

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Заместитель начальника управления персоналом –  
начальник отдела кадров ФГУП «ЦАГИ»



В.Н. Баранов  
2019 г.

**Дополнительная профессиональная  
программа повышения квалификации  
«Основы модального анализа и прогнозирования  
явлений аэроупругости»**

**ФГУП ЦАГИ**  
гор. Жуковский

## Пояснительная записка

Дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Основы модального анализа и прогнозирования явлений аэроупругости» (далее – Программа) предназначена для инженерно-технических работников, специалистов и аспирантов, работающих в области авиа- и ракетостроения, а также для студентов и слушателей авиационных высших учебных заведений.

Программа рекомендуется в первую очередь специалистам в области летных, наземных и трубных динамических испытаний и всем тем, кому придется иметь дело с исследованиями динамических свойств и нагрузок реальных динамических систем любого происхождения (общее и транспортное машиностроение, строительные конструкции, объекты нефтегазовой промышленности и т.д.)

Программа разработана на основе профессионального стандарта «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам» (утвержден приказом Минтруда РФ от 04.03.2014 №121Н).

Реализация программы направлена на совершенствование и (или) получение новой компетенции, необходимой для профессиональной деятельности динамики линейных колебательных систем и методов обработки экспериментальных данных.

**Цель программы:** ознакомление с основными принципами расчетно-экспериментального подхода к исследованиям возмущенного движения сложных динамических систем на основе математических моделей, формируемых из результатов наземных, летных и трубных динамических испытаний и/или расчетов.

**Планируемыми результатами** изучения программы является на основе включенных в программу сведений из динамики линейных колебательных систем и методов обработки экспериментальных данных формируются компетенции по:

- ◇ организации динамических испытаний;
- ◇ постановке задач, основных принципов и базовых алгоритмов идентификации и/или корректировки математических моделей в виде уравнений динамики упругой конструкции в потоке;
- ◇ использованию полученных математических моделей к задачам динамики и численного моделирования реакции сложных динамических систем на внешние возмущения.

**В результате освоения программы слушатель должен:**

Знать, уметь и владеть навыками применять:

- основные гипотезы и соотношения аэромеханики упругой конструкции;- основные положения технологии обработки экспериментальных данных динамического эксперимента;
- основные положения технологии модального анализа и идентификации расчетных динамических моделей;

- основные положения методики прогнозирования явлений аэроупругости по результатам динамических испытаний.

**Форма обучения:** очная.

**Режим занятий:** 2 раза в неделю по 2 академических часа (1 ак. час - 45 мин.)

**Итоги обучения:** по окончании проводится итоговая аттестация в виде зачета. По результатам итоговой аттестации при успешном освоении программы выдается удостоверение повышения квалификации установленного образца.

**Объем программы:** 36 ак. час.

**Учебный план  
программы «Основы модального анализа  
и прогнозирования явлений аэроупругости»**

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, академических часов				
		Всего	Лекции	Практика	Самостоятельная работа	Зачет
1	«Основы модального анализа и прогнозирования явлений аэроупругости»	36	22	-	12	2

**Примерный календарный учебный график программы  
«Основы модального анализа  
и прогнозирования явлений аэроупругости»**

Вид занятий	Количество часов по неделям					
	1 неделя	2 неделя	3 неделя	4 неделя	5 неделя	6 неделя
Лекции	4	4	4	6	4	
Самостоятельная работа	2	2	2	4	2	
Зачет	-	-	-	-	-	2
Итого:	6	6	6	10	6	2

**Связь программы «Основы модального анализа  
и прогнозирования явлений аэроупругости»  
с профессиональным стандартом**

<b>Профессиональный стандарт</b>	<b>Обобщенные трудовые функции</b>	<b>Трудовые функции</b>	<b>Уровень квалификации</b>
<p>«Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам» зарегистрировано в Министерстве юстиции РФ 21.03.2014 г. регистрационный № 31692</p> <p>Утверждено приказом Минтруда РФ 04.03.2014 №121н</p>	<p>Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок по отдельным разделам темы</p>	<p>Осуществление проведения работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований А/01.5</p> <p>Осуществление выполнения экспериментов и оформления результатов исследований и разработок А/02.5</p>	5

**Формирование результатов освоения программы  
«Основы модального анализа  
и прогнозирования явлений аэроупругости»  
с учетом профессионального стандарта**

<p>Профессиональный стандарт «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам»</p>	<p>ФГОС ВО по направлению подготовки 24.03.04 «Авиастроение» (уровень бакалавра) -Утвержден приказом Минобра 21.03.2016 №249  -Зарегистрировано приказом Минюста от 25.04.2016 №41910</p>	<p>Профессиональные компетенции</p>
--	---	-------------------------------------

Трудовые функции	Профессиональные задачи	Компетенции
<p>Осуществление проведения работ по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований А/01.5</p> <p>Осуществление выполнения экспериментов и оформления результатов исследований и разработок А/02.5</p>	<p>Участие в разработке облика объектов, согласовании разрабатываемых проектов с подразделениями предприятия;</p> <p>Математическое моделирование процессов и объектов на базе стандартных пакетов исследований;</p> <p>Проведение экспериментов по заданной тематике и анализ результатов экспериментов;</p> <p>Составление отчета по выполненному заданию, участие во внедрении результатов исследований и разработок.</p>	<p>Способность к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства (ОК-5);</p> <p>Способностью владеть навыками математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов исследований (ОПК-10);</p> <p>Способностью к решению инженерных задач с использованием базы знаний математических и естественнонаучных дисциплин (ПК-1);</p> <p>Способностью участвовать во внедрении результатов исследований и разработок (ПК-11);</p> <p>Способность развивать творческую инициативу, рационализаторскую и изобретательскую деятельность, внедрять эффективные инженерные решения в практику, в том числе составлять математические модели объектов профессиональной деятельности (ПСК);</p> <p>Владеть методами аэродинамического расчета и эксперимента(ПСК).</p>

**Тематический план программы  
«Основы модального анализа и прогнозирования явлений аэроупругости»**

№п/п	Наименование темы	Часы
1	Тема 1. Роль динамических свойств конструкций в обеспечении безопасности эксплуатации, ресурса, прочности летательных аппаратов (ЛА) и сооружений.	12
2	Тема 2. Постановка задачи об идентификации и/или коррекции расчетно-экспериментальной динамической модели	22
3	Итоговое занятие (зачет)	2
4	<b>ИТОГО</b>	<b>36</b>

**Рабочая программа «Основы модального анализа  
и прогнозирования явлений аэроупругости»**

№ п/п	Тема	Всего	Контактная работа обучающихся с преподавателем	Самостоятельная работа
	<b>Тема 1. Роль динамических свойств конструкций в обеспечении безопасности эксплуатации, ресурса, прочности летательных аппаратов (ЛА) и сооружений.</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>4</b>
1	Основные источники ошибок, проблемы повышения точности исследований. Особенности расчетно-экспериментальных подходов. Общая характеристика задач идентификации и/или коррекции расчетных моделей по результатам эксперимента. Документированные и рабочие процедуры СМК, утвержденные в институте.	3	2	1
2	Методы обработки экспериментальных данных: регрессионные модели, метод наименьших квадратов, метод главных компонент, обработка временных процессов.	3	2	1
3	Динамика линейных динамических систем (ДС), уравнения динамики конструкции упругого ЛА в потоке, собственные колебания ДС, базовые решения для реакции конструкции ЛА, матричные частотные характеристики.	3	2	1

4	Обобщенные схема и виды динамических испытаний (ДИ). Анализ данных эксперимента, полученных при моногармоническом, полигармоническом, случайном контролируемом и случайном неконтролируемом видах возбуждений, точность получаемых результатов.	3	2	1
<b>Тема 2: Постановка задачи об идентификации и/или коррекции расчетно-экспериментальной динамической модели.</b>		<b>22</b>	<b>14</b>	<b>8</b>
5	Метод прямой идентификации уравнений. Идентификация/коррекция динамической модели на основе модального анализа.	3	2	1
7	Базовые алгоритмы идентификации параметров собственных колебаний, основные допущения и ограничения.	3	2	1
8	Способы формирования базисных векторов системы обобщенных координат. Приведение сигналов датчиков к однородной системе величин.	3	2	1
9	Основные этапы подготовки и проведения летных/трубных испытаний на флаттер. Цель и смысл наземных калибровочных испытаний.	3	2	1
10	Идентификация и/или коррекция динамических матриц жесткости и демпфирования: - формирование матрицы собственных векторов и собственных чисел ДС, признаки идентичности тонов.	3	2	1
11	Идентификация/коррекция матрицы масс: - идентификация базиса нормальных координат, методы идентификации обобщенных масс.	4	2	2
12	Идентификация/коррекция матриц динамических связей между органами управления ЛА и конструкцией.	3	2	1
<b>Форма итоговой аттестации (зачет)</b>		<b>2</b>		
<b>Общий объем, часов</b>		<b>36</b>	<b>22</b>	<b>12</b>

## **Организационно-педагогические условия реализации программы:**

Обучение по программе организуется путем проведения лекционных занятий, самостоятельной работы под руководством преподавателя и самостоятельной работы слушателей. Реализация программы предполагает применение технических средств обучения (компьютерных).

Лекции проводятся в оборудованной учебной аудитории, обеспечивающей демонстрацию видеофильмов, слайдов, плакатов, использование технических средств обучения: ноутбук, проектор, экран.

При проведении лекционных занятий преподаватель регламентирует темп изложения учебного материала, который позволяет слушателям при необходимости производить записи. Перед завершением или в ходе обучения преподаватель отвечает на возникшие у слушателей вопросы, выборочно проверяет степень усвоения материала, а также указывает необходимый перечень учебной литературы для самостоятельного изучения. При необходимости слушатели могут получить у преподавателя материал в электронном виде.

Самостоятельная работа слушателей предусматривает, как правило, выполнение учебных заданий, а также обмен опытом и подготовку к зачету в соответствии с учебной программой. Для подготовки к зачету слушателям предоставляется учебное время для самостоятельной работы.

Для чтения лекций привлекаются ведущие ученые, а также квалифицированные специалисты ФГУП «ЦАГИ».

## **Контроль и оценка результатов освоения программы**

Контроль результатов освоения учебного материала Программы осуществляется в форме зачета и служит формой проверки усвоения слушателями учебного материала программы.

Зачет принимается преподавателем, который непосредственно проводит учебные занятия со слушателями. Перед проведением зачета, при необходимости, проводится консультация.

Содержание зачета включает не менее одного теоретического вопроса из каждой темы учебно-тематического плана, что позволяет проверить качество изученного материала Программы, а также оценить полученные слушателем знания и освоенные профессиональные компетенции.

## **Показатели и критерии оценки результатов освоения Программы:**

«зачтено» - если слушатель правильно ответил не менее чем на 50% от общего числа контрольных вопросов, «не зачтено» - если не выполнены условия оценки «зачтено».



## **Контрольные вопросы для зачета по программе «Основы модального анализа и прогнозирования явлений аэроупругости»**

1. Особенности расчетно-экспериментальных подходов. Общая характеристика задач идентификации и/или коррекции расчетных моделей по результатам эксперимента.
2. Методы обработки экспериментальных данных: регрессионные модели, метод наименьших квадратов, метод главных компонент, обработка временных процессов.
3. Уравнения динамики конструкции упругого ЛА в потоке, собственные колебания ДС, базовые решения для реакции конструкции ЛА на внешнее воздействие, матричные частотные характеристики.
4. Обобщенные схема и виды динамических испытаний (ДИ). Анализ данных эксперимента, полученных при моногармоническом, полигармоническом, случайном контролируемом и случайном неконтролируемом видах возбуждений, точность получаемых результатов.
5. Базовые алгоритмы идентификации параметров собственных колебаний, основные допущения и ограничения.
6. Способы формирования базисных векторов системы обобщенных координат. Приведение сигналов датчиков к однородной системе величин.
7. Основные этапы подготовки и проведения летных/трубных испытаний на флаттер.
8. Цель и смысл наземных калибровочных испытаний.
9. Идентификация и/или коррекция динамических матриц жесткости и демпфирования: формирование матрицы собственных векторов и собственных чисел ДС, признаки идентичности тонов.
10. Идентификация базиса нормальных координат, методы идентификации обобщенных масс.
11. Понятие параметрической расчетно-экспериментальной динамической модели и способы получения ее элементов.
12. Особенности динамических свойств конструкций в потоке, идентификация и/или коррекция аэродинамических коэффициентов по результатам динамических испытаний в потоке.
13. Учет модификаций конструкции, виды и алгоритмы учета простейших модификаций.
14. Характерные нелинейности, способы выделения нелинейных элементов и определения их параметров.
15. Использование расчетно-экспериментальных моделей для специализированных исследований: расчет границ флаттера и дивергенции, численное моделирование реакции ЛА на внешние воздействия.

**Учебно-методическое обеспечение программы  
«Основы модального анализа и прогнозирования явлений аэроупругости»**

**Рекомендуемая литература:**

1. Б.Д. Брянцев, С.И. Калабухов, В.И. Клепцов. Некоторые вопросы динамических испытаний и прогнозирования флаттера по результатам испытаний на докритических режимах. Материалы научно-технической конференции ЦАГИ Декабрь 2016г. Труды ЦАГИ инв. №2764, 10 стр. 2017г.
2. Г. А. Амирьянц, Ф. З. Ишмуратов, Ю. А. Найко, Ма Цзинчжун, Ван Голян, Лю Минь. Расчетно-экспериментальные исследования характеристик статической аэроупругости административного самолета //Ученые записки ЦАГИ. 2018. Т.XLIX, №8, с.69 – 77
3. Б.Д. Брянцев. К вопросу о преимуществах использования криогенных аэродинамических труб для исследований явлений аэроупругости. // Труды научно-технической конференции Прочность конструкций летательных аппаратов, Жуковский: ЦАГИ, 2018г. 10с.
4. Б.Д. Брянцев, Б.В. Григорьев, В.А. Мосунов, О.А. Орлова, С.Э. Парышев, А.В. Фролов. Разработка технологии экспериментальных исследований флаттера на основе идентификации модальных параметров в базисе нормальных (обобщенных) координат // Труды научно-технической конференции Прочность конструкций летательных аппаратов, Жуковский: ЦАГИ, 2018г. 4с.
5. М.Ф. Гарифуллин. Численные методы в расчетных и экспериментальных исследованиях нестационарных явлений аэроупругости: в 2-х книгах /Центральный аэрогидродинамический ин-т им. проф. Н.Е. Жуковского, — М.: Наука. — Кн. 1: Численные методы в расчетных исследованиях, 2016, 352 с.
6. ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ РВ 0015-002, РК СМК 4-00-2017.

**Материально-технические условия реализации программы:**

1. Компьютерный класс.
2. Проекционное оборудование (ноутбук, проектор, экран).