

УДК 629.7.036.3

¹Ф.К. ЗАКИЕВ, ¹А.С. КИСЕЛЕВ, ²Н.П. ВЕЛИКАНОВА, ²П.В. ИВАНОВ

¹ОАО КПП «Авиамотор» Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ Казань, Россия

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ КОРПУСОВ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ

Приведен анализ напряженно-деформированного состояния силовых корпусов камеры сгорания наземной газотурбинной установки для газоперекачивающего агрегата. Конструкция камеры сгорания разработана на базе газогенератора авиационного конвертированного двигателя. Изменения в конструкцию внесены в связи с изменением топлива. Оценка напряженно-деформированного состояния силовых элементов камеры сгорания выполнено с помощью программных комплексов «NX 7.5» и «ANSYS». В результате проведенной работы установлено, что ресурс силовых элементов камеры сгорания составляет не менее 100000 часов. Полученные запасы прочности являются достаточными для силовых корпусов камеры сгорания наземного газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: корпус наружный, корпус внутренний, кольцо подвески, прочность, устойчивость, ресурс.

Введение

Камера сгорания газотурбинного двигателя является сложным и ответственным узлом, от степени совершенства которого во много зависят основные данные всего двигателя, его надежность и ресурс. Проектирование камер сгорания энергетических установок имеет свои особенности, связанные с решением задач по общим требованиям экологии и эксплуатационной надежности.

Корпуса наружный и внутренний камеры сгорания являются силовыми узлами двигателя, выполненными из жаропрочного листового сплава на никелевой основе. Материалы, применяемые для изготовления камер сгорания, должны удовлетворять специфическим условиям работы узлов и обеспечивать работоспособность конструкции в течение ресурса работы двигателя. Корпус наружный камеры сгорания представляет собой сварной узел, состоящий из профилированной передней и задней листовых стенок и фланцев – переднего среднего и заднего. Передним и задним фланцами корпус камеры сгорания крепится соответственно к наружным фланцам спрямляющего аппарата компрессора и корпуса соплового аппарата турбины. Внутренний корпус камеры сгорания представляет собой профилированный сварной узел, крепящийся передним фланцем к спрямляющему аппарату компрессора, а задним – к корпусу соплового аппарата турбины.

Узлы камер сгорания подвержены воздействию высоких температур и перепадов

давления, динамическим и вибрационным нагрузкам, а также пульсациям газового потока, возникающим при сгорании топлива. Максимальный перепад давления на корпус камеры может достигать 300 МПа, а температура стенок – 650...700°С. Основные требования, предъявляемые к материалам камер сгорания:

- высокая жаропрочность и жаростойкость;
- высокое сопротивление усталости и трещинообразование при низкой скорости распространения трещин;
- устойчивость к газовой коррозии;
- удовлетворительные технологические свойства (способность к пластической деформации, хорошая обрабатываемость резанием, хорошая свариваемость и др.) [2]

На работающем двигателе на элементы камеры сгорания действуют следующие нагрузки:

- газодинамические силы, обусловленные перепадом давления;
- осевая сила и окружное усилие от газового потока, действующие на корпусные детали камеры сгорания;
- температурные усилия от нагрева деталей, возникающие в осевом и радиальном направлениях в зонах соединения элементов. [3]

1. Расчет на прочность корпуса наружного и кольца подвески жаровой трубы камеры сгорания

Геометрические модели корпуса наружного камеры сгорания и кольца подвески жаровой части созданы с помощью САД-системы «NX 7.5», затем для последующего расчета на

прочность из полученной модели был вырезан сектор (1/42 часть - кратно числу отверстий в кольце подвески), представленный на рис. 1.

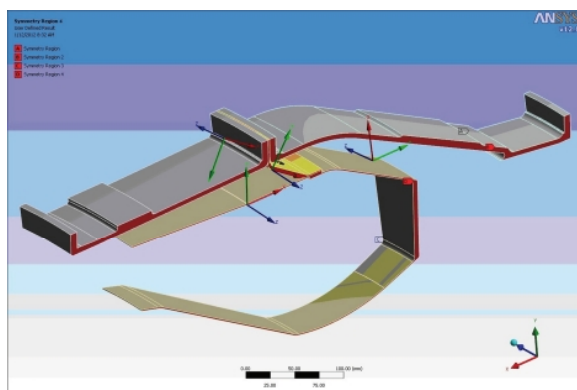


Рис. 1. Геометрическая модель корпуса наружного с кольцом подвески камеры сгорания

Расчет производился методом конечных элементов в трехмерной постановке задачи с использованием свойства циклической симметрии. Для создания конечно-элементной модели были использованы элементы типа Solid186 и Solid187.

Приложение перепада давления, равного $P_{изб} = 17,24 \text{ кгс/см}^2$, производилось на внутренние поверхности корпуса наружного камеры сгорания.

На жаровую часть камеры сгорания действует результирующая реактивная осевая сила величиной $P_r = 1001 \text{ кгс}$, направленная против потока газа. Распределение усилия производилось на узлы крепления уплотнительных колец на кожухах камеры сгорания.

На корпус наружный действует растягивающая осевая сила, равная $P_{осев} = 36587,8 \text{ кгс}$. Приложение и распределение усилия производилось по фланцу крепления к корпусу теплового аппарата турбины.

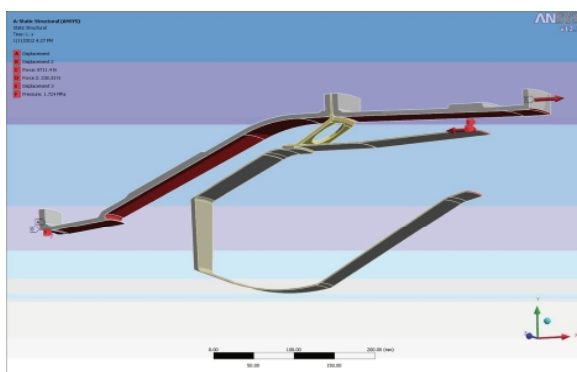


Рис. 2. Ограничение перемещений и приложение усилий

Закрепление модели производилось по фланцу крепления корпуса наружного камеры

сгорания к корпусу компрессора. Ограничение радиальных перемещений производилось в месте крепления колец уплотнительных на кожухах камеры сгорания. Условия закрепления и приложение усилий изображены на рис. 2.

Кольцо подвески жаровой трубы камеры сгорания изготовлено из материала – сплав ХН50ВМТЮБ. Свойства материала взяты в соответствии с паспортом ВИАМ №524 для рабочей температуры $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Значение предела длительной прочности при рабочей температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ на ресурс 100000 часов получено путем экстраполяции имеющихся параметров длительной прочности для материалов ЭП99 и ЭП199, аналогичных по указанным свойствам.

Корпус наружный камеры сгорания изготовлен из материала – сплав ХН45ВМТЮБР (ЭП718). Свойства материала взяты в соответствии для рабочей температуры $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Значение предела длительной прочности при рабочей температуре на ресурс 100000 часов получено путем экстраполяции имеющихся параметров длительной прочности [4]. Свойства материалов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Свойства материалов

Материал	ХН50ВМТЮБ	ХН45ВМТЮБР
Модуль упругости, E , кгс/мм ²	16600	15700
Коэффициент Пуассона, μ	0,28	0,28
Плотность, ρ , кг/м ³	8180	8290
Предел длительной прочности, $\sigma_{100000}^{500 \text{ }^\circ\text{C}}$, кгс/мм ²	80,5	63,7

В расчете учтено действие температурного расширения до рабочей температуры $500 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент линейного расширения задавался равным $\alpha = 14,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$.

Изолинии интенсивности эквивалентных напряжений и радиальных перемещений изображены на рис. 3 - 6.

Максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу на корпусе наружном камеры сгорания составило $\sigma_{\max}^{\text{KH}} = 20,03 \text{ кгс/мм}^2$, что видно из рис. 3.

Коэффициент запаса длительной прочности по эквивалентным напряжениям на корпусе наружном камеры сгорания при этом равен:

$$K_M^{\text{KH}} = \frac{\sigma_{100000}^{500 \text{ }^\circ\text{C}}}{\sigma_{\max}} = \frac{63,7}{20,03} = 3,18 \quad (1)$$

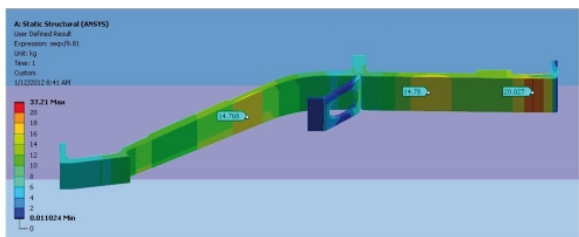


Рис. 3. Изолинии эквивалентных напряжений по Мизесу, корпус наружный, кгс/мм²

Максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу, как видно из рис.4, на кольце подвески жаровой трубы камеры сгорания составило $\sigma_{\max}^{\text{кп}} = 15,15$ кгс/мм²

Коэффициент запаса длительной прочности по эквивалентным напряжениям на кольце подвески жаровой трубы камеры сгорания при этом равен:

$$K_M^{\text{кп}} = \frac{\sigma_{1000000}^{500\text{ }^\circ\text{C}}}{\sigma_{\max}} = \frac{80,5}{15,15} = 5,31 \quad (2)$$

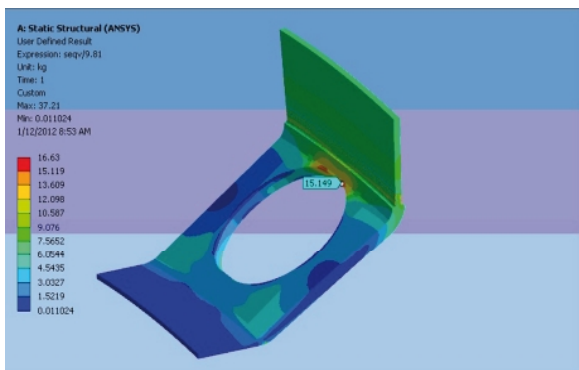


Рис. 4. Изолинии эквивалентных напряжений по Мизесу, кольцо подвески жаровой трубы, кгс/мм²

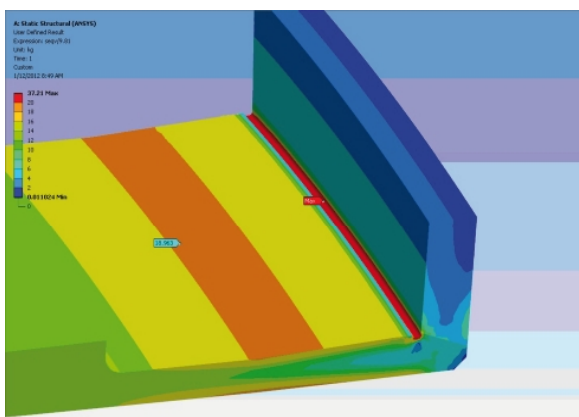


Рис. 5. Изолинии эквивалентных напряжений по Мизесу, фланец крепления к сопловому аппарату турбины, кгс/мм²

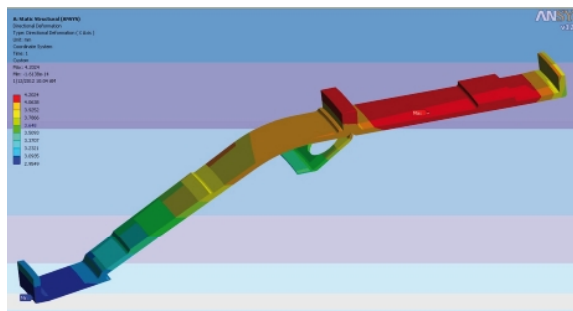


Рис. 6. Изолинии радиальных перемещений, мм

Максимальные радиальные перемещения корпуса наружного от действия силовых факторов составили $u_r = 4,2$ мм.

Коэффициенты запаса длительной прочности достаточны для работоспособности корпуса наружного и кольца подвески камеры сгорания на рабочем режиме в течение ресурса 100000 часов.

2. Расчет на устойчивость корпуса внутреннего камеры сгорания

Проведен расчет корпуса внутреннего камеры сгорания соединенным с корпусом соплового аппарата турбины на прочность и устойчивость на ресурс 100000 часов.

Геометрические модели корпусов построены с использованием системы «Компас» и переданы в расчетную систему «ANSYS» через формат «IGES».

В связи с отсутствием экспериментальных данных по длительной прочности материалов корпусов, оценка запасов прочности проводилась по кривым, полученным экстраполяцией данных по длительной прочности материалов в соответствии со справочными данными ВИАМ с помощью параметра Ларсона - Миллера. Расчетная модель корпусов представлена на рис 7.

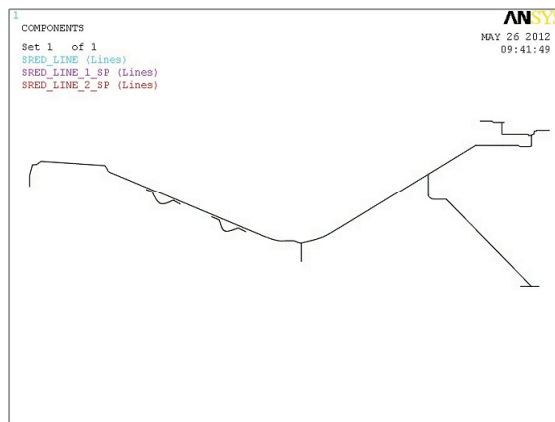


Рис. 7. Средняя линия модели корпусов внутренних камеры сгорания и соплового аппарата турбины

Расчет выполнен для режима температур наружного воздуха $t_H = -55^\circ\text{C}$. На корпуса внутренние действуют внешнее избыточное давление, продольная сила и крутящий момент, соответственно от осевых и окружных усилий в сопловых лопатках турбины, причем от первого соплового аппарата турбины на него передается, только половина осевых и окружных усилий в силу закрепления лопаток, как балки на двух опорах, - другая воспринимается наружным корпусом.

Осевое усилие равно:

$$F_{\text{осев}} = \frac{P_{\text{осев}}^{\text{Ica}}}{2} \cdot Z_1 = \frac{2699}{2} \cdot 54 = 7288\text{H} = 7436\text{кгс}, \quad (3)$$

где $P_{\text{осев}}^{\text{Ica}}$ - осевая сила, равная $P_{\text{осев}}^{\text{Ica}} = 2699\text{H}$;
 $Z_1 = 54$ - количество лопаток первого соплового аппарата турбины.

Окружное усилие равно:

$$F_{\text{окр}} = \frac{P_{\text{окр}}^{\text{Ica}}}{2} \cdot Z_1 = \frac{1189,5}{2} \cdot 54 = 32115\text{H} = 3277\text{ кгс}, \quad (4)$$

где $P_{\text{окр}}^{\text{Ica}}$ - окружная сила, равная $P_{\text{окр}}^{\text{Ica}} = 1189,5\text{H}$;
 $Z_1 = 54$ - количество лопаток первого соплового аппарата турбины.

Материал корпуса внутреннего камеры сгорания - сплав ХН45МВТЮБР (ЭП718), корпуса внутреннего соплового аппарата турбины - сплав ХН77ТЮР-ВД (ЭИ437Б). Механические свойства этих материалов приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2 - Свойство материала - сплав ХН77ТЮР-ВД

$\sigma_B^{500^\circ}$, кгс/мм ²	90
E^{500° , кгс/мм ²	1,7E+04
μ	2,8E-01
ρ , кг·с ² /мм ⁴	8,2E-10

Таблица 3 - Свойство материала - сплав ХН45МВТЮБР

$\sigma_B^{500^\circ}$, кгс/мм ²	100
E^{500° , кгс/мм ²	1,57E+04
μ	2,8E-01
ρ , кг·с ² /мм ⁴	8,29E-10

Схема нагружения корпусов камеры сгорания и турбины изображена на рис. 8, задание граничных условий представлено на рис. 9.

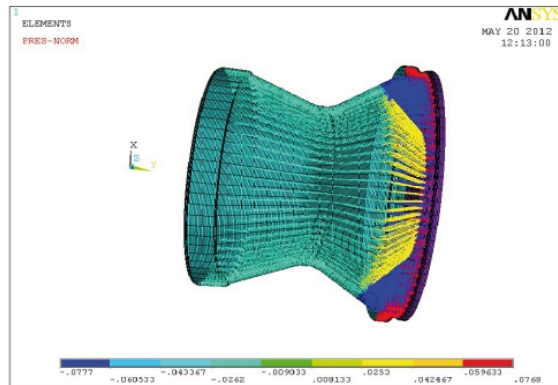


Рис. 8. Схема приложения давления

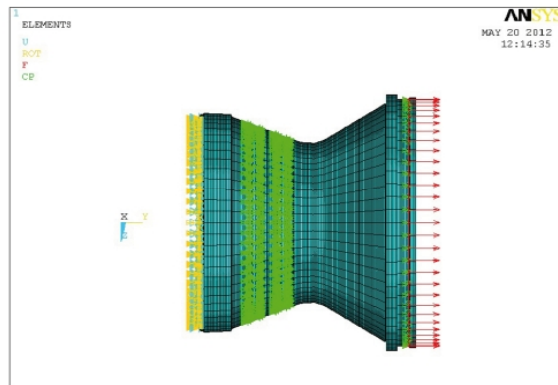


Рис. 9. Схема задания граничных условий и нагружения осевой силой и крутящим моментом

Жесткость фланцев со стороны соплового аппарата турбины вводится в конечно - элементную модель посредством использования оператора CP на узлах, лежащих в зоне фланца, через задание установок степеней свободы для данного набора узлов. Результаты расчета представлены на рис. 10.

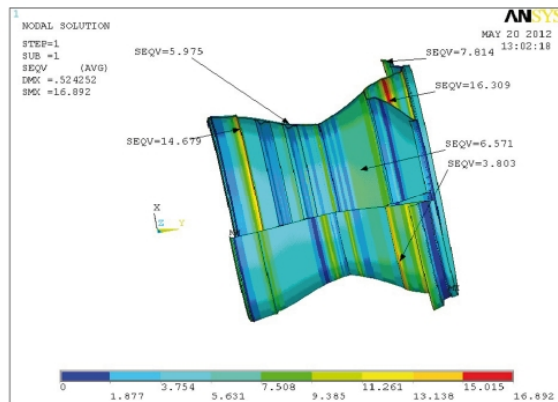


Рис. 10. Изолинии эквивалентных напряжений корпусов по Мизесу (вырез 30°)

Максимальное эквивалентное напряжение, полученное на внутреннем корпусе соплового аппарата турбины, составляет $\sigma_{\text{ЭКВ}} = 16,892\text{ кгс/мм}^2$.

Предел длительной прочности материала – сплав ХН77ТЮР-ВД (ЭИ437Б) получен экстраполяцией значений, взятых из Справочника ВИАМ [4] по авиационным материалам, с помощью параметра Ларсона-Миллера:

$$\sigma_{\text{дл}}^t = \sigma_{100000}^t = \sigma_{100000}^{500^\circ\text{C}} = 53,7 \text{ кгс/мм}^2$$

Минимальный коэффициент запаса прочности корпуса внутреннего соплового аппарата турбины:

$$K_{\text{min}} = \frac{\sigma_{\text{дл}}^t}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{53,7}{16,892} = 3,2 \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{дл}}^t$ – предел длительной прочности материала ХН77ТЮР;

σ_{max} – максимальное эквивалентное напряжение на внутреннем корпусе соплового аппарата турбины.

Максимальное эквивалентное напряжение на внутреннем корпусе камеры сгорания составляет $\sigma_{\text{экв}} = 14,679 \text{ кгс/мм}^2$.

Предел длительной прочности материала – сплав ХН45МВТЮБР (ЭП718) получен экстраполяцией значений, взятых из Справочника ВИАМ [4] по авиационным материалам, с помощью параметра Ларсона-Миллера:

$$\sigma_{\text{дл}}^t = \sigma_{100000}^t = \sigma_{100000}^{500^\circ\text{C}} = 63,7 \text{ кгс/мм}^2$$

Минимальный коэффициент запаса прочности корпуса внутреннего камеры сгорания:

$$K_{\text{min}} = \frac{\sigma_{\text{дл}}^t}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{63,7}{14,679} = 4,3 \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{дл}}^t$ – предел длительной прочности материала ХН45МВТЮБР;

σ_{max} – максимальное эквивалентное напряжение на внутреннем корпусе камеры сгорания.

Первая форма потери устойчивости корпусов представлена на рис. 11.

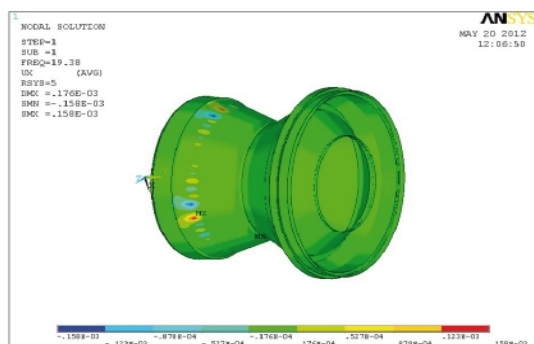


Рис. 11. Первая форма потери устойчивости

Полученные коэффициенты запаса достаточны. Минимальный коэффициент запаса устойчивости составляет $K_y = 19,38$. Полученный коэффициент запаса устойчивости достаточен.

Вывод

В результате проведенного расчета на прочность корпуса наружного с кольцом подвески жаровой трубы и устойчивость корпуса внутреннего с корпусом соплового аппарата получены следующие результаты:

1. Для корпуса наружного камеры сгорания с кольцом подвески жаровой трубы максимальное значение эквивалентных напряжений по Мизесу составило:

$\sigma_{\text{max}}^{\text{кн}} = 20,03 \text{ кгс/мм}^2$ – на корпусе наружном камеры сгорания;

$\sigma_{\text{max}}^{\text{кп}} = 15,15 \text{ кгс/мм}^2$ – на кольце подвески жаровой трубы камеры сгорания.

Коэффициенты запаса длительной прочности по эквивалентным напряжениям при этом равны:

$K_M^{\text{кн}} = 3,18$ – на корпусе наружном камеры сгорания;

$K_M^{\text{кп}} = 5,31$ – на кольце подвески жаровой трубы камеры сгорания.

Максимальные радиальные перемещения корпуса наружного от действия силовых факторов и температурного расширения составили $u_r = 4,2 \text{ мм}$.

Коэффициенты запаса длительной прочности достаточны для работоспособности корпуса наружного и кольца подвески камеры сгорания на рабочем режиме в течение ресурса 100000 часов.

2. Для корпуса внутреннего камеры сгорания с корпусом соплового аппарата турбины запасы прочности составили:

- минимальный коэффициент запаса прочности корпуса внутреннего камеры сгорания составляет $K_{\text{min}} = 4,3$;

- минимальный коэффициент запаса прочности корпуса внутреннего соплового аппарата турбины составляет $K_{\text{min}} = 3,2$.

Минимальный коэффициент запаса устойчивости корпусов внутренних камеры сгорания и соплового аппарата турбины составляет $K_y = 19,38$.

Расчетные минимальные коэффициенты запасов достаточны для безопасной эксплуатации корпуса внутреннего камеры сгорания и корпуса соплового аппарата турбины на ресурс 100000 часов.

Полученные запасы прочности являются достаточными для силовых корпусов камер сгорания наземного газотурбинного двигателя.

Литература

1. Расчет на прочность авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / под ред. Биргера И.А. и Котерова Н.И. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
2. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. для вузов / С.А. Вьюнов, Ю.Н. Гусев, А.В. Карпов и др.; под общ. ред. Д.В. Хромина. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
3. Расчет на прочность деталей машин [Текст] / под ред. И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
4. Справочник по авиационным материалам. Коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы [Текст]/ Справ. ВИАМ – 6-е изд., перераб. и доп. М.: ОНТИ, 1973. – 630 с.

Поступила в редакцию 06.06.2013

Ф.К. Закієв, О.С. Кисельов, Н.П. Великанова, П.В. Іванов. Аналіз напружено-деформованого стану силових корпусів камери згоряння для наземної газотурбінної установки

Наведено аналіз напружено-деформованого стану силових корпусів камери згоряння наземної газотурбінної установки для газоперекачувального агрегату. Конструкцію камери згоряння розроблено на базі газогенератора авіаційного конвертованого двигуна. Зміни в конструкцію внесено у зв'язку із зміною палива. Оцінку напружено-деформованого стану силових елементів камери згоряння виконано за допомогою програмних комплексів «NX 7.5» і «ANSYS». У результаті проведеної роботи встановлено, що ресурс силових елементів камери згоряння становить не менше 100000 годин. Отримані запаси міцності є достатніми для силових корпусів камери згоряння наземного газотурбінного двигуна.

Ключові слова: корпус зовнішній, корпус внутрішній, кільце підвіски, міцність, стійкість, ресурс.

F.K. Zakiev, A.S. Kiselev, N.P. Velikanova, P.V. Ivanov Analysis of stress - strain of power combustion chamber casing for ground gas turbine plant

The analysis of the stress - strain state power bodies terrestrial gas turbine combustion systems for gas-compressor unit. Design of the combustion chamber is designed on the basis of converted aircraft engine gas generator. Changes made to the structure due to changes in fuel. Evaluation of stress - strain state of the power components of the combustion chamber is configured using software systems «NX 7.5» and «ANSYS». As a result of this work found that the resource load-bearing elements of the combustion chamber is not less than 100,000 hours. The resulting safety margins are sufficient to power packages combustion turbine engine ground.

Key words: building exterior, building internal, ring suspension, durability, sustainability, resource.