

ОПТИМИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ГТД ПО МАССЕ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ТРЕБОВАНИЙ УДЕРЖАНИЯ ОБОРВАВШЕЙСЯ ЛОПАТКИ

© 2012 А. Н. Крундаева, Д. В. Габов, А. Ю. Маралев

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области

Для автоматизации поиска оптимальных по массе и удовлетворяющих требованиям по непробиваемости корпусов создан программный комплекс на основе расчётного комплекса LS-DYNA с применением оптимизатора IOSO, позволяющий путём изменения геометрических параметров получать корпус, удовлетворяющий условию непробиваемости и минимальной массы.

Непробиваемость корпуса, программный комплекс, динамические свойства, фрагментация лопатки.

Вероятность разрушения элементов роторов авиационных ГТД относительно мала по сравнению с вероятностью других отказов, однако потенциальная возможность связанной с этим катастрофы заставляет специально рассматривать эту проблему. Запас энергии, которым обладает фрагмент разрушившегося ротора (лопатки, фрагмент диска), может оказаться достаточным для того, чтобы пробить корпус двигателя и повредить при этом системы жизнеобеспечения самолёта, вызвать пожар. В связи с этим возникает необходимость анализа прочности корпусов в случае удара разрушившейся части ротора. Такой анализ называют расчётом корпуса на непробиваемость [1].

Методика оценки непробиваемости корпусов, разработанная в ЦИАМ и основанная на балансе кинетической энергии E_k фрагмента разрушившегося ротора и работы A деформации и последующего разрушения корпуса, позволяет в явном виде получить соотношения для расчёта толщины корпуса, необходимой для удержания фрагмента заданных размеров при известной скорости удара. В отсутствие опытных данных эта методика даёт завышенное значение толщины корпуса.

Для обеспечения требуемой безопасности полётов, прописанной в авиационных правилах АП 33, кроме расчётов непробиваемости корпусов проводится экспериментальное подтверждение локализации в корпусах двигателя фрагментов роторов. Так, одно из наиболее дорогостоящих испытаний – проверка локализации разрушения при об-

рыве вентиляторной лопатки. Ввиду высокой стоимости таких испытаний они должны носить именно подтверждающий характер и быть предварительно смоделированы.

На предприятии ОАО «НПО «Сатурн» при проектировании новых ГТД была поставлена задача минимизировать затраты и время для выбора оптимальной толщины корпусов авиационных двигателей.

Оценка непробиваемости конструкции корпуса вентилятора

В рамках проекта создания двигателя SaM 146 была разработана 3D -методика расчёта непробиваемости корпусов на основе программного комплекса LS-DYNA [2]. Данная методика была верифицирована по результатам сертификационных испытаний на полноразмерном двигателе.

В процессе создания методики получены динамические свойства материалов корпусов и лопаток КНД во всём диапазоне скоростей деформации, характерных для условий соударения [3].

Разработанная 3D -методика позволяет определить фрагментацию лопатки, траекторию движения оторвавшихся фрагментов лопатки, описать весь процесс их соударения с корпусом и другими лопатками, оценить возможность разрушения корпуса.

Разработка программного комплекса оптимизации корпусов компрессора и турбины

Для автоматизации поиска оптимальных по массе и удовлетворяющих требованиям по непробиваемости корпусов был соз-

дан программный комплекс на основе расчётного комплекса LS-DYNA с применением оптимизатора IOSO [4], позволяющий путём варьирования геометрических параметров получать конструкции корпусов, удовлетворяющих условию непробиваемости и минимальной массы.

Принцип работы

Программный комплекс осуществляет автоматизированный процесс поиска решения (оценка перемещений и напряжений на корпусе) с возможностью варьирования толщиной корпуса, расположениями и размерами фланцев с целью снижения массы корпуса и выполнения условия непробиваемости. Область поиска, определяющая границы варьирования изменяемых параметров, ограничивается снизу технологическими толщинами, которые рассчитаны на первом этапе проектирования конструкции корпуса при учёте влияния статических нагрузок, а сверху ограничивается толщинами, определёнными по энергетической методике ЦИАМ.

В процессе оптимизации программа находит варианты распределения геометрических параметров. Если текущий вариант удовлетворяет условию непробиваемости и минимальной массе, то этот вариант запишется как лучший. Во время оптимизации при нахождении оптимальных параметров программа построит график улучшения целевой функции (рис.1). Когда график целевой функции выходит на прямую, это означает, что программа определила оптимальное сочетание толщины корпуса с его массой при заданных граничных условиях.

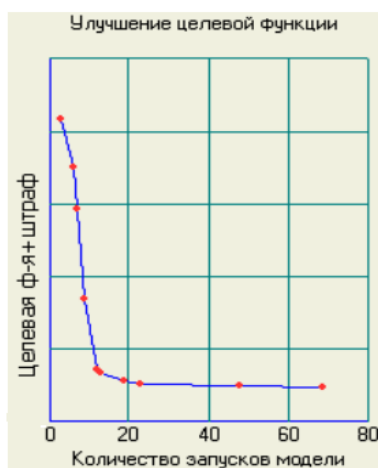


Рис. 1. График улучшения целевой функции

Возможны два варианта выхода из программы: либо по ограничению количества итераций, либо при нахождении оптимального решения.

Возможности программного комплекса

1. Автоматическая генерация оболочечной конечно-элементной модели в формате LS-DYNA на основе геометрии, построенной в CAD/CAM -системе Unigraphics по параметрам, заданным в IOSO.

2. Автоматическая генерация расчётной модели и расчёт на обрыв лопатки вентилятора в LS-DYNA.

3. Автоматический выбор корпуса, имеющего минимальную массу и пластические деформации.

4. Автоматическое перестроение сетки по результатам оптимизации для полученного корпуса.

Возможности программного комплекса для задания расчётной схемы

- различные схемы закрепления корпусов;
- возможность расчёта нескольких корпусов;
- возможность задания сценария обрыва лопатки.

Пример расчётной схемы задачи, используемой для оптимизации корпусов КНД

С целью учёта податливости сборки корпусов при удержании обрывающихся фрагментов лопаток ротора КНД в расчётную схему включены все корпуса статора КНД с 1-й по 3-ю ступени. Общий вид расчётной модели корпусов КНД представлен на рис. 2.

Связь между корпусами выполнена за счёт соединения узел в узел, реализующего совместность перемещений. Болтовое соединение не моделируется в рамках работы оптимизатора.

Передний и задний фланцы составного корпуса закреплены по всем степеням свободы: для передней части КНД, где стоит радиально-упорный подшипник с направляющими аппаратами, введено допущение, а в задней части корпуса таким образом моделируется стойка.

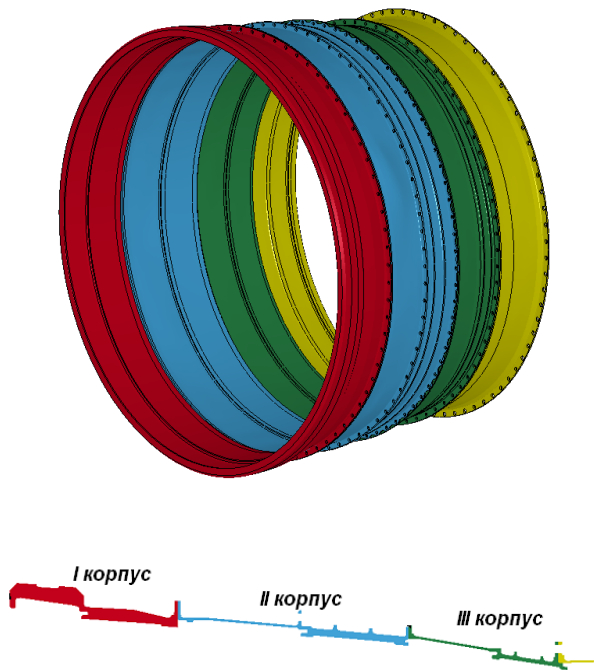


Рис. 2. Оптимизируемый корпус вентилятора

Конечно-элементная модель корпусов и лопатки построена с использованием оболочечных конечных элементов с распределением толщин (рис. 3), взятых с 3D-модели. Размерность задачи составляет 320 тысяч узлов и 312 тысяч элементов. Характерные размеры элементов (диагональ) на корпусе и на лопатках соответствуют размерам, полученным при верификации расчётов по экспериментальным данным, для двигателя SaM 146.

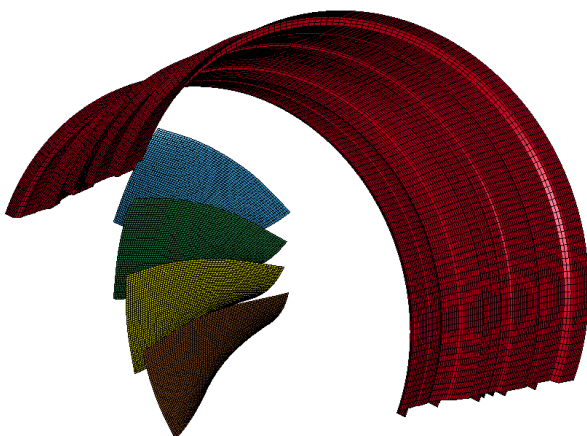


Рис. 3. Конечно-элементная модель первой ступени вентилятора КНД

В состав КНД входят три ступени вентилятора. Каждое рабочее колесо в расчётной схеме представлено четырьмя соседними лопатками. При этом обрывается вторая ло-

патка, идущая по направлению вращения. Первая, третья и четвёртая лопатки моделируются для оценки взаимодействия оборвавшейся лопатки с расположенными рядом с ней лопатками. Остальные лопатки венца находятся в отдалении от места обрыва и поэтому не моделируются.

Контакт оборвавшейся лопатки и корпуса, а также фрагментов лопатки друг с другом задаётся контактным алгоритмом по поверхности с учётом разрушения элементов обрывающейся лопатки и статическим коэффициентом трения, равным единице. Значение критерия разрушения элементов лопатки при её деформации и коэффициент трения взяты из верифицированных результатов расчёта для двигателя SaM 146.

Корпус и лопатки выполнены из титана.

Для каждой ступени КНД последовательно моделируется обрыв лопатки. Расчёт осуществляется на максимальном режиме работы двигателя.

Для проверки работоспособности оптимизированных на основе оболочечных конечных элементов корпусов проведён поверочный 3D-расчёт в программном комплексе LS-DYNA по методике, верифицированной на испытаниях двигателя SaM 146.

Результаты работы

В ходе работ по проектированию перспективного двигателя проведена оптимизация по массе корпусов (рис. 4) с выполнением требований по непробиваемости. Программа перебрала более 1000 вариантов корпусов и определила наилучшие варианты.

С использованием результатов оптимизации геометрии корпуса проведён поверочный расчёт по 3D-методике, в котором граничные условия оставались такими же, как и при расчёте с оболочечными элементами.

Основным показателем пробития или непробития корпуса в выполненных расчётах выступает уровень пластических деформаций на внешней поверхности корпуса в зоне взаимодействия с оборвавшейся лопаткой.

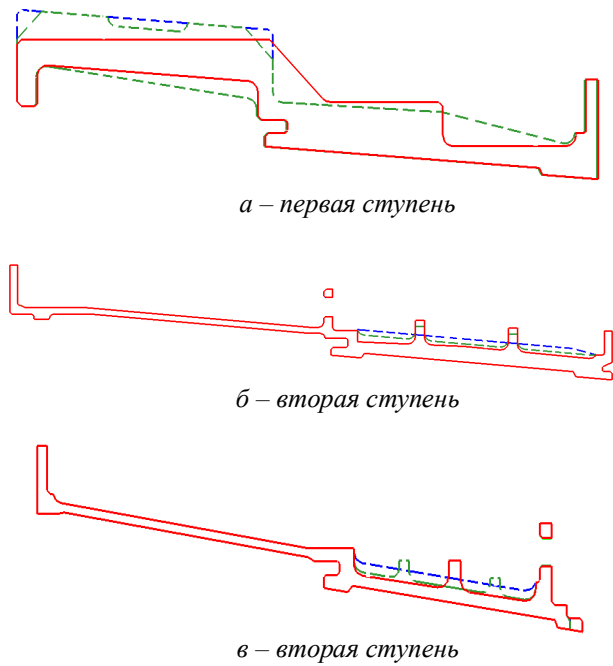


Рис. 4. Оптимизированные корпуса вентилятора:
 - - - - контур корпуса по методике ЦИАМ,
 - - - - контур оптимизированного корпуса

На рис. 5 – 7 показаны пластические деформации на внутренней и внешней поверхности первого и второго корпусов в момент окончания расчёта. Высокий уровень пластических деформаций на внутренней поверхности корпуса возникает из-за трения элементов оборвавшейся лопатки с корпусом. В данной зоне происходит «счёрсывание» небольшого слоя металла из-за взаимодействия оборвавшейся лопатки с поверхностью корпуса.

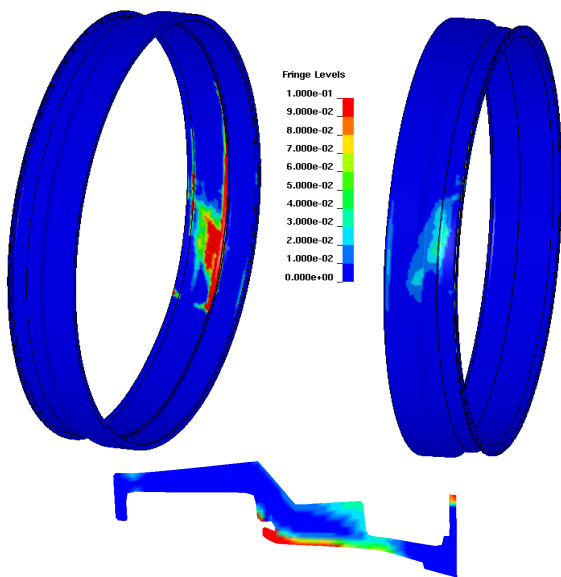


Рис. 5. Пластические деформации на первом корпусе от ударов лопатки вентилятора

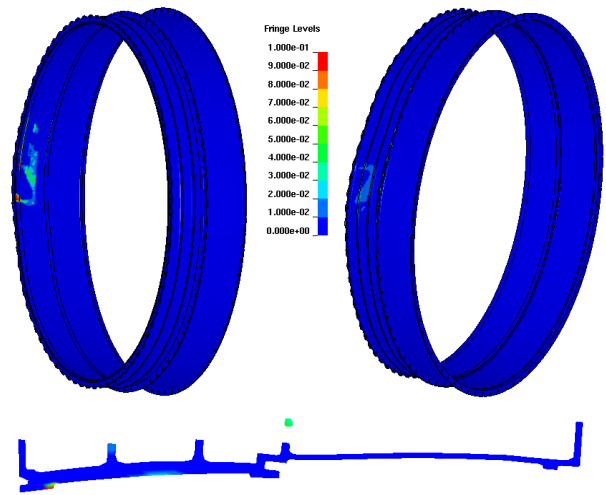


Рис. 6. Пластические деформации на втором корпусе от ударов лопатки вентилятора

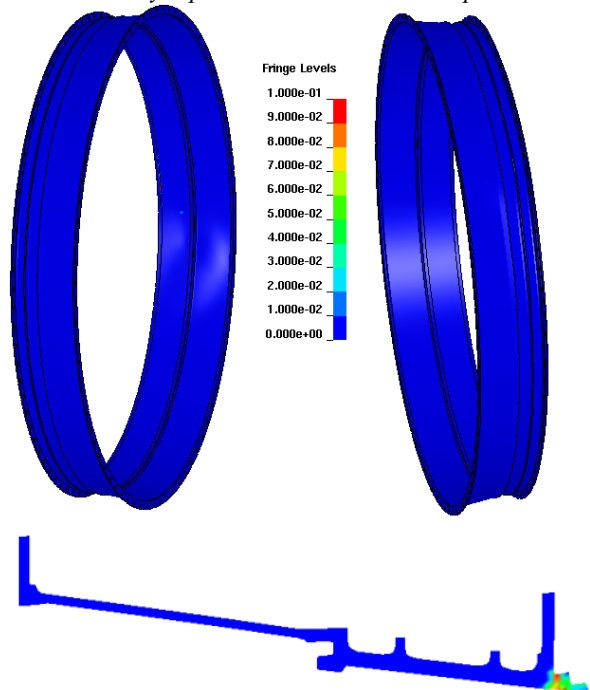


Рис. 7. Пластические деформации на третьем корпусе от ударов лопатки вентилятора

Результаты расчётов

Максимальные значения пластических деформаций на внешней поверхности корпусов не превышают допустимого значения. Это свидетельствует о том, что спроектированные корпуса способны обеспечить удержание лопатки вентилятора в пределах двигателя.

Результаты 3D -моделирования непробиваемости корпусов компрессора подтверждают работоспособность оптимизированных корпусов, полученных по оболочечной методике. Существующие различия в объём-

ной и оболочечной модели заключаются в том, что оболочечная модель на данный момент ограничена оценивать различные неравномерности геометрии исследуемого корпуса.

Анализ результатов оптимизации (табл. 1) показал, что максимальный выигрыш по массе составил 21.49% и был получен для корпуса первой ступени компрессора КНД.

Таблица 1. Результаты оптимизации по массе

Нумерация корпусов	1	2	3	Сумма
% от методики ЦИАМ	21.49	16.12	15.23	18.86

Выводы

1. Разработан комплекс, позволяющий производить оптимизацию корпусов компрессоров и турбин в автоматическом режиме.

2. Применение данной методики позволило снизить суммарную массу проектируемых корпусов на 18.86% относительно расчёта по методике ЦИАМ.

Библиографический список

1. Авиационные правила [Текст]. Ч. 33. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов. – М., 2004.
2. Численное моделирование обрыва лопатки вентилятора [Текст] / Ю.Н. Шмотин, А.А. Рябов, Д.В. Габов [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ, 2005. - № 9 (25). - С. 63–67.
3. Hopkinson B. The Effects of Momentary Stresses in Metals [Text] / B. Hopkinson // Proc. Roy. Soc. (London), 74 (1905).
4. IOSO Technology Center [Текст]: руководство пользователя. IOSO NS version 1.3 // М.: Вековая 21 (www.iosotech.com), 2001 – 2003.

OPTIMIZATION OF CASING ON MASS WITH ENSURING REQUIREMENTS FOR DEDUCTION OF THE RAGGED BLADE

© 2012 A. N. Krundaeva, D. V. Gabov, A. Y. Maralev

JSC “Saturn”, Rybinsk

To automate the search for optimal weight and meet requirements for containment ability of case was established software package based on the program LS-DYNA with the IOSO, which allows by changing the geometry of the receiving case, satisfying for containment ability and low mass.

Containment ability of case, program, computational modeling.

Информация об авторах

Крундаева Анастасия Николаевна, инженер-конструктор 3 категории Научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области. E-mail: anastas_siy@mail.ru. Область научных интересов: быстрая динамика, численное моделирование, прочность.

Габов Дмитрий Валентинович, ведущий инженер-конструктор Научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области. Область научных интересов: моделирование быстропротекающих динамических процессов, общая динамика авиационных двигателей, усталость и механика разрушения.

Маралев Андрей Юрьевич, инженер-конструктор Научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области. E-mail: pitbull_syndicate@rambler.ru. Область научных интересов: создание программ на языках программирования: C++, QT.

Krundaeva Anastasia Nikolaevna, postgraduate student of Department of methods of engineering and numerical analysis, RSATU. JSC “Saturn”. E-mail: anastas_siy@mail.ru. Area of research: quick dynamics, computational modeling, strength.

Gabov Dmitriy Valentinovich, senior ingeneer of JSC “Saturn”. Area of research: Fast dynamics process simulation, dynamics of aircraft engine, fatigue and fracture mechanics/

Maralev Andrey Yurievich, senior ingeneer JSC “Saturn”. E-mail: pitbull_syndicate@rambler.ru. Area of research: create programs on programming languages: C++, QT.