

Рег. № 016-813 от 15.06.2016.



Конкурсная работа по теме

Применение достижений авиационной техники для развития промышленности России, на примере разработанного в ЦИАМ, межгосударственного стандарта: ГОСТ 13755-2015,

представленная коллективом авторов:

д.т.н. Дорофеев В.Л., В.В. Голованов, С.Г. Гукасян,
к.т.н. Дорофеев Д.В.

в номинации: За вклад в разработку нормативной базы в авиации и
авиастроении

Научный руководитель-заместитель
генерального директора

д.т.н. А.И. Ланшин

Главный научный сотрудник
Начальник отдела
Начальник сектора
Ведущий инженер, программист

д.т.н. В.Л. Дорофеев
 В.В. Голованов
 С.Г. Гукасян
 к.т.н. Д.В. Дорофеев

Дата

М.П.

**ПРИМЕНЕНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ
РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ, НА ПРИМЕРЕ
РАЗРАБОТАННОГО В ЦИАМ, МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО
СТАНДАРТА: ГОСТ 13755-2015**

Д.т.н.Дорофеев В.Л., В.В.Голованов, С.Г.Гукасян, к.т.н. Дорофеев Д.В.

Одним из путей развития промышленности России, по словам В.В Путина, является широкое внедрение разработок военно-промышленного комплекса в народное хозяйство.

Наиболее часто символом машиностроения является зубчатое колесо. От того насколько правильно выбраны параметры зубчатых колес зависит уровень шума автомобилей, станков, тракторов, катеров и много другой техники.

Не менее важная задача состоит в том, чтобы обеспечить совместимость экспортируемой российской техники с зарубежной.

Важно не предлагать какое либо отдельное решение, а дать общий метод решения проблем. Решается такая задача путём стандартизации.

В основе расчета, проектирования и технологии зубчатых передач лежит так называемый исходный контур. Известно множество различных предложений по назначению параметров исходного контура. Но среди этого множества есть такие, которые наиболее эффективны и позволяют создавать надежные машины. В 1981 году был разработан стандарт на исходный контур: ГОСТ 13755-81. На основе этого стандарты было создано много машин, эффективно работающих. Однако при решении задач уменьшения веса деталей авиационных двигателей, которые велись в ЦИАМ, были найдены новые параметры исходного контура, которые не соответствовали ГОСТ 13755-81, но отличались значительными преимуществами.

На рис. 1-3 показано развитие конструкций зубьев авиационных зубчатых колес, разработанных в ЦИАМ. Одной из первых работ, предложенных в ЦИАМ, были зубчатые колеса с поднутренным основанием зубьев, рис.1. В этой конструкции переходная поверхность (галтель) не шлифуется, на поверхности галтели не образуются дефектные слои, что обеспечивает высокую изгибную прочность зубьев. В следующей конструкции ЦИАМ было предложено применить исходный контур с углом исходного контура 25° (рис.2). Это обеспечило не только более высокую прочность, но и позволило избежать ошибок проектирования, свойственных ГОСТ 13755-81. Также была разработана теория расчета параметров поднутрения зубьев. Зубчатые колеса с углом исходного контура 25° с поднутренным основанием применяются практически во всех авиационных двигателях, таких, например, как АЛ-31Ф. Следующим шагом было внедрение несимметричного исходного контура, (рис. 3). Несимметричный исходный контур позволил получить увеличенную толщину масляной пленки между контактирующими поверхностями зубьев при повышенном коэффициенте перекрытия. Эта конструкция применяется в редукторе

двигателя ТВ7-117 самолета Ил-114, обеспечивая непревзойденную долговечность двигателя.

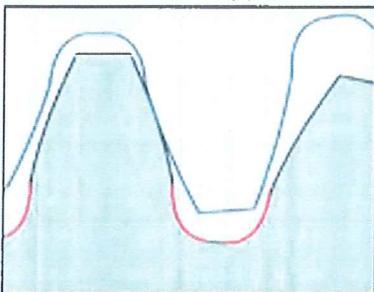


Рис. 1.

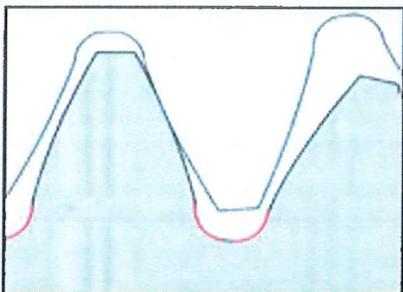


Рис. 2

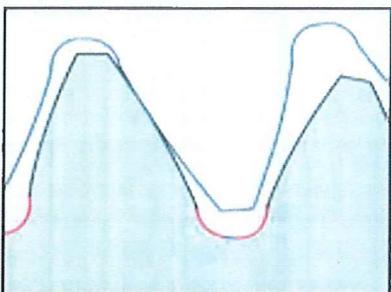


Рис. 3

Одновременно с разработкой несимметричного исходного контура в ЦИАМ велась работа по исходному контуру для зубчатых колес с большим коэффициентом перекрытия. Применение такого контура позволяет уменьшить вибрации колес в пять раз по сравнению с зубчатыми колесами с коэффициентом перекрытия меньше 2.

На рис. 4 показаны зубья несимметричного исходного контура (применен на двигателе ТВ7-117), на рис. 5 – зубья с коэффициентом перекрытия больше 2-х (применен на двигателе НК-93).

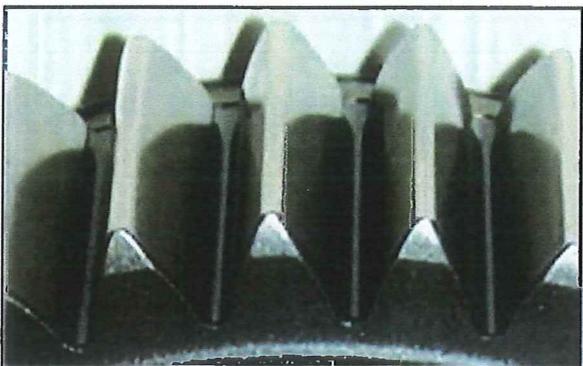


Рис. 4.

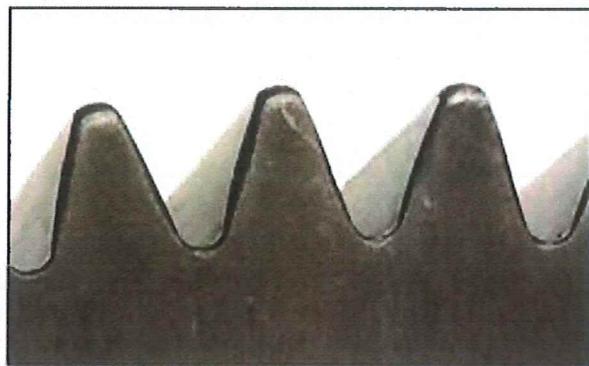


Рис. 5.

Отсутствие стандарта на зубчатые колеса с новыми исходными контурами сдерживало развитие зубчатых передач не только в общем машиностроении России, но и в авиационной промышленности, поскольку на ряде изделий продолжал применяться ГОСТ 13755-81, при отсутствии должной информационной поддержки. Поэтому было принято решение разработать стандарт сразу на серию исходных контуров.

В процессе разработки нового стандарта выполнялись исследования по оптимизации параметров исходного контура. Например, было доказано, что для несимметричного исходного контура наилучший угол наклона основной стороны равен 33° , а для смежной стороны 20° . На основе опыта заводов в исходный контур введен новый параметр, названный “приграничная зона”, обеспечивающий отсутствие интерференции с переходной кривой зубьев колес. Также добавлена закругленная вершина зуба и многие другие параметры, улучшающие прочность зубчатых передач при одновременном уменьшении вибраций.

Разработанный в ЦИАМ в 2015 году стандарт: ГОСТ 13755-2015, получил статус межгосударственного

ГОСТ 13755-2015 не предназначен для конических зубчатых колес, но оказалось, что на его основе могут быть созданы и конические зубчатые передачи с круговыми зубьями, например, показанные на рис. 6.

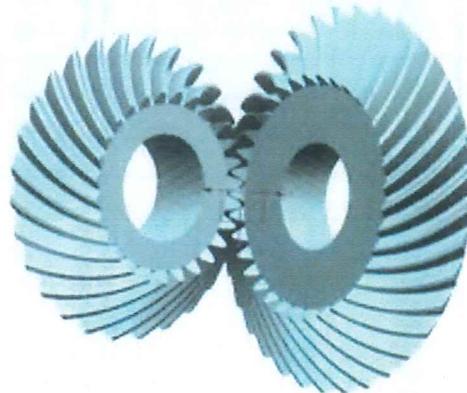
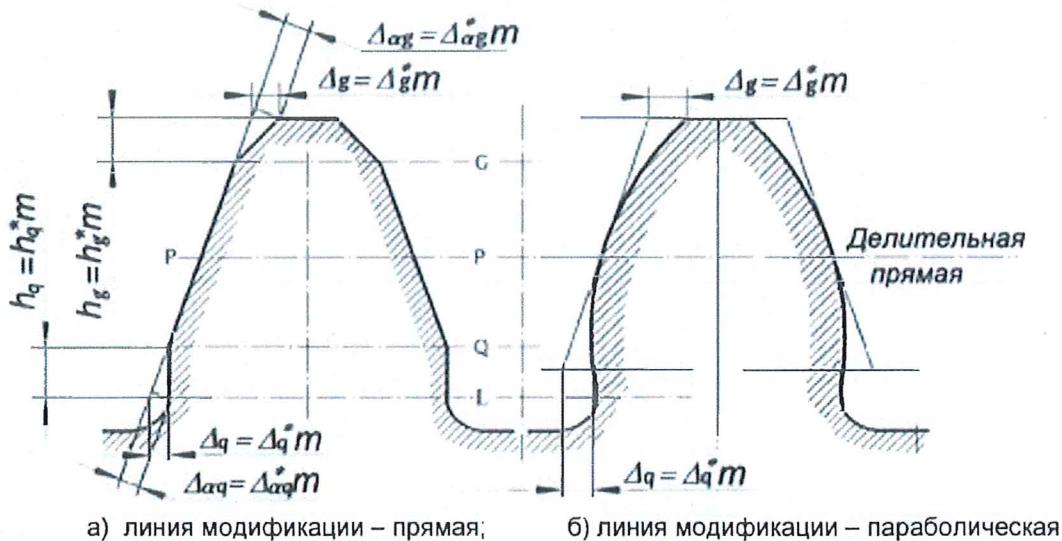


Рис. 6. Конструкция конической зубчатой передачи с зубьями, геометрия которых соответствует ГОСТ 13755-2015

Применение конических зубчатых колес с исходным контуром по ГОСТ 13755-2015 позволит многократно повысить вибрационную прочность дисков колес. Причина в том, что движение таких колес в зацеплении отличается высокой плавностью и низкими динамическими нагрузками.

В ГОСТ 13755-2015 даны рекомендации по применению модификации профиля зубьев в параметрах исходного контура. Приводятся правила не только назначения, но и измерения параметров модификации (рис. 7).



Δ_g ; Δ_q — глубина модификации головки (ножки) зуба — наибольшее расстояние от точки пересечения главного профиля с линией вершин до линии модификации головки по направлению линии вершин;

$\Delta_{\alpha g}$; $\Delta_{\alpha q}$ — нормальная глубина модификации головки (ножки) зуба — наименьшее расстояние от главного профиля точки пересечения линии модификации с линией вершин (с линий L, проходящей через граничные точки).

Нормальная глубина модификации главного профиля исходного контура определяется по формуле: $\Delta_\alpha = \Delta \cdot \cos \alpha_P$

Рис. 7. Общие схемы модификации исходного контура

Исходя из опыта ЦИАМ, в ГОСТ 13755-2015 приведены рекомендации по применению того или иного типа модификации зубьев. Модификация это целенаправленное внесение изменений в геометрию зубьев, с целью компенсации деформаций под нагрузкой.

В зависимости от основных технологических и конструктивных условий могут применяться различные наборы параметров модификаций.

На рис. 8 показаны основные типы модификаций профиля зубьев, а в таблице приведены рекомендации по применению модификации профиля.

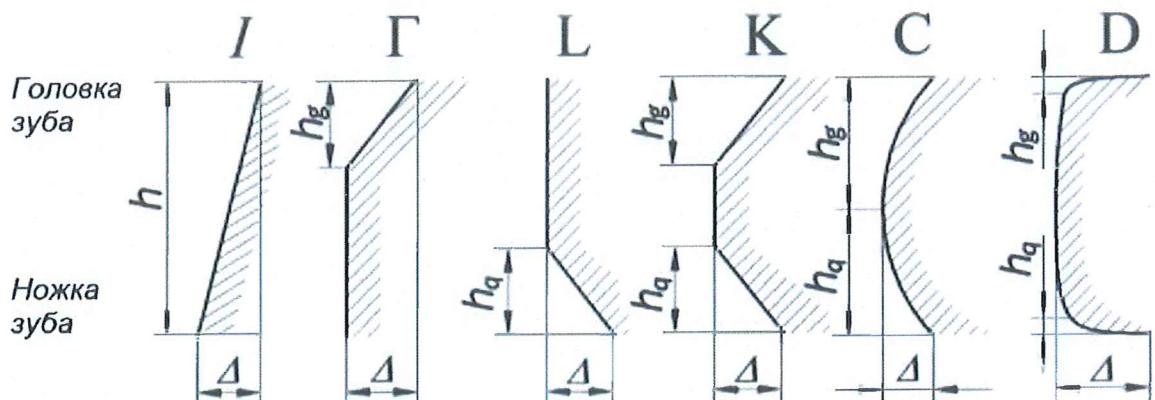


Рис. 8. Диаграммы различных типов модификации профиля зубьев

Таблица — Параметры модификации профиля для различных типов диаграмм отклонений от эвольвенты и рекомендации по применению модификации профиля зубьев

| Тип диаграммы профиля | Рекомендации по применению модификации профиля зубьев |
|-----------------------|--|
| I | Выполняется путем изменения основного шага на одном из колес, так, чтобы вход зубьев в зацепление происходил без кромочного удара. |
| Г | Передачи, к которым предъявляются повышенные требования по шуму и вибрациям под нагрузкой. Выполняется либо на зубьях ведомого колеса, либо на двух колесах одновременно. |
| L | Передачи, к которым предъявляются повышенные требования по шуму и вибрациям под нагрузкой. Выполняется либо на зубьях ведущего колеса, либо на двух колесах одновременно. |
| K | Многопоточные передачи, к которым предъявляются повышенные требования шуму и вибрациям под нагрузкой. Этот вид модификации допускается применять на зубьях только одного из колес. |
| C | Передачи, работающие на переменных режимах нагружения, к которым предъявляются повышенные требования по шуму и вибрациям. |
| D | Передачи с зубчатыми колесами, имеющими коэффициент перекрытия больше 1.7, и к которым предъявляются высокие требования по шуму и вибрациям. |

В отзывах на ГОСТ 13755-2015 справедливо отмечалось, что для применения этого стандарта необходим пересмотр стандартов по расчету геометрии и прочности зубчатых колес.

В настоящее время в отделении динамики и прочности авиационных двигателей ЦИАМ завершена работа по созданию стандартного метода расчета зубчатых с исходным контуром по ГОСТ 13755-2015 и получено предложение ВНИИМАШ разработать серию таких стандартов.

При проектировании зубчатых колес по ГОСТ 13755-81 в ряде случаев неэффективно используется площадь контактной поверхности, что показано на рис. 8.

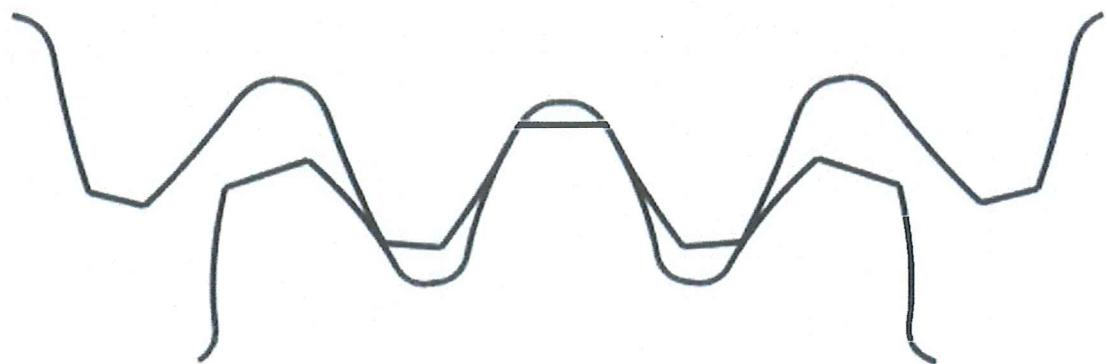


Рис. 9. Форма зубьев колес по ГОСТ 13755-81с параметрами $x_1=0.8$, $x_2=2$

Этот недостаток устранен в ГОСТ 13755-2015 (Рис.10).

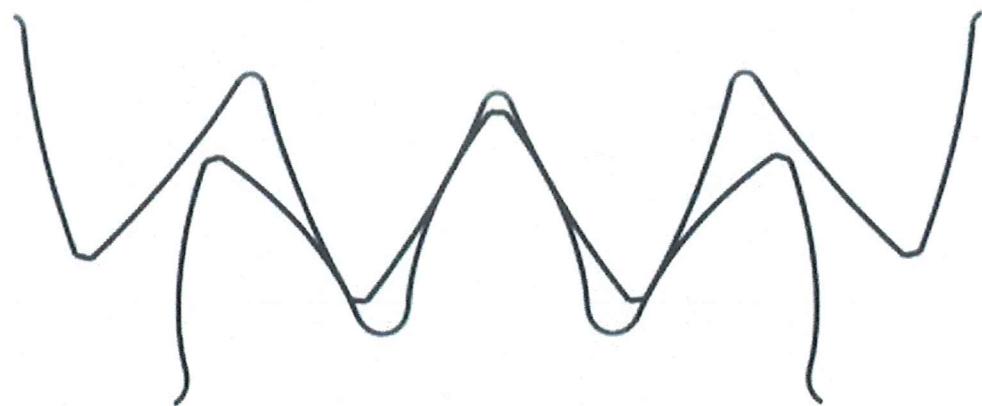


Рис. 10. Форма зубьев колес по ГОСТ 13755-2015с параметрами $x_1=0.8$, $x_2=2$

Как видно из рисунков 9 и 10, площадь контакта зубьев с исходным контуром по ГОСТ 13755-2015 значительно больше, что увеличивает прочность зубчатой передачи.

Преимущество достигается путем замены стандартной высоты головки зубьев h_{ap} на стандартную толщину вершины зубьев s_{ap} .

Параметры h_{ap} и s_{ap} показаны на исходном контуре по ГОСТ 13755-2015 (рис11).

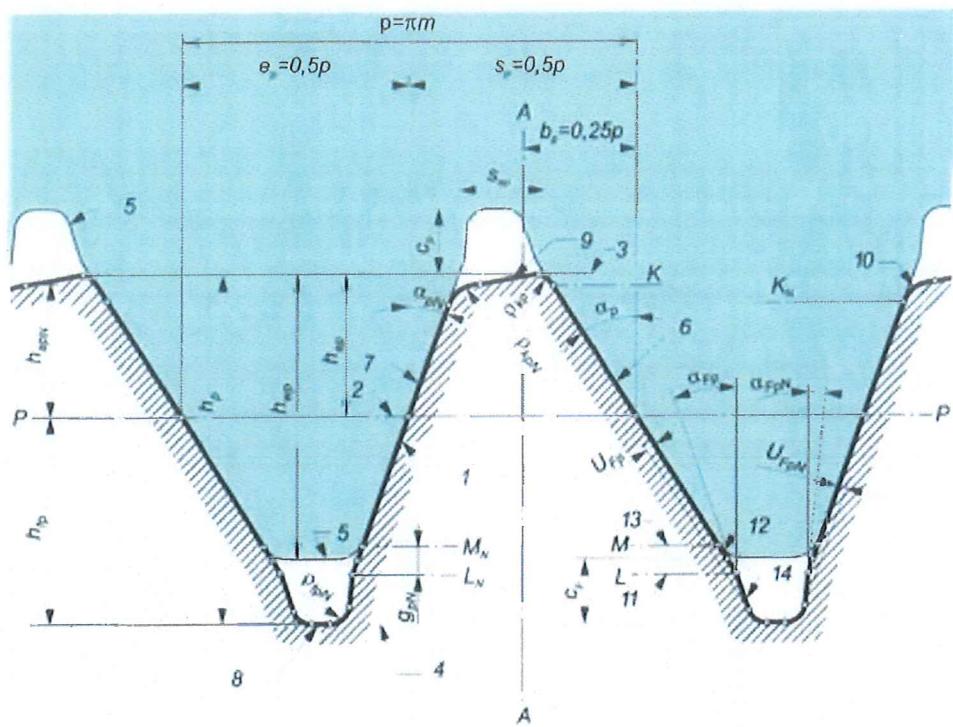


Рис. 11. Исходный контур по ГОСТ 13755-2015

Для внедрения нового стандарта в ЦИАМ разработаны справочные графики и таблицы для расчета геометрии прочности зубчатых колес. Эта сложная работа потребовала создания нового численно-аналитического метода расчета, многократно превышающего по точности такой известный метод как метод конечных элементов. На рис. 12 показан пример результатов расчета коэффициентов формы зубьев этим методом. Расчет выполнен для различных чисел зубьев по ГОСТ 13755-2015 и для различных коэффициентов смещения исходного контура.

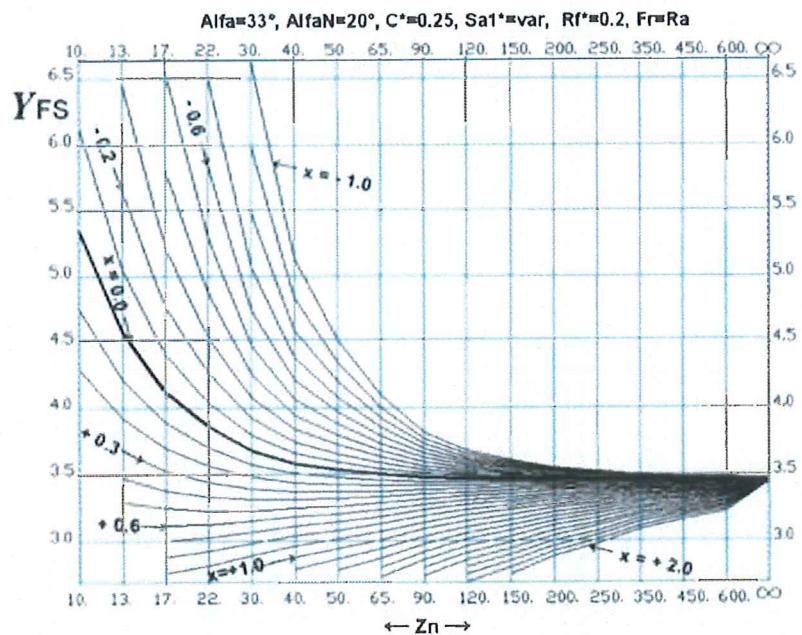


Рис. 12. Графики для выбора коэффициентов формы несимметричных зубьев

На рис. рис. 13 показано основное окно программы для расчета зубчатых передач по ГОСТ 13755-2015.

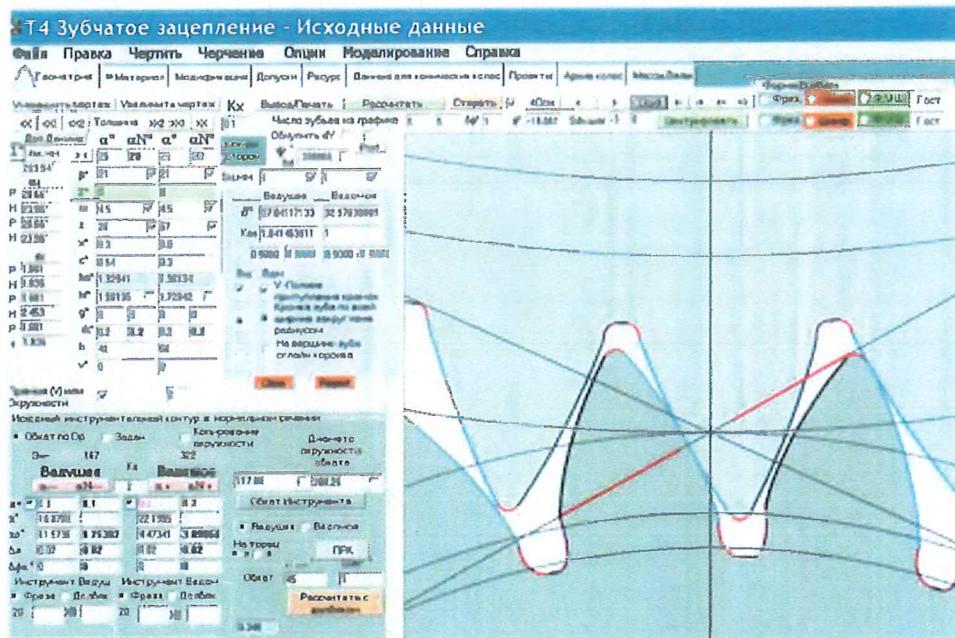


Рис. 13. Основное окно программы расчета зубчатых передач с новым исходным контуром (данные опытной конструкции зубьев авиационного редуктора ВР 252)

На рис. 14 – показан результат расчета распределения контактных напряжений по всей поверхности зубьев колес с новым исходным контуром для редуктора ВР-252 вертолетов Ка-27/32.

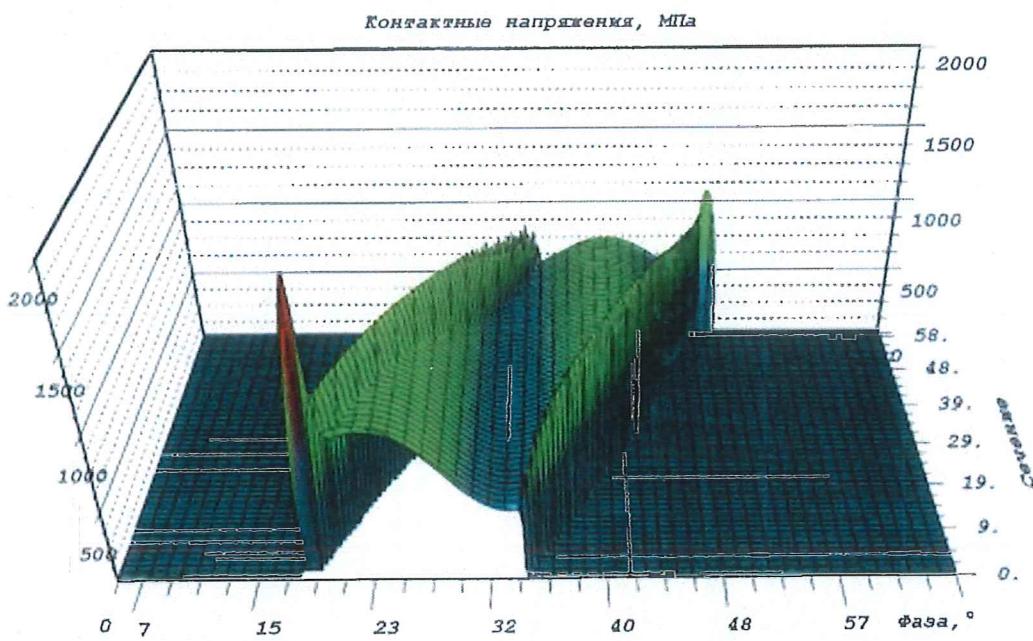
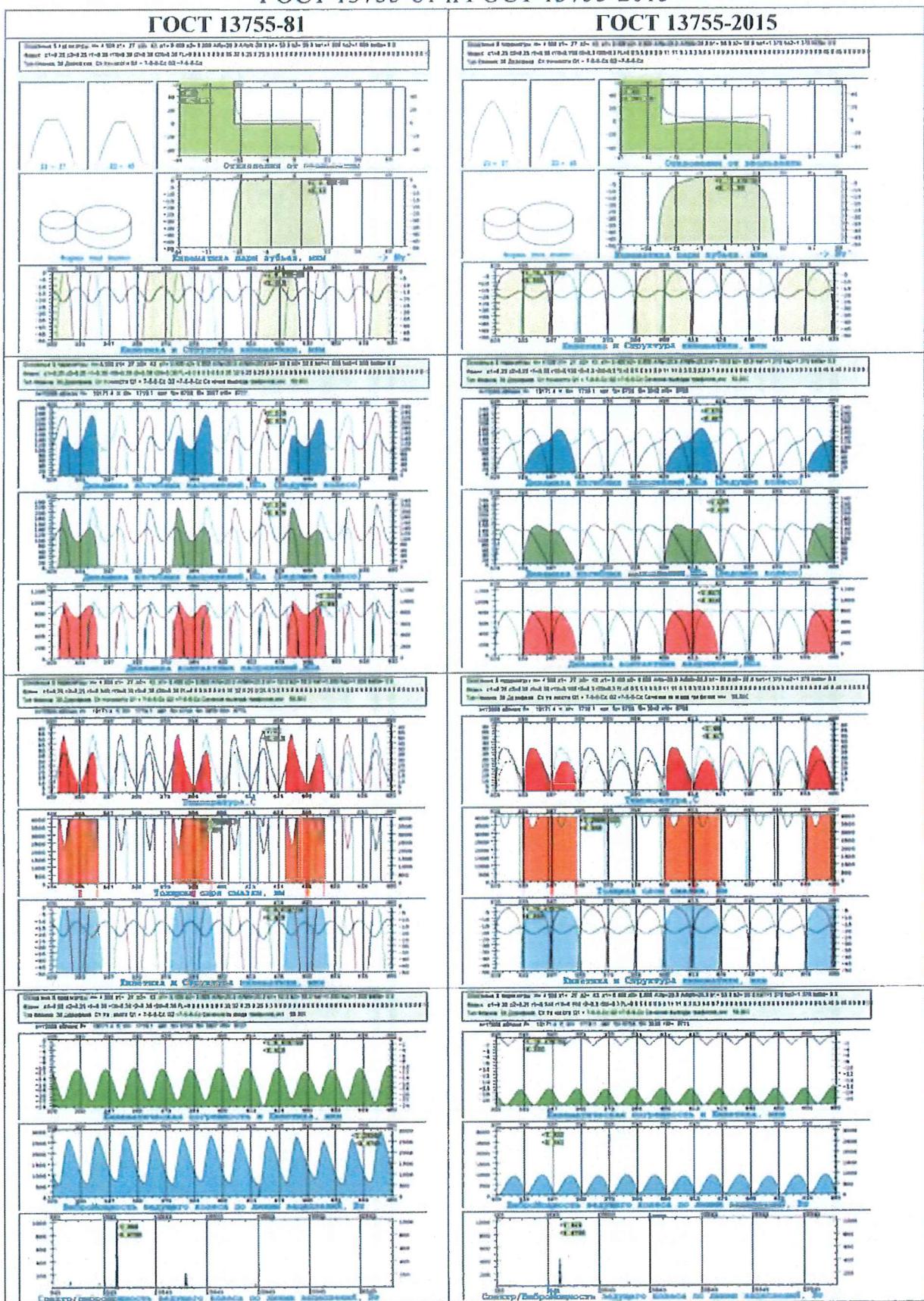


Рис. 14. Распределение контактных напряжений по поверхности зубьев

Для оценки зубчатых колес по ГОСТ 13755 -81 и зубчатых колес по ГОСТ 13755 - 2015 выполнены сравнительные расчеты, результаты которых показаны на графиках таблицы.

Таблица - Сравнение прочности и виброактивности зубчатых передач по ГОСТ 13755-81 и ГОСТ 13755-2015



Как видно из графиков таблицы , прочность зубчатых передач по ГОСТ 13755-2015 значительно превышает прочность передач по ГОСТ 13755-81.

Но самое значительное преимущество по уровню шума, характеризуемого произведением динамических сил в зацеплении на скорость колебаний колес. Преимущество более чем в два раза.

На базе параметров исходного контура, заложенных в ГОСТ 13755-2015, были созданы зубчатые передачи большинства российских авиационных двигателей.

Среди этих двигателей особое место занимает двигатель ТВ7-117, в редукторе которого применены впервые в мире зубчатые колеса с несимметричным исходным контуром. Наряду с прямозубыми, косозубыми и шевронными колесами, зубчатые колеса с несимметричным исходным контуром выделились в самостоятельный класс передач. Применение несимметричных зубьев в редукторе винта двигателя ТВ7-117 оказало большое влияние на развитие авиационных зубчатых передач. В настоящее время эти передачи рассматриваются в мировой практике, как новое перспективное направление развития общей теории прочности деталей машин.



Рис. 15. Самолеты в трансмиссиях которых применены зубчатые передачи с исходным контуром зубьев по ГОСТ 13755-2015

Таким образом, применение нового стандарта ГОСТ 13755-2015 будет способствовать повышению надежности и снижению шума не только авиационных зубчатых передач, но и зубчатых передач, применяемых в автомобильном, судовом и общем машиностроении.