

УДК 628.438:519.9

Т. Р. Гараненко<sup>1</sup>, Т. И. Прибора<sup>2</sup>, Е. К. Березовский<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОХОРДНЫХ ПОЛЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ВЕНТИЛЯТОРА

*Рассмотрены особенности создания широкохордных полых лопаток вентилятора АД. Проведенные статический и модальный анализы различных вариантов рабочих лопаток вентилятора позволили определить их напряженно-деформированное состояние (НДС), форму и частоты собственных колебаний, что обеспечивает создание реальной физической модели полых рабочих лопатки вентилятора.*

**Ключевые слова:** лопатка вентилятора, титановый сплав, статический анализ, динамический анализ, гофра, напряженно-деформированное состояние.

### Введение

Современные авиационные ГТД должны обладать высокой надежностью в эксплуатации.

Одним из требований, предъявляемых к ГТД, является снижение веса деталей, в частности, рабочих лопаток. Этим достигается снижение напряженности в дисках, основных деталях ГТД. Требование снижения веса возможно обеспечить за счет изготовления рабочих лопаток из новых сплавов на основе титана (в частности, алюминиды титана), вместо стали. При достаточной прочности, данные материалы дают значительное снижение веса.

Другие направления — изготовление полых лопаток вентилятора и из композиционных материалов.

В данной работе представлены численные исследования полых рабочих лопатки вентилятора.

### Формулирование проблемы

Численные исследования стали возможны в результате использования современных средств вычислительной техники, внедрения численных методов, в том числе метода конечных элементов.

Расчетный комплекс ANSYS с использованием математических моделей высокого уровня, дает наглядное представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) объекта исследования, в нашем случае, широкохордной полых рабочей лопатки вентилятора.

В ряде опубликованных статей [1, 2] проводилась численная оценка напряженно-деформированного состояния полых вентиляторной лопатки с двойной выпуклостью и без закрутки сечений по радиусу. Надо отметить, это сильно

упрощает создание математической модели и позволяет проводить сравнительный анализ влияния на напряженность конструкции внутренней гофры.

### Решение проблемы

Для проведения сравнительного анализа в начале рассчитывалась модель вентиляторной лопатки конкретного профиля, находящегося в летной эксплуатации.

Полученные результаты были приняты в качестве критерия при проведении дальнейшего численного моделирования (рис. 1).

Материал вентиляторной лопатки — титановый сплав ВТ6.

При генерации конечно-элементной сетки использовался элемент 2-ого порядка Solid186.

Хвостовую часть лопатки из математической модели исключили, для упрощения. Граничные условия в виде закрепления прикладывали на корневом сечении пера. В перспективе, при отладке конечно-элементной полых модели пера лопатки, в качестве нагрузок можно рассматривать рабочее давление на перо, рабочую частоту вращения и рабочее температурное поле.

Результаты расчета по определению напряженно-деформированного состояния пера исходной сплошной лопатки представлены распределением радиальных перемещений (рис. 2), радиальных напряжений (рис. 3) и эквивалентных напряжений (рис. 4).

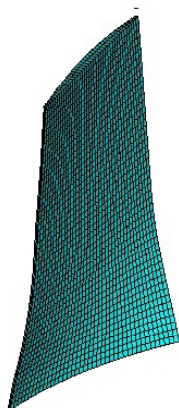


Рис. 1. Конечно-элементная модель пера рабочей лопатки

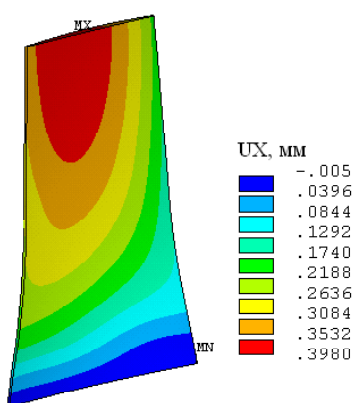


Рис. 2. Радиальные перемещения пера рабочей лопатки вентилятора

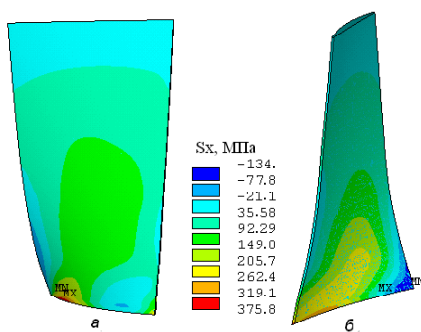


Рис. 3. Радиальные напряжения пера рабочей лопатки вентилятора (а – спинка, б – корыто)

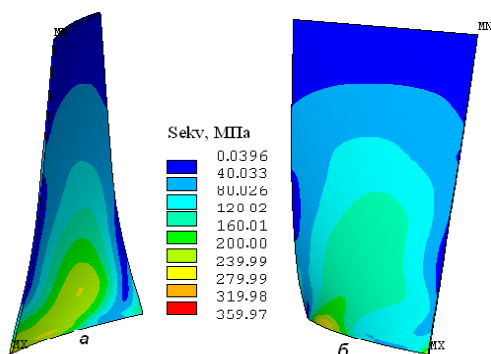


Рис. 4. Эквивалентные напряжения пера рабочей лопатки вентилятора (а – корыто, б – спинка)

### Модель полой широкохордной рабочей лопатки вентилятора

Переход к моделированию полой лопатки осуществлен согласно разработанной технологии. Спинка и корыто пера соответствуют действующей лопатке. Организованы объемы и сгенерирована конечно-элементная сетка элементом SOLID186, с той же густотой разбивки, как и в работающей лопатке. На рис. 5 приведены объемы модели полой лопатки, на рис. 6 – конечно-элементная сетка данной модели.

Наполнитель, «гофра», максимально приближен по геометрии к профилю пера. Объем «гофры» разделен на простейшие объемы для облегчения генерации конечно-элементной сетки. Трудности при генерации сетки возникли из-за сильной закрученности пера лопатки по высоте и уменьшению толщины лопатки с увеличением радиуса сечения лопатки. Качество сетки влияет на результаты расчета.

Вторая проблема создания конечно-элементной модели полого пера с «гофрой» – это обеспечение совместной работы корпуса пера и «гофры». На практике совместная работа корпуса и «гофры» обеспечивается контактной точечной сваркой. На примере численного эксперимента, то есть расчета математической модели, можно сказать, что этим операциям (точной сварки и последующим технологическим операциям), обеспечивающим общность обшивки и наполнителя, необходимо уделять повышенное внимание. Иначе некоторые составляющие конструкции работают самостоятельно, что недопустимо. Как моделированием, так и реальными технологическими процессами обеспечить идеальную общность конструкции сложно.

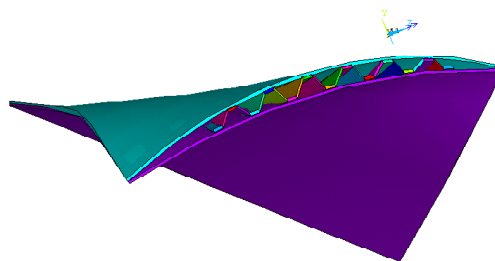


Рис. 5. Модель полого пера рабочей лопатки вентилятора, объемы

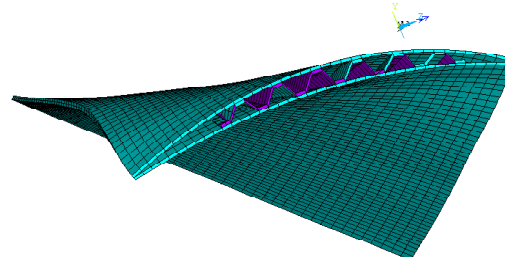


Рис. 6. Модель полого пера рабочей лопатки вентилятора, конечно-элементная сетка

Расчет модели пера с наполнителем – «гофрой» показал, что в данном случае выполненное численное моделирование несовершенно и требует значительной доработки, как и технологический процесс по изготовлению физической модели для эксперимента связан с реальными трудностями. Для оценки уровня деформаций и напряжений было принято решение перейти к формированию плоской полой модели с «гофрой».

**Математическая модель плоского полого пера рабочей лопатки вентилятора**

Создана математическая модель плоской полой лопатки с «гофрой». Размеры модели соответствуют чертежам детали для изготовления с последующим исследованием (рис. 7).

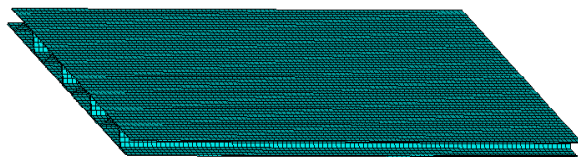


Рис. 7. Модель полого плоского пера лопатки вентилятора с конечно-элементной сеткой

Данная модель значительно проще в численном исполнении и в практическом реальном исполнении.

Модель выполняется из титанового листа, размерами 290×158 мм. Высота «гофры» принята равной средней толщине реальной лопатки вентилятора.

Толщина листа 0,6 мм. В математической модели выполнена условно точечная сварка «гофры» и листа. Качество сварки на реальной модели требует особого внимания и тщательного исполнения. Расчетная модель показана на рис. 8.

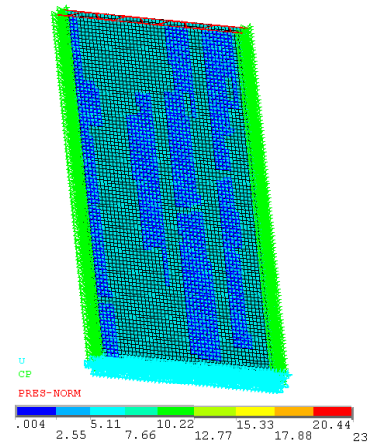


Рис. 8. Расчетная модель полого плоского пера

По нижней кромке модели (корневое сечение лопатки) организовано закрепление модели по всем направлениям, имитируя закрепление реальной модели в зажиме. По верхней кромке, соответствующей периферийному сечению лопатки, приложена контурная нагрузка растяжения ( $\sigma_{\text{конт}} = 230 \text{ МПа}$ ). Данная нагрузка воспроизводит действующую центробежную силу в поле вращения лопатки с частотой  $n = 6020 \text{ об/мин}$ . На площадь, соответствующую корыту лопатки, приложено распределенное давление от воздействия воздушного потока. Поле давления соответствует реальной рабочей лопатке вентилятора (0,004...0,014 МПа).

Для оценки НДС модели в перспективной экспериментально-исследовательской установке выполнены статический и динамический анализ математической модели программным расчетным комплексом ANSYS .

Результаты статического анализа представлены в виде распределения перемещений, радиальных, изгибных, касательных (от кручения) и эквивалентных напряжений (рис. 9–12).

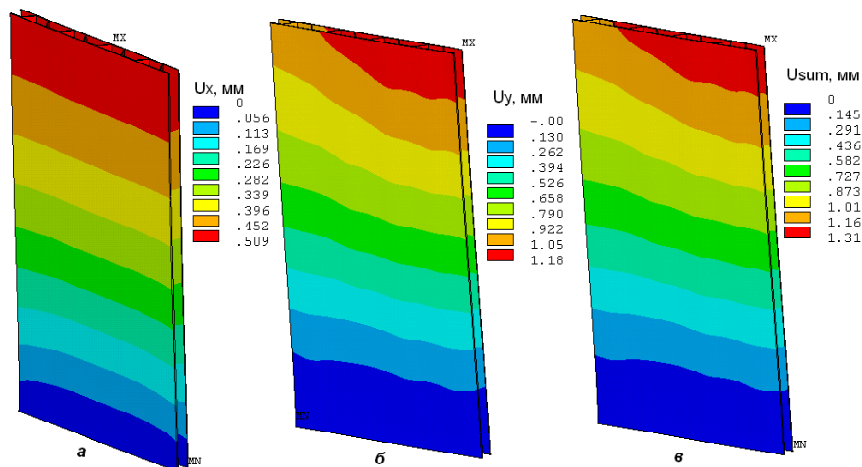


Рис. 9. Распределение радиальных (а), осевых (б) и суммарных перемещений (в) пера полой плоской модели с «гофрой»

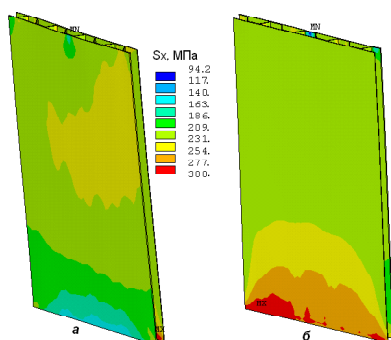


Рис. 10. Распределение радиальных напряжений пера полой плоской модели с «гофрой», где: *a* – спинка модели пера, *б* – корыто модели пера с приложенным давлением по поверхности

Несимметричность распределения напряжений на «корыте» и «спинке» модели плоской лопатки можно объяснить различной жесткостью пластин, полученной от несимметричного взаимодействия пластин с «гофрой».

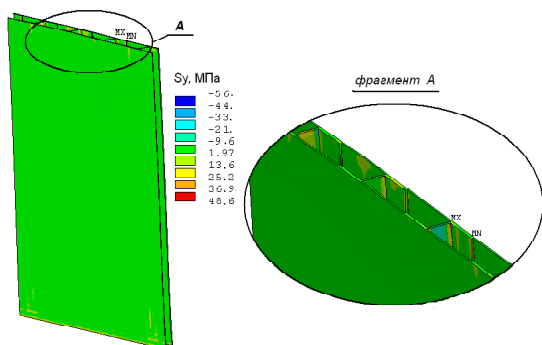


Рис. 11. Распределение осевых напряжений пера полой плоской модели с «гофрой»

Величины осевых напряжений незначительны, – как следствие приложенного на поверхность корыта давления. Можно заметить, что изгиб воспринимает «гофра», тогда как пластины корыта и спинки не нагружены.

Касательные напряжения от кручения вследствие неравномерного давления на перо, и эквивалентные напряжения показаны на рис. 12, 13.

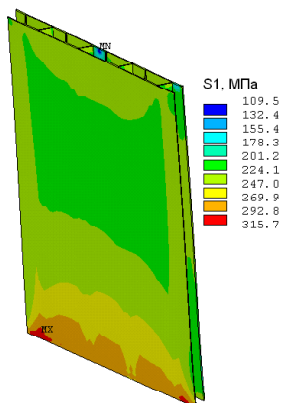


Рис. 12. Касательные напряжения пера полой плоской модели

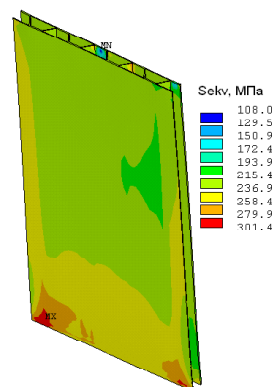


Рис. 13. Эквивалентные напряжения пера полой плоской модели

Уровень напряжений в модели плоской полой лопатки от приложенных нагрузок невысокий, ниже, чем в сплошной работающей лопатке (см. рис.14).

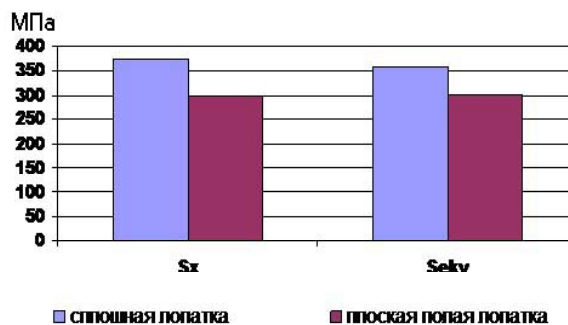


Рис. 14. Сравнительный анализ уровня напряжений исходной и плоской полой лопаток

Математическое моделирование дает возможность визуально оценить прогнозируемое напряженно-деформированное состояние «гофры» (рис. 15).

Выполненный модальный анализ модели пера полой плоской лопатки определил формы и частоты собственных колебаний (рис. 16).

Для сравнения приводим частоты и формы собственных колебаний сплошной лопатки вентилятора (рис. 17).

Модальный анализ показывает, что у пера полой плоской модели лопатки вентилятора частоты 3-х первых форм собственных колебаний значительно выше, чем у пера исходной сплошной лопатки вентилятора.

На графике (рис. 18) представлена резонансная диаграмма для пера сплошной лопатки вентилятора и плоской полой модели лопатки вентилятора.

Анализ резонансной диаграммы показывает, что частоты первых трех форм свободных колебаний плоской полой лопатки выше, чем соответствующие частоты первых трех форм колебаний фрагмента сплошной лопатки.

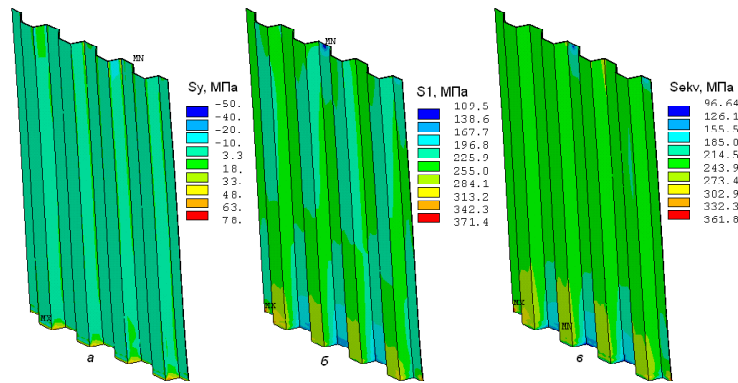


Рис. 15. Осевые (а), касательные (б) и эквивалентные напряжения (в) в наполнителе пера полой плоской модели, в «гофре»

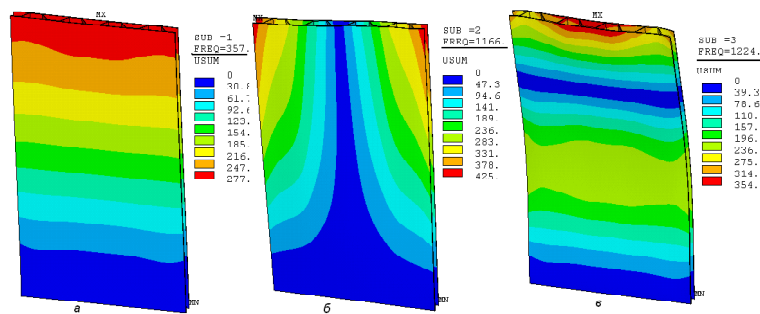


Рис. 16. Три первые формы и частоты собственных колебаний плоской полой лопадки вентилятора (а – 1-я изгибная, б – 1-я крутильная, в – 2-я изгибная)

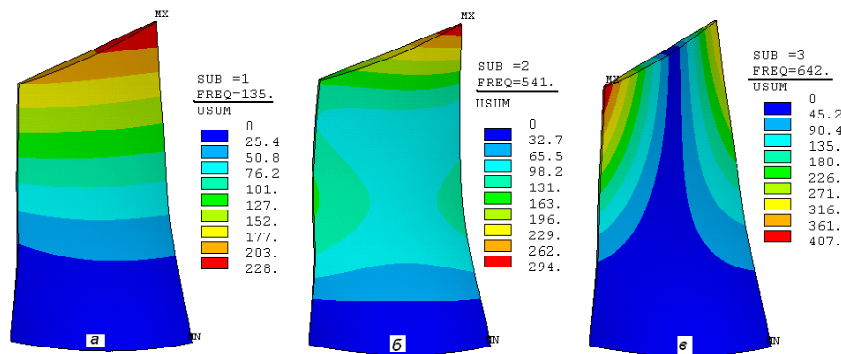


Рис. 17. Три первые формы и частоты собственных колебаний сплошной лопадки вентилятора (а – 1-я изгибная, б – 2-я изгибная; в – 1-я крутильная)

Резонанс по первой форме колебаний фрагмента сплошной лопадки происходит от 2-й гармоники на низких частотах оборотов ( $\approx 4000$  об/мин), тогда как полая плоская лопадка имеет 2 резонанса по первой форме колебаний от 4-й и 5-й гармоник, практически в рабочем диапазоне частот вращения.

Фрагмент сплошной лопадки имеет резонансы по второй форме колебаний от 6-й, 7-й и 8-й гармоник в рабочем диапазоне частот вращения, а полая плоская лопадка имеет резонансы по 2-й и 3-й формам колебаний от 12...16-й гармоник.

Наблюдается необходимость проведения натурального исследования с тензометрированием.

Создание математической модели и проведение численного исследования модели пера полой плоской вентиляторной лопадки показали, что создание реальной физической модели и проведение экспериментов возможны. Численное исследование можно продолжить при наличии материальной базы натуральных исследований. Тогда с опережением возможно прогнозирование результатов при проведении исследований с натурным объектом.



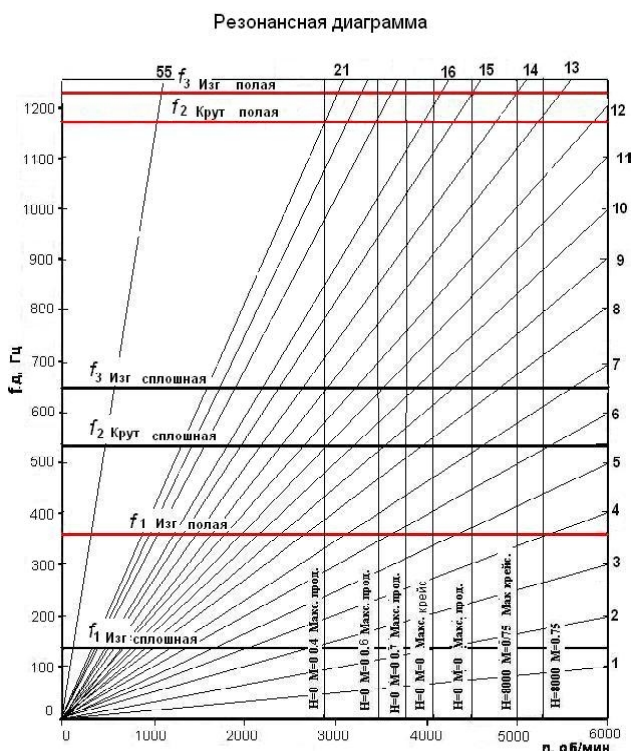


Рис. 18. Диаграмма Кемпбелла фрагмента сплошной вентиляторной лопадки и модели полой плоской лопадки вентилятора

### Выводы

Проведено математическое моделирование полого пера с наполнителем лопадки вентилятора. Выявлены возможные проблемы при проведении данного численного эксперимента. Разработаны пути решения предполагаемых и имеющих проблем.

Определены НДС, формы и частоты собственных колебаний моделей полых рабочих лопадок вентилятора.

Создание физической модели и проведение испытаний укажет пути внесения корректив в разработанную математическую модель полой лопадки вентилятора.

### Список литературы

1. Кайбышев О.А. Численный анализ вариантов конструкции пустотелой вентиляторной лопадки / [О. А. Кайбышев, А. К. Галимов, А. А. Круглов и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2004. — № 1. — С. 90–95.
2. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений в полых лопадках вентилятора с повреждениями / М. Ш. Нихамкин, О. Л. Любчик // Вестник ПНИПУ, Аэрокосмическая техника. — 2012. — № 32. — С. 25–35.

Поступила в редакцию 02.02.2016

### Гараненко Т.Р., Прибора Т.І., Березовський Є.К. Математичне моделювання широкохордних порожнистих робочих лопадок вентилятора

*Розглянуті особливості створення широкохордних порожнистих лопадок вентилятора АД. Проведені статичний і модальний аналізи різних варіантів робочих лопадок вентилятора дозволили визначити їх напружено-деформований стан (НДС), форму і частоти власних коливань, що забезпечує створення реальної фізичної моделі порожнистої робочої лопадки вентилятора.*

**Ключові слова:** лопадка вентилятора, титановий сплав, статичний аналіз, динамічний аналіз, гофра, напружено-деформований стан.

### Garanenko T., Pribora T., Berezovskii E. Mathematical design of wide hollow working shoulder-blades of ventilator

*The features of creation of wide hollow shoulder-blades of ventilator are considered AE. Conducted static and modal the analyses of different variants of working shoulder-blades of ventilator allowed to define their tensely-deformed state (TDS), form and frequencies of eigentones, that provides creation of the real physical model of hollow working shoulder-blade of ventilator.*

**Key words:** shoulder-blade of ventilator, titanic alloy, static analysis, dynamic analysis, flute, tensely-deformed state.