвестиции, скидки потребителям, налоговые кредиты производителям, освобождение от налогов, налоги на добываемое топливо и т.п.)

Действенным инструментом можно считать установление целевых показателей для каждого типа произведенной энергии. Это касается стоимости энергии для конечного потребителя (за кВт ч или литр жидкого топлива), а иногда и для объемов производства. При условии квотирования производитель обязан определенное количество энергии поставлять из возобновляемых источников, а за невыполнение установленных норм налагается штраф. Как правило, зарубежные страны плановый период устанавливают до 2010 - 2012 гг.. Целевые показатели для ЭС составляют 21 % электроэнергии и 12 % общей энергии.

Система капитальных грантов предусматривает финансирование из государственных источников части инвестиционных средств, которые вкладываются в производство энергии из возобновляемых источников (ВИ), что позволит удешевить ее для конечного потребителя.

Политику «навязанные тарифы» впервые в 1978 году применили США, а в начале 90-х годов она была внедрена в ряде стран Западной Европы, Греции и Индии. К 2005 году ее использовали 32 страны мира, в том числе и развивающиеся. Считается, что этот тип политики способствует внедрению передовых технологий, увеличению инвестиций, в частности, в ветроэнергетике, биомассе, микроГЭС. Навязанные тарифы, как правило, уменьшаются для производителей и действуют в среднем 15 - 20 лет.

Среди других видов регулирования производства энергии из ВИ заслуживают внимания следующие: субсидии производителям, налоговое стимулирование и кредиты, освобождение от уплаты НДС, торговля «зелеными» сертификатами, аукционы по реализации определенного объема производства энергии.

В мире биоэнергетика (кроме биодизеля) ориентирована на мелких потребителей (т.е. для покрытия потребностей домохозяйств), поэтому внедрение «зеленого» тарифа не может прямо влиять на ее развитие.

Наиболее типичными средствами влияния на распространение биодизеля (из опыта Бразилии, США, стран Западной Европы) являются обязательства,

программы по совершенствованию производства энергии, финансирование третьими лицами, налоги на добываемое топливо, капитальные гранты, освобождение от уплаты некоторых видов налогов.

Одним из возможных путей реализации политики энергосбережения является освоение и использование альтернативных источников энергии (АИЭ). Их преимущество определяется неисчерпаемостью и экологической чистотой, а также нейтральностью к энергетическому балансу на планете.

За счет мероприятий по использованию АИЭ в Украине к 2030 году планируется выйти на уровень замещения 34,2 млн т у.т., или 12 % объема потребления первичных энергоносителей.

Одним из направлений разрешения проблем энергосбережения является внутренняя диверсификация источников энергоснабжения. Это предусматривает целенаправленное увеличение в ТЭБ территорий и отдельных потребителей, удельного веса энергии, которая получена из естественных и техногенных источников, имеющихся в данной местности, но пока не используемых.

Предварительные расчеты свидетельствуют – отдельные территории Украины за счет местных источников могут полностью обеспечить себя энергией, при этом за счет увеличения коэффициента энергосберегающих и энергоэффективных технологий только в металлургии финансовый эффект к 2012 году может достичь примерно 50 млрд грн, а экологический – уменьшить выбросы парниковых газов на 125 млн т.

Здесь не учтены выбросы твердых веществ и других вредных загрязнений окружающей среды, которые могут уменьшиться в 4 - 5 раз в пересчете на 1 т готовой продукции металлургии. Кроме этого, внутренняя диверсификация источников электроснабжения позволит значительно (в 1,5 – 1,7 раза) сократить потери электроэнергии в электрических сетях, что составляет сейчас более 30 млрд кВт·ч в год.

Как показывают общемировые тенденции, а также реалии, связанные с поставкой природного газа в Украину, источники поставок энергоносителей, например нефти, природного газа и ядерного топлива, должны быть диверсифицированы, а структура энергогенерирующих мощностей тщательно сбалансирована.

Обеспечение возрастающих потребностей Украины в топливно-энергетических ресурсах до 2030 г. согласно энергетической стратегии Украины планируется осуществлять за счет разных факторов, в том числе путем увеличения использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Именно к этому сектору энергетики относится предлагаемая концепция развертывания в Украине полномасштабного производства ветросолнечных энергосистем мощностью до 30 кВт. Предназначены такие энергосистемы как для автономного энергообеспечения потребителей, удаленных от магистральных линий электропередачи, так и для потребителей, подключенных к действующей энергосистеме. Особенность автономных энергосистем заключается в том, что их неотъемлемой составляющей являются аккумуляторы - накопители электроэнергии. Это позволяет обеспечивать бесперебойное электроснабжение потребителя в темное время суток или безветренную погоду. Другая особенность состоит в том, что каждая ветросолнечная площадка обладает солнечным и ветровым потенциалами, учет которых позволяет выбирать оптимальное соотношение между установленными мощностями фотопанели и ветроколеса по критерию минимальной стоимости единицы мощности вырабатываемой электроэнергии в течение года [6].

В отличие от прочих источников возобновляемой энергии солнечная и

ветровая энергии доступны практически повсеместно, что позволяет располагать ветросолнечные установки непосредственно возле каждого потребителя, тем самым способствуя развитию децентрализации электроснабжения потребителей или распределенной генерации электроэнергии. Солнечная и ветровая технологии на сегодняшний день наиболее подготовлены к формированию рынка распределенной генерации и в будущем, вероятнее всего, будут наиболее жизнеспособны.

Диверсификация распределенной генерации электроэнергии нивелирует негативные свойства централизованной энергосистемы и наделяет, например, региональную энергосистему, такими преимуществами, как разгрузка линий электропередач и трансформаторов, что приводит к снижению потерь, повышению качества электроэнергии и надежности электрообеспечения, демпфированию полупиковых нагрузок в микросетях и т.д. Эти преимущества могут быть реализованы только в результате внедрения административных, организационных и технических мероприятий, а также энергоэффективных технологий и оборудования.

В Украине есть потенциальные инвесторы, которые заинтересованы в сооружении объектов возобновляемой энергетики, привязанных территориально к первичному возобновляемому ресурсу и в использовании такой энергии для собственных предприятий в других регионах. Объекты генерации возобновляемой энергии могут быть построены в энергодефицитных регионах, где отсутствуют энергоисточники и куда электроэнергию транспортируют с большими потерями в электросетях. Интеграция «малой энергетики» в электроснабжающую систему требует разработки целого ряда технологических и организационных мероприятий по согласованию режимов работы децентрализованного оборудования с электроснабжающей системой, а также нормативно-правовой базы, определяющей статус децентрализованной энергетики в системе топливно-энергетического комплекса страны. При этом роль государства является определяющей.

Автономные энергосистемы предназначены для подачи электроэнергии в отдельные дома, коттеджи, фермы, теплицы, для питания средств связи, катодной защиты трубопроводов, платформ и мостов, электропитания рекламных щитов, дорожных знаков, придорожных кафе и т.п., водяных насосов и оросительных систем, для систем охраны и безопасности, резервного питания различных объектов и автономных сооружений, в том числе в сфере национальной безопасности и при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Автономные интегрированные энергетические системы, построенные по модульному принципу, позволяют за счет соответствующего набора СЭС, ВЭУ и аккумуляторов-энергонакопителей оперативно комплектовать интегрированные установки заданной мощности, ориентируясь на требования потребителя с учетом соотношения между солнечным и ветровым потенциалами.

Реализация государственной политики Украины по энергосбережению предусматривает обязательное увеличение объемов привлечения в топливно-энергетическую базу Украины нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и характерных для каждого региона альтернативных видов энергоносителей, что является весомым вкладом в местное самоэнергообеспечение регионов и отдельных предприятий. К тому же Украина имеет наработки и соответствующие процессы производства и добычи практически всех видов нетрадиционного топлива и энергии, а ее промышленность способна в сжатые сроки наладить производство необходимого

оборудования [7].

В целях реализации государственной политики Украины в области энергосбережения осуществляются меры по исполнению решений правительства Украины в направлении использования альтернативных источников энергии и альтернативных видов топлива, в том числе биотоплива, огромную заинтересованность в экспорте которого выказывает Евросоюз.

Широко распространенным источником возобновляемых ресурсов является биомасса. Общие годовые объемы возобновляемых ресурсов биомассы в Украине составляют 115,5 млн. тонн [8].

Одними из самых распространенных видов биотоплива являются этанол, который производится из сахара или целлюлозы, и биодизельное топливо, производимое из овощных масел и животных жиров. Мировое производство этанола в период с 2000 по 2005 годы увеличилось вдвое, в то время как производство биодизеля за аналогичный период возросло вчетверо. При этом экологическая привлекательность такого источника энергии очевидна. Основной причиной существенного отличия объемов производства является наличие двух ключевых параметров - прогнозируемое наличие земли и урожайность, которые имеют большую неопределенность и являются основой для различных оценок. Прогнозируемые объемы производства биомассы как топлива на 2050 год имеют диапазон от 50 до 240 ЕДж/год (1 ЕДж = 1018 ДЖ).

### Список літератури

1. Рева Л.С., Трубочанинов Ф.М. Энергетическая и экономическая безопасность мира и Украины: состояние и перспективы // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. - Харьков: НАКУ „ХАИ”, 2006. - Вып.32 –С. 137-140.
2. Ермилов С. Проблемы и пути совершенствования государственной политики в области энергосбережения // Экономика Украины. -2006.- №9.- С. 4-11.
3. Михайленко І.Д. Енергозбереження як важлива складова енергобезпеки України // Енергосбережение. – 2005.- №8. – С. 2 - 4.
4. Чибісова Г.С. Які інструменти державного регулювання ефективні для біоенергетики? // Енергосбережение. – 2006. - №11. – С. 29 – 31.
5. Яценко Ю.П. Потенціал місцевих джерел та інноваційні технології його використання // Енергосбережение. – 2006. - №11. – С. 2 - 5.
- 6.Высоцкий С.П., Дариенко О.Л. Применение возобновляемых источников и накопителей энергии на батареях // Енергосбережение. -2006. – №11. – С. 19 – 22.
7. Бахнєєв В.С., Кліменко А.А., Олесевич Є.К. Основи вибору структури електро- і теплогенеруючих потужностей для м. Одеси та Одеської області // Енергосбережение. – 2006. - №11. – С. 12 – 14.
8. Железная Т.А., Гелетуха Г.Г., Жовнир Н.М. Современное состояние и перспективы развития технологии газификации биомассы с целью выработки электроэнергии // Промышленная теплотехника. – 2006. - №6. – С. – 60 – 70.

## Анализ управленческой деятельности организации

*Национальная металлургическая академия Украины  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

**Актуальность.** Одной из задач изменений в области управления организацией является повышение качества управления персоналом организации. «Изменение» персонала относится к наиболее определяющему типу успеха организационных изменений, так как сопровождает и составляет базу всех остальных изменений.

Рассмотрим следующую **постановку задачи**: исследование и анализ системы организационного управления, состоящей из большого числа взаимодействующих подразделений, в целях разработки и практического применения методов наиболее эффективного управления ею.

**Метод решения.** Комплексный метод факторного анализа дает возможность определения интегрированного коэффициента эффективности управленческих процессов предприятия  $K_{эф}$ , который отображает в количественном выражении качественные показатели выполнения функций управления, что позволяет:

- определить интегральный коэффициент эффективности и реально отобразить картину соответствия фактического выполнения управленческих функций;
- определить степень функциональной взаимосвязи подразделений системы;
- скорректировать направленность управленческих процессов в пределах системы и ее отдельных составляющих;
- определить уровень эффективности управленческих процессов в целом

$$K_{эф} = \sum_{i=1}^n a_i x_i \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} y_{ij}, \quad (1)$$

где  $a_i$  – функциональная весомость и  $x_i$  – функциональное соответствие выполнения  $i$ -й ( $i=1, 2, \dots, n$ ) внешней функции структурной системы управления;  $b_{ij}$  – функциональная весомость и  $y_{ij}$  – функциональное соответствие выполнения  $j$ -й ( $j=1, 2, \dots, m_i; i=1, 2, \dots, n$ ) внутренней функции структурной подсистемы управления.

В расчетах используют показатели весомости функций управления, определенные экспертным путем в зависимости от сферы деятельности организации. В модели определения эффективности управленческого процесса предлагается использовать понятие «идеального конечного результата», дающего его параметрическое значение, которое может быть использовано для расчета величины резерва повышения эффективности управленческих процессов для внешних составляющих системы  $P_x$ , внутренних функций  $P_{yi}$  и всей глобальной системы  $P_{эф}$ .

$$K_{эф}^* = \lim_{x_i \rightarrow x^*} \lim_{y_{ij} \rightarrow y^*} \sum_{i=1}^n a_i x_i \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} y_{ij} = \sum_{i=1}^n a_i \left( \lim_{x_i \rightarrow x^*} x_i \right) \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} \left( \lim_{y_{ij} \rightarrow y^*} y_{ij} \right) = x^* y^* \sum_{i=1}^n a_i \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij}, \quad (2)$$

где  $K_{эф}^*$  - коэффициент эффективности управленческих процессов организации;  $x_i$  - функциональное соответствие выполнения  $i$ -й ( $i=1,2,\dots,n$ ) внешней функции структурной системы управления;  $y_{ij}$  - функциональное соответствие выполнения  $j$ -й ( $j=1,2,\dots,m_i=1,2,\dots,n$ ) внутренней функции структурной системы управления;  $n$  - количество внешних функций управления;  $m$  - количество внутренних функций управления;  $a_i$  - функциональная весомость выполнения  $i$ -й ( $i=1,2,\dots,n$ ) внешней функции структурной системы управления;  $\beta_{ij}$  - функциональная весомость выполнения  $j$ -й ( $j=1,2,\dots,m_i=1,2,\dots,n$ ) внутренней функции структурной системы управления.

$$P_x = \sum_{i=1}^n a_i (K_x^* - u_i) = \sum_{i=1}^n K_x^* a_i - \sum_{i=1}^n a_i u_i = K_x^* - \sum_{i=1}^n a_i u_i = 10 - \sum_{i=1}^n a_i u_i, \quad (3)$$

где  $P_x$  - резерв повышения эффективности управленческих процессов для внешних составляющих системы;  $K_x^*$  - предельные значения системы;  $u_i$  - локальные составляющие резерва для общей (всей) системы;

$$P_{y_i} = \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} (K_{y_i}^* - v_{ij}) = \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} K_{y_i}^* - \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} v_{ij} = K_{y_i}^* - \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} v_{ij} = 10 - \sum_{j=1}^{m_i} b_{ij} v_{ij}, \quad (4)$$

где  $P_{y_i}$  - резерв повышения эффективности управленческих процессов для внутренних составляющих системы;  $K_{y_i}^*$  - предельные значения подсистемы;  $v_{ij}$  - локальные составляющие резерва для каждой подсистемы.

**Пример.** Рассмотрим динамику изменения среднегодовой численности работников и средней выработки на примере предприятия по предоставлению транспортных услуг (табл. 1).

Таблица 1

Показатель	Годы					Итого
	2002/01	2003/02	2004/03	2005/04	2006/05	
Абсолютное изменение среднегодовой численности, чел.	76	290	181	146	292	985
Коэффициент динамики изменения средней численности, %	330,3	366,1	145,4	125,2	140,2	3084,8
Абсолютное изменение средней годовой выработки, тыс.грн./чел.	-85,9	-40,6	5,2	-1,3	-19,1	-141,7
Коэффициент динамики изменения средней выработки, %	58,0	65,8	106,7	98,4	76,7	30,74

По приведенным данным определим общий прирост дохода, выделив прирост, полученный за счет роста производительности труда работников и путем изменения средней списочной численности работников за каждый последующий год по сравнению с предыдущим годом, и суммируем эти данные за последние годы (табл. 2).

Таблица 2

Показатель	Годы					Итого
	2002/01	2003/02	2004/03	2005/04	2006/05	
Общее изменение объема реализации, тыс. грн	6189	18224	17126	11270	4430	57239
Вследствие изменения средней выработки, тыс. грн	-9358,8	-16203,5	2988,9	-885,8	-19525,3	-42984,4
Вследствие изменения численности работников, тыс. грн	15547,8	34427,5	14137,1	12155,8	23955,3	100223,4

При расчетах будем пользоваться следующими формулами:

$$DQ = Q_i - Q_{i-1} \quad (5)$$

$$DQ_W = (W_i - W_{i-1}) * T_i \quad (6)$$

$$DQ_T = (T_i - T_{i-1}) * W_{i-1} \quad (7)$$

где  $Q_i$  - объем общего дохода за текущий период;  $Q_{i-1}$  - объем общего дохода за предыдущий период;  $DQ$  - изменение объема общего дохода;  $DQ_T$  - изменение объема общего дохода вследствие изменения средней списочной численности работников;  $DQ_W$  - изменение объема общего дохода вследствие изменения средней выработки на одного работника;  $W_i$  - средняя выработка и  $T_i$  - средняя фактическая численность работников за отчетный период;  $W_{i-1}$  - средняя выработка и  $T_{i-1}$  - средняя фактическая численность работников за предыдущий период.

По результатам расчетов, осуществленных по исследуемому предприятию, выявлены значительные неиспользованные резервы совершенствования управленческих процессов (рис. 2).

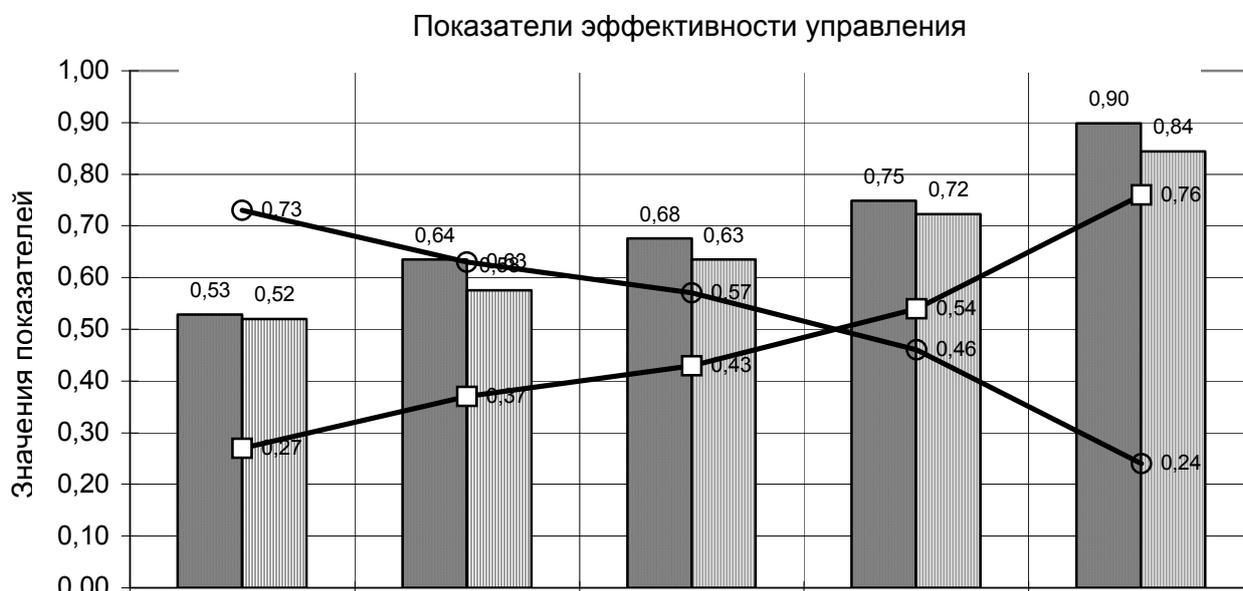


Рис. 2. Диаграмма показателей эффективности управления

Полученные результаты анализа управленческих процессов отображают исходные показатели баланса внутренних подсистем и внешних функций всей системы управления.

Обоснование экономически целесообразных затрат на управленческий процесс послужило исходной базой для разработки следующих *мероприятий по усовершенствованию организационного управления*:

- 1) определение количества и подчиненности функционально обусловленных отделов и подразделов организации;
- 2) обоснование затрат на функционирование подразделов и расчет необходимой численности специалистов;
- 3) изменение организационной структуры предприятия в целях обеспечения ее соответствия решаемым задачам на рассматриваемом этапе его развития;
- 4) усовершенствование положений о подразделениях и должностных инструкциях с установлением приоритетов по функциям и механизмов контроля за их выполнением.

Динамика средней по подразделениям производительности труда зависит от следующих факторов: изменения выработки в каждом подразделении и от изменения доли каждого подразделения в общем объеме численности персонала отдела. Влияние изменений каждого из этих факторов оценено обычными индексами фиксированного состава и структурных сдвигов.

$$W_n = \sum W_o d_o, \quad (8)$$

$$W_p = \sum W_n d_n = \sum (\sum W_o d_o) d_n, \quad (9)$$

где  $W_o$  - уровень производительности труда в каждом подразделении;  $W_n$  - средняя по отделу производительность труда;  $W_p$  - средняя по предприятию производительность труда;  $d_o$  - доля подразделений в общем объеме численности персонала отделов;  $d_n$  - количество отделов к общему объему численности персонала предприятия.

Таким образом, динамика средней по организации производительности труда может быть окончательно представлена следующим выражением:

$$\frac{W_{p1}}{W_{p0}} = \frac{W_{p1}}{\sum W_{o0} d_{o1} d_{n1}} \times \frac{\sum W_{o0} d_{o1} d_{n1}}{\sum W_{n0} d_{n1}} \times \frac{\sum W_{n0} d_{n1}}{W_{p0}}. \quad (10)$$

Результаты расчета соответствующих долей численности персонала подразделений и отделов в общем объеме отделов и всей организации соответственно, а также величин, входящих в факторные индексы, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Структурные подразделения предприятия	Базисный период			Отчетный период			Средний темп роста выработки, %
	Объем реализации, тыс.грн	Численность, чел.	Выработка, тыс.грн/чел.	Объем реализации, тыс.грн	Численность, чел.	Выработка, тыс.грн/чел.	
	Q <sub>0</sub>	T <sub>0</sub>	W <sub>0</sub>	Q <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	$\overline{T}_w = \sqrt[m]{W_1/W_0}$
1.1 Грузовой район 1	5540,0	64,0	86,6	9870,0	230,0	42,9	79,1
1.2 Управление перевозок	6060,0	86,0	70,5	8570,0	190,0	45,1	86,2
1.3 Грузовой район 2	2644,0	36,0	73,4	9200,0	95,0	96,8	109,7
1.4 Служба перевозки грузов	3900,0	12,0	325,0	5800,0	20,0	290,0	96,3
Итого 1	18144,0	198,0	91,6	33440,0	535,0	62,5	88,0

2.1	Ремонтные мастерские	4900,0	94,0	52,1	10900,0	230,0	47,4	96,9
2.2	Монтажный участок	4190,0	80,0	52,4	9350,0	195,0	47,9	97,1
Итого 2		9090,0	174	52,2	20250,0	425,0	47,6	97,0
3.1	Группа АСУ	1800,0	16,0	112,5	4200,0	30,0	140,0	107,6
3.2	Инженерная и транспортная служба	2130,0	11,0	193,6	6100,0	28,0	217,9	104,0
Итого 3		3930,0	27,0	145,6	10300,0	58,0	177,6	106,9
Итого		31164,0	399,0	78,1	63990,0	1018,0	62,9	93,0

Определим по данным итоговой строки изменение средней по предприятию производительности труда, используя формулу (10):

$$\frac{62.9}{78.1} = \frac{62.9}{76.399} \times \frac{76.399}{78.262} \times \frac{78.262}{78.1} = 0.823 \times 0.976 \times 1.002 = 0.805 .$$

Разности числителей и знаменателей факторных показателей позволяют сделать следующее заключение о влиянии факторов на абсолютное изменение средней производительности труда в целом по организации:

- 1) влияние изменений производительности труда в каждом подразделении организации – 13,541 тыс. грн;
- 2) влияние изменения структуры численности персонала в пределах отделов (изменение долей подразделений) – 1,862 тыс. грн,
- 3) влияние изменения структуры численности персонала организации (изменение долей отделов) – 0,156 тыс. грн.

### Выводы

По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что на снижение производительности труда по организации в целом оказали влияние два фактора: уменьшение выработки в подразделениях и неблагоприятные структурные сдвиги между подразделениями отделов.

Анализ исследуемой организации, проведенный с применением традиционных методов, определил низкий уровень выполнения управленческих процессов, которые привели к неудовлетворительным экономическим результатам. Системный анализ управленческого процесса позволил составить детальную картину конкретных недостатков и преимуществ.

### Список литературы

1. Стелюк Б.Б. Модель оценки состояния управленческих процессов на предприятии // Управління проектами та розвиток виробництва. – 2007. – № 1(21). – С. 94-99.
2. Стелюк Б.Б. Регрессионная модель оценки эффективности управления деятельностью организации // V Міжнародна науково-практична конференція. “Сучасні інформаційні технології в економіці та управлінні підприємствами, програмами та проектами”. – Алушта: ХАІ, – 2007. – С. 151-152.

## **Этапы эволюции массивов информации**

### **Введение**

Анализ работ, посвященных вопросам разработки, проектирования, эксплуатации БД [1 - 5], позволяет сделать вывод о том что, вопросу жизненного цикла баз данных как массива информации (далее по тексту статьи – «массивы») не уделяется должного внимания. Практически не освещены начальные этапы жизненного цикла массивов информации, этапы формирования и возникновения потребности в специальном устройстве, автоматизированных средствах управления массивами.

Из практического опыта известно о существовании определенной категории массивов, которые сложно поддаются способу организации, требуемому известными моделями данных, лежащими в основе современных СУБД. Подобные массивы относят к классу слабоструктурированных или неструктурированных данных. Рассмотрение таких массивов с точки зрения их эволюции позволяет выделить характерные особенности и сформулировать потребность в новой модели данных.

Освещению жизненного цикла массивов информации, классификации массивов информации на ранних стадиях развития посвящена данная работа.

### **Эволюция массивов информации**

В эволюции массивов информации выделяют следующие этапы развития:

Этап 1. Неосознанное накопление информации. Единичные документы, разрозненные сведения.

Этап 2. Целенаправленное накопление информации. Множество разрозненных сведений. Устоявшаяся отчетность. Типовые запросы. Небольшое количество отчетов.

Этап 3. Выделение группы типовых сведений. Небольшой объем массива информации. Стандартизация отчетов. Ручная обработка. Увеличение количества источников. Структуризация источников. Унификация и согласование метаинформации. Структурирование накопленного массива информации. Организация процесса обработки информации организационно-управленческими мерами. Ресурсоемкость обработки информации начинает превышать человеческие возможности. Возникновение потребности в средствах автоматизации обработки данных.

Этап 4. Выделение информационных потоков, их структуризация. Унификация процессов обработки информации. Проектирование БД. Выбор средства автоматизированного управления данными. Освоение разработанной БД и информационной системы на ее основе. Рост объемов данных. Сокращение времени на подготовку отчетов. Хранение массива информации в разработанной БД.

Этап 5. Рост объемов данных. Снижение качества хранимой информации. Принятие специальных мер. Контроль качества данных. Охват новых областей. Увеличение количества источников. Потребность в дополнительных атрибутах, объектах. Усложнение модели данных. Изменение приоритетов атрибутов хранимых сущностей. Увеличение и усложнение отчетов.

Этап 6. Разросшаяся, неуправляемая, в некоторых местах противоречивая модель данных. Снижение качества данных. Разделение БД. Внедрение вспомогательных инструментов, таких, как BI, хранилище данных.

Этап 7. Массив не пополняется новыми сведениями. Актуальные данные перенесены в другой массив информации. Служит источником информации для других массивов. Эпизодическое построение отчетов. Выполняется исторический анализ данных. Перемещение массива на долговременные носители информации. Удаление массива при потеря значительного уровня актуальности информации.

Схематично процесс эволюции массивов информации показан на рис.1

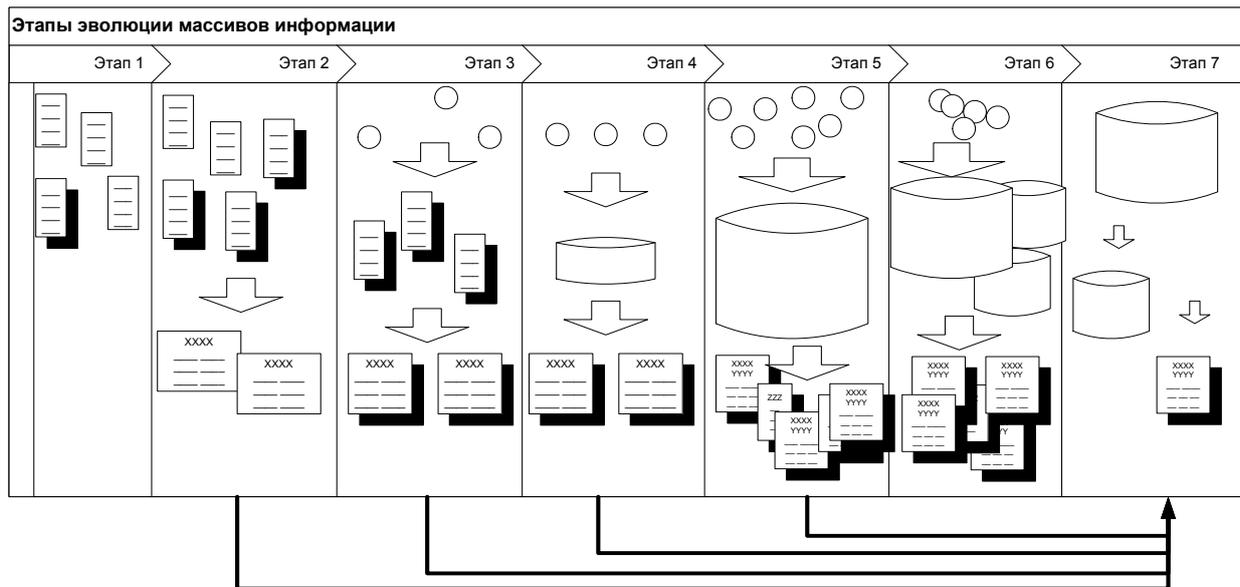


Рис. 1. Процесс эволюции массивов информации

На этапе 1 данные накапливаются в разрозненных, не связанных между собой файлах в связи с потребностью подготовки не типового, специального отчета. С данными на этом этапе работает один человек.

Этап 2 обусловлен возникновением периодической потребности в ранее единожды подготовленных отчетах. Его характеризует накопленный массив информации, разрозненная структура данных. Понятная, но не отработанная методика построения отчетов. Периодичность подготовки отчетов не прогнозируема, их готовятся по требованию. С данными работает небольшая группа людей.

Этапы 1 и 2 имеют относительно небольшой объем накопленной информации, позволяющий обрабатывать ее вручную с использованием простых средств автоматизации, универсальными инструментами общего назначения. Применяемые средства автоматизации являются разовыми и частными, создаваемыми отдельными пользователями под себя. Накапливаемые данные на этих стадиях характеризуют:

- не документированность структуры;
- разнородность структуры информации;
- разнородность семантики атрибутов;
- произвольное соблюдение правил обработки данных.

Это приводит к необходимости внедрения на указанных этапах дополнительной стадии технологической цепочки – процесса приведения данных

к единому представлению. Накопленные данные имеют различную организацию, различную структуру данных, не согласованную терминологию и схему именования атрибутов. Массив информации имеет дубликаты данных, среди атрибутов есть синонимы и омонимы. Количество схем организации данных (метаинформации) сопоставимо с объемом данных, которые они описывают. На этих этапах более целесообразна непосредственная обработка данных, нежели организация их потоковой обработки посредством метаинформации.

Этапы 1 и 2 имеют важную особенность, утрачиваемую на последующих этапах развития: структура данных отражает частное представление пользователя о предметной области. Поэтому с такой структурой пользователю наиболее комфортно работать.

Развитие не всех массивов информации доходит до этапа 3. Накопленные массивы информации становятся "неструктурированными" в силу уже упоминавшейся особенности – большого объема несогласованной и неунифицированной метаинформации.

Накопленные массивы информации на этапах 1-3 еще сложно назвать базой данных (далее – БД) в ее современном понимании [1, 2, 3]. Осмысленная потребность в отдельной, специализированной БД начинает формироваться только на этапе 3.

Этап 4 характеризуется переходом на использование специально разработанной БД. Последующие этапы отражают развитие массивов информации сквозь призму БД. С течением времени изменяется внешняя обстановка, изменяются приоритеты. Это приводит к необходимости вести учет большего количества факторов, учитывать факторы, которые при проектировании БД казались несущественными. Предпринимаются шаги по расширению модели данных, реализованной в БД.

Дальнейшее использование массива информации связано с увеличивающейся трудоемкостью поддержки данных в актуальном состоянии, обработкой информации. К работе над массивом привлекают дополнительных сотрудников. Это требует целого комплекса организационно-управленческих мероприятий по координации усилий для сохранения контроля над процессом. На этом этапе существует большой риск увеличения энтропии информации. Поэтому разрабатывают методики, инструкции по работе с массивом данных. Вводят общие правила поиска, наименования атрибутов, способов представления данных. Осуществляется унификация схем данных. От малоиспользуемых данных отказываются. Происходит переход к общей, унифицированной структуре данных и общим формам отчетности. Окончательный переход от частных структур данных к единой и унифицированной структуре данных.

На этапе 5 возрастают административные расходы на сопровождение и поддержку БД. Ухудшается качество данных в БД. Проявление ряда проблем, вызванных историческими данными [2]. Из-за неоднократных доработок модель данных теряет свою первоначальную концептуальную стройность. Усложняются взаимосвязи объектов. Появляются похожие структуры данных.

За время эксплуатации БД и ее инфраструктуры сменяется несколько коллективов сопровождающего персонала, имеющих свои приоритеты, освоенные модели, инструменты, собственное представление о предметной области. В силу ограниченности в ресурсах коллективы акцентируются на непосредственном выполнении доработок. Вопросам развития логической модели данных, положенной в основу БД, не уделяется должного внимания. В силу подобных процессов данные в БД имеют тенденцию становиться "сложно

структурированными". Появляется проблема "потерянных" данных.

На шестом этапе развития БД становится большим хранилищем информации со сложной моделью данных и сложной реализацией. Модель данных и ее реализация имеют низкий уровень документирования, невысокую ее полноту. В информационной системе появляется феномен "гуру" – человека или нескольких лиц, имеющих адекватное представление о структуре модели данных, ее ограничениях, особенностях реализации. В силу этого дальнейшее развитие модели данных и выполнение доработок структур данных БД нецелесообразны, и организация рассматривает вопрос перепроектирования модели данных с последующим переходом на нее. Процесс широко исследован и подробно освещен [2, 4].

Окончание процесса развития массива информации характеризует седьмой этап – этап архивного хранения данных. Процессы добавления новых данных, корректировки существующих остановлены, данные доступны только на чтение. С течением времени актуальность данных утрачивается, частота обращений к массиву уменьшается. Массив информации переводится на долговременные носители с низкой скоростью доступа или удаляется из информационного поля из-за нецелесообразности дальнейшего его хранения. Массив становится источником информации для формирования других массивов информации.

Эволюция не всех массивов информации проходит все этапы, на каком-то из этапов развитие останавливается, и начинают действовать процессы седьмого этапа.

В информационном поле обычно одновременно существует несколько массивов, находящихся на разных этапах эволюции. Это может породить, особенно в случае полной реструктуризации массива, ложное представление о спиральном характере эволюции массивов. Однако при ближайшем рассмотрении наблюдаются сжатые по времени два процесса – перевод старого массива информации на седьмой этап и формирование нового массива, источником данных для которого служит первый массив.

Таким образом, каждый этап эволюции характеризуется:

- объемом накопленной информации;
- частотой ее обработки;
- сложностью ее обработки;
- степенью важности подготовленной информации.

### **Классификация по размеру массивов информации и метаданных**

Согласно [1, 3] метаданные – это представление о данных в массиве информации, описание структуры данных, взаимосвязей. Объем метаданных может служить критерием сложности модели данных. Чем проще модель данных, тем компактнее ее описание, меньше объем метаданных, и наоборот. Распределение массивов по группам в зависимости от соотношения объема данных и сложности модели данных, выраженных через объем метаданных, показан на рис. 2.

Вся область зависимостей разделена на 4-ре квадранта, каждый из которых имеет явно выраженные признаки.

1-й квадрант характеризуется небольшими объемами информации, объемом метаинформации, сопоставимой с объемом самих данных. Данные структурированы, но с данными через структуру работать сложно. Информация хранится чаще всего в виде файлов.

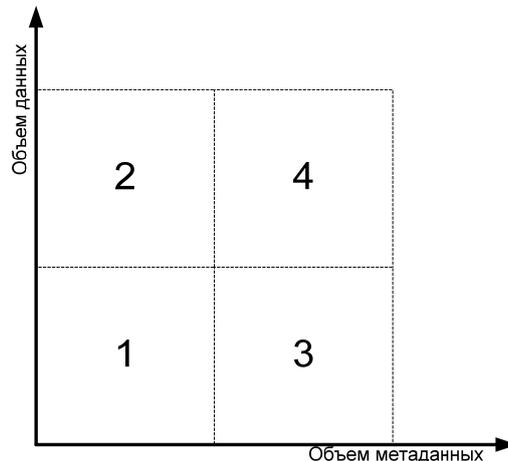


Рис. 2. Распределение массивов по группам в зависимости от объема данных и сложности модели данных.

2-й квадрант – это большие объемы информации, значительно превышающие объем метаданных, описывающей их. С данными работают посредством специализированных инструментов. Данные организованы в БД.

3-й квадрант характеризует массивы информации, в которых объем метаданных превышает объем данных.

4-й квадрант характеризует массивы информации, аналогичные первому, но имеющих гораздо большие объемы.

Современными исследованиями охвачен только 2-й квадрант [1 - 5]. Для автоматизации работ с остальными группами массивов используют средства, разработанные для неструктурированных данных, с последующей ручной обработкой.

Этапы 1 и 2 эволюции массивов информации характеризуются 1-м квадрантом. Дальнейшую эволюцию массивов информации в настоящее время стараются направить в сторону 2-го квадранта. Любой массив информации неоднороден, и в нем существуют области, в которых рост данных происходит более быстрыми темпами, чем в остальных. Эти области выделяют в отдельные массивы, попадающие по классификации во 2-й квадрант.

На основании полученной классификации выделяют три типа массивов в зависимости от их поведения при добавлении новой порции информации:

- вертикальные массивы – новая порция информации увеличивает объем данных, но не объем метаданных;
- горизонтальные массивы – новая порция информации больше увеличивает объем метаданных, чем объем данных;
- смешанные массивы – новая порция информации увеличивает объем как метаданных, так и данных. Объемы метаданных и данных сопоставим.

Варианты поведения массива информации при добавлении новых сведений показан на рис 3. На схеме массив представлен прямоугольником, длина вертикальной стороны которого выражает объем данных, горизонтальной – объем метаданных.

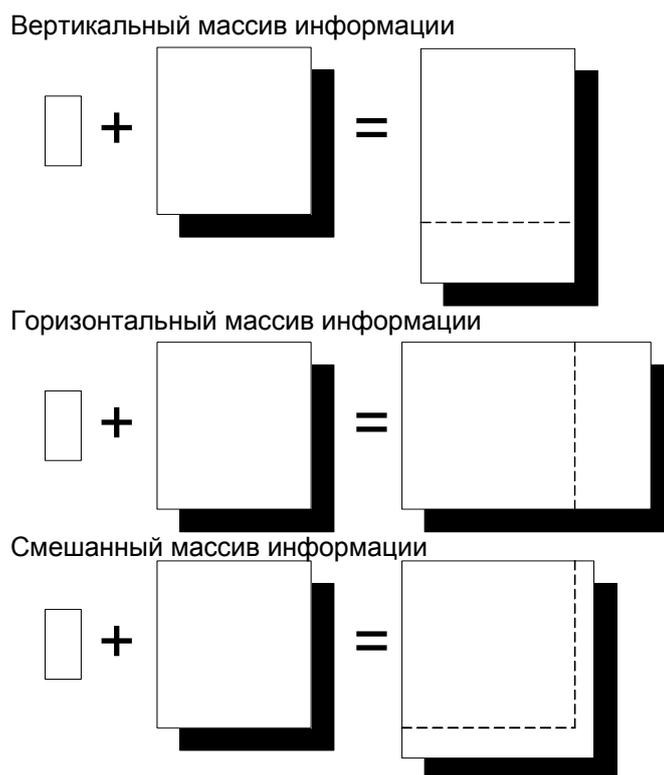


Рис. 3. Три варианта поведения массива информации при добавлении порций данных

Основные черты массивов информации:

- вертикальные массивы:
  - большой объем данных;
  - однотипность информации, ограниченное количество разновидностей информации;
  - небольшой объем метаинформации;
  - унифицированность и согласованность метаинформации;
  - четко определить цель существования массива;
  - долгосрочна потребность в существовании массива;
  - регулярность поступления данных;
- горизонтальные массивы:
  - большой объем метаинформации, сопоставимый с объемом данных;
  - различное представление одной и той же сущности в зависимости от конкретных задач;
  - слабая унификация метаданных;
  - нерегулярность поступления данных;
  - разнородная информация;
  - неопределенный срок существования массива.

Смешанные массивы существуют на первоначальных этапах формирования массивов, на дальнейших этапах, по мере накопления данных, трансформируются в горизонтальные или вертикальные массивы.

Как отмечалось выше, прогресс в развитии массивов информации возможен путем использования средств автоматизации управления данными в массиве. В настоящее время это требует структуризации, унификации и

представления в компактном виде метаинформации – перехода к формально выраженным структурам данных. В силу известной ресурсоемкости подобного процесса он целесообразен только для больших массивов данных – для вертикальных массивов.

Таким образом, эволюция горизонтальных и смешанных массивов информации возможна только до четвертого этапа. В основе дальнейшей эволюции лежит стадия преобразования горизонтальных и смешанных массивов в вертикальные.

Деградация вертикальных массивов информации (этап 6) вызвана увеличивающимся объемом метаинформации, приобретением направления изменения массива с явно выраженного вертикального в сторону смешанного. Массив смещается в сторону 4-го квадранта, согласно рис 3. Для подобного класса данных в настоящее время не существует эффективных механизмов обработки. Поэтому с течением времени развитие массива переходит на седьмой этап.

### Процесс накопления данных

Процесс накопления информации присутствует на каждом этапе эволюции массива, кроме последнего этапа. На первом этапе процесс накопления является основополагающим, на последующих этапах его доля снижается, оставаясь тем не менее важной. Процесс накопления данных – это процесс целенаправленного отбора определенной категории информации из различных источников и объединения их в отдельном множестве, в массиве информации. Схематично процесс накопления показан на рис. 4.

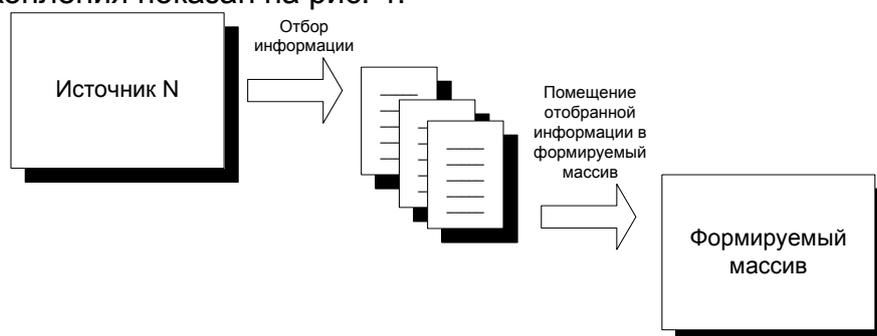


Рис. 4. Схема процесса накопления данных

В общем виде процесс накопления данных носит характер копирования отобранных порций данных. Распространенность подобного подхода вызывает экспоненциальный рост как объемов, так и энтропии информации, приводит к появлению негативных последствий таких, как информационная перегрузка, информационный мусор, необходимость в скоростных и производительных каналах связи, емких устройствах хранения, производительной аппаратуры по преобразованию данных.

Основные причины существования процесса копирования при накоплении данных:

- 1) гарантированность доступности данных;
- 2) сохранности контроля над данными;
- 3) необратимое преобразование данных;
- 4) другая схема представления данных;
- 5) более детальная структуризация данных;

- 6) добавление собственных атрибутов;
- 7) отслеживание версий данных.

Причины 1 и 2 во многом обусловлены социальной природой – потребностью во владении информацией. В этой работе только обозначена данная особенность, требующая своего детального исследования.

Причины 3 и 4 связаны с необходимостью уменьшения риска получения неадекватной модели предметной области, потери данных при выполнении преобразования массива из одной схемы данных в другую.

Целесообразность процесса копирования информации обусловлена в основном причинами 1, 2 и 5. Конкретизация остальных причин позволяет снизить объем копирования. Основным направлением усилий, направленных на снижение объема копирования, является переход от отдельных массивов информации к единому информационному полю, разбитому на отдельные массивы посредством категорий [6, 7].

В этом случае категории информации трактуются как тип представления информации, в другой схеме данных. Происходит рост метаданных при сохранении объема данных. Массив информации, представляющий собой единое информационное поле, приобретает свойства горизонтального массива.

Зависимость соотношения между объемом метаданных и объемом данных от этапов жизненного цикла показана на рис 5. Виден характерный рост метаданных, затем снижение ее объема по мере унификации, устранение синонимов, выработка единого словаря данных. Переломный момент наступает на третьем этапе, этапе структуризации массива информации, внедрения автоматизированных средств управления информацией. Происходит переход от горизонтальных массивов к вертикальным, стабилизация объемов метаданных при продолжающемся росте объемов данных. На последующих этапах эволюции начинается рост объемов метаданных. На последнем этапе эволюции поступление информации в массив прекращается, что отражено на графике точкой К. Массив становится только источником информации.

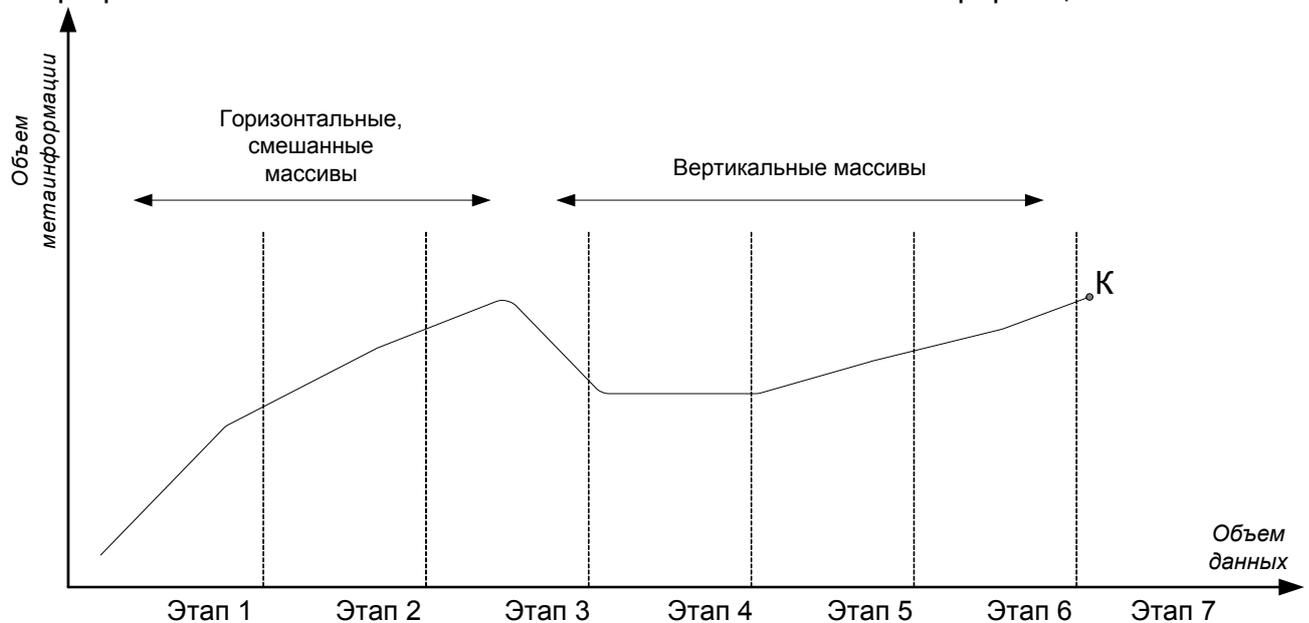


Рис. 5 Зависимость соотношения между объемом метаданных, объемов данных от этапов жизненного цикла.

## Применимость существующих моделей данных

Для эффективного использования автоматизированных средств требуется формализация процессов обработки данных, что невозможно сделать без формализации самого массива информации – определения его структуры, структуры данных, взаимосвязей, построения схемы данных. В целях снижения сложности автоматизированных систем необходимо уменьшить размерность информационной модели. Признаком, характеризующим размерность и сложность информационной модели, является объем метаданных. При уменьшении размерности информационной модели уменьшается объем метаданных, что наблюдается на третьем этапе эволюции. Данный процесс обладает своей известной ресурсоемкостью и попадает под действие закона целесообразности его выполнения. На небольших объемах данных очевидно его нецелесообразное применение, но с ростом объемов, ужесточения требований к срокам подготовки отчетности, достоверности получаемых сведений необходимость в средствах автоматизации возрастает. Это демонстрируют этапы 1 - 3 эволюции.

В настоящее время известны четыре модели данных [1, 5], построенных из предположения существования определенного класса схемы данных:

- иерархическая;
- сетевая;
- реляционная;
- объектно-ориентированная.

Как было упомянуто выше, схема данных создается в процессе формализации массива информации, что целесообразно выполнять для вертикальных массивов, находящихся на третьем этапе эволюции. Поэтому известные модели данных находят крайне ограниченное применение на ранних стадиях эволюции массивов информации. Неустоявшаяся схема данных требует частого внесения изменений, что для приведенных выше моделей данных вызывает необходимость выполнения преобразования данных. Этот процесс связан с рисками получения неадекватной модели предметной области, потери данных, что в силу причин 3 и 4 требует дополнительного копирования данных.

## Выводы

Эволюция массивов информации показывает, что развитие массивов связано с процессами структуризации – формированием описания базовых составляющих массива информации, их взаимосвязей. Формирования метаинформации вызвано потребностью эффективной обработки массива информации при увеличивающемся его объеме. На ранних стадиях эволюции массивы являются горизонтальными или смешанными, обрабатываются в основном ручными методами. Эффективная автоматизированная обработка возможна только вертикальных массивов, что требует дополнительных усилий для их выделения из смешанных или горизонтальных массивов и последующего преобразования. Дальнейшие этапы эволюции проходят вертикальные массивы, проблематика их развития достаточно хорошо изучена и описана. Горизонтальные и смешанные массивы развиваются только до четвертого этапа, в научной литературе им уделяется недостаточное внимание. Тем не менее, они занимают заметную часть человеческой деятельности, связанной с обработкой информации, их дальнейшие этапы эволюции сдерживаются отсутствием средств автоматизации управления массивом информации. Это приводит к возникновению целого ряда негативных факторов:

- искусственному дроблению информационного поля на отдельные, обособленные массивы в целях:
  - получения вертикальных массивов и возможности применения одной из известных моделей организации данных;
  - меньшего по объему горизонтальных или смешанных массивов, допускающих ручную обработку.
- дублированию информации;
- разобщенности сведений и в последующей потребности дополнительных усилий по объединению массивов информации;
- отсутствию единого информационного поля;
- отказу от частных форм представления информации в пользу унификации. Это приводит к возникновению частных массивов, дублирующих основные, но в другой форме.

Для создания средств автоматизации управления горизонтальными и смешанными массивами необходима разработка новой модели данных, учитывающей основные характеристики горизонтальных массивов. Основными направлениями в развитии новой модели данных ожидаются:

- использование аппарата категорий для выделения массивов информации на едином информационном поле;
- акцент на едином месте хранения данных, отсутствие необходимости дублирования данных;
- смещение акцента в сторону способов разнопланового представления данных, а не их способов организации их хранения.

#### **Список литературы**

1. Гарсиа-Молина Г., Ульман Д., Уидом Д.. Системы баз данных: Санкт-Петербург: Пер. с англ. - М.: Вильямс, 2004. – 1088 с.
2. Спирли Э., Корпоративные хранилища данных. Планирование, разработка, реализация. Пер. с англ. Т. 1: - М.: Вильямс, 2001. – 400 с.
3. Наумов А.Н. Системы управления базами данных и знаний. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 538 с.
4. Конноли, Томас и др. Базы данных: Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика: – 2-е изд., испр. и доп. – М. Вильямс, 2000. – 700 с.
5. Кренке Д. Теория и практика построения баз данных. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Питер, 2003. – 800 с.
6. Фурашев А.В. Концептуальная модель системы универсальной классификации объектов // Открытые информационные технологии и компьютерные технологии. – Х.: НАКУ "ХАИ", 1998. – Вып.2. – С. 112-115
7. Фурашев А.В. Реализация концептуальной модели системы универсальной классификации объектов // Открытые информационные технологии и компьютерные технологии. –Х.: НАКУ "ХАИ", 1999. – Вып.3. – С. 95-100
8. Фурашев А.В. Рассмотрение некоторых вопросов атрибутивной схемы организации данных. // Открытые информационные технологии и компьютерные технологии. – Х.: НАКУ "ХАИ", 2004. – Вып. 24. – С. 217-223.

## Стан лісових ресурсів України

*Національний аерокосмічний університет ім.М.Є. Жуковського «ХАІ»*

Відомо, що Україна має у своєму розпорядженні певні запаси деревинної продукції.

За статистичними даними лісовий фонд України представлений цінними твердолистяними та хвойними породами. Із них: сосни - 34,7%, вільхи – 4,2%, дубу – 23,6%, буку – 9,3%, ялини – 9,9%, берези – 5,4%, ясеня – 1,4%, ялиці – 1,4%, осини – 1,2%, інших порід – 2%.

Лісовий фонд – це територія лісів і земель, покритих лісом, які призначені для потреб лісового господарства. Лісовий фонд відділений від земель іншого призначення відповідно до чинного законодавства. До земель лісового фонду належать лісові (призначені для вирощування лісу) та нелісові (рілля, сінокоси, води тощо).

Як свідчить статистика, загальна площа лісового фонду становить 9942 тис. га, лісова — 9152 тис га, покрита лісом — 8620 тис га. Частка гірських лісів становить 21,8%. Цінність їх визначається в першу чергу захисними, рекреаційними, охоронними та іншими численними корисними функціями, які вони виконують.

У складі лісового фонду України переважають державні ліси, загальна площа яких сягає 7550 тис. га. Загальна площа колгоспних лісів становить 1884 тис. га. Як правило, вони представлені малопродуктивними насадженнями з малою часткою стиглих деревостанів. Забезпеченість лісом населення України — 0,17 га на людину — одна із найнижчих в Європі. В Югославії вона сягає 0,46 га, у Болгарії — 0,42, в Румунії — 0,29, в Польщі — 0,24 га. Забезпеченість деревиною становить 25,4 м<sup>3</sup> на одного жителя України. У складі лісового фонду переважають хвойні породи, покрита лісом площа яких становить 2916,6 тис. га. Твердолистяні породи займають площу 2578,2 тис. га, м'яколистяні породи — 624,0, чагарники — 11,6, інші деревні породи — 21 тис. га. Середній запас деревини на 1 га покритої лісом площі України становить 153 м<sup>3</sup>, в стиглих і перестійних лісах — 252 м<sup>3</sup>. Середньорічний приріст деревини на 1 га покритої лісом площі становить 4,0 м<sup>3</sup>. Ліси України — це "зелене золото" молодої держави. Вони є джерелом цінної промислової сировини, продуктів харчування, стабілізуючим фактором навколишнього природного середовища. Для примноження цього національного багатства необхідно істотно підвищити продуктивність лісів, поліпшити їх охорону та захист. Питання підвищення ефективності відтворення лісів слід розглядати в тісному взаємозв'язку з організацією раціонального використання всіх компонентів лісу.

В умовах незалежності України лісова промисловість має особливе значення для підвищення рівня забезпеченості держави та населення продукцією лісового комплексу та покращання, за рахунок збільшення обсягів лісових насаджень, екологічної обстановки.

Для визначення перспективних напрямків розвитку лісової промисловості необхідно обґрунтувати напрямки формування сучасного лісопромислового комплексу на основі галузевої та регіональної структур з орієнтацією на задоволення попиту економіки держави та ринку на його продукцію при повному і

ефективному використанні власного виробничо-ресурсного потенціалу. Досягнення поставленої мети можна забезпечити шляхом порівняння світового досвіду зі становищем у лісовій галузі України.

Досвід структурної політики у країнах з розвинутою економікою показує, що вона була спрямована на зростання і підвищення ефективності функціонування промислового комплексу, на реалізацію кінцевої мети — забезпечення усталеної конкурентноспроможної національної економіки.

За попередніми даними, у зв'язку зі зменшенням обсягів виробництва лісової промисловості, а також із скороченням поставок деревини з інших регіонів і розривом господарських зв'язків, Україна недоотримує близько 6 млн. м<sup>3</sup> лісової сировини та приблизно 22% виробленої з неї продукції. В цілому обсяги продукції лісової промисловості зменшуються. Такі втрати спричинені, в першу чергу, неефективністю та неінтенсивністю використання деревинних ресурсів, яких і без того не вистачає. В Україні інтенсивність використання лісових ресурсів є найнижчою серед країн Європи. Склалася парадоксальна ситуація, коли за рахунок власних ресурсів потреби держави в деревній сировині та продукції лісової промисловості задовольняються тільки на 1/3, тоді як деревні відходи використовуються тут на 50-60%, а використання біомаси є значно нижчим, ніж у розвинутих країнах.

Сьогодні, коли Україна переживає нелегкі часи, коли економіка знаходиться в занепаді і майже в більшості галузях народного господарства існує безліч різноманітних проблем, економічний стан підприємств лісової промисловості та лісового комплексу в цілому залишає бажати кращого. Нестабільність української економіки та національної валюти, нестача обігових коштів фінансових активів підприємств призводять до постійного зменшення обсягів випущеної продукції, її якості та конкурентоспроможності на ринку. Подальший розвиток галузей лісової промисловості потребує повного радикального реформування, що включає заміну фізично та морально застарілого обладнання, наділення підприємств обіговими коштами, розробка ефективних, раціональних технологій, раціональне використання відходів.

На превеликий жаль, на цей час, у державі існує значний дефіцит грошових коштів, і, тому сподіватись у близькому майбутньому на реформування лісової промисловості та народного господарства в цілому не доводиться.

З економічної та соціальної точок зору ліс та його ресурси є продуктом і предметом праці, а з виробничої — засобом виробництва компонентів середовища і регенеруючого впливу на навколишнє середовище, тобто ліс є товаром, має вартість, належить до відновлюваних природних ресурсів а тому повинен використовуватися в обсягах згідно з лісівничими принципами безперервності та невиснажливості.

Користування деревними ресурсами в Україні в цілому має тенденцію до зменшення загальних обсягів. Перевантаженість лісового відомства виробничими функціями, відсутність належних машин, механізмів і технологічних ліній (а останнім часом – і робочої сили) призвели не тільки до погіршення стану лісового фонду і, як наслідок, до зменшення продуктивності лісових земель, але й до його самовідтворення, до відмови від виконання надзвичайно важливої державної функції відповідальності за піднесення рівня або повне забезпечення потреб держави в послугах лісу, в лісосировинних (і в першу чергу – деревних) ресурсах власного виробництва.

Також однією з основних проблем українського лісового комплексу є те, що ліс офіційно не визнається нерухомим майном, його вилучено із фінансового і товарного обігу. Основний лісовий закон України – Лісовий кодекс – не визнає і не визначає ліс як об'єкт економіко-правових стосунків, не передбачає просторової обмеженості такого об'єкта.

Структура використання деревних ресурсів і випуску продукції на деревній основі взагалі є незадовільною. Виникає такий економічний казус, що ліс як угіддя офіційно не визнається носієм вартості. Після вирубаня (знищення або порушення цілісності лісового угіддя) заготовлена деревина набуває вартості, стає товаром. Наслідком такої “державної економічної політики” є бажання всіх суб'єктів вирубувати ліс, надаючи йому “товарного вигляду”, а не займатись лісовирощуванням.

Неефективно (переважно як дрова) використовується деревина, яка заготовляється в процесі рубок, догляду за смугами вздовж залізничних і автомобільних доріг, і це в умовах гострого дефіциту на деревину, коли її можна використати як повноцінну сировину для виготовлення целюлози, картону, ДСП, ДВП та іншої ефективної в споживанні продукції. В поперечних смугах можна щорічно заготовляти 2,5 млн м<sup>3</sup> деревини.

Доцільно прискорити розвиток галузей промисловості, які ефективно переробляють деревину (перш за все – целюлозно-паперову). Сировиною для розвитку целюлозно-паперової промисловості є не тільки деревина, але й макулатура, вторинні сировинні ресурси сільського та комунального господарств (солома, очерет, деревина), які заготовляються в процесі догляду за парками, садами та поодинокими деревами тощо.

Україна для виробництва картону й іншої продукції використовує тільки 500 тис. т. макулатури, в той час як є можливість збільшити її споживання до 1 млн. т. за рік. Другий напрям розв'язання проблеми — це істотне поліпшення відтворення лісосировинних ресурсів. Перспективними є плантаційне лісорозведення (особливо на непридатних для сільськогосподарського виробництва землях), вирощування насаджень із швидкорослих деревних порід, введення в лісові культури модрина японської та інших продуктивних деревних порід з метою їх вирубання в процесі проміжного користування лісом.

Необхідно підвищити ефективність відтворення захисних смуг уздовж транспортних шляхів не тільки для посилення їхніх захисних функцій, але й отримання повноцінної кондиційної деревини, забезпечити заліснення всіх малоприсадибних для сільськогосподарського виробництва земель. Підвищення лісистості території України до 20 % дасть змогу в перспективі забезпечити лісопромисловий комплекс місцевими сировинними ресурсами, поліпшити кліматичні умови і їхній позитивний вплив на продуктивність сільського господарства, а також збільшити рекреаційний потенціал лісів і його позитивний вплив на здоров'я населення.

Доцільно відзначити, що способи виконання технологічних і транспортних операцій у лісозаготівельному виробництві істотно впливають на стан лісовідновлення на лісосіках, зумовлюють появу боліт, підлісків та недеревинної рослинності. Лісозаготівельне виробництво впливає на розвиток лісокористування і форм організації лісового господарства. Водночас організація лісовідновлення значною мірою визначає обсяги та способи заготівлі деревини.

В Україні складається напружена ситуація із забезпеченням народного господарства лісоматеріалами, папером, картоном та іншою продукцією із деревини.

Експортні можливості галузей лісового комплексу обмежені, з одного боку, невисокою якістю продукції, а з іншого – необхідністю враховувати, що Україна – одна з найменш забезпечених лісом і деревиною країн Європи. Підприємства лісового комплексу не задовольняють потреби внутрішнього ринку.

Процес виробництва в лісовому господарстві потребує накопичення значних запасів деревини. Деревні запаси не можна оновити за короткий строк. Втрати деревного запасу безповоротні, і в зв'язку з цим функція охорони та захисту лісів у лісогосподарському виробництві є надзвичайно важливою.

Лісопильне та шпалопильне виробництво, які є основними споживачами круглих лісоматеріалів у деревообробній промисловості, розвиваються менш динамічно порівняно з виробництвом деревних плит. У цілому світове споживання деревини характеризується зменшенням частки цільної деревини та збільшенням глибокої хіміко-механічної та хімічної переробки.

Лісогосподарське виробництво слабомеханізоване, розосереджене, на великій території знаходиться просто неба і під впливом природних факторів (дощ, сніг). Ці особливості лісогосподарського виробництва створюють труднощі в організації виробництва та праці, стримують формування кваліфікованих кадрів.

Таким чином, аналізуючи стан лісових ресурсів, можна зробити висновок, що він перебуває у незадовільному стані, потребує захисту, охорони та раціонального використання.

### Список літератури

1. Сенякевич І. Економіка галузей лісового комплексу // Знання.– 1992.
2. Маценко Г. Все про ліс. Які вони, дерева України? // Магістраль. – 1997. - №42-43., спец. випуск.
3. Авдеенко В.Н., Котлов В.А. Производственный потенциал промышленного предприятия. – М., 1989. – 255с.
4. Анчишкин А.И. Прогнозирование роста социалистической экономики. – М., 1973. – 218с.
5. Балабанов И.Т. Анализ и планирование финансов хозяйствующего субъекта. – М.: Финансы и статистика, 1994. – 80с.
6. Бойко Н.Н. Лесной производственный комплекс Украинских Карпат. – Ужгород, 1989.
7. Задольский О.М. Економічні основи розвитку лісової галузі в Україні // Економіка України. – 1997. – №9. – С. 73 – 82.
8. Лісовий кодекс України // Голос України, 1994. №68. – С. 6–7, 89.
9. Паламарчук В., Мішенін Є. Організація та економічне стимулювання праці у лісовому комплексі України // Україна: аспекти праці, 1988. – №3. – С.29 – 34.
10. Фурдичко О.І. Резерви підвищення ефективності використання лісових ресурсів (на прикладі підприємств лісогосподарського комплексу). Автореф. дис. канд. екон. наук. – Л., 1991. – 31с.
11. Самоплавський В. І. Лісове господарство в умовах переходу до ринкової економіки // Кон'юнктура і цінові відносини в ринкових умовах. – Л., 1993. – С. 2 – 6.

## **Разработка прогрессивной потайной заклепки с коническим компенсатором для выполнения соединений силовых элементов крыла**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,  
ГП АНТК им. О.К. Антонова*

Заклёпочные соединения силовых элементов самолётных конструкций являются одними из конструктивных нерегулярностей планера, ответственными за обеспечение его прочности, ресурса, живучести, герметичности, коррозионной стойкости и качества внешней поверхности.

Снижение качества внешней поверхности самолета способствует увеличению аэродинамического сопротивления самолета, из-за чего существенно увеличивается расход авиатоплива [8]. В условиях уменьшения мировых запасов нефти и роста цен на нефтепродукты топливная эффективность становится одним из основных показателей, определяющих облик перспективных самолетов, а также их совершенство и конкурентоспособность. Специалисты авиапромышленности предпринимают меры по повышению топливной эффективности, в том числе благодаря повышению качества внешней поверхности и местной аэродинамики.

Соединения элементов планера самолета транспортной категории, формирующие наружную, обтекаемую воздушным потоком поверхность, для обеспечения качества внешней поверхности (КВП) выполняют крепежными элементами с потайными закладными головками. Исследование состояния КВП гражданских самолетов показало, что технологические неровности планера, такие, как зазоры и уступы по стыкам обшивок, утяжка и вспучивание последних в зонах заклепочных швов, а также выступание и западание закладных головок крепежных элементов, увеличивают аэродинамическое лобовое сопротивление самолетов. Наличие в панелях потайных гнезд под закладные головки отрицательно влияет на усталостную долговечность и герметичность потайных заклепочных соединений крыла.

Состояние КВП и долговечность во многом будут определяться уровнем конструктивного совершенства применяемых потайных заклепок и технологии их постановки.

Для уменьшения отрицательного влияния потайных гнезд под закладные головки заклепок при сборке панелей крыла в свое время были разработаны и нашли применение потайные заклепки с компенсаторами, например заклепки по ОСТ 1 34052-85 (ЗУКК) [4]. При этом из-за неоптимальной формы закладных головок в целом и компенсаторов в частности известные заклепки при клепке по технологии согласно ПИ 249-78 [7] и разработанных на ее основе технологических инструкций не обеспечивают аэродинамическую гладкость обшивок в зонах заклепочных швов. Закладные головки применяемых потайных заклепок с компенсатором после клепки выступают над поверхностью на величину, значительно превышающую предельно допустимую техническими условиями на КВП и требуют дополнительных доводочных операций, заключающихся в удалении (зачистке) избыточного материала закладных головок.

Согласно техническим условиям на качество внешней поверхности самолета Ан-140 выступание закладных головок потайных заклепок в первой зоне не должно превышать 0,05 мм.

Результаты исследования состояния КВП планера самолета Ан в зонах заклепочных швов, выполненных заклепками по ОСТ 1 34052-85 [4], показаны на рис. 1 и 2.

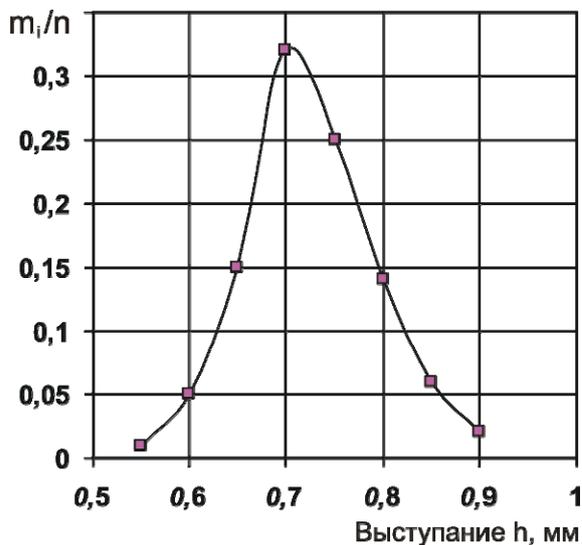


Рисунок 1 – Величина выступания закладных головок заклепок по ОСТ 1 34052-85 после клепки до фрезерования

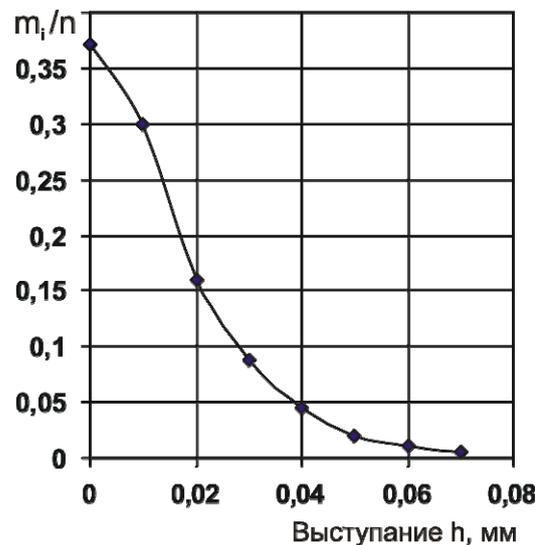


Рисунок 2 – Величина выступания закладных головок заклепок по ОСТ 1 34052-85 после фрезерования

Замеры выступания закладных головок заклепок после клепки до фрезерования были проведены на верхней панели крыла в области 8-го стрингера, 15-й – 18-й нервюр, после фрезерования – выборочно по всей поверхности крыла [3].

Анализ результатов измерений величин выступания закладных головок заклепок по ОСТ 1 34052-85 над поверхностью обшивки показал, что после клепки до фрезерования фактически реализуется высота выступания закладных головок заклепок от 0,55 до 0,9 мм, после фрезерования – от 0 до 0,07 мм. При этом высота выступания до 0,05 мм реализуется у 96% заклепок. Кроме того, после клепки и фрезерования закладных головок потайных заклепок наблюдаются такие технологические неровности внешней поверхности крыла, как зазоры и уступы по стыкам обшивок, утяжка и вспучивание последних в зонах заклепочных швов, а также нарушение защитного покрытия соединяемых элементов крыла.

Разработка и применение новых потайных заклепок с компенсатором из алюминиевых сплавов, обеспечивающих требуемое КВП крыла, позволяют повысить ресурс и герметичность клепаных соединений, снизить расход герметизирующих материалов и массу конструкции, повысить производительность труда, сократить цикл сборки, улучшить условия труда.

Целью данной работы является разработка прогрессивной потайной заклепки с нормальной высотой закладной головки и коническим компенсатором, предназначенной для выполнения потайных заклепочных соединений элементов крыла самолета, закладная головка которой не требует выполнения операции фрезерования после клепки.

Первоначальный облик проектируемой потайной заклепки с коническим компенсатором формируется путем добавления к “базовому телу” заклепки усеченного конуса, расположенного на торце закладной головки (рис. 3).

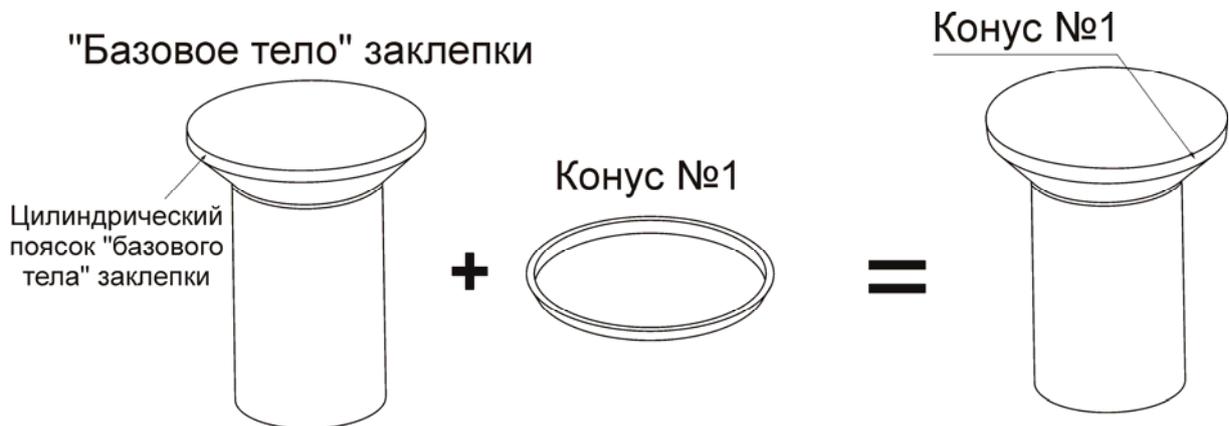


Рисунок 3 – Схема формирования облика разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором

“Базовое тело” разрабатываемой потайной заклепки формируется на основе контура гнезда под установку потайной заклепки с корончатым компенсатором ОСТ 1 34052-85 (согласно ТИ 36-21-86 [9]) с добавлением радиусного перехода  $R$  между закладной головкой и стержнем заклепки с номинальным диаметром  $d_{\text{закл}}$  (рис. 4). Длина “базового тела” заклепки  $L_{\text{закл}}$  подбирают согласно ОСТ 1 34102-80 [6] в зависимости от номинального диаметра заклепки и толщины пакета соединяемых деталей.

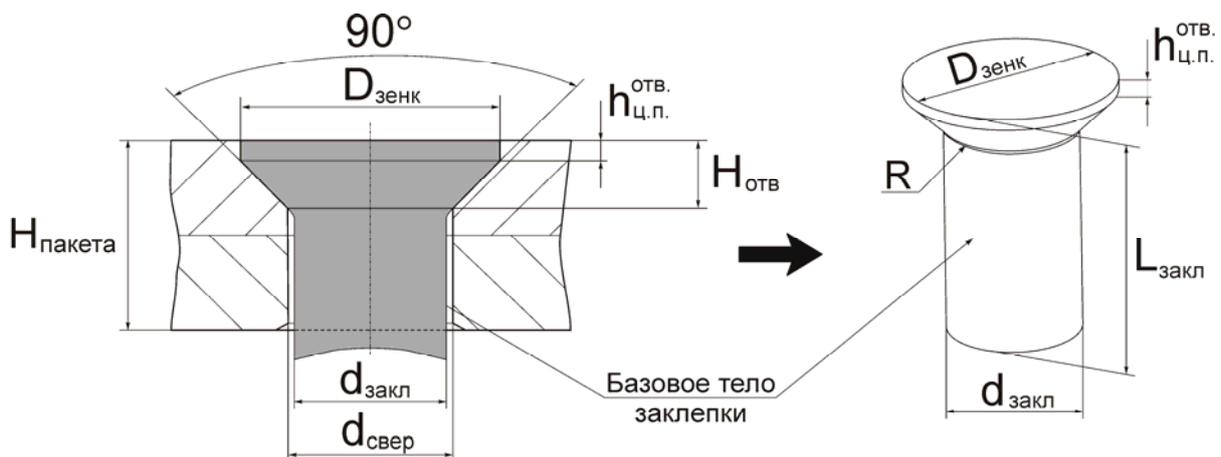


Рисунок 4 – Формирование облика базового тела разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором

Конус № 1 добавляют к цилиндрическому пояску потайной головки “базового тела” заклепки для увеличения радиального натяга в зоне цилиндрического пояска зенкованной части гнезда под установку закладной головки потайной заклепки.

Эскиз и модель первоначального облика разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором показаны на рис. 5.

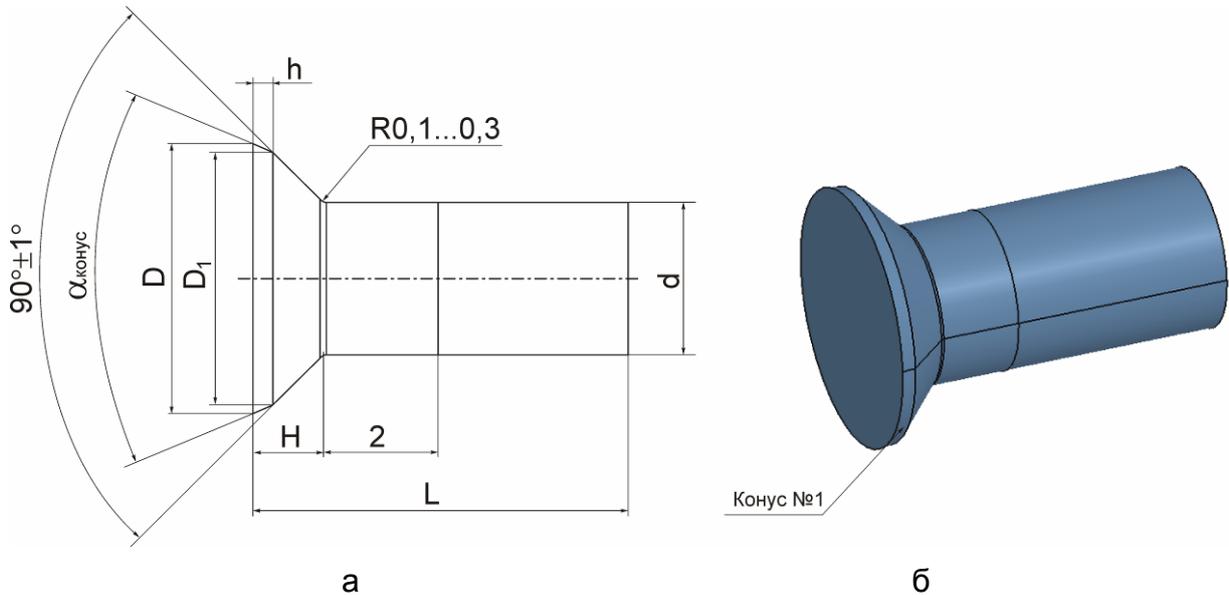


Рисунок 5 – Эскиз (а) и модель (б) разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором

Разрабатываемую потайную заклепку с коническим компенсатором устанавливают в потайное гнездо (рис. 6), аналогичное установочному гнезду потайной заклепки ОСТ 1 34052-85 согласно ТИ 36-21-86 [9].

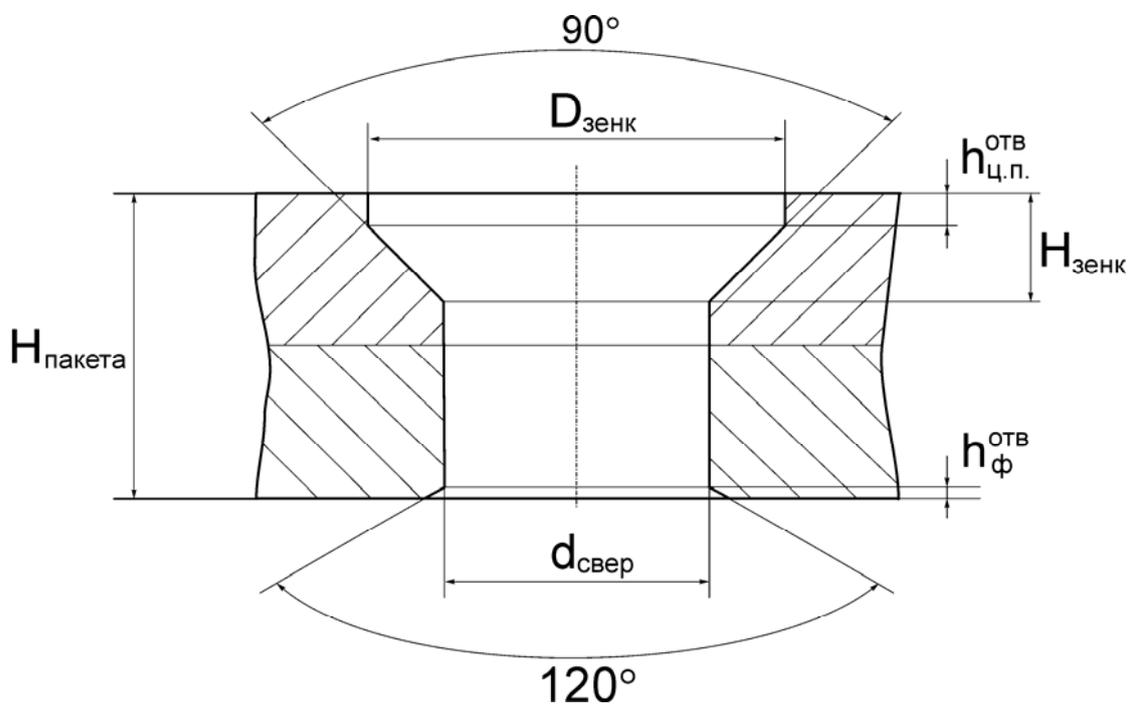


Рисунок 6 – Геометрические параметры гнезда под установку проектируемой потайной заклепки с коническим компенсатором

Соотношения геометрических параметров проектируемой потайной заклепки с коническим компенсатором и параметров установочного гнезда показаны на рис. 7.

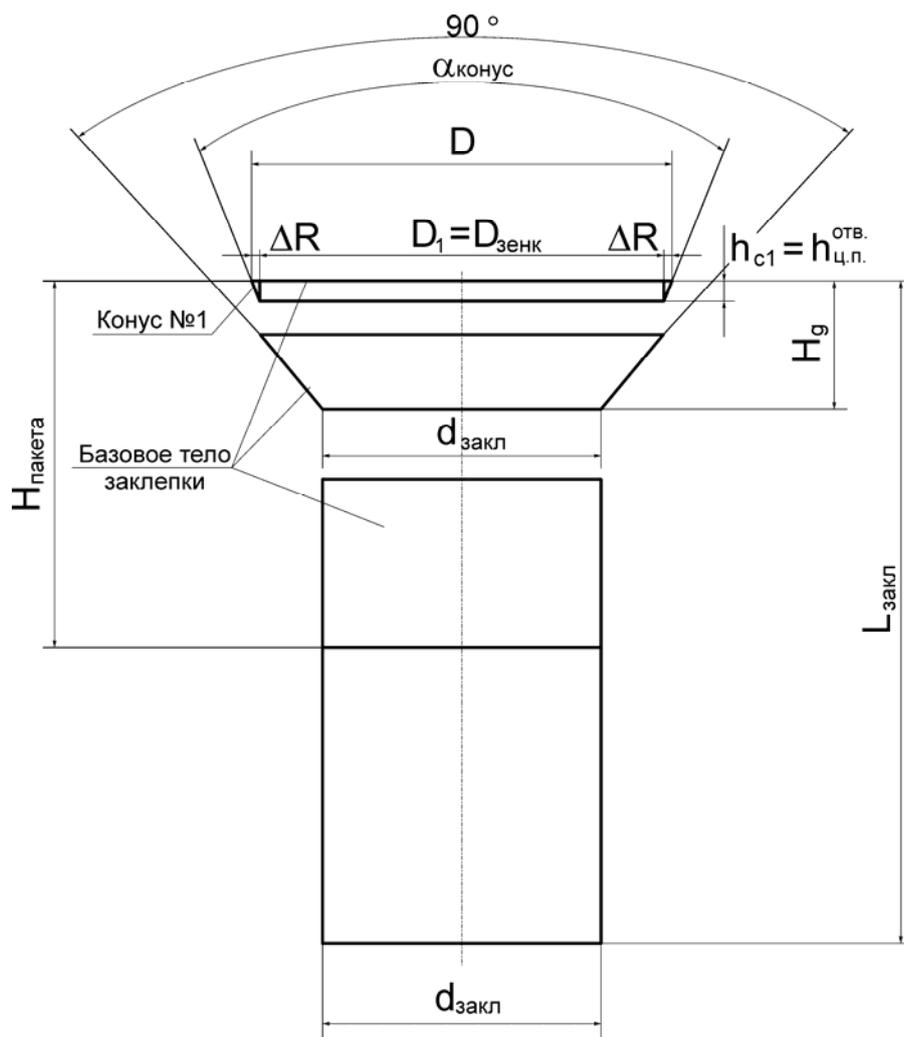


Рисунок 7 – Соотношение параметров усеченного конуса разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором и гнезда под ее установку

Технологический процесс выполнения соединений заклепками с корончатым компенсатором [4] согласно ПИ-249-78 [7] и ТИ 36-21-86 включает в себя следующие операции:

- образование отверстий;
- образование гнезд под закладные головки заклепок ОСТ 1 34052-85;
- подготовка узла к клепке;
- вставка заклепок;
- образование замыкающих головок;
- зачистка закладных головок заклепок ОСТ 1 34052-85;
- контроль качества заклепочных соединений.

Отверстие под потайную заклепку ОСТ 1 34052-85 выполняется сверлом или сверлом-разверткой. Номинальные диаметры сверл, диаметры отверстий под заклепку ОСТ 1 34052-85 и допустимые отклонения должны соответствовать табл. 1 ТИ 36-21-86 [9].

Гнездо под установку закладной головки заклепки ОСТ 1 34052-85 выполняют по методике, описанной в ПИ-249-78 специальной зенковкой черт. 61905 [7].

Геометрические параметры гнезда под установку разрабатываемой потайной заклепки, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Геометрические параметры отверстия с гнездом под разрабатываемую потайную заклепку с коническим компенсатором

$d_{\text{закл}}$	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0
$d_{\text{отв}} = d_{\text{свер}}$	3,050	3,550	4,050	5,050	6,050
$D_{\text{зенк}}$	4,800	5,600	6,400	8,000	9,600
$h_{\text{ц.п}}^{\text{отв}}$	0,250	0,300	0,350	0,400	0,500
$H_{\text{зенк}}$	1,125	1,325	1,525	1,875	2,275

Критериями, по которым определяли геометрические параметры разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором, являются:

– радиальный натяг, численные значения которого и характер распределения по толщине пакета принято использовать как интегральную характеристику, по которой можно спрогнозировать усталостную долговечность, герметичность и коррозионную стойкость заклепочного соединения;

– величина выступания закладной головки над поверхностью пакета после процесса клепки (не более 0,05 мм) как показатель КВП обшивки планера самолета.

Величину радиального натяга заклепочного соединения определяют по формуле [3]

$$\Delta = \frac{d_{\text{закл}}^{\text{клеп}} - d_{\text{отв}}}{d_{\text{отв}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где –  $d_{\text{закл}}^{\text{клеп}}$  – диаметр заклепки в измеряемом сечении после расклепывания;

–  $d_{\text{отв}}$  – диаметр отверстия в пакете до расклепывания заклепки.

С учетом соотношения параметров разрабатываемой потайной заклепки с параметрами гнезда под ее установку (см. рис. 7) величина наибольшего теоретически закладываемого радиального натяга в сечении торцевого основания конуса №1 определяют по формуле:

$$\Delta = \frac{D - D_{\text{зенк}}}{D_{\text{зенк}}}, \quad (2)$$

где –  $D = D_{\text{зенк}} + 2 \cdot \Delta R$  – диаметр заклепки в рассматриваемом сечении.

В свою очередь

$$\Delta R = h_{\text{ц.п}}^{\text{отв}} \cdot \text{tg} \left( \frac{\alpha_{\text{конус}}}{2} \right). \quad (3)$$

Следовательно,

$$\Delta = 2 \cdot \frac{h_{\text{ц.п}}^{\text{отв}}}{D_{\text{зенк}}} \cdot \text{tg} \left( \frac{\alpha_{\text{конус}}}{2} \right) \cdot 100\%. \quad (4)$$

Принимаем, что

$$2 \cdot \frac{h_{\text{ц.п}}^{\text{отв}}}{D_{\text{зенк}}} = A_{\text{инстр}}^{\text{тех}}, \quad (5)$$

где –  $A_{\text{инстр}}^{\text{тех}}$  – инструментальный коэффициент образования отверстия под установку проектируемой потайной заклепки (табл. 2).

Таблица 2 – Параметры заклепочного соединения

$d_{\text{закл}}$	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0
$D_{\text{зенк}}$	4,800	5,600	6,400	8,000	9,600
$h_{\text{ц.п}}^{\text{отв}}$	0,250	0,300	0,350	0,400	0,500
$A_{\text{инстр}}^{\text{тех}}$	0,104	0,107	0,109	0,100	0,104

Согласно табл. 2 при разработке конструкции потайной заклепки коэффициент  $A_{\text{инстр}}^{\text{тех}}$  считаем постоянным. Для различных  $d_{\text{закл}}$  он в среднем составляет  $(A_{\text{инстр}}^{\text{тех}})_{\text{сред}} = 0,1048$ .

Следовательно, из формулы (4) видно, что максимальная величина теоретически закладываемого радиального натяга в сечении торцевого основания конуса №1 без учета технологических отклонений на изготовление инструмента и образование установочного гнезда под разрабатываемую потайную заклепку с коническим компенсатором для различных диаметров проектируемой заклепки зависит только от угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса №1.

Зависимости максимальной величины теоретически закладываемого радиального натяга в сечении торцевого основания конуса №1 от угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса №1 для различных диаметров разрабатываемой заклепки показаны на рис. 8.

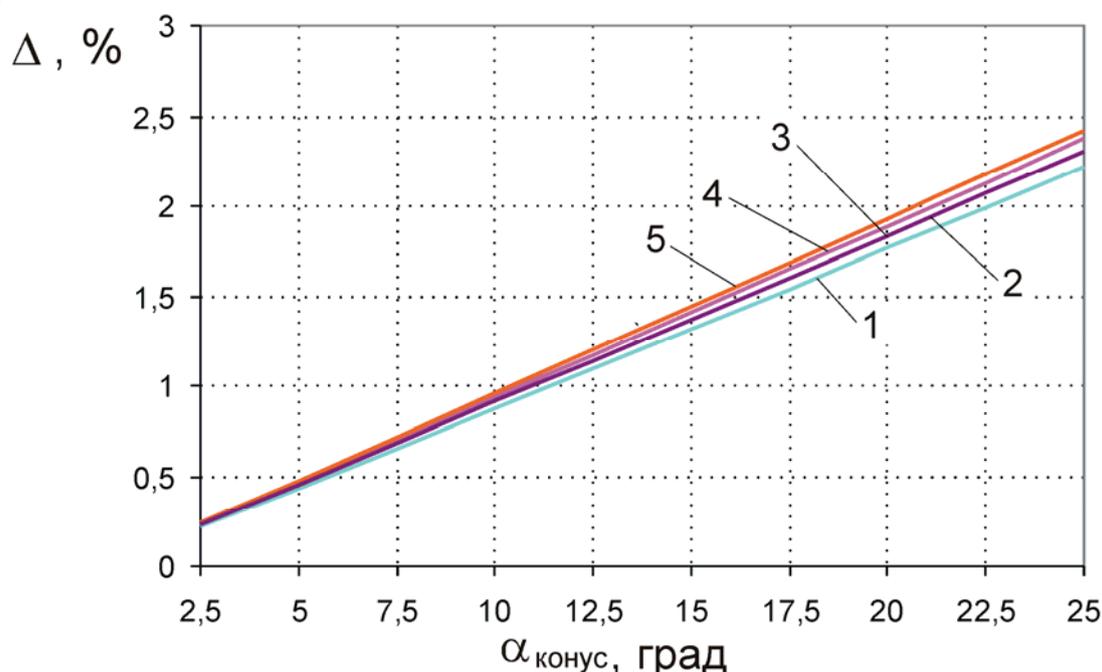


Рисунок 8 – Распределение максимальной величины теоретически закладываемого радиального натяга в сечении торцевого основания конуса №1 в зависимости от изменения значения угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса №1:

1 –  $d_{\text{закл}} = 3,0$  мм; 2 –  $d_{\text{закл}} = 3,5$  мм; 3 –  $d_{\text{закл}} = 4,0$  мм;

4 –  $d_{\text{закл}} = 5,0$  мм; 5 –  $d_{\text{закл}} = 6,0$  мм

В качестве исследуемого параметра при разработке потайной заклепки с коническим компенсатором рассмотрен угол конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  усеченного конуса № 1 (см. рис. 7).

Влияние угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  усеченного конуса № 1 на величину выступания закладной головки после процесса клепки –  $\Delta Y_{\text{выст}}$  и характер распределения радиального натяга  $\Delta\%$  по толщине пакета рассматривали для заклепки с номинальным диаметром  $d_{\text{закл}} = 4$  мм. Длина заклепки потайной заклепки с конусом № 1 была подобрана согласно ОСТ 1 34102-80 [6]. Для соединяемого пакета толщиной 4 мм длина заклепки составила  $L_{\text{закл}} = 9$  мм.

Для исследования влияния  $\alpha_{\text{конус}}$  на характеристики разрабатываемой заклепки с потайной головкой  $\angle 90^\circ$  с коническим компенсатором был принят диапазон изменений угла конусности усеченного конуса № 1 с учетом изменения величины теоретически максимально возможных радиальных натягов в сечении торцевого основания конуса №1.

Рассмотрен диапазон величин  $\alpha_{\text{конус}}$  от 5 до 20° с шагом 2,5°.

Постоянные геометрические параметры потайной заклепки с коническим компенсатором приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Постоянные геометрические параметры потайной заклепки с коническим компенсатором

$d_{\text{закл}}$ , мм	$D_{\text{зенк}}$ , мм	$h_{\text{Ц,П}}^{\text{отв}}$ , мм	$H_g^*$ , мм	$L_{\text{закл}}$ , мм
4	6,4	0,35	1,55	9

Значение параметра  $D$  (см. рис. 7) разрабатываемой потайной заклепки с компенсатором является переменной величиной, линейно зависящей (2) от угла конусности усеченного конуса № 1 разрабатываемой потайной заклепки.

Для определения влияния угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса № 1 на параметры заклепочного соединения была сформирована расчетная схема заклепочного соединения на основании геометрических параметров разрабатываемой потайной заклепки и параметров отверстия под ее установку. Было выбрано соединение двух круглых пластин диаметром  $6d_{\text{закл}}$  для возможности реализации осесимметричной расчетной схемы рассматриваемого заклепочного соединения.

Выбор осесимметричной расчетной схемы обусловлен возможностью в несколько раз ускорить итерационный процесс разработки конструкции потайной заклепки с коническим компенсатором.

Учитывая осевую симметрию рассматриваемого заклепочного соединения и осевой характер приложения внешней нагрузки, в качестве расчетной схемы исследовали сечение заклепочного соединения с соответствующими условиями закрепления (рис. 9). Вдоль осей  $X$ ,  $Y$  для всех узлов, лежащих на торцевой поверхности пластин №1 и №2 были наложены ограничения на перемещения вдоль указанных осей. На осевые узлы сечения заклепки были наложены также ограничения на перемещения вдоль оси  $X$ . Процесс клепки моделировался перемещением абсолютно жестких штампов, моделирующих обжимки.

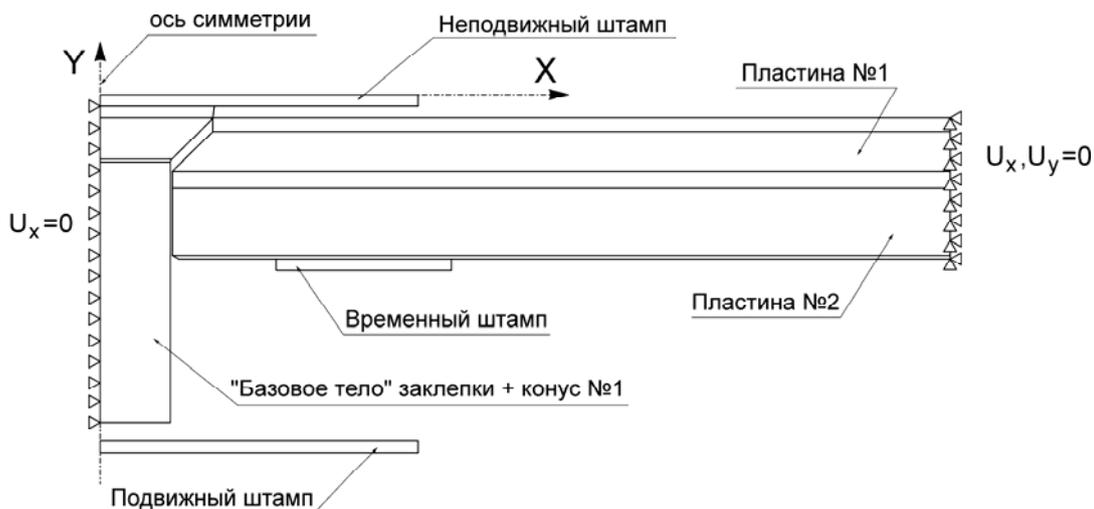


Рисунок 9 – Расчетная схема рассматриваемого заклепочного соединения

Для определения влияния угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса № 1 на величину первоначальной посадки закладной головки  $\Delta Y_{\text{пос}}$  разрабатываемой потайной заклепки в установочное гнездо соединяемого пакета согласно выбранной расчетной схеме (рис. 9) с помощью системы ANSYS [11] была сформирована конечно-элементная модель заклепочного соединения (рис. 10) из элементов, представленных в системе, которые в полной мере удовлетворяют условиям решаемой задачи.



Рисунок 10 – Конечно-элементная модель заклепочного соединения для определения влияния угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса №1 разрабатываемой потайной заклепки на величину первоначальной посадки потайной головки заклепки в установочное гнездо

На данном этапе расчетов в сформированную конечно-элементную модель для определения влияния угла конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса №1 разрабатываемой потайной заклепки на величину первоначальной посадки заклепки  $\Delta Y_{\text{пос}}$  в установочное гнездо не были включены элементы "подвижного" штампа расчетной схемы.

В конечно-элементной модели заклепочного соединения использовали следующие характеристики материалов:

1) материал заклепки – алюминиевый сплав В65 с модулем упругости  $E = 71000$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,3$ . Для описания поведения материала выбран закон полилинейного изотропного упрочнения материала (MISO) [11], предполагающий, что полный диапазон напряжений равен удвоенному значению предела текучести, так, чтобы учитывался эффект Баушингера.

Диаграмма растяжения материала В65 при комнатной температуре показана на рис. 11, а [1];

2) материал пластин, используемый для моделирования разрабатываемого заклепочного соединения, – алюминиевый сплав Д16Т с модулем упругости  $E = 72000$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,3$ . В расчетах была принята опция полилинейного кинематического упрочнения материала (KINH) [13], учитывающая эффект Баушингера.

Диаграмма растяжения материала Д16Т при комнатной температуре показана на рис. 11, б [1].

При создании в расчетной модели контактных пар было учтено трение путем задания коэффициента сухого трения скольжения [2]:

- $\nu = 0,15$  – между заклепкой и пластиной;
- $\nu = 0,65$  – между заклепкой и штампами;
- $\nu = 0,94$  – между пластинами.

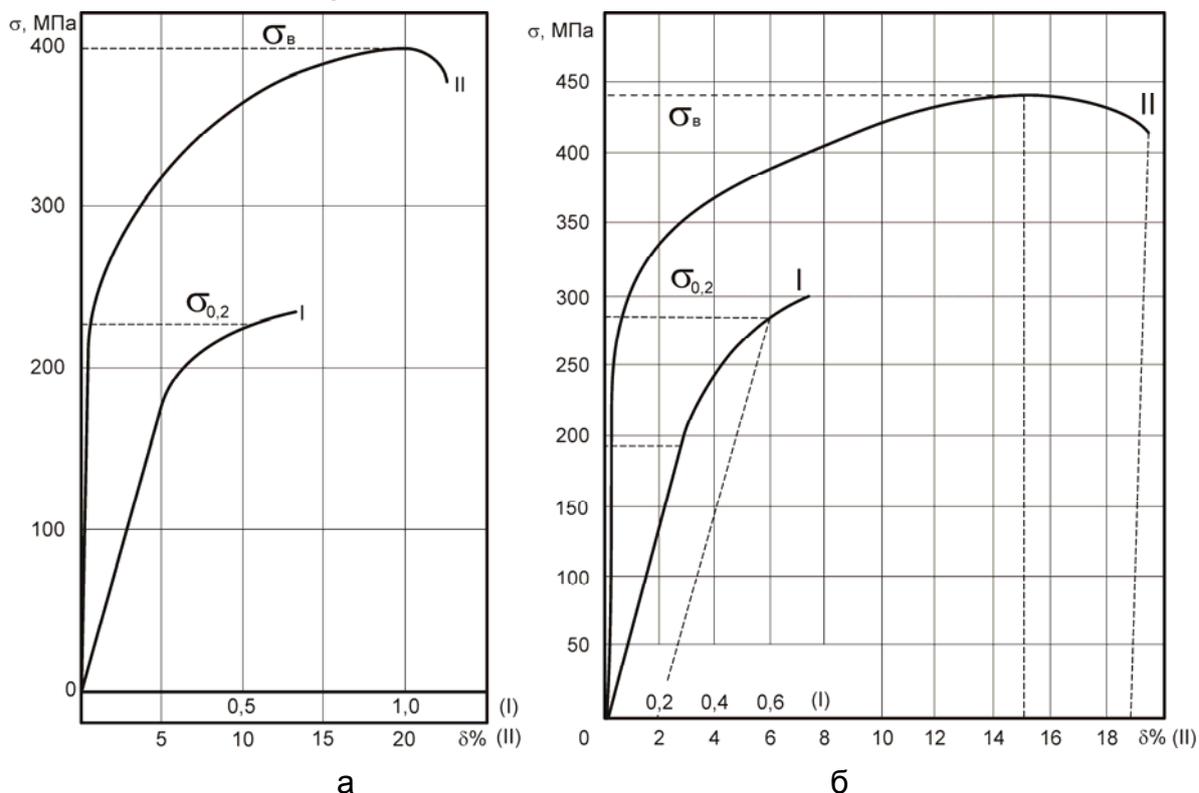


Рисунок 11 – Диаграмма растяжения материалов потайной заклепки и соединяемого пакета:

а – диаграмма растяжения сплава В65 при комнатной температуре

б – диаграмма растяжения сплава Д16-АТ при комнатной температуре

Конечно-элементная модель заклепочного соединения (рис. 10) состоит из плоских четырехузловых элементов PLANE 182 и контактных элементов TARGE 169 и CONTA 171, представленных в системе ANSYS. Всего модель содержит 2536 конечных элементов.

С помощью составленной конечно-элементной модели моделировался процесс установки заклепки в гнездо путем перемещения “неподвижного” штампа (рис. 12) для заклепки диаметром 4 мм с различными углами конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  на величины, указанные в табл. 4.

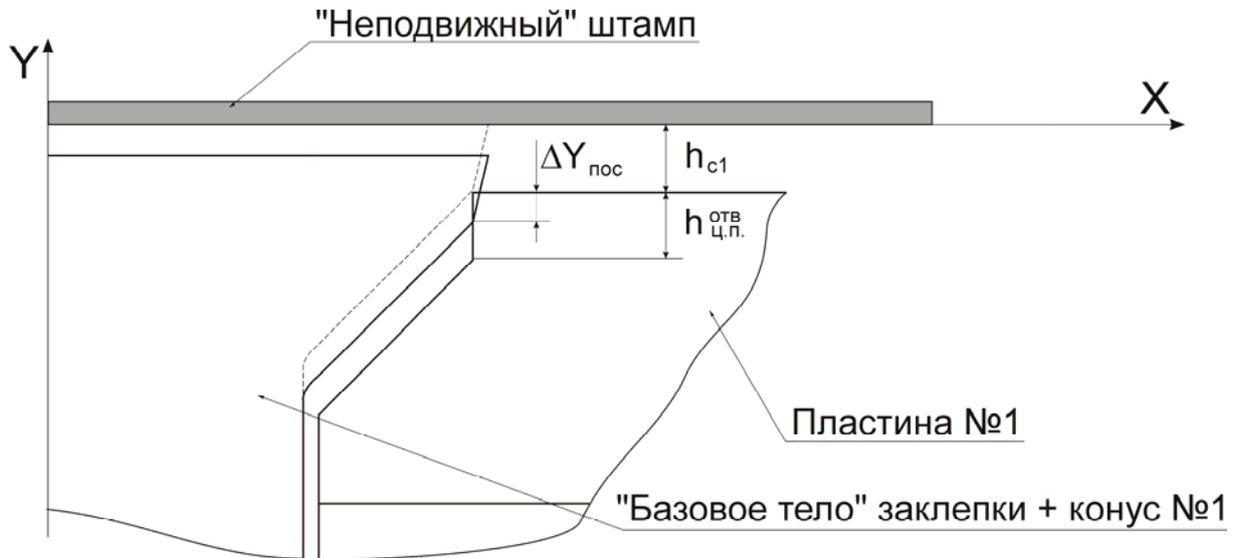


Рисунок 12 – Моделирование перемещения “неподвижного” штампа

Таблица – 4 Значения перемещения “неподвижного” штампа на этапе определения величины первоначального выступания закладной головки потайной заклепки

$\Delta Y_{\text{пос}}, \text{мм}$	0,025	0,05	0,075	0,10	0,125	0,15	0,175	0,20	0,25	0,3	0,35
------------------------------------	-------	------	-------	------	-------	------	-------	------	------	-----	------

В результате расчета были получены величины возникающих контактных давлений  $q_{\text{контакт}}$  в зоне контакта “неподвижный штамп + заклепка и пакет”.

С учетом сил трения условие равновесия между “неподвижным” штампом и заклепкой и пакетом можно записать:

$$q_{\text{контакт}}^{\text{сред}} \cdot F_{\text{контакт}} = P_{\text{устан}}, \quad (6)$$

где  $q_{\text{контакт}}^{\text{сред}}$  – осредненное значение контактного давления на площадку контакта, МПа;

–  $F_{\text{контакт}}$  – площадь зоны контакта,  $\text{мм}^2$ ;

–  $P_{\text{устан}}$  – усилие предварительной установки разрабатываемой заклепки в установочное гнездо.

Влияние  $\alpha_{\text{конус}}$  на величину и характер распределения  $P_{\text{устан}}$  при различных значениях  $\Delta Y_{\text{пос}}$  показано на рис.13.

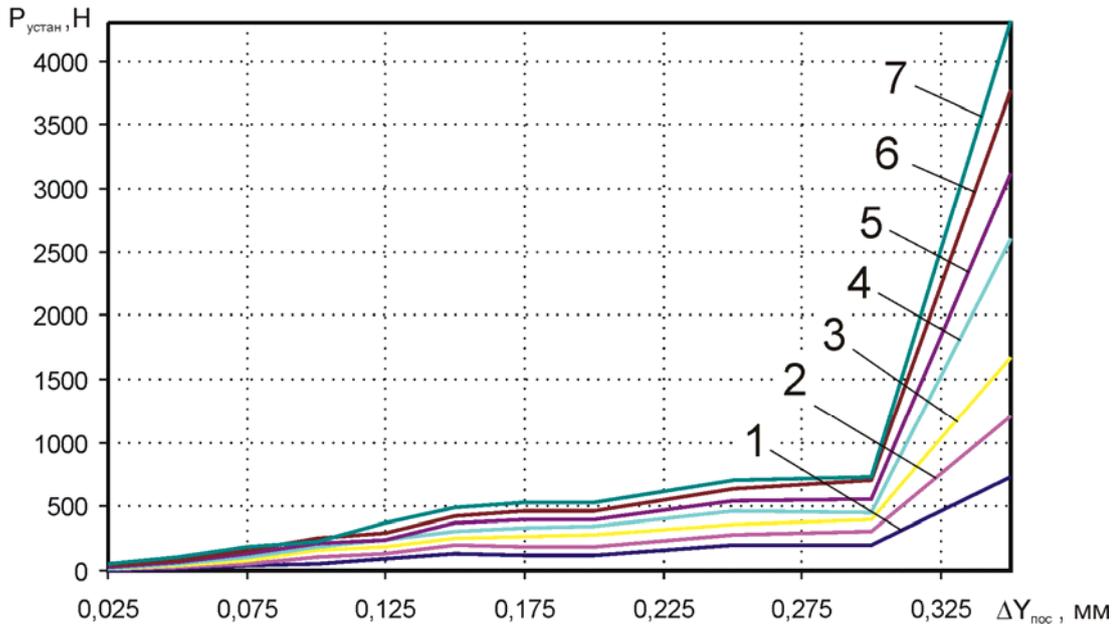


Рисунок 13 – Влияние  $\alpha_{\text{конус}}$  на величину и характер распределения  $P_{\text{устан}}$  при различных значениях  $\Delta Y_{\text{пос}}$ :

- 1 –  $\alpha_{\text{конус}} = 5^\circ$ ; 2 –  $\alpha_{\text{конус}} = 7,5^\circ$ ; 3 –  $\alpha_{\text{конус}} = 10^\circ$ ; 4 –  $\alpha_{\text{конус}} = 12,5^\circ$ ;  
 5 –  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$ ; 6 –  $\alpha_{\text{конус}} = 17,5^\circ$ ; 7 –  $\alpha_{\text{конус}} = 20^\circ$

Область  $P_{\text{устан}}(\Delta Y_{\text{пос}})$  в диапазоне  $P_{\text{устан}}$  от 0 до 200 МПа показана на рис. 14.

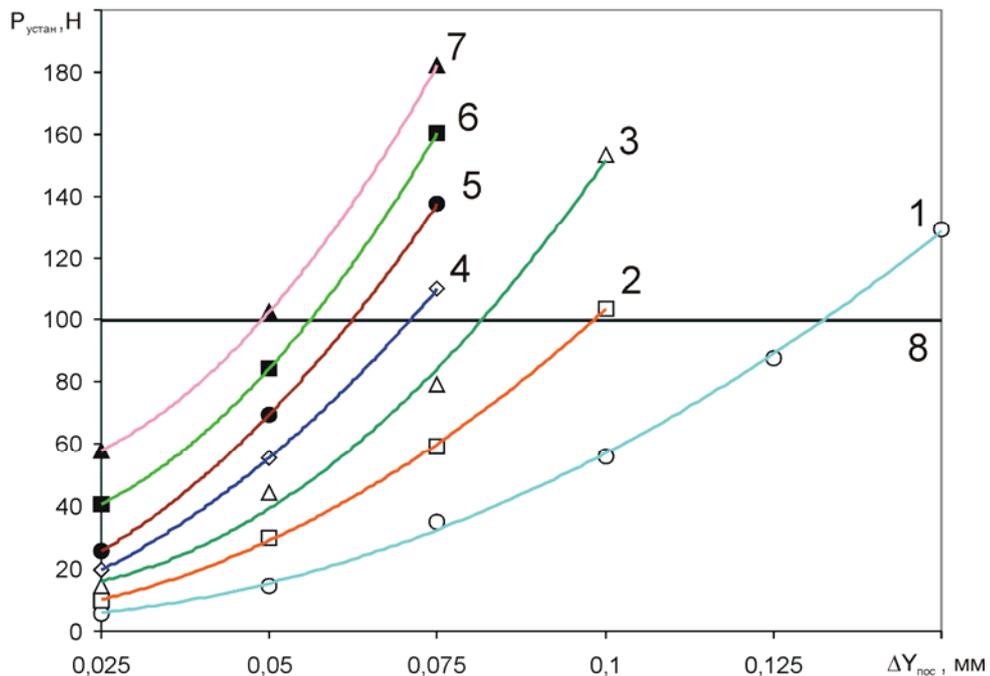


Рисунок 14 – Влияние  $\alpha_{\text{конус}}$  на величину и характер распределения  $P_{\text{устан}}$  при различных значениях  $\Delta Y_{\text{пос}}$  в диапазоне  $P_{\text{устан}}$  от 0 до 200 МПа:

- 1 –  $\alpha_{\text{конус}} = 5^\circ$ ; 2 –  $\alpha_{\text{конус}} = 7,5^\circ$ ; 3 –  $\alpha_{\text{конус}} = 10^\circ$ ; 4 –  $\alpha_{\text{конус}} = 12,5^\circ$ ;  
 5 –  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$ ; 6 –  $\alpha_{\text{конус}} = 17,5^\circ$ ; 7 –  $\alpha_{\text{конус}} = 20^\circ$ ; 8 – граничное условие по  $P_{\text{устан}}^{\text{limit}}$

Кривые зависимости  $P_{устан}(\Delta Y_{пос})$  для различных углов конусности  $\alpha_{конус}$  в указанном диапазоне получены путем аппроксимации значений  $\Delta Y_{пос}$  в рассматриваемой области полиномом второго порядка на основе метода наименьших квадратов.

Кривая 8 (см. рис. 14) является граничным условием на величину усилия предварительной установки разрабатываемой заклепки в установочное гнездо.

На этапе разработки потайной заклепки с коническим компенсатором для данного расчетного случая было принято предельное усилие установки потайной заклепки в установочное гнездо отверстия –  $P_{устан}^{limit} = 100 \text{ Н}$ .

Влияние угла конусности конуса № 1 разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором на величину предварительной посадки  $\Delta Y_{пос}^{пред}$  закладной головки потайной заклепки в установочное гнездо с учетом граничного условия на величину усилия предварительной установки  $P_{устан}^{limit} = 100 \text{ Н}$  показано на рис. 15.

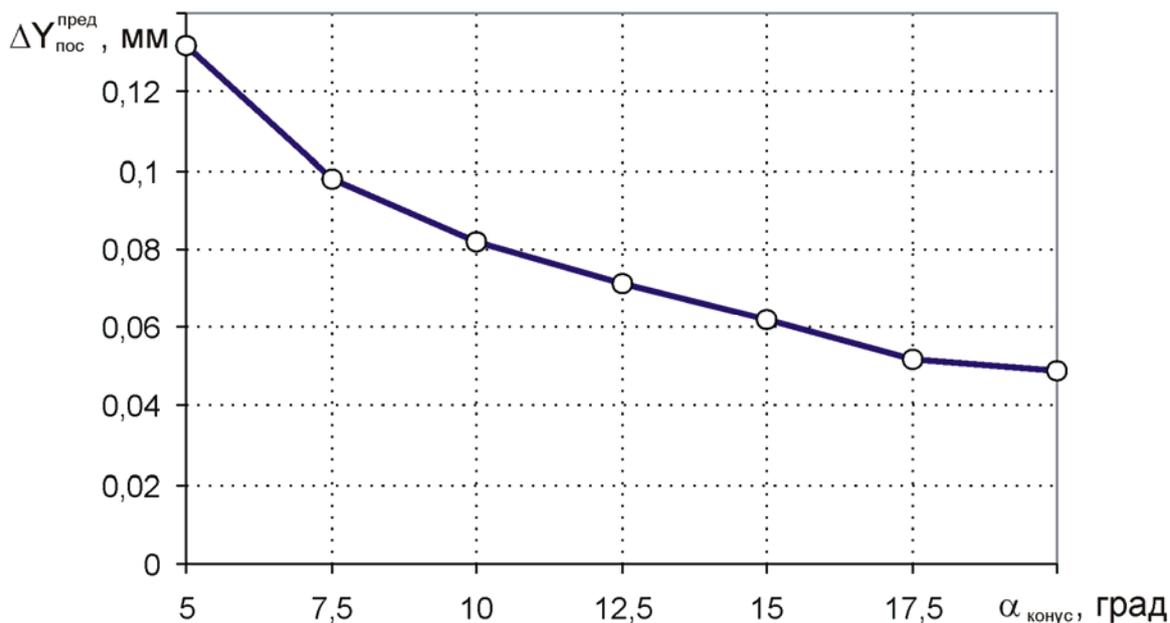


Рисунок 15 – Влияние  $\alpha_{конус}$  разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором на величины предварительной посадки  $\Delta Y_{пос}^{пред}$  закладной головки потайной заклепки в установочное гнездо с учетом граничного условия на величину усилия предварительной установки  $P_{устан}^{limit} = 100 \text{ Н}$

После определения величины предварительной посадки  $\Delta Y_{пос}^{пред}$  закладной головки разрабатываемой потайной заклепки в установочное гнездо для различных значений угла конусности  $\alpha_{конус}$  для моделирования процесса клепки заклепочного соединения была сформирована на основе расчетной схемы (см. рис. 9) конечно-элементная модель заклепочного соединения (рис. 16), включающая в себя элементы “подвижного” штампа.

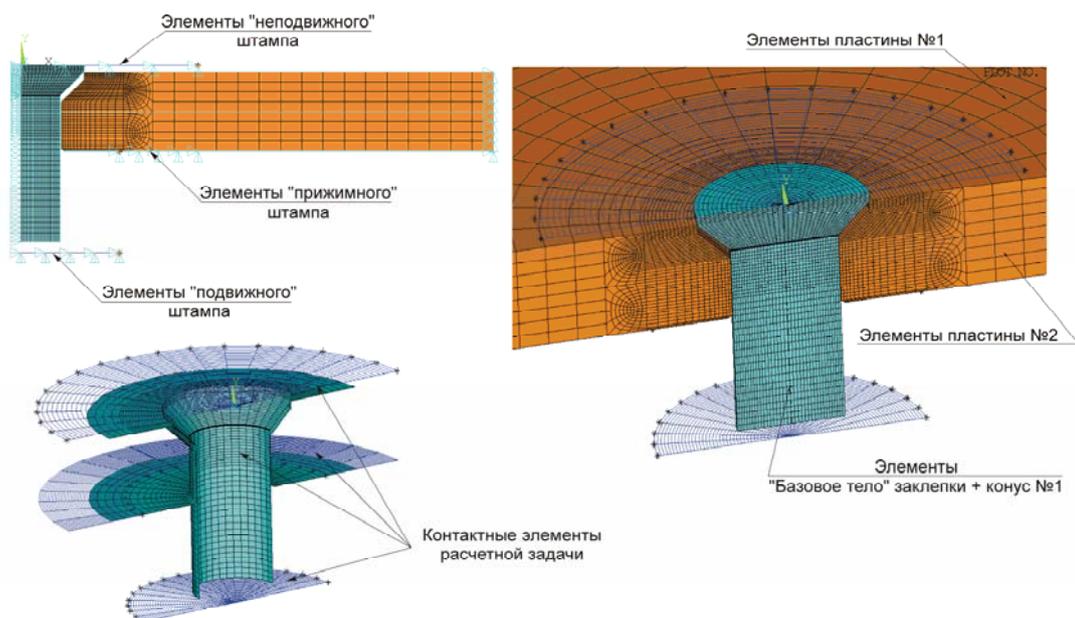


Рисунок 16 – Конечно-элементная модель заклепочного соединения, моделирующая процесс клепки потайной заклепки с коническим компенсатором

Конечно-элементная модель заклепочного соединения (см. рис. 16) состоит из плоских четырехузловых элементов PLANE 182 и контактных элементов TARGE 169 и CONTA 171 [11]. Всего модель содержит 2591 конечный элемент.

Материалы для элементов заклепки, пластин и штампов использовали те же, что и при расчете задач определения предварительной посадки разрабатываемой потайной заклепки в установочное гнездо.

С помощью сформированной конечно-элементной модели моделировался процесс установки заклепки в гнездо на величину предварительной посадки  $\Delta Y_{\text{пос}}^{\text{пред}}$  и дальнейший процесс клепки разрабатываемой потайной заклепки диаметром 4 мм с различными углами конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  путем перемещений "подвижного" штампа (рис. 17) до образования замыкающей головки заклепки высотой  $0,4d_{\text{закл}}$ , что соответствует требованиям, изложенным в ТИ 36-21-86 [9].

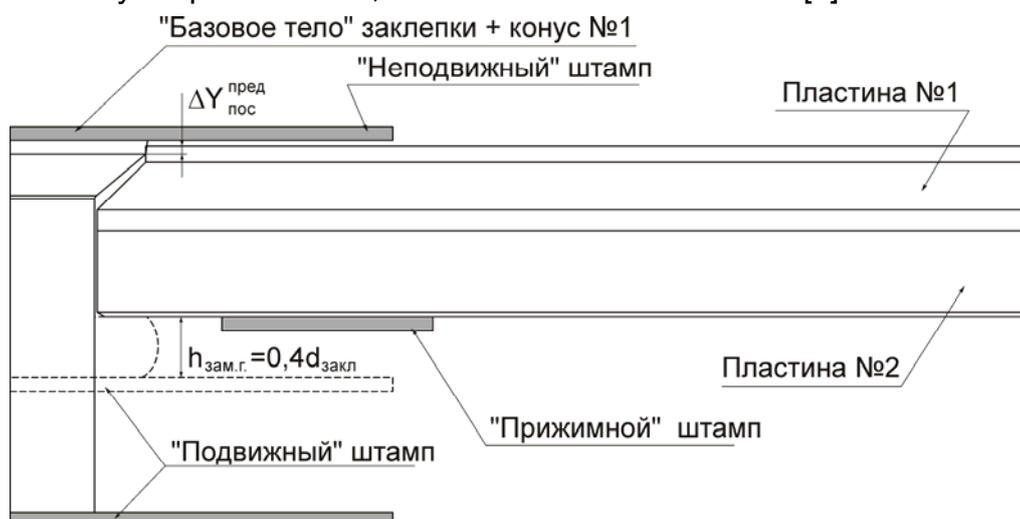


Рисунок 17 – Схема формирования замыкающей головки разрабатываемой потайной заклепки

В результате расчетов отклонение от высоты замыкающей головки разрабатываемой потайной заклепки не превышало 1,5% от требуемого значения высоты замыкающей головки согласно ТИ 36-21-86 [9].

Характер распределения радиального натяга по толщине пакета для различных углов конусности конуса №1 разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором, показан на рис. 18.

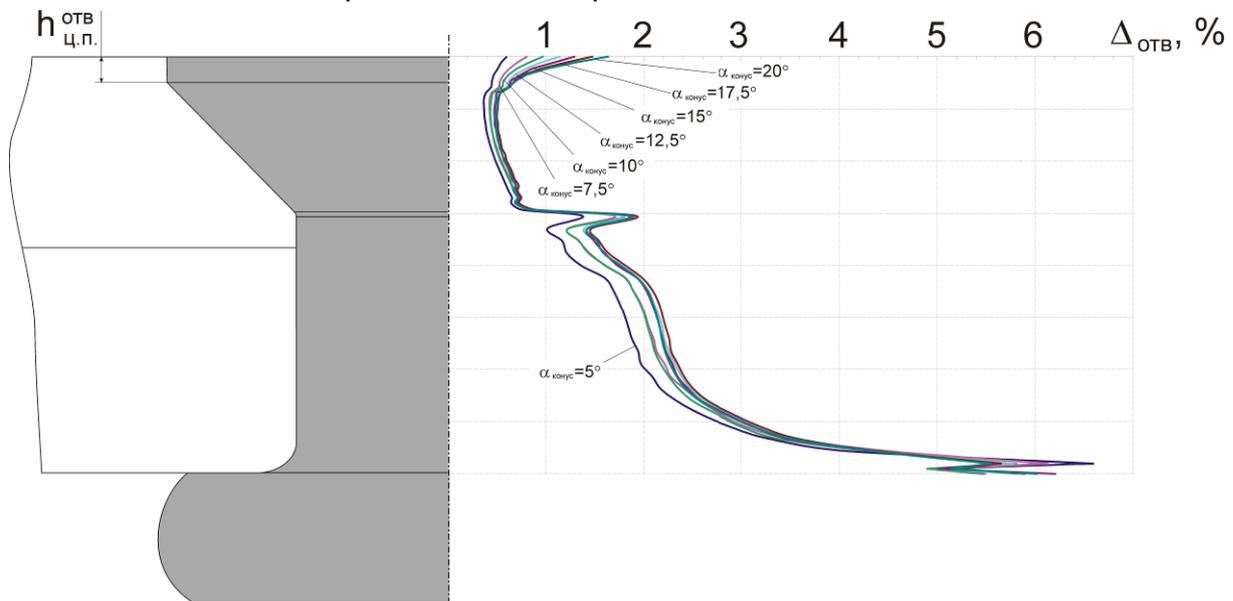


Рисунок 18 – Характер распределения радиального натяга по толщине соединяемого пакета

Характер распределения радиального натяга по высоте цилиндрической части зенкованного отверстия для различных углов конусности конуса № 1 разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором, показан на рис. 19.

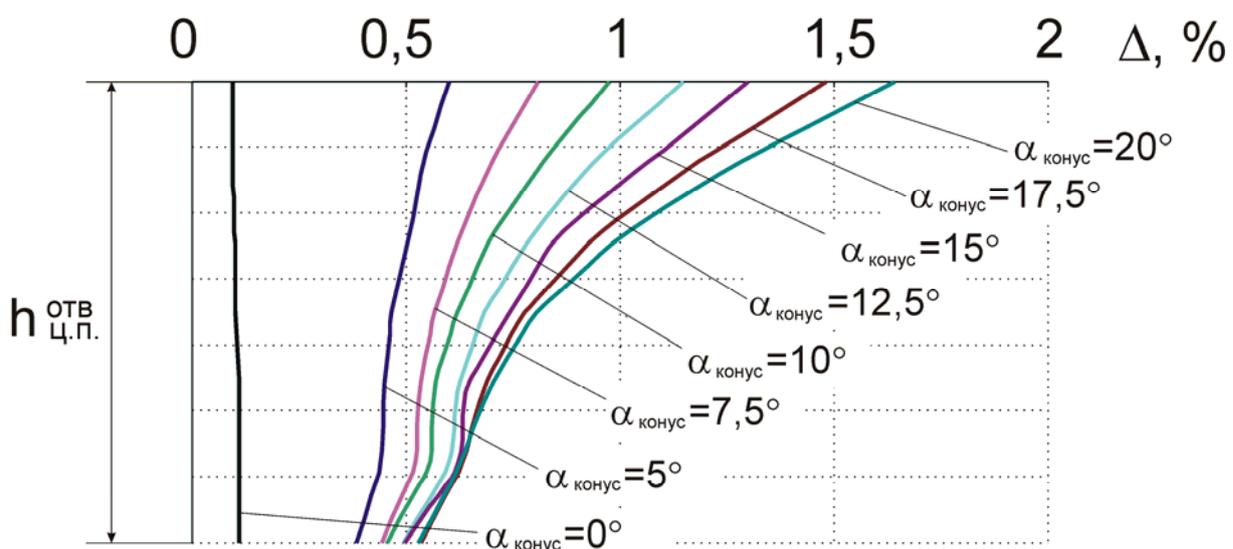


Рисунок 19 – Характер распределения радиального натяга по высоте цилиндрической части зенкованного отверстия для различных углов конусности конуса № 1

Среднюю величину выступания закладной головки  $\Delta h_{\text{ВЫСТ}}^{\text{сред}}$  разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором после клепки определяли путем вычисления разницы между осредненными значениями координат узлов торцевой поверхности закладной головки заклепки и координат узлов поверхности пакета после моделирования процесса клепки.

Максимальную величину выступания закладной головки  $\Delta h_{\text{ВЫСТ}}^{\text{max}}$  разрабатываемой потайной заклепки после клепки находили путем определения разницы между максимальным значением координат узлов торцевой поверхности закладной головки разрабатываемой потайной заклепки и минимальным значением координат узлов поверхности пакета после процесса клепки.

Влияние угла конусности на значение средней  $\Delta h_{\text{ВЫСТ}}^{\text{сред}}(\alpha_{\text{конус}})$  и максимальной  $\Delta h_{\text{ВЫСТ}}^{\text{max}}(\alpha_{\text{конус}})$  величин выступания закладной головки после процесса клепки показано на рис. 20.

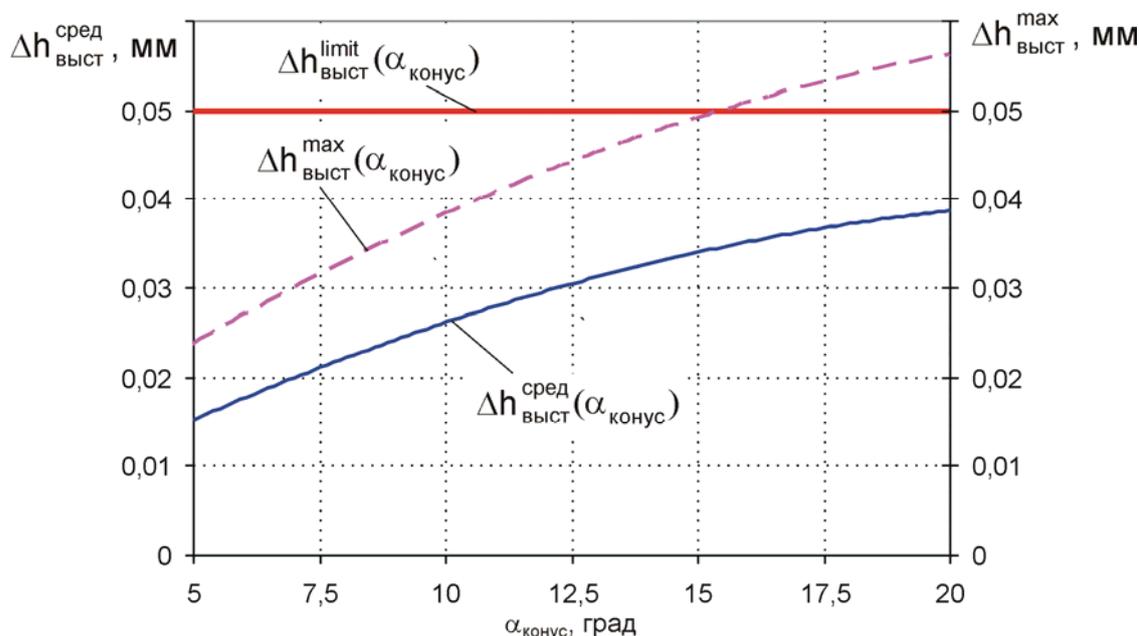


Рисунок 20 – Влияние угла конусности на значение средней и максимальной величин выступания закладной головки после процесса клепки

Кривая  $\Delta h_{\text{ВЫСТ}}^{\text{limit}}(\alpha_{\text{конус}})$  является ограничивающей кривой по величине выступания закладной головки разрабатываемой потайной заклепки.

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к высоте выступания закладной головки разрабатываемой потайной заклепки – 0,05 мм, согласно рис. 18 оптимальное значение угла конусности конуса №1 для разрабатываемой потайной заклепки в зависимости от максимального значения высоты выступания закладной головки заклепки над поверхностью пластины заклепочного соединения после клепки составило  $\alpha_{\text{конус}}^{\text{отр var 2}} = 15^\circ$ .

Конструкция разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором показана на рис. 21.

Геометрические параметры разрабатываемой потайной заклепки представлены в табл. 7.

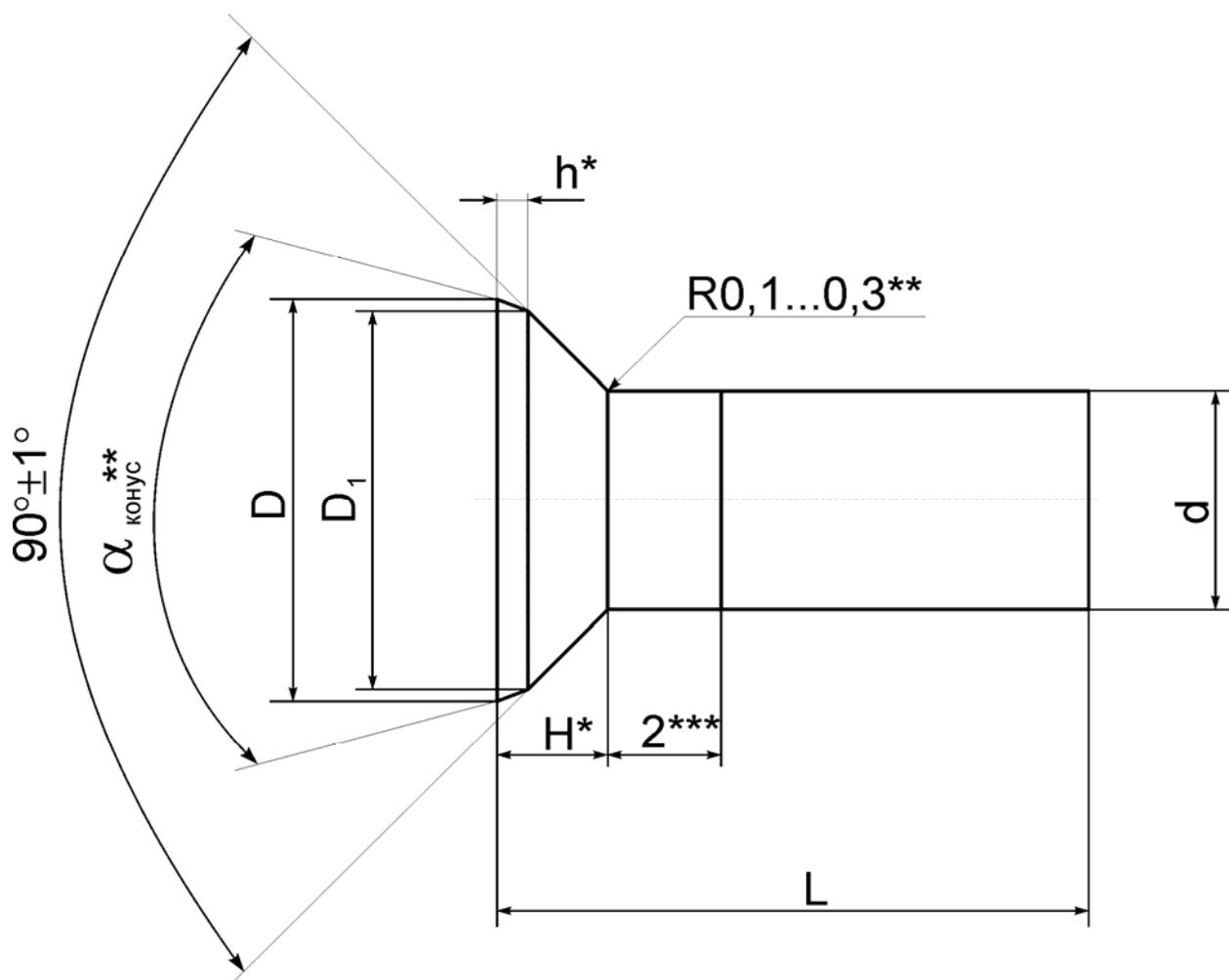


Рисунок 21 – Конструкция разрабатываемой потайной заклепки с коническим компенсатором

Таблица 7 – Геометрические параметры потайной заклепки с коническим компенсатором

d Пред. откл. +0,04	D <sub>1</sub>		α Пред. откл. ±1°	D		h +0,025	H +0,05
	Номин.	Пред. откл.		Номин.	Пред. откл.		
3,0	4,8	±0,025	15 <sup>0</sup>	4,87	±0,01	0,25	1,15
3,5	5,6		15 <sup>0</sup>	5,68		0,3	1,35
4,0	6,4		15 <sup>0</sup>	6,5		0,35	1,55
5,0	8,0		15 <sup>0</sup>	8,11		0,4	1,9
6,0	9,6	±0,03	15 <sup>0</sup>	9,73	±0,02	0,5	2,3

Характер распределения радиального натяга по толщине соединяемого пакета для заклепки с  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$  показан на рис. 22.

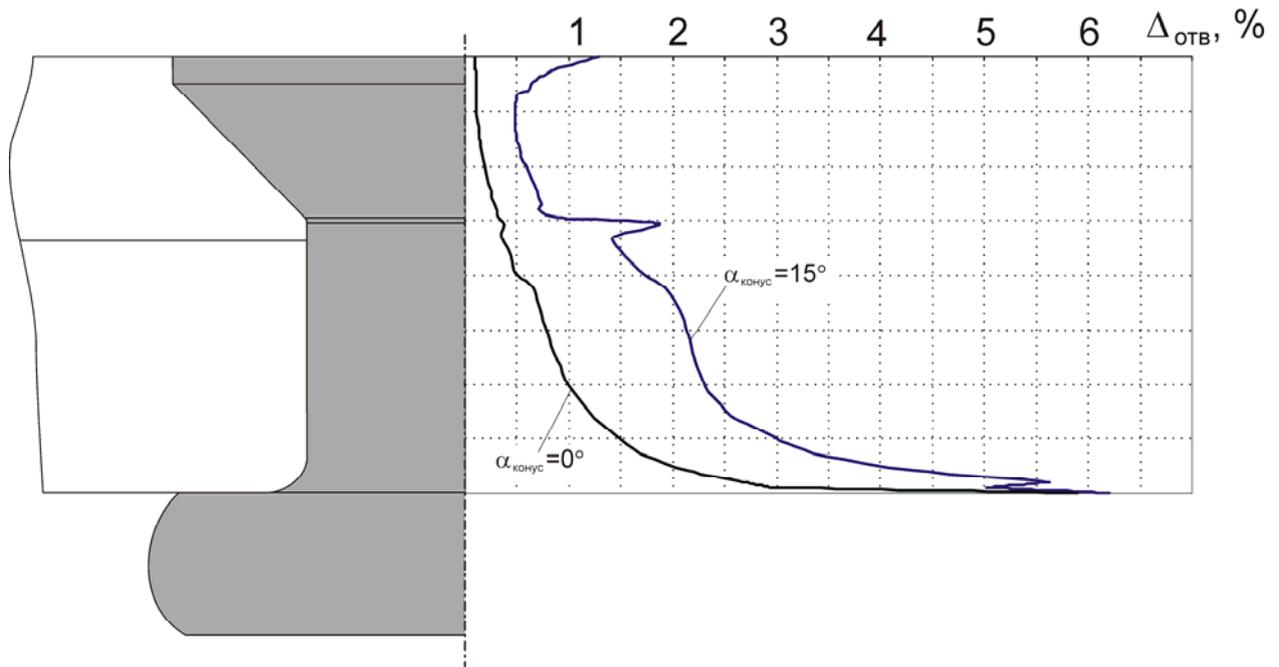


Рисунок 22 – Характер распределения радиального натяга по толщине соединяемого пакета для потайной заклепки с  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$

Характер распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  в заклепочном соединении для расчетного случая заклепки с  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$  показан на рис. 23.

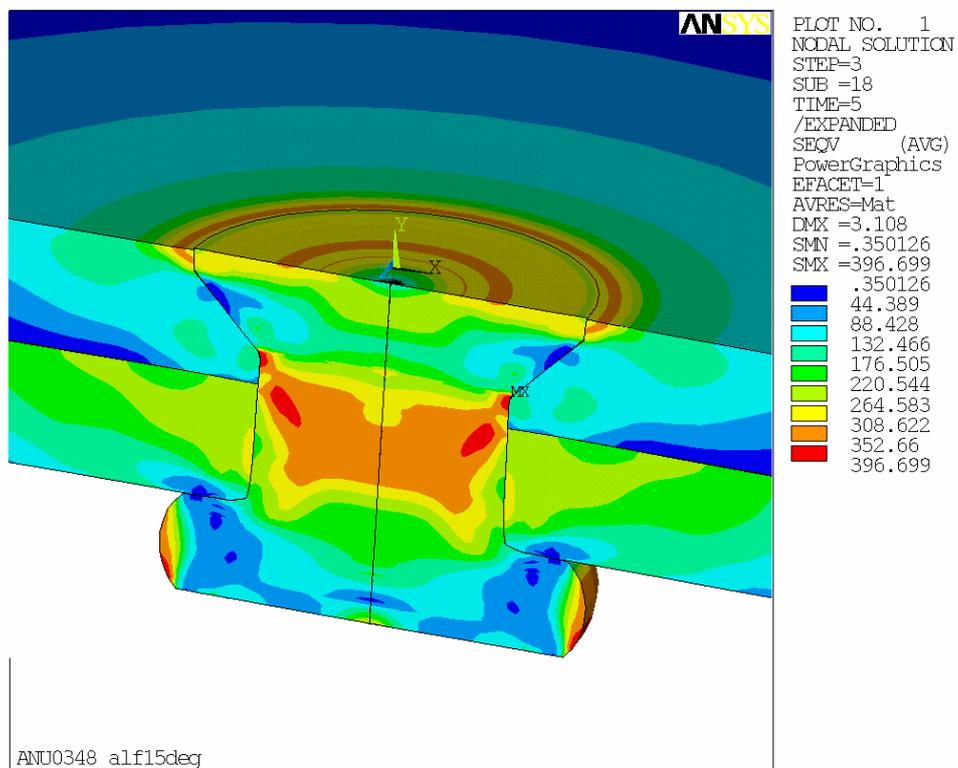


Рисунок 23 – Характер распределения эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  в заклепочном соединении для расчетного случая разрабатываемой потайной заклепки с  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$

Согласно расчетам для выбранного диапазона углов конусности  $\alpha_{\text{конус}}$  конуса № 1 добавление к цилиндрическому пояску потайной головки “базового тела” заклепки конуса с углом конусности  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$  позволило увеличить радиальный натяг в зоне цилиндрического пояска гнезда под установку закладной головки потайной заклепки по сравнению с “базовым телом” заклепки (см. рис. 23) в среднем в 7,8 раза; в зоне конического пояса закладной головки разрабатываемой потайной заклепки – в 3,2 раза; в зоне стержня заклепки, находящегося в соединяемом пакете, – в 1,55 раза.

### Выводы

1. Разработана конструкция заклепки с потайной головкой  $\angle 90^\circ$  с коническим компенсатором, обеспечивающая требуемое качество внешней поверхности крыла и удовлетворительный характер распределения радиального натяга без фрезерования закладных головок заклепок после клепки.

2. Исследовано влияние угла конусности усеченного конуса, потайной заклепки с коническим компенсатором на характер распределения радиального натяга по толщине рассматриваемого заклепочного соединения. Определено оптимальное с точки зрения КВП значение угла конусности:  $\alpha_{\text{конус}} = 15^\circ$ .

3. Показано, что разработанная конструкция потайной заклепки с коническим компенсатором обеспечивает требуемое теоретическое выступание закладных головок заклепок над поверхностью обшивки после процесса клепки (0,05 мм) и не требует последующей операции фрезерования закладных заклепок.

4. Предложен метод определения влияния геометрических параметров потайной заклепки с коническим компенсатором на КВП и распределение радиального натяга по толщине соединяемого пакета с учетом величины предварительной установки заклепки с коническим компенсатором в потайное гнездо.

### Список литературы

1. Авиационные материалы: справочник – т.4, ч.1/ – М.:ОНТИ, 1982 – 627 с.
2. Авиационный технический справочник – изд. 2-е / В.Г. Александров, А.В. Майоров – М.; Транспорт, 1975. – 430 с.
3. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций/ А.Г. Гребеников. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006 – 532 с.
4. ОСТ 1 34052-85. Заклепки с потайной головкой  $\angle 90^\circ$  с корончатым компенсатором.
5. ОСТ 1 34055-92. Заклепки с потайной головкой  $\angle 90^\circ$  с цилиндрическим компенсатором.
6. ОСТ 1 340102-80. Диаметры отверстий под заклепки, размеры замыкающих головок и подбор длины.
7. ПИ 249-78. Клепка металлических конструкций заклепками по ГОСТ 14797-75 – ГОСТ 14803 75. – М.: НИАТ, 1978. – 52 с.
8. Проведение исследования по определению эффективности экономии топлива за счет совершенствования качества внешней поверхности.: Отчет о НИР (заключительный)/ № 1.01.04.26х.– М., 1983
9. ТИ 36-21-86. Выполнение высокоресурсных герметичных соединений заклепками с компенсатором. – К.: КМЗ, 1986, – 15 с.
10. ANSYS: Справочник пользователя. / Басов К.А. – М.:ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
11. ANSYS Analysis Guide. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear structural analysis. 001087. 4th Edition. SAS IP©.

## **Исследование влияния конструктивных параметров на характеристики локального НДС при растяжении пластины с функциональным отверстием**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Анализ конструкций с использованием метода конечных элементов (МКЭ) является в настоящее время фактически мировым стандартом для прочностных и других видов расчета конструкций. Основой этого служит универсальность МКЭ, позволяющая единым способом рассчитывать различные конструкции с разными свойствами материалов.

Система NASTRAN предназначена для решений широкого спектра задач, связанных с расчетом долговечности элементов конструкции; оптимизации конструкции; расчетом на прочность конструкций, подверженных статическим и динамическим нагрузкам; расчетом тепловых воздействий; расчетом на устойчивость, а также для решения контактных задач.

В работе [1] проанализировано влияние конструктивных параметров пластины с различным типом отверстий на коэффициент концентрации напряжений, однако необходимо определить влияние параметров пластины с отверстием на коэффициент концентрации деформаций и удельную энергию деформирования, которые являются также важными характеристиками для прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций [3].

Целью данной работы является анализ характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) пластины с функциональным отверстием различных типов (цилиндрическим, цилиндроконическим, цилиндроконическим пояском).

Для расчета НДС пластины с отверстием система NASTRAN позволяет применить такую последовательность действий:

1. Разработка физической модели элемента конструкции и её материала.
2. Разработка конечно-элементной модели пластины с отверстием.
3. Приложение внешней нагрузки к элементу конструкции и задание граничных условий.
4. Расчет характеристик локального НДС элемента конструкции.
5. Анализ характеристик локального НДС элемента конструкции ( $k_\sigma$  – коэффициент концентрации напряжений (брутто);  $k_\varepsilon$  – коэффициент концентрации деформаций (брутто);  $\sigma \times \varepsilon$  – удельная энергия деформирования) и их графическое представление.

### **Разработка физической модели пластины с функциональным отверстием**

Модель пластины с отверстием, нагруженной растягивающими усилиями, показана на рис.1.

В силу симметрии пластины математическую модель, которая будет применяться для конечно-элементного анализа, можно представить в виде, изображенном на рис.2.

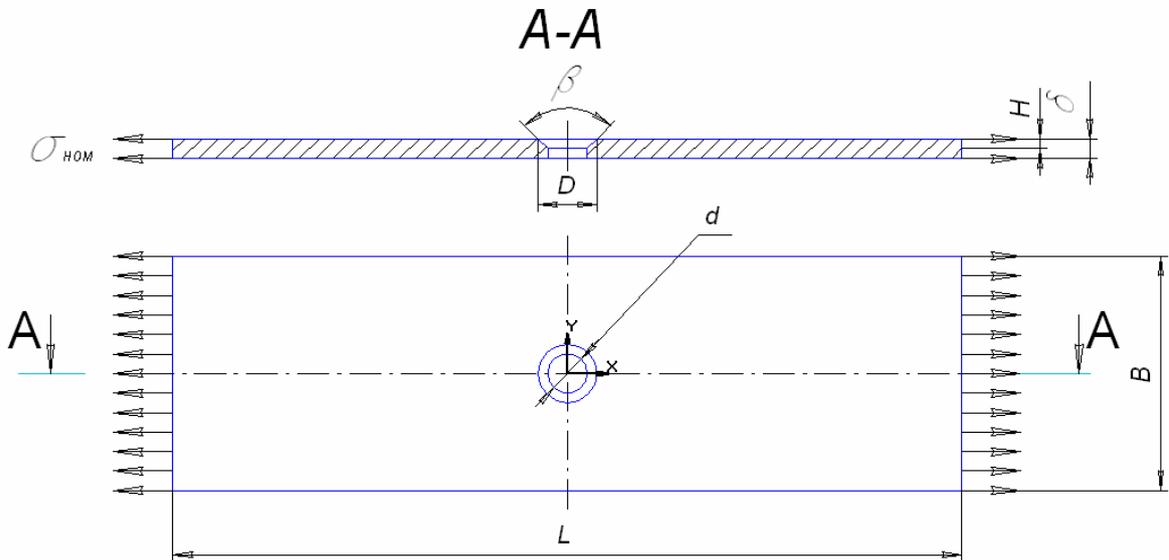


Рисунок 1 - Модель пластины с отверстием цилиндрического типа

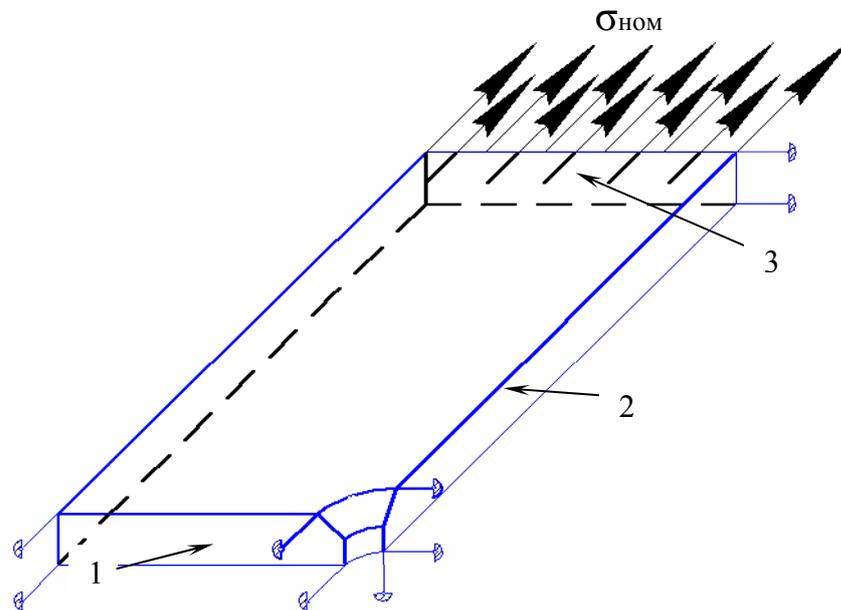


Рисунок 2 - Эквивалентная модель пластины для расчета НДС

Для определения физического закона деформирования создана твердотельная модель пластины. Материал пластины - сплав 1163АТ. Механические характеристики материала приведены в таблице.

$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{пц}$ , МПа	E, МПа	$\mu$	G, МПа
430	300	265	72000	0,3	27000

Диаграмма растяжения сплава 1163АТ показана на рис.3:

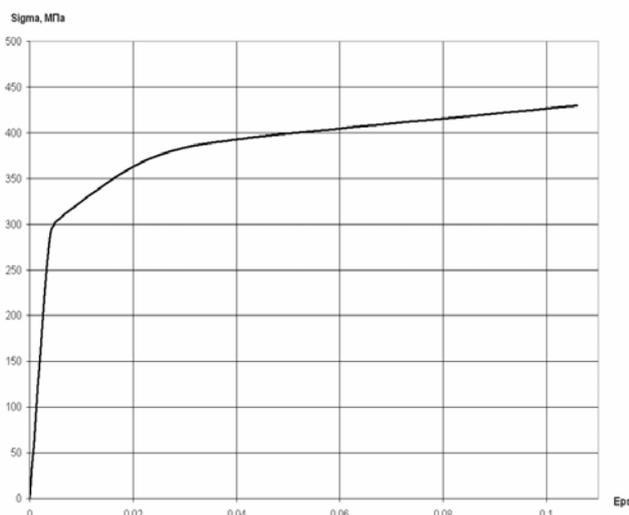


Рисунок 3 - Диаграмма растяжения сплава 1163 АТ

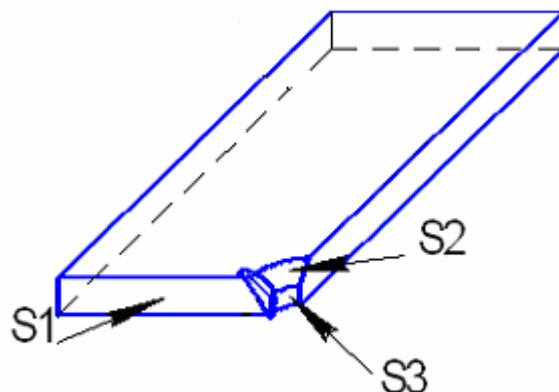


Рисунок 4 - Зона максимальных напряжений пластины

### Разработка конечно-элементной модели пластины с функциональным отверстием

Исходя из построенной геометрической модели рассматриваемой пластины и основываясь на экспериментальных данных, допустим, что зона максимальных напряжений находится на образующей отверстия, как показано на рис.4.

Так как выбор типов конечных элементов (КЭ) и их плотности разбиения оказывает значительное влияние на точность аппроксимации поля напряжений и потребляемое процессорное время, то целесообразно увеличить плотность разбиения на поверхностях, граничащих с зоной максимальной концентрации напряжений (поверхности S1, S2, S3 - см. рис.4) [2].

Выберем тип разбиения на конечные элементы **HEX MESHING** (гексаэдральный тип КЭ) и размер конечных элементов в зоне концентрации напряжений 0,25 мм (рис. 5).

### Приложение нагрузок к элементу конструкции и граничные условия

Необходимо задать кинематические и статические граничные условия с учетом симметрии данной задачи.

Для задания граничных условий воспользуемся расчетной схемой, изображенной на рис.2.

Наложим связи на поверхности 1 и 2, а к поверхности 3 приложим нормальную нагрузку, равную  $\sigma_{норм}$  (рис. 6).

В результате построения конечно-элементной модели пластины с отверстием, приложения всех граничных условий модель готова для выполнения расчета характеристик локального НДС.

Выберем тип расчета **NONLINEAR STATIC** (нелинейный статический расчет), исходя из статического характера прикладываемой нагрузки и нелинейности поведения материала.

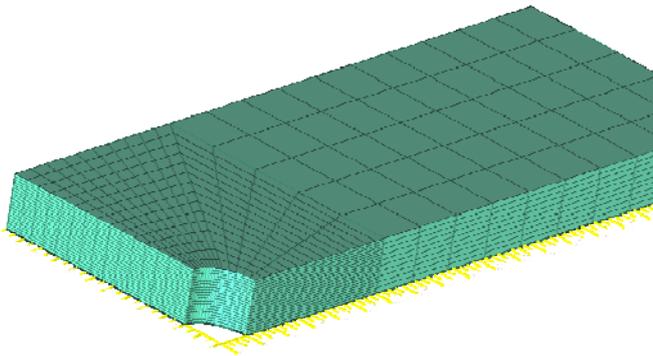


Рисунок 5 - Конечно-элементная модель пластины с отверстием

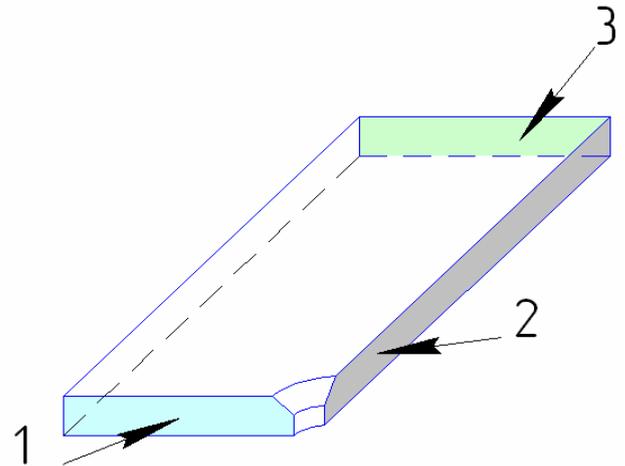


Рисунок 6 - Поверхности, необходимые для задания граничных условий

В результате расчета можно оценить значение коэффициентов концентрации напряжений и деформаций в зоне отверстия, которые определяются по следующим формулам:

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{экв}}}{\sigma_{\text{ном}}}, k_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{экв}}}{(\sigma_{\text{ном}}/E)}, \text{ где}$$

$E$  - модуль упругости материала пластины;  $\sigma_{\text{экв}}$  - эквивалентные локальные напряжения в зоне отверстия;  $\varepsilon_{\text{экв}}$  - эквивалентные локальные деформации в зоне отверстия;  $\sigma_{\text{ном}}$  - напряжения брутто в сечении.

Определим характеристики локального НДС для следующих вариантов исполнения отверстий по изложенному выше алгоритму:

- 1) цилиндрическое отверстие;
- 2) цилиндроконическое отверстие;
- 3) цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском;

Проведем анализ влияния следующих параметров на характеристики локального НДС пластины с отверстием:

- отношения  $B/d$  пластины с цилиндрическим отверстием;
- величин номинального напряжения  $\sigma_{\text{бр}}$ ;
- углов зенковки  $\beta$  отверстия пластины;
- глубин зенковки  $H$  пластины с цилиндроконическим отверстием;

- диаметра цилиндрического пояса для третьего варианта исполнения отверстия.

### Исследование влияния отношения $B/d$ пластины с цилиндрическим отверстием на характеристики локального НДС

Исходные данные:

$L = 200$  мм;  $B = 60$  мм;  $\delta = 5$  мм;  $B/d = 2...7$ ;  $\sigma_{\text{НОМ}} = 50...200$  МПа.

Поварьируем параметр  $d$  (диаметр отверстия), при постоянной толщине пластины  $B$  для цилиндрического отверстия.

Обработав результаты расчетов, построим графики зависимости величин характеристик локального НДС  $k_\varepsilon$ ,  $k_\sigma$ ,  $\sigma_{\text{хэ}}$  от отношения  $B/d$  и от величины нагрузки (рис. 7 – 9 соответственно).

Проанализировав данные, полученные при расчете, можно сделать вывод: при увеличении отношения  $B/d$  от 2 до 7 при  $\sigma_{\text{НОМ}}=100$  МПа  $k_\sigma$  уменьшается от 3,22 до 3,05,  $k_\varepsilon$  уменьшается от 5,61 до 2,89,  $\sigma_{\text{хэ}}$  уменьшается от 2,51 до 1,21.

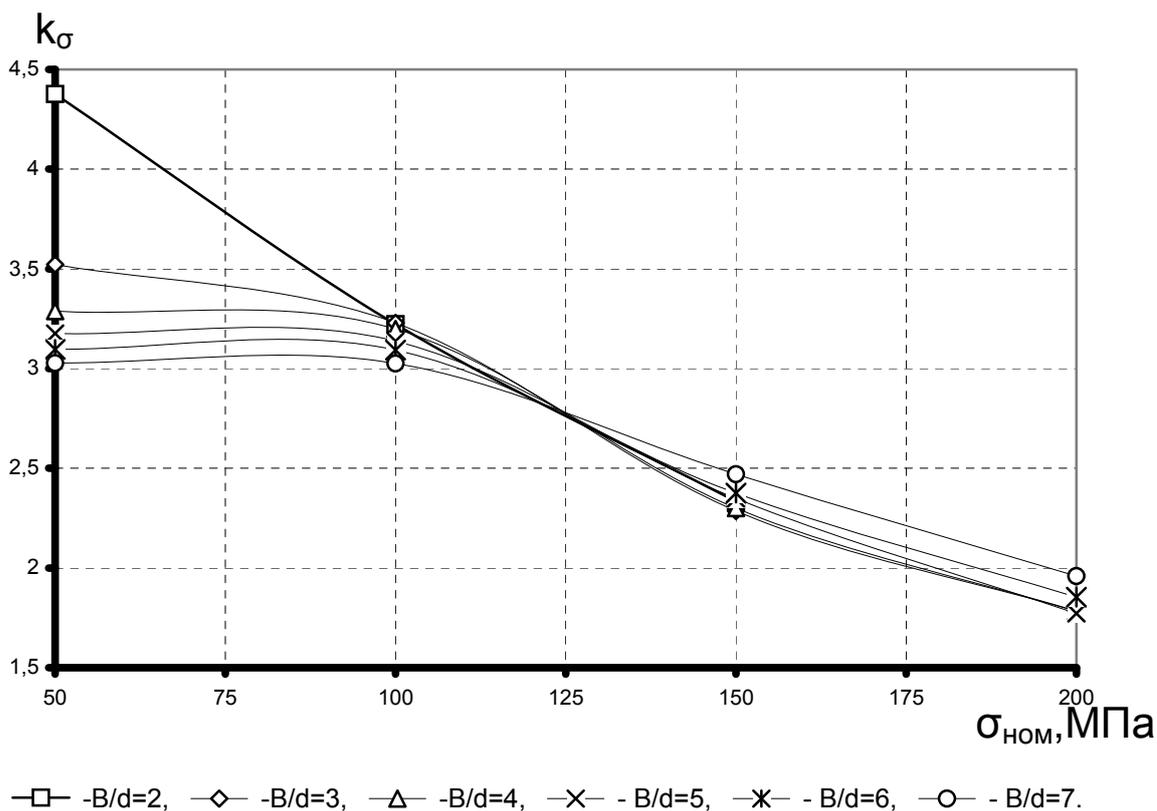


Рисунок 7 - Влияние уровня нагружения и отношения  $B/d$  на коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$

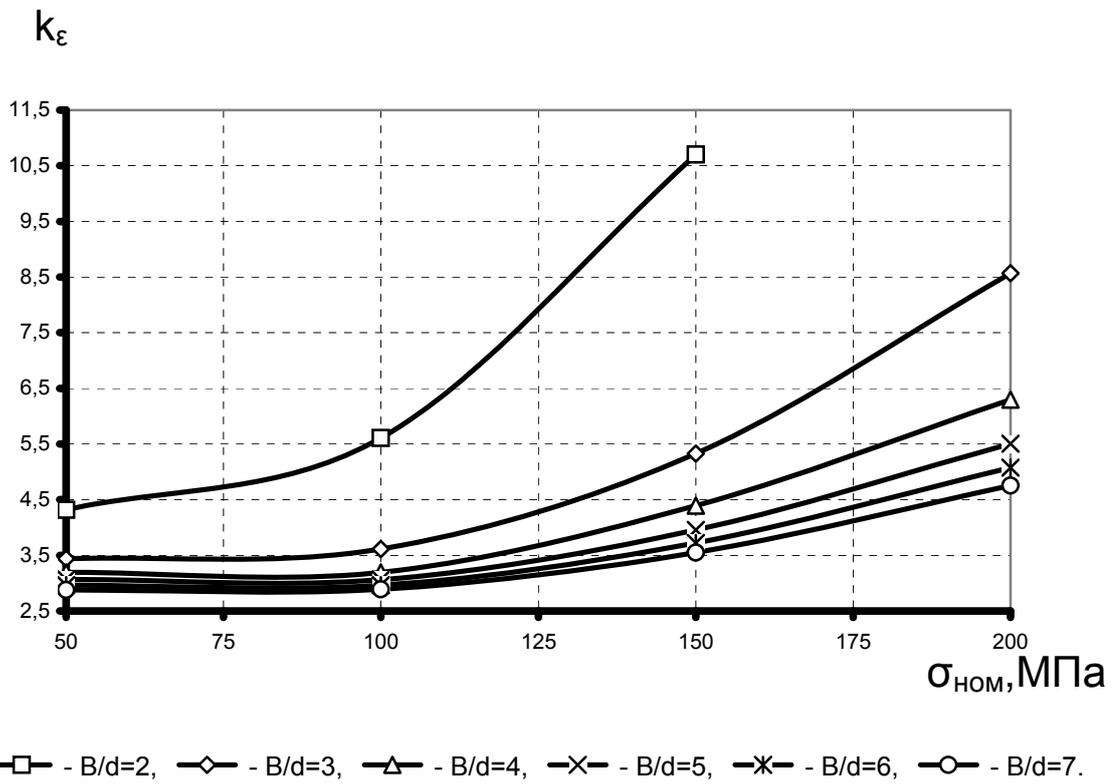


Рисунок 8 - Влияние уровня нагружения и отношения  $B/d$  на коэффициент концентрации деформаций  $k_\epsilon$

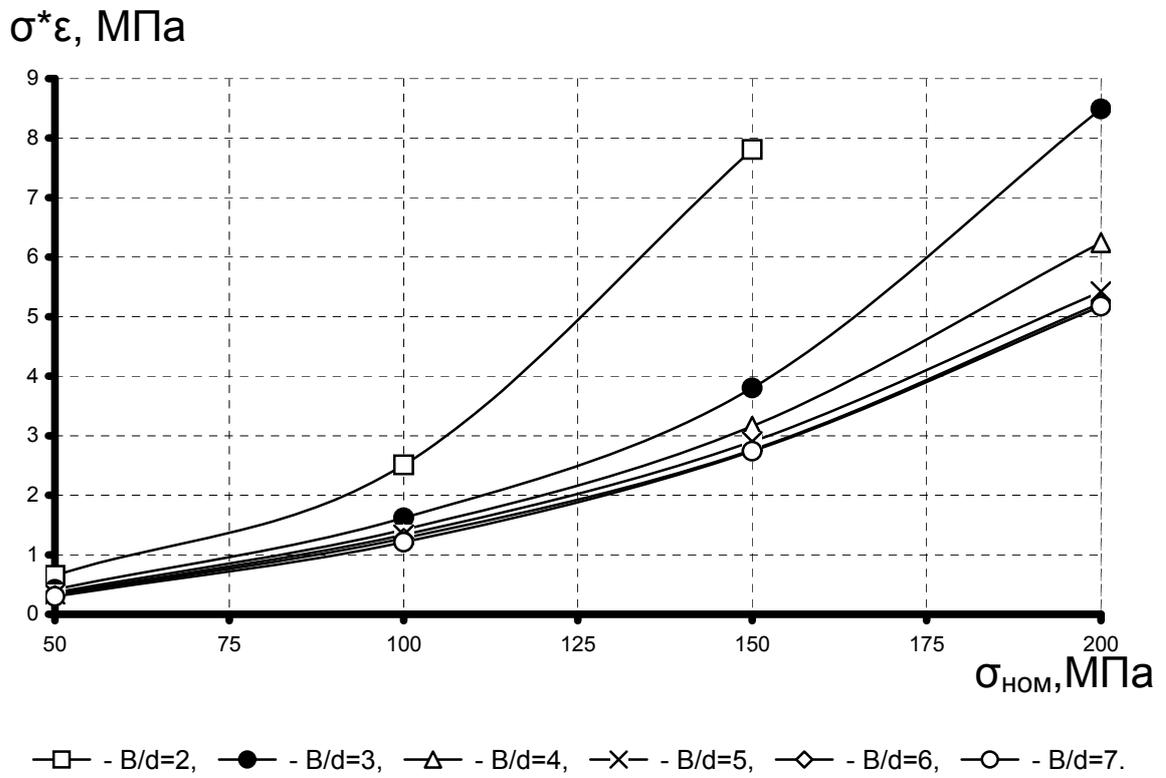


Рисунок 9 - Влияние уровня нагружения и отношения  $B/d$  на удельную энергию деформирования  $\sigma^*\epsilon$

## Исследование влияния величины номинального напряжения на характеристики локального НДС пластины с отверстием

Исходные данные:

$L = 200 \text{ мм}$ ;  $B = 60 \text{ мм}$ ;  $\delta = 5 \text{ мм}$ ;  $B/d = 6$ ;  $D = 12 \text{ мм}$ ;  $\beta = 90^\circ$ ;  $\sigma_{\text{ном}} = 50 \dots 200 \text{ МПа}$ .

Рассмотрим три случая – пластина с цилиндрическим отверстием, пластина с цилиндроконическим отверстием, пластина с цилиндроконическим отверстием с цилиндрическим пояском.

Модель пластины с различным типом отверстий, конечно-элементная модель и характер распределения нормальных напряжений показаны на рис. 10 а, б, в- 12 а, б, в.

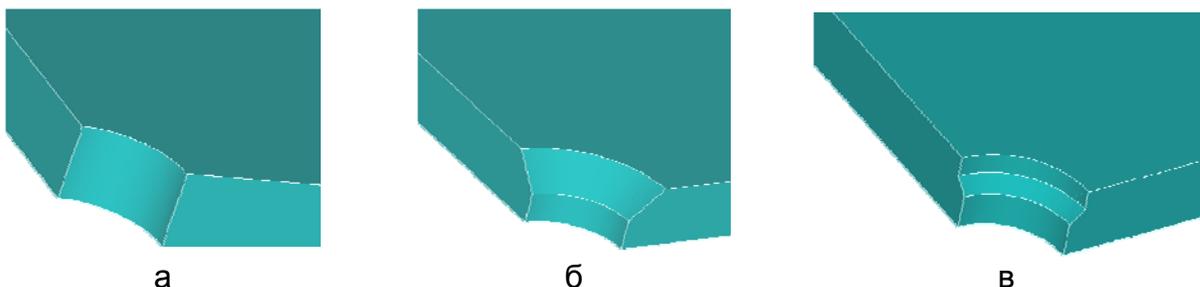


Рисунок 10 - Варианты исполнения отверстий: а - 1-й тип(цилиндрическое отверстие); б - 2-й тип (цилиндроконическое отверстие); в - 3-й тип (цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском)

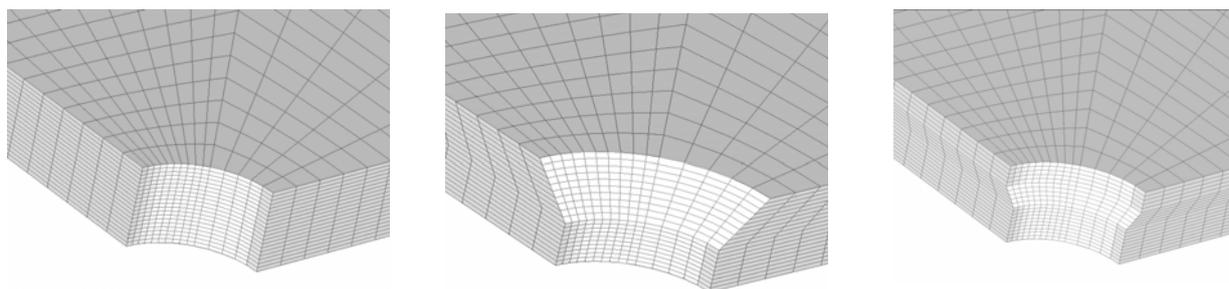


Рисунок 11 - Конечно-элементная модель пластины с отверстием: а - 1-й тип(цилиндрическое отверстие); б - 2-й тип (цилиндроконическое отверстие); в - 3-й тип (цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском)

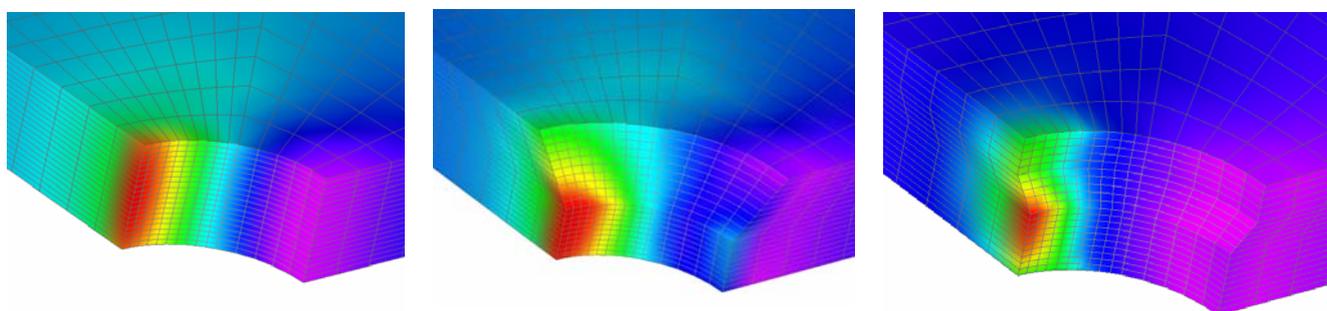


Рисунок 12 - Характер распределения нормальных напряжений в пластине с отверстием при  $\sigma_{\text{ном}}=100 \text{ МПа}$ : а - 1-й тип(цилиндрическое отверстие); б - 2-й тип (цилиндроконическое отверстие); в - 3-й тип (цилиндроконическое отверстие с цилиндрическим пояском)

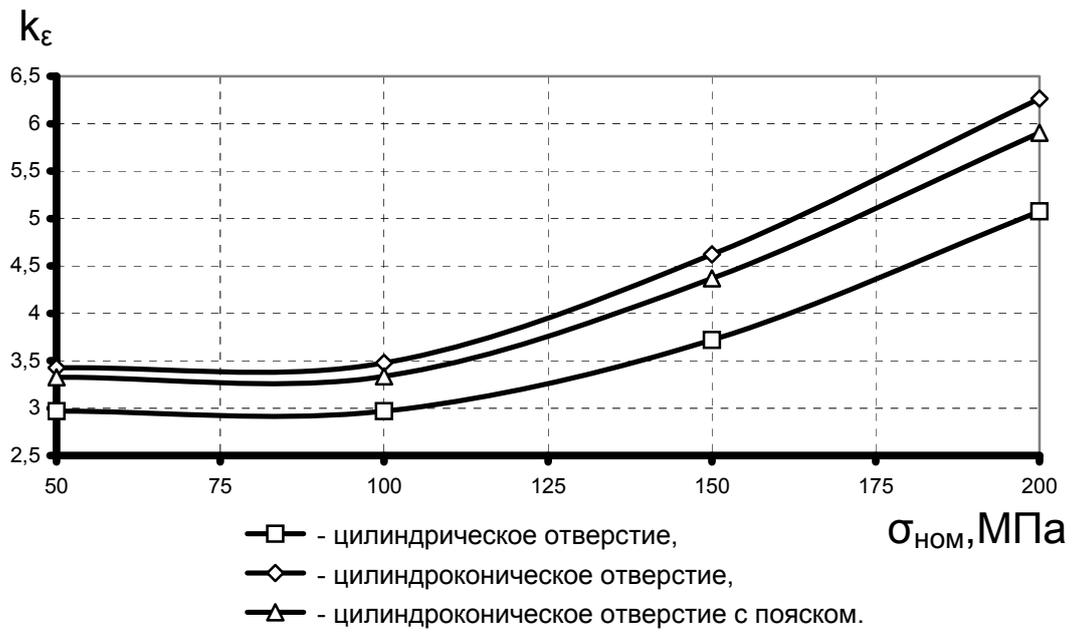


Рисунок 13 - Влияние уровня нагружения и типа отверстия на коэффициент концентрации деформаций  $k_\epsilon$

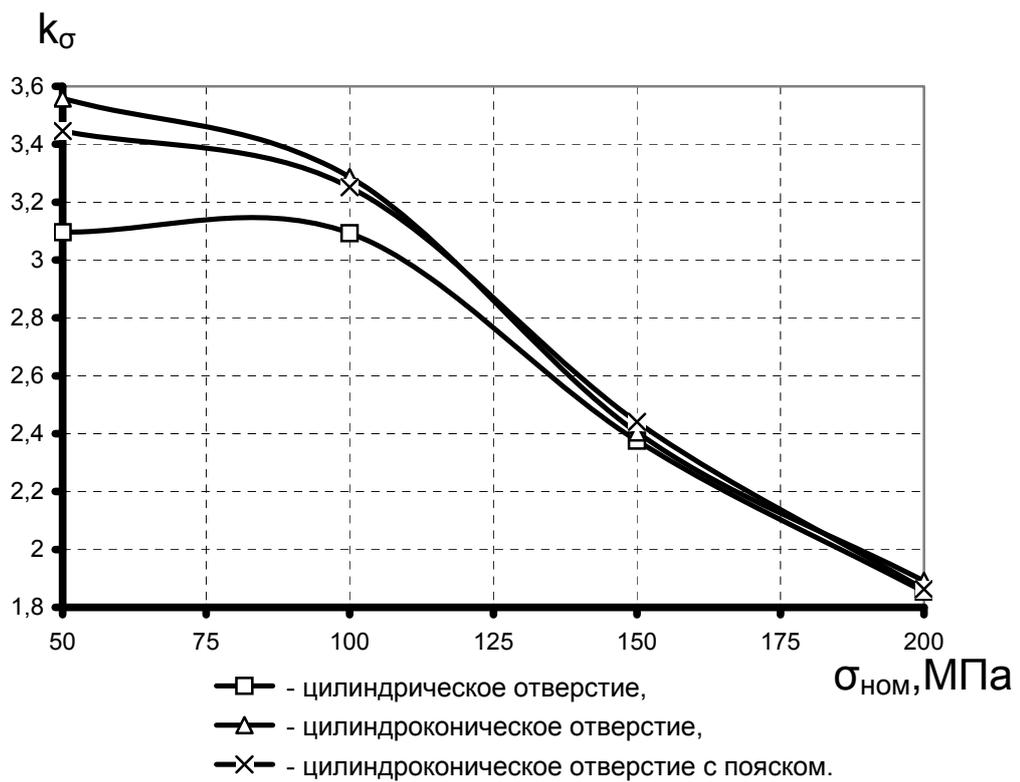


Рисунок 14 - Влияние уровня нагружения и типа отверстия на коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$

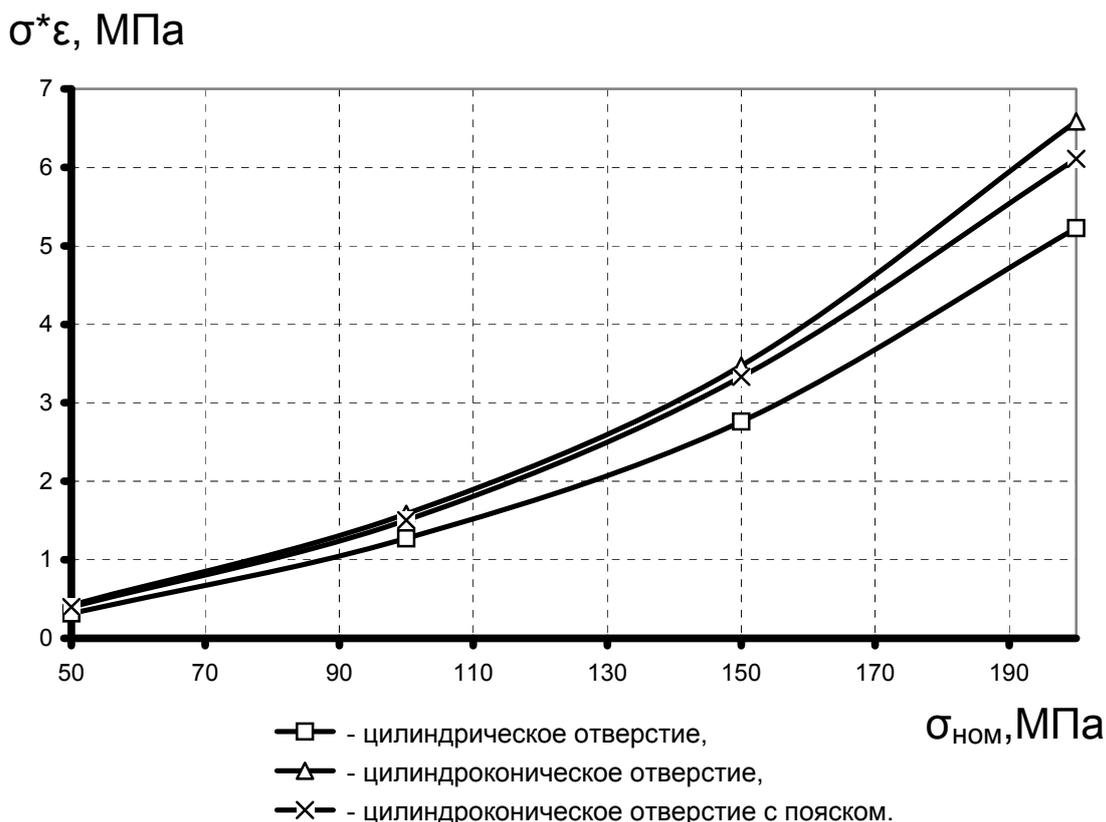


Рисунок 15 - Влияние уровня нагружения и типа отверстия на удельную энергию деформирования  $\sigma^*\epsilon$

По результатам расчетов, построены графики зависимости величин характеристик локального НДС  $k_\epsilon$ ,  $k_\sigma$ ,  $\sigma^*\epsilon$  от величины  $\sigma_{НОМ}$  во всех трех случаях (рис. 13 – 15 соответственно).

Проанализировав данные, полученные при расчете, можно сделать вывод: при увеличении уровня нагружения от 50 до 200 МПа в цилиндрическом отверстии  $k_\sigma$  уменьшается от 3,096 до 1,854,  $k_\epsilon$  увеличивается от 2,966 до 5,076,  $\sigma^*\epsilon$  увеличивается от 0,32 до 5,23; в цилиндрикоконическом отверстии  $k_\sigma$  уменьшается от 3,558 до 1,892,  $k_\epsilon$  увеличивается от 3,427 до 6,264,  $\sigma^*\epsilon$  увеличивается от 0,423 до 6,584; в цилиндрикоконическом отверстии с пояском  $k_\sigma$  уменьшается от 3,446 до 1,863,  $k_\epsilon$  увеличивается от 3,326 до 5,904,  $\sigma^*\epsilon$  увеличивается от 0,398 до 6,109.

### Исследование влияния глубины зенковки на характеристики локального НДС пластины с цилиндрикоконическим отверстием

Задачей данного расчета является нахождение величины оптимальной глубины зенковки.

Исходные данные

$L = 200$  мм;  $B = 60$  мм;  $d = 10$  мм;  $\delta = 5$  мм;  $\beta = 90^\circ$ ;  $H = 0 \dots 3.5$  мм.

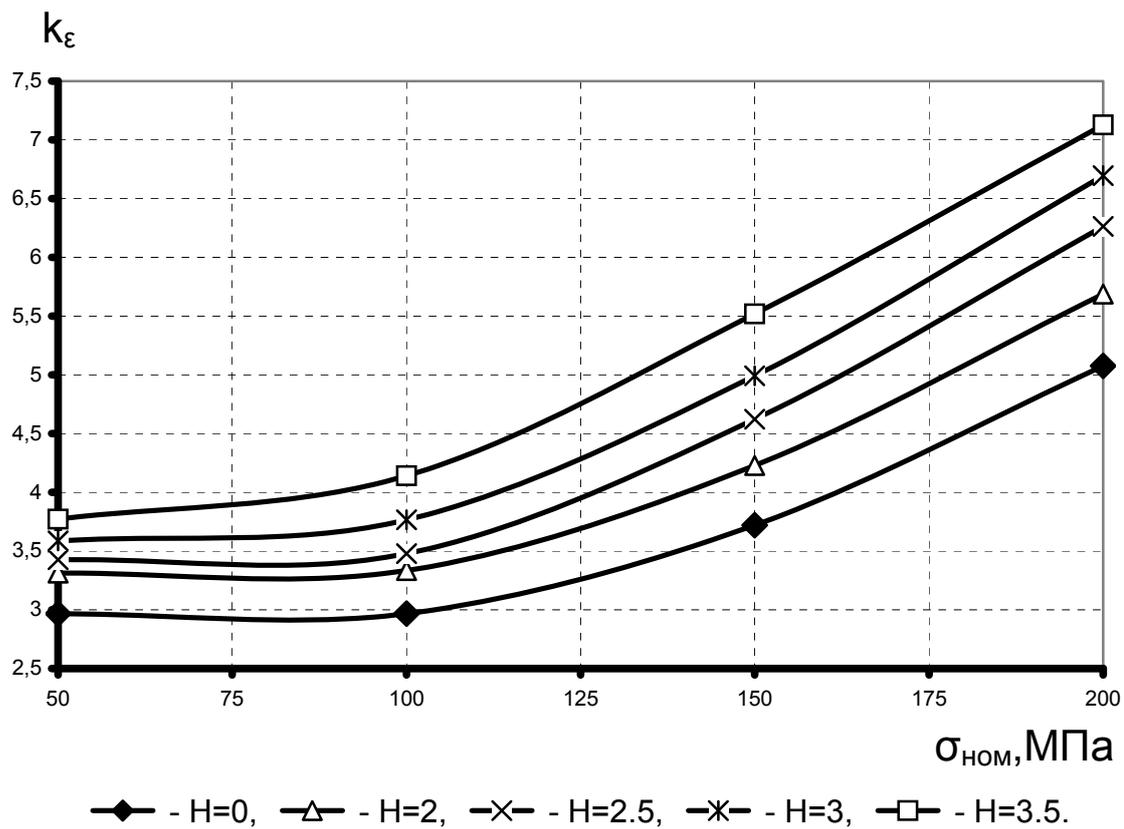


Рисунок 16 - Влияние уровня нагружения и глубины зенковки на коэффициент концентрации деформаций  $k_\epsilon$

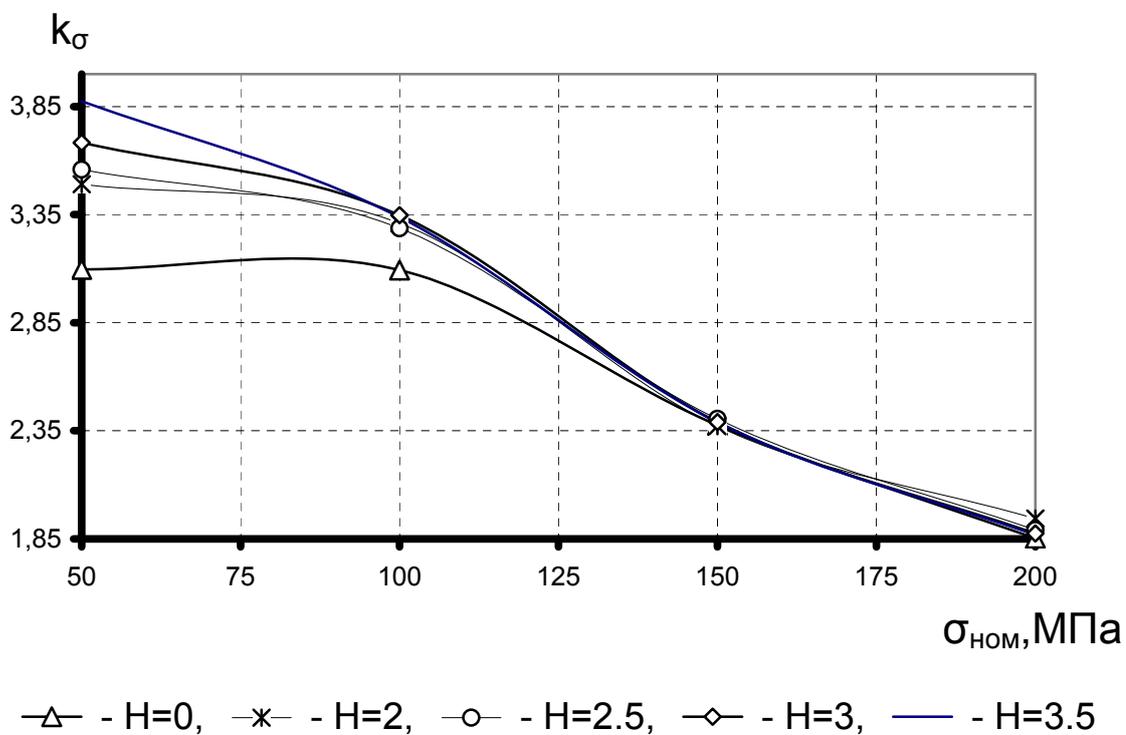


Рисунок 17 - Влияние уровня нагружения и глубины зенковки на коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$

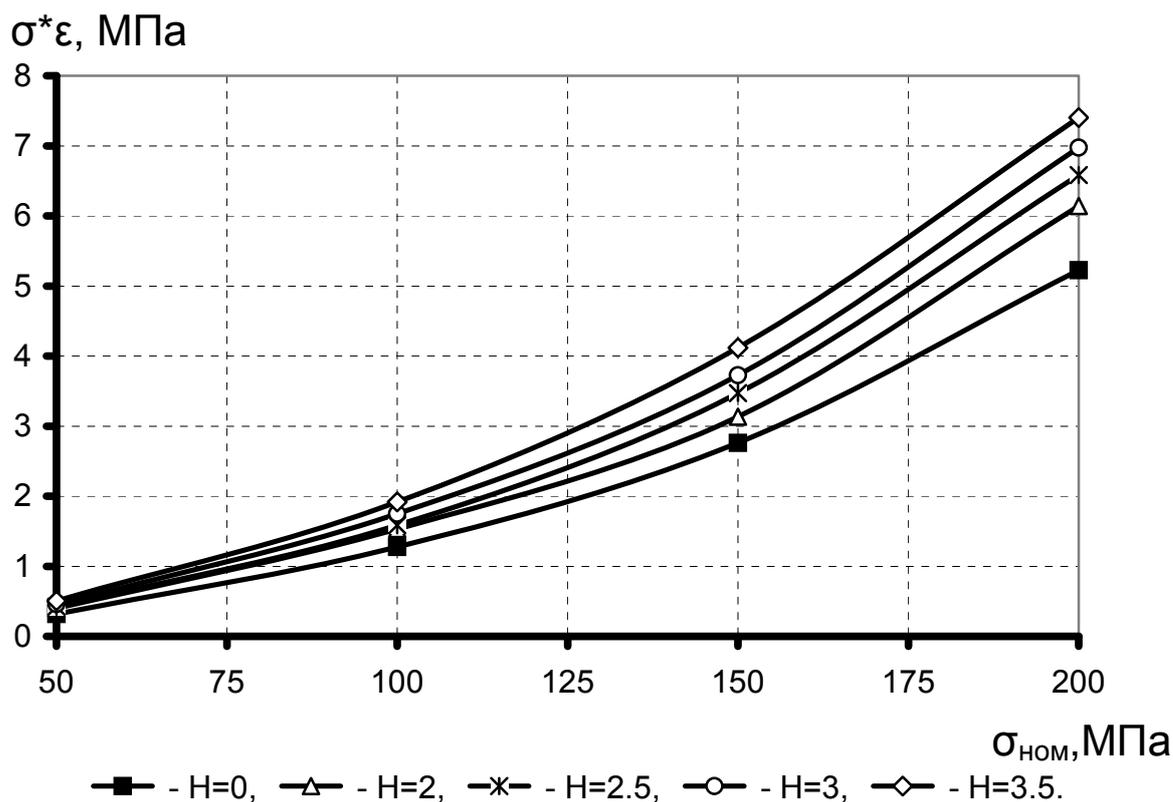


Рисунок 18 - Влияние уровня нагружения и глубины зенковки на удельную энергию деформирования  $\sigma^*\epsilon$

По результатам расчетов построены графики зависимости характеристик локального НДС конструкции от глубины зенковки и величины приложенной нагрузки (рис. 16 – 18).

Проанализировав данные, полученные при расчете, можно сделать вывод: при увеличении глубины зенковки от 0 до 3,5 мм при  $\sigma_{НОМ}=100$  МПа ко увеличивается от 3,31 до 3,339,  $k\epsilon$  увеличивается от 3,334 до 4,14,  $\sigma^*\epsilon$  увеличивается от 1,53 до 1,92.

### Исследование влияния угла зенковки на характеристики локального НДС пластины с цилиндрическим отверстием

Задачей данного расчета является нахождение величины оптимального угла зенковки.

Исходные данные

$$L = 200 \text{ мм}; B = 60 \text{ мм}; d = 10 \text{ мм}; \delta = 5 \text{ мм}; H = 2.5 \text{ мм}; \beta = 30 \dots 120^\circ.$$

По результатам расчетов построены графики зависимости характеристик локального НДС конструкции от угла зенковки и величины приложенной нагрузки (рис. 19 - 21).

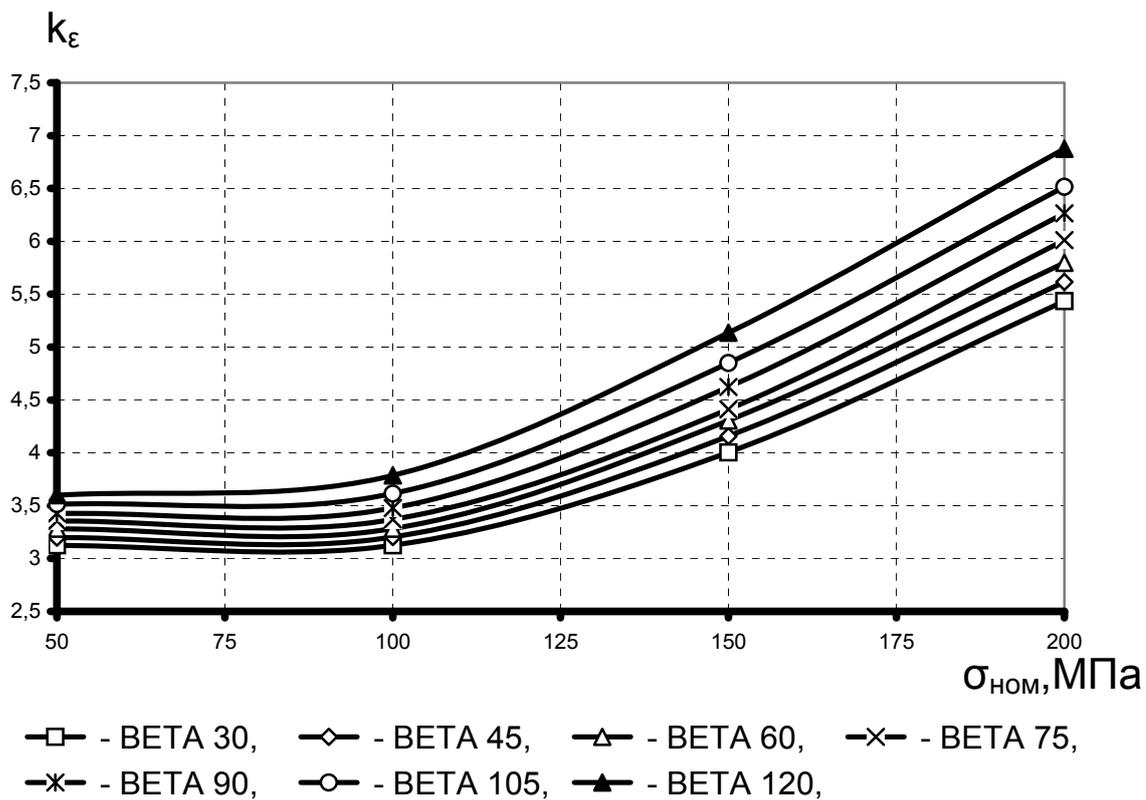


Рисунок 19 - Влияние уровня нагружения и угла зенковки на коэффициент концентрации деформаций  $k_\epsilon$

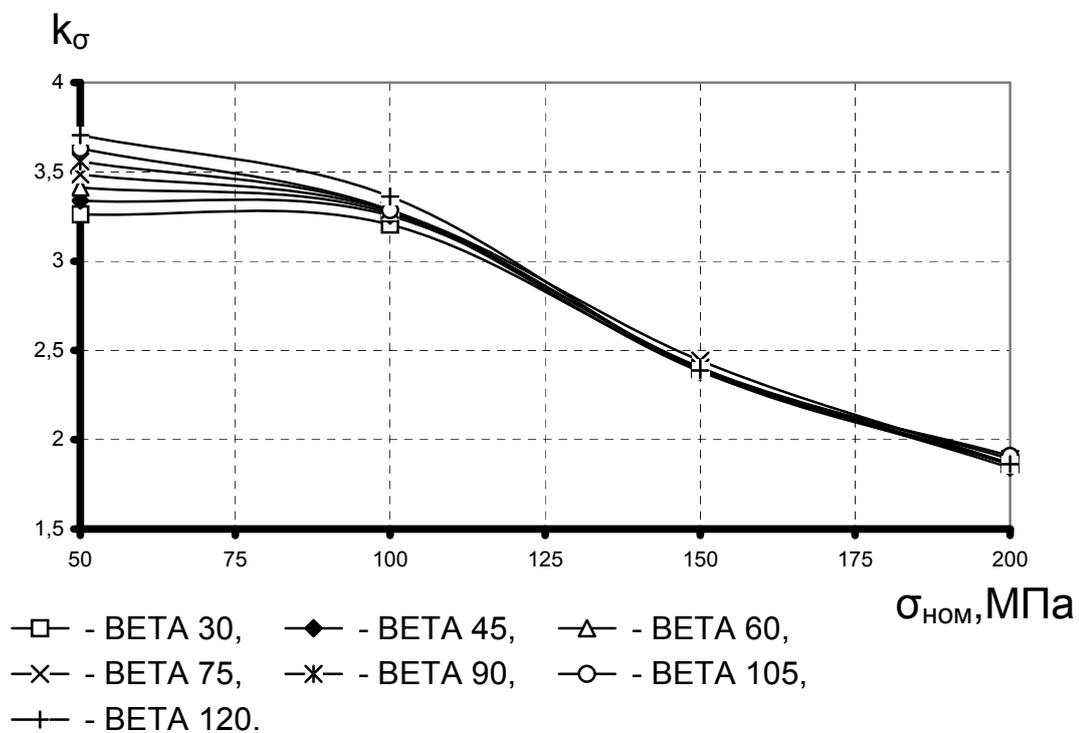


Рисунок 20 - Влияние уровня нагружения и угла зенковки на коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$

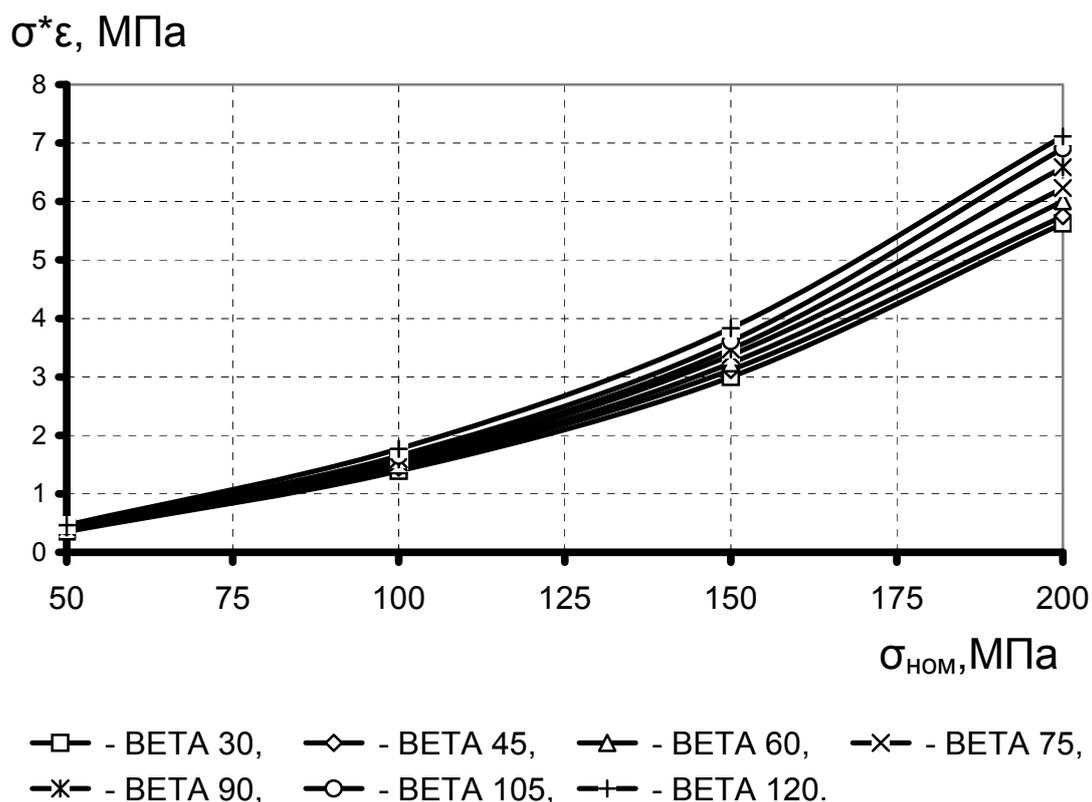


Рисунок 21 - Влияние уровня нагружения и угла зенковки на удельную энергию деформирования  $\sigma^*\epsilon$

Проанализировав данные, полученные при расчетах, можно сделать вывод: при увеличении угла зенковки от 30 до 120° при  $\sigma_{НОМ}=100$  МПа  $k\sigma$  увеличивается от 3,205 до 3,362,  $k\epsilon$  увеличивается от 3,125 до 3,79,  $\sigma^*\epsilon$  увеличивается от 1,39 до 1,77.

### Исследование влияния диаметра цилиндрического пояска на характеристики локального НДС пластины с цилиндрическим отверстием с цилиндрическим пояском

Задачей данного расчета является нахождение величины оптимального диаметра цилиндрического пояска

Исходные данные:

$L = 200$  мм;  $B = 60$  мм;  $d = 10$  мм;  $\delta = 5$  мм;  $H = 2.5$  мм;  $D = 11 \dots 14$  мм;  $\beta = 90^\circ$ .

По результатам расчетов построены графики зависимости характеристик локального НДС пластины с цилиндрическим отверстием с цилиндрическим пояском от диаметра цилиндрического пояска и величины приложенной нагрузки (рис.22 -24).

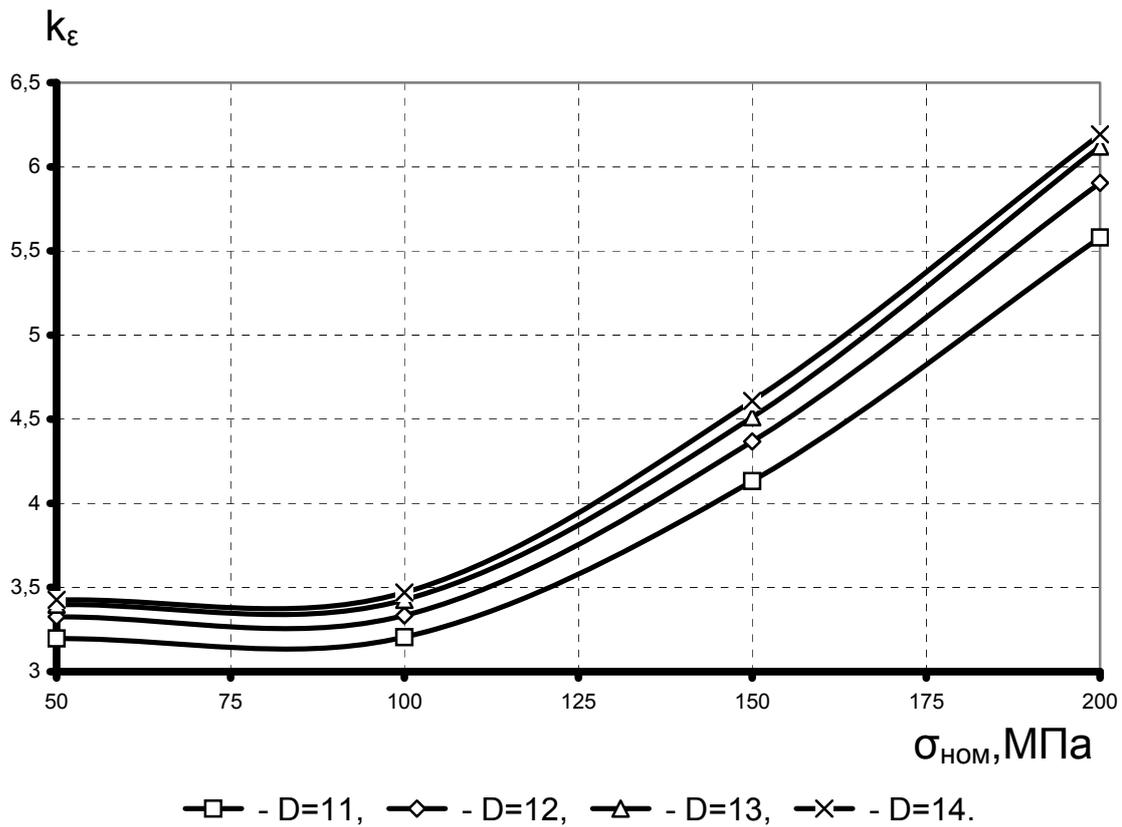


Рисунок 22 - Влияние уровня нагружения и диаметра цилиндрического пояска на коэффициент концентрации деформаций  $k_\epsilon$

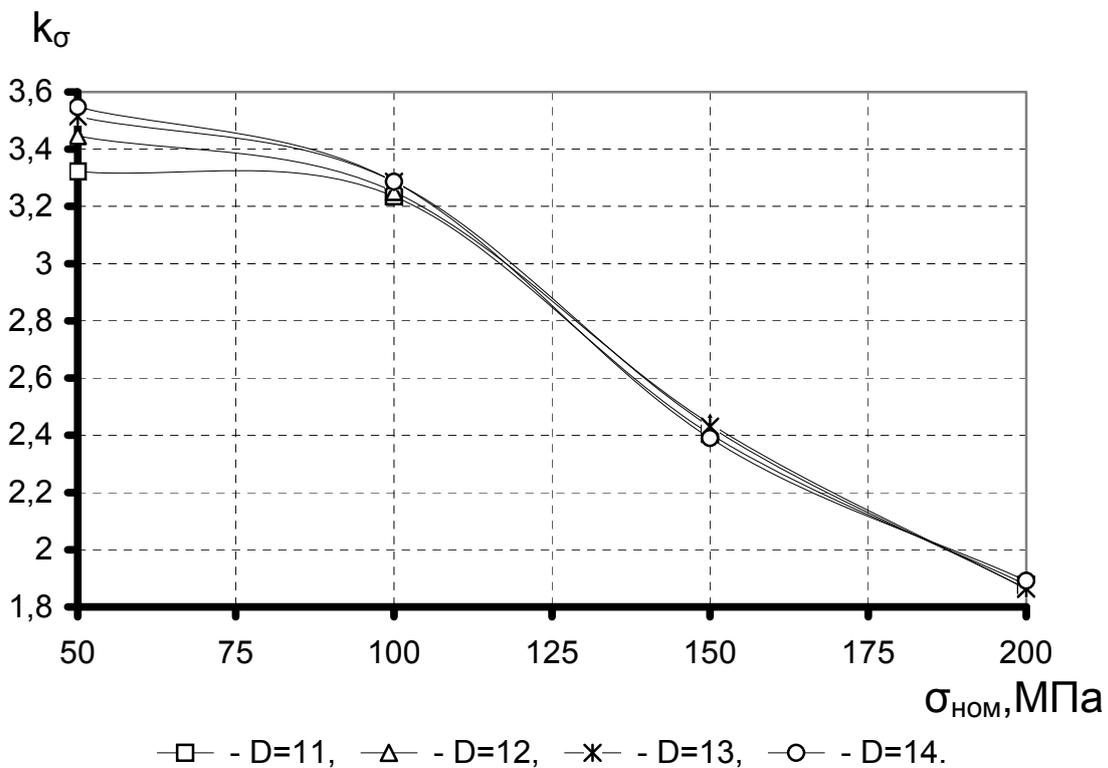


Рисунок 23 - Влияние уровня нагружения и диаметра цилиндрического пояска на коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$

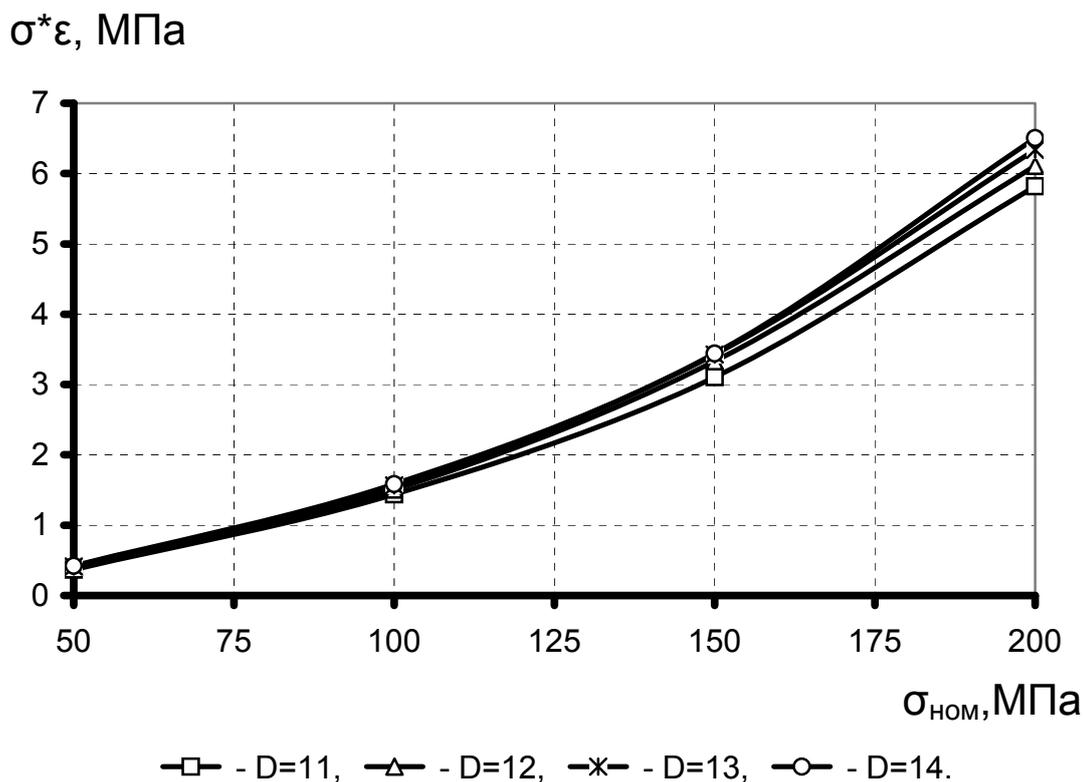


Рисунок 24 - Влияние уровня нагружения и диаметра цилиндрического пояска на удельную энергию деформирования  $\sigma^*\epsilon$

Проанализировав данные, полученные при расчетах, можно сделать вывод: при увеличении диаметра цилиндрического пояска от 11 до 14 мм при  $\sigma_{\text{НОМ}} = 100$  МПа  $k_0$  увеличивается от 3,24 до 3,29,  $k_1$  увеличивается от 3,204 до 3,47,  $\sigma^*\epsilon$  увеличивается от 1,44 до 1,58.

#### Выводы

Разработан метод расчета НДС пластины с функциональным отверстием в системе MSC/Nastran.

Проанализированы возможности системы MSC/Nastran по расчету нелинейных статических задач методом конечных элементов.

Определено влияние конструктивных параметров пластины с отверстием различного типа на характеристики локального НДС.

Полученные результаты расчета являются основой для прогнозирования характеристик сопротивления усталости конструктивных элементов с отверстиями.

#### Список литературы

1. Гребеников А.Г., Дыбский П.А., Даниленко О.Г. Исследование концентрации напряжений в пластине с цилиндрическим отверстием методом конечных элементов в системе ANSYS 5.3. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. Ун-т «ХАИ». – Вып.1
2. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC.visualNASTRAN for Windows. – М.: ДМК Пресс, 2004, - 704с.
3. Гребеников А.Г. Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций.- Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 532 с.

## Рефераты

УДК 629.7.01

Метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС при растяжении / А.Г. Гребеников, С.П. Светличный, В.А. Матвиенко, А. М. Гуменный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2003. – Вып. 37. – С. 5 – 17.

Разработан метод анализа влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия пластин с тремя отверстиями на характеристики локального НДС. Использование дорнования и последующего обжатия приводит к снижению удельной энергии деформирования в 2,51–3,01 раза по сравнению с удельной энергией деформирования для пластины с тремя отверстиями без упрочнения отверстий.

Ил. 16. Библиогр.: 6 назв.

Розроблено метод аналізу впливу послідовного застосування дорнування та бар'єрного обтиснення пластин із трьома отворами на характеристики локального НДС. Використання дорнування та подальшого обтиснення приводить до зниження питомої енергії деформування у 2,51–3,01 раза порівняно з питомою енергією деформування для пластини із трьома отворами без зміцнення отворів.

Іл. 16. Бібліогр.: 6 назв

УДК 621.833.7

Волновая сдвоенная зубчатая передача для главного редуктора вертолета / А.И. Полетучий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 18 – 24.

Приведено описание новой сдвоенной волновой зубчатой передачи для главных редукторов вертолетов и основы теории работоспособности гидростатических генераторов.

Ил. 4. Библиогр.: 8 назв.

Наведено опис нової здвоєної хвильової зубчастої передачі для головних редукторів вертольотів та основи теорії працездатності гідростатичних генераторів.

Іл. 4. Бібліогр.: 8 назв

УДК 629.7.002.72 : 004.896 : 519.876.5

Методологические основания разработки системы автоматизированного проектирования приспособлений для сборки летательных аппаратов / А.А. Бабушкин // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 25 – 34.

Представлены концепция и результаты разработки моделей и методов автоматизированного проектирования сборочных приспособлений (СП), синтезированных алгоритмов и ядра информационной технологии интерактивного программного комплекса, адаптированного к запуску в консольном режиме на выбранной аппаратно-программной платформе, с помощью которых спроектирована интегрированная САПР-СП.

Ил. 1. Библиогр.: 12 назв.

Наведено концепцію й результати розробки моделей і методів автоматизованого проектування складальних пристроїв (СП), синтезованих алгоритмів та ядра інформаційної технології інтерактивного програмного комплексу, адаптованого до запуску в консольному режимі на вибраній апаратно-програмній платформі, за допомогою яких спроектовано інтегровану САПР-СП.

Іл. 1. Бібліогр.: 12 назв

#### УДК 629.7.01

Метод исследования характеристик контактного взаимодействия твердотельных элементов конструкций с помощью системы MSC.NASTRAN / Е.Т. Василевский, Н.В. Паршутто, А.В. Кальян, Д.М. Устюгов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 35 – 43.

Проанализированы возможности программного пакета MSC.NASTRAN для расчета задач контактного взаимодействия методом конечных элементов.

Разработана методика определения контактных напряжений для твердотельных конструкций.

Ил. 9. Библиогр.: 5 назв.

Проаналізовано можливості програмного пакета MSC.NASTRAN для розрахунку задач контактної взаємодії методом скінченних елементів.

Розроблено методику визначення контактних напруг для твердотільних конструкцій.

Іл. 9. Бібліогр.: 5 назв

#### УДК 629.7.01

Экспериментальное исследование влияния последовательного упрочнения пластин в зоне отверстий раскаткой и барьерным обжатием, дорнованием и барьерным обжатием на их усталостную долговечность / А.Г. Гребеников, В.А. Матвиенко, А.М. Гуменный, А.С. Третьяков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 44 – 52.

Проведено експериментальне дослідження впливу послідовного зміцнення пластин в зоні отворів розкаткою та бар'єрним обтисненням, дорнуванням та бар'єрним обтисненням на втомну довговічність пластин із трьома отворами. В результаті досліджень встановлено: втомна довговічність пластини з трьома отворами, зміцненої в зоні отворів послідовним застосуванням розкатки та бар'єрного обтиснення, вище усталостної довговічності пластини з одним отвором в 12,06 рази, пластини з трьома неупрочненими отворами – в 6,21 рази; усталостна довговічність пластини з трьома отворами, упорочненої в зоні отворів послідовним застосуванням дорнування та бар'єрного обтиснення, вище усталостної довговічності пластини з одним отвором в 22,04 рази, пластини з трьома неупрочненими отворами – в 11,35 рази.

Ил. 12. Библиогр.: 5 назв.

Проведено експериментальне дослідження впливу послідовного зміцнення пластин у зоні отворів розкаткою та бар'єрним обтисненням, дорнуванням та бар'єрним обтисненням на втомну довговічність пластин із трьома отворами. В результаті досліджень встановлено: втомна довговічність пластини з трьома отворами, зміцненої в зоні отворів послідовним застосуванням розкатки та бар'єрного обтиснення, вище втомної довговічності пластини з одним отвором в 12,06 рази, пластини з трьома незміцненими отворами в 6,21 рази; втомна довговічність пластини з трьома отворами, зміцненої в зоні отворів послідовним застосуванням дорнування та бар'єрного обтиснення, вище втомної довговічності пластини з одним отвором в 22,04 рази, пластини з трьома незміцненими отворами – 11,35 рази.

Іл. 12. Бібліогр.: 5 назв

УДК 616.314.001.57:517.962.1

Изучение биомеханического взаимодействия имплантатов и опорных тканей челюсти с применением метода конечных элементов / В.Ф. Деменко, В.Ф. Несвит, А.Ю. Воробьев, И.В. Линецкий, З.Р. Ранджи // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 53 –72.

Рассмотрена проблема моделирования биомеханической дентальной системы “имплантат – кость”. Создана ее математическая модель, включающая геометрическую модель, систему нагружения, условия соединения имплантата с костью, обоснованы подходы к выбору размеров конечных элементов (КЭ). Представлен пример реализации разработанной модели для упрощенной геометрии имплантата в виде цилиндра и реального имплантата типа Ankylos. Изучено распределение напряжений в области контакта имплантата с костной тканью.

Ил. 29. Библиогр.: 33 назв.

Розглянуто проблему моделювання біомеханічної дентальної системи “імплантат-кістка”. Створено її математичну модель, яка включає геометричну модель, систему навантаження, умови з'єднання імплантату з кісткою, обґрунтовано підходи до вибору розмірів скінченних елементів (КЕ). Подано приклад реалізації розробленої моделі для спрощеної геометрії імплантату у вигляді циліндра і розповсюдженого в клінічній практиці імплантату типу Ankylos. Вивчено розподілення напружень, деформацій та контактного тиску в області контакту імплантату з тканиною кістки за умов ідеальної остеоінтеграції та повної дезостеоінтеграції.

Іл. 29. Бібліогр.: 33 назви

УДК 621.833.7

Оптимизация параметров волновой зубчатой передачи по предельному вращающему моменту / А.И. Полетучий, Я.А. Стеценко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 73 –79.

Описаны математическая и алгоритмическая модели оптимизации параметров волновой зубчатой передачи по предельному вращающему моменту и приведены результаты оптимизации.

Ил. 6. Библиогр.: 5 назв.

Описано математичну і алгоритмічну моделі оптимізації параметрів хвильової зубчастої передачі за граничним обертальним моментом і наведено результати оптимізації.

Іл. 6. Бібліогр.: 5 назв

УДК 621.833.7.

Зносостійкість розмірного ланцюга “вал генератора – гнучке колесо” силових хвильових зубчастих передач / Г.О. Приймаков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 80 –82.

Розв'язано контактну задачу теорії пружності при зношуванні розмірного ланцюга “вал генератора – внутрішня поверхня гнучкого колеса” СХЗП. Розвинено контактну-зношувальну задачу згідно з моделлю Л. А. Галіна – О. Г. Приймакова з врахуванням можливих коливань вала генератора.

Іл. 1. Бібліогр.: 10 назв

Решена контактная задача теории упругости при изнашивании размерной цепи «вал генератора – внутренняя поверхность гибкого колеса СВЗП. Получила развитие контактно-износная задача соответственно модели Л.А. Галина – А.Г. Приймакова с учетом возможных колебаний вала генератора.

Ил. 1. Библиогр.: 10 назв.

УДК 629.7.01

Оценка вероятности потери технической устойчивости ракеты-носителя методом ускоренного статистического моделирования / В.Г. Сухоробрий, М.И. Никифорова // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 83–92.

Проведено исследование возможности оценки вероятности потери технической устойчивости ракет-носителей с помощью ускоренного статистического моделирования. Определено, что использование квадратичных моделей и многомерных аппроксимирующих квадратичных моделей при проведении УСМ для оценки вероятности потери технической устойчивости РН позволяет получить результат с заданной точностью. Показано, что применение УСМ позволяет значительно сократить время моделирования.

Ил. 14. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

Проведено дослідження можливості оцінки ймовірності втрати технічної стійкості ракет-носіїв з допомогою прискореного статистичного моделювання. Показано, що використання квадратичних моделей і багатовимірних апроксимуючих квадратичних моделей при проведенні ПСМ для оцінки ймовірності втрати технічної стійкості РН дозволяє отримати результат із заданою точністю. Визначено, що використання ПСМ дозволяє значно скоротити час моделювання.

Іл. 14. Табл. 3. Бібліогр.: 6 назв

УДК 004.942:681.513.672

Синтез алгоритма функционирования привода регулятора давления в программно-аппаратной модели контроля системы автоматизированного управления газораспределительной станцией / А.П. Собчак, П.Е. Ефременко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 93–100.

Рассмотрена разработка алгоритма имитатора функционирования привода регулятора давления как одной из составных частей структуры универсальной модели контроля (имитатора управляемого объекта) для системы автоматизированного управления газораспределительными станциями, при программно-аппаратной реализации которой образуются необходимые контрольно-проверочные комплексы. Описаны основные подходы при синтезе алгоритма, а также особенности его функционирования в общей структуре модели контроля.

Библиогр.: 3 назв.

Розглянуто розробку алгоритму імітатора функціонування приводу регулятора тиску як однієї зі складових частин структури універсальної моделі контролю (імітатора керованого об'єкта) для системи автоматизованого управління газорозподільними станціями, при програмно-апаратній реалізації якої утворюються необхідні контрольно-перевірні комплекси. Описано основні підходи при синтезі алгоритму, а також особливості його функціонування в загальній структурі моделі контролю.

Бібліогр.: 3 назви

УДК 535.241.13:534

Элементы и устройства функциональной микроэлектроники /В.А. Антонова, В.П. Поляков, П.Ф. Поляков, В.А. Хорунжий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. ПАВ-датчики: силочувствительные элементы. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 101 – 107.

Исследованы характеристики элементов и устройств функциональной микроэлектроники.

Ил. 3. Библиогр.: 8 назв.

Досліджено характеристики елементів і пристроїв функціональної мікроелектроніки.

Іл. 3. Бібліогр.: 8 назв

УДК 621.327

Метод кодирования изображений в системах видео наблюдения авиационной бригады / А.О. Красноручский, О.Р. Кретив, Б.В. Остроумов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 108 – 112.

Обосновывано направление уменьшения времени доведения видеоинформации в сети стандарта IEEE 802.11.

Ил. 2. Библиогр.: 4 назв.

Обґрунтовано напрям зменшення часу доведення відеоінформації у мережі стандарту IEEE 802.11.

Іл. 2. Бібліогр.: 4 назви

УДК 681.58.011.56

СИНТАР-3 и СИНТАР 2007: сравнительный анализ систем разработки контроллерного ПО / В.Г. Сухорезный, А.С. Гристан, Д.В. Джулгаков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 113 –118.

Отмечено, что с момента окончания разработки последней версии САПР АСУ ТП семейства СИНТАР требования к АСУ претерпели изменения, что повлекло за собой необходимость разработки новой версии, получившей название СИНТАР 2007. Проведен анализ этих изменений, их влияния на САПР, а также определены пути модификации САПР семейства СИНТАР с целью наиболее полного удовлетворения новых требований.

Библиогр.: 4 назв.

Зазначено, що з моменту завершення розробки останньої версії САПР АСУ ТП сім'ї СИНТАР вимоги до АСУ суттєво змінилися, що привело до необхідності розробки нової версії, яка отримала назву СИНТАР 2007. Проведено аналіз цих змін та їх впливу на САПР, а також визначено шляхи модифікації САПР сім'ї СИНТАР з метою найбільш повного задоволення нових вимог.

Бібліогр.: 4 назви

УДК 621.811.31

Дослідження трибосполучень за допомогою сигналів електронно-акустичної емісії / О.Г. Приймаков, Ю.О. Градиський, В.М. Стадніченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2007. – Вып. 37. – С. 119 –129.

Розроблено методологію оцінки залишкового ресурсу авіаційної техніки як апіорним прогнозуванням, так і за дослідними даними. Середній залишковий і гамма-відсотковий ресурси визначені для деяких окремих видів розподілу напрацювання до відмови.

Іл. 5. Бібліогр.: 19 назв

Разработана методология оценки остаточного ресурса авиационной техники как априорным прогнозированием, так и по исследовательским данным. Средний остаточный и гамма-процентный ресурсы определены для некоторых отдельных видов распределения наработки до отказа.

Ил. 5. Библиогр.: 19 назв.

УДК 681.3.068+800.92XML

Применимость XML в системах CMS / А.С. Денисенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007 – Вып. 37 – С. 130 –132.

Описаны преимущества систем управления контентом (CMS), использующих возможности технологии XML и ее расширений XSL и XSLT. Указаны задачи каждой технологии. Приведены возможные области применения в различных вариантах web-проектов. Преимущества использования технологии XML рассмотрены в сравнении с технологией CSS. Раскрыты принципы работы с файловой системой и методы обработки данных.

Библиогр.: 2 назв.

Описано переваги систем управління контентом (CMS), які використовують можливості технології XML та її розширень XSL і XSLT. Вказано задачі кожної технології. Наведено ймовірні області застосування у різних варіантах web-проектів. Переваги використання технології XML розглянуто порівнянно із технологією CSS. Розкрито принципи роботи із файловою системою та методи обробки даних.

Бібліогр.: 2 назви

УДК 004.89

Синтез и минимизация базы вероятных квантов знаний в курсе «Основы систем искусственного интеллекта» / И.В. Шевченко, Е.П. Киричук // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 133 – 139.

Синтезирована и оптимизирована по критериям безызбыточности идентификационная база  $v$ -квантов знаний (БвкЗ) для поддержки принятия решений о правильности распределения денежных средств. Оптимизация БвкЗ дополнена применением правил алгебры высказываний, например правил идемпотентности и поглощения.

Библиогр.: 10 назв.

Синтезовано й оптимізовано за критеріями безнадлишковості ідентифікаційну базу  $v$ -квантів знань (БвкЗ) для підтримки прийняття рішень щодо правильності розподілу коштів. Оптимізацію БвкЗ доповнено за рахунок застосування правил алгебри висловлень, наприклад правил ідемпотентності та поглинання.

Бібліогр.: 10 назв

УДК 519.2+681.3

Прогнозная модель экспоненциального сглаживания с учетом неопределенности исходных данных / В.М. Вартанян, Р.А. Сухобрус // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 140 –144.

Рассмотрена методика прогнозирования с использованием модели экспоненциального сглаживания при условии неопределенности исходных данных. Предложена формализованная процедура адаптивного определения константы сглаживания для составления прогноза по временному ряду интервальных значений параметра исследуемого процесса.

Ил. 1. Табл. 2. Библиогр.: 2 назв.

Розглянуто методику прогнозування з використанням моделі експоненціального згладжування за умови невизначеності вихідних даних. Запропоновано формалізовану процедуру адаптивного визначення константи згладжування для складання прогнозу за часовим рядом інтервальних значень параметра досліджуваного процесу.

Іл. 1. Табл. 2. Бібліогр.: 2 назви

УДК 621-4:514:004.94

Компьютерное моделирование чувствительности измеряемых параметров к изменению формы. / Е. Н. Бут, И. В. Бычков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 145 – 149.

Исследована чувствительность измеряемых параметров, таких, как угол наклона касательной, отклонения вертикальной и горизонтальной координат от номинальной, к изменению формы поверхности. Наиболее чувствительными к изменению формы поверхности оказались зависимость суммы квадратов отклонений горизонтальной и вертикальной координат по центральному углу и зависимость угла касательной от приведенной длины дуги.

Іл. 7. Библиогр.: 14 назв.

Досліджено чутливість вимірюваних параметрів, таких, як кут нахилу дотичної, відхилення вертикальної та горизонтальної координат від номінальної, до зміни форми поверхні. Найбільш чутливими до зміни форми поверхні виявились залежність суми квадратів відхилень горизонтальної та вертикальної координат по центральному куту та залежність кута дотичної від приведеної довжини дуги.

Іл. 7. Бібліогр.: 14 назв

УДК 504.064

Інформаційні технології з прогнозування екологічних і соціально-економічних наслідків пожеж і потреби в силах, засобах і ресурсах для їх ефективної ліквідації або запобігання. Сучасний стан проблеми / В.Л. Клеєвська // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 150 –158.

Описано результати системного аналізу опублікованих наукових результатів, проведеного з метою виявлення сучасного стану теоретичних досліджень і практичних рекомендацій щодо розробки і впровадження перспективних способів завчасного визначення потреби в силах, засобах і ресурсах для ефективної ліквідації ймовірних пожеж ( на основі прогнозування їхніх можливих екологічних і соціально-економічних наслідків) та інформаційних технологій для реалізації цих способів.

Бібліогр.: 15 назв

Описаны результаты системного анализа опубликованных научных результатов, проведенного с целью выявления современного состояния теоретических исследований и практических рекомендаций по разработке и внедрению перспективных способов заблаговременного определения потребности в силах, средствах и ресурсах для эффективной ликвидации вероятных пожаров (на основе прогнозирования их возможных экологических и социально-экономических последствий) и информационных технологий для реализации этих способов.

Библиогр.: 15 назв.

УДК 621.31

Экономические и потенциальные возможности энергосбережения в Украине / Л.С. Рева, Ф.М. Трубочанинов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 159 – 163.

Проблемы недостатка энергоносителей в стране во главу экономической деятельности государства ставят поиск и применение альтернативных источников, а также энергосбережение при использовании традиционных энергоносителей. Проанализированы как потенциал страны по возобновляемым источникам энергии, так и экономико-правовые вопросы стимулирования как производителей, так и потребителей энергии в ее рациональном и эффективном использовании.

Библиогр.: 8 назв.

Проблеми нестачі енергоносіїв в країні перш за все економічної діяльності держави ставлять пошуки і застосування альтернативних джерел, а також енергозбереження при використанні традиційних енергоносіїв. Проаналізовано як потенціал держави з відновлюваних джерел енергії, так і економіко-правові питання (засади) стимулювання як виробників, так і споживачів енергії в її раціональному й ефективному використанні.

Бібліогр.: 8 назв

УДК 519.68:65.01

Анализ управленческой деятельности организации / Б.Б. Стелюк, И.В. Дронова, Аль Дахери Али Мухаммед // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 164 –168.

Рассмотрены вопросы исследования и анализа системы организационного управления, состоящей из большого числа взаимодействующих подразделений, с целью разработки и практического применения методов наиболее эффективного управления этой системой. Использован комплексный метод факторного анализа, который дает возможность определения интегрированного коэффициента эффективности управленческих процессов предприятия. Апробация предложенного метода проиллюстрирована на примере конкретной организации.

Ил. 1. Табл. 3. Библиогр.: 2 назв.

Розглянуто питання дослідження й аналізу системи організаційного управління, що складається з великої кількості взаємодіючих підрозділів, з метою розробки й практичного застосування методів найбільш ефективного управління цією системою. Використано комплексний метод факторного аналізу, який дає можливість визначення інтегрованого коефіцієнта ефективності управлінських процесів підприємства. Апробація запропонованого методу проілюстрована на прикладі конкретної організації.

Іл. 1. Табл. 2. Бібліогр.: 2 назви

УДК 681.58

Этапы эволюции массивов информации / А.В. Фурашев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии – Харьков: НАКУ «ХАИ», – 2007. – Вып. 37. – С. 169 – 178.

Исследована эволюция массивов информации, выделены этапы накопления и обработки информации, не охваченные современными средствами автоматизации управления данными. Выделены характерные особенности как самого процесса накопления так и структуры информации. Выделены три типа информационных массивов: смешанные, горизонтальные и вертикальные. Сделан акцент на необходимости исследования и предложения такой модели данных, которая оказалась бы применимой к первоначальным стадиям накопления информации. Исследован процесс накопления данных, характерный для первых трех стадий эволюции массивов информации, показаны причины, обусловившие подобный процесс накопления данных.

Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

Досліджено еволюцію масивів інформації та визначено етапи накопичення і обробки інформації, не охоплені сучасними засобами автоматизації управління даними. Визначено характерні особливості як самого процесу накопичення, так і структури інформації. Виділено три типи інформаційних масивів: змішані, горизонтальні та вертикальні. Акцент зроблено на необхідності дослідження та запропонування такої моделі даних, яка б могла бути застосована на початкових стадіях накопичення інформації. Досліджено процес накопичення даних, характерний для перших трьох стадій еволюції масивів інформації, та визначено причини, що зумовили подібний процес накопичення даних.

Іл. 5. Бібліогр.: 9 назв

УДК 332.122(477)

Стан лісових ресурсів України/ А.Є. Мельник // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 179 – 182.

Обосновано неудовлетворительное состояние лесных ресурсов Украины, которые требуют защиты, охраны и рационального использования. Изложены рекомендации по улучшению состояния лесных ресурсов Украины. Проведены анализ и сравнение состояния лесных ресурсов Украины и некоторых стран Европы.

Библиогр.: 11 назв.

Обґрунтовано незадовільний стан лісових ресурсів України, які потребують захисту, охорони та раціонального використання. Викладено рекомендації щодо покращання стану лісових ресурсів України. Проведено аналіз і порівняння стану лісових ресурсів України та деяких країн Європи.

Бібліогр.: 11 назв.

УДК 629.735.33.017.1

Разработка прогрессивной потайной заклепки с коническим компенсатором для выполнения соединений силовых элементов крыла / Д.С. Кива, С.А. Бычков, А.Г. Гребеников, Е.Т. Василевский, Д.Ю. Дмитренко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 183 – 201.

Разработана конструкция потайной заклепки с коническим компенсатором, обеспечивающая требуемое качество внешней поверхности крыла и удовлетворительный характер распределения радиального натяга по толщине соединяемого пакета без фрезерования закладных головок заклепок после клепки. Предложен метод определения влияния геометрических параметров потайной заклепки с коническим компенсатором на КВП и характер распределения радиального натяга по толщине соединяемого пакета с учетом величины предварительной установки заклепки с коническим компенсатором в потайное гнездо.

Іл. 23. Бібліогр.: 11 назв.

Розроблено конструкцію потайної заклепки з конічним компенсатором, яка забезпечує потрібну якість зовнішньої поверхні крила та задовільний характер розподілення радіального натягу по товщині з'єднуваного пакета без фрезерування закладних головок заклепок після клепання. Запропоновано метод визначення впливу параметрів потайної заклепки з конічним компенсатором на якість зовнішньої поверхні та характер розподілення радіального натягу по товщині з'єднуваного пакета з урахуванням величини попереднього установклення заклепки з конічним компенсатором у потайне гніздо.

Іл. 23. Бібліогр.: 11 назв

УДК 629.7.01

Исследование влияния конструктивных параметров на характеристики локального НДС при растяжении пластины с функциональным отверстием / А.А. Жильцов, В.Н. Желдоченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2007. – Вып. 37. – С. 202 – 216.

Разработан метод определения характеристик локального НДС пластины с функциональным отверстием различных типов методом конечных элементов, реализованный в системе NASTRAN. Получены значения напряжений и деформаций в пластине с цилиндрическим, цилиндроконическим отверстиями и цилиндроконическим отверстием с цилиндрическим пояском. Определены коэффициенты концентрации напряжений и деформаций, а также удельная энергия деформирования.

Ил. 24. Библиогр.: 3 назв.

Розроблено метод визначення характеристик локального НДС пластини з функціональним отвором різних типів методом скінченних елементів, реалізований у системі NASTRAN. Отримано значення напруг і деформацій в пластині з циліндричним, циліндроконічним отворами та циліндроконічним отвором з циліндричним пояском. Визначено коефіцієнти концентрації напруг і деформацій, а також питома енергія деформування.

Іл. 24. Бібліогр.: 3 назви

**Требования к оформлению статей в тематический сборник научных трудов  
Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»  
«Открытые информационные и компьютерные интегрированные  
технологии»**

Уважаемые авторы публикаций!

К опубликованию в сборнике принимаются научные статьи, ранее не публиковавшиеся, посвященные вопросам и проблемам открытых информационных и компьютерных интегрированных технологий.

Согласно Постановлению ВАК Украины от 15.01.2003 г. № 7-05/1 "Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліку ВАК України" текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами;
- анализ исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- формулировка целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

Статья, не соответствующая требованиям ВАК Украины, к публикации не принимается.

Статья должна быть отредактирована литературным редактором и сверстана автором таким образом, чтобы все страницы были полностью заполнены текстом (в т.ч. последняя страница). Не принимается статья, содержащая неполные страницы.

Статья должна быть полностью подготовлена с помощью редактора MS Word 95, 97 или 2000. Рисунки и фотографии размещаются в тексте статьи, при этом рисунки должны быть сгруппированы и "привязаны" к тексту.

Требования к оформлению следующие:

- 1) параметры страницы: формат А4, верхнее поле - 2,5 см, нижнее - 3 см, левое - 2,5 см, правое - 2 см, от края до нижнего колонтитула - 2 см;
- 2) номер страницы: внизу, от центра, шрифт Arial (размер 12);
- 3) УДК: в левом верхнем углу страницы, шрифт Arial, 12;
- 4) инициалы и фамилии авторов: шрифт Arial, размер 12, в верхнем правом углу;
- 5) название статьи: шрифт Times New Roman, жирный, размер 16, выравнивание – по центру;
- 6) организация: шрифт Arial, курсив, размер 12;

- 7) между названием статьи, авторами, организацией и текстом статьи - один пустой абзац (размер 12);
- 8) текст статьи: шрифт Arial, обычный, размер 12; интервал - **одинарный**, перед абзацем и после него - 0 пт, отступ первой строки - 1,25 см, выравнивание - по ширине;
- 9) внешний вид графиков, таблиц, формул - по усмотрению авторов, но использовать шрифты размером не менее 8;
- 10) подписи под рисунками располагать по центру страницы; перед рисунком и после его наименования (или подрисуночной подписи) оставить пробел в одну строку.

Физические величины должны приводиться в единицах системы СИ.

В конце статьи необходимо привести список использованных источников (заголовок печатается отдельной строкой посередине, шрифт Arial, 12). Литературные источники должны быть пронумерованы в соответствии с порядком ссылок на них в тексте. Ссылка на источник дается в квадратных скобках. Список литературы приводится в конце статьи библиографическим списком источников на языке оригинала в соответствии с ГОСТ 7.1.-84.

Одновременно со статьей в редакцию предъявляются:

- экспертное заключение организации, в которой работает автор, о возможности опубликования статьи в открытой печати;
- рецензия на статью от ведущего специалиста;
- реферат на русском и украинском языках, содержащий краткое содержание статьи (объем не более семи строк одним абзацем).

Статья и реферат подаются в редакцию в виде файлов на дискете 3,5" (1,44 Мбайт) и в распечатанном виде на бумаге формата А4 (210x297).

Решение о публикации статьи принимает редколлегия.

Принятая к публикации распечатанная рукопись статьи автору не возвращается.

Научное издание

**ОТКРЫТЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ  
ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Выпуск 37**

**Редакторы: Л.А. Кузьменко, Т.Г. Кардаш**

**Компьютерная верстка: Н. В. Ефремова**

**Подписано в печать 21.12.2007. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная.**

**Усл. печ. л. 12,7. Уч.-изд. л. 14,25. Т. 300 экз. Заказ**

---

**Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского**

**«Харьковский авиационный институт»**

**61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17**

**<http://www.khai.edu>**

---

**Отпечатано в типографии ХГАПП  
г. Харьков-23, ул. Сумская, 134, т. 707-87-60**