

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор  
академик РАН

Е.А. Микрин

2018 г.

## ПРОГРАММА

кандидатского экзамена по направлению подготовки  
научно-педагогических кадров в аспирантуре  
24.06.01 Авиационная и ракетно-космическая техника

направленность 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы  
летательных аппаратов»

Программа кандидатского экзамена по направленности подготовки «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» сформирована в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 24.06.01 Авиационная и ракетно-космическая техника (приказ Минобрнауки России от 30.07.2014 № 890), Порядком организации и осуществления образовательной деятельности по программам подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре (приказ Минобрнауки России от 19.11.2013 № 1259), учебным планом подготовки научно-педагогических кадров «РКК «Энергия» по направленности «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов».

Составители:

к.т.н.

Чернягин А.Г.

к.т.н.

Прохоров Ю.М.

Согласовано:

Заведующая аспирантурой

Потрываева Е.В.

Программа рассмотрена на заседании секции НТС «Подготовка научных кадров»

Протокол № 4/2018 от 17.07.2018

Председатель секции НТС  
«Подготовка научных кадров»

Лукьяшко А.В.

Таблица переутверждения программы

|   |                  |                  |                  |                  |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Год утверждения<br>(переутверждения)  |                  |                  |                  |                  |
| Председатель (заместитель<br>председателя секции НТС),<br>ФИО, ученая степень |                  |                  |                  |                  |
| Подпись   |                  |                  |                  |                  |
| Номер и дата протокола<br>заседания секции НТС                                | Протокол №<br>от | Протокол №<br>от | Протокол №<br>от | Протокол №<br>от |

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Программа предназначена для проведения кандидатского экзамена по направлению подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника», по направленности «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» в аспирантуре «РКК «Энергия».

В основу настоящей программы положены следующие дисциплины: прочность и тепловые режимы летательных аппаратов; общетехнические основы анализа прочности КЛА; тепловые режимы летательных аппаратов; программный комплекс ANSYS и NASTRAN в задачах прочности конструкций КЛА; обеспечение прочности как системный процесс.

На экзамене по направленности «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» аспирант должен продемонстрировать знания о способах обеспечения прочности ЛА, последовательности и объемах работ, продемонстрировать владение методами использования современных технологий при построении расчетных моделей, владения навыками обработки результатов прочности и тепловых испытаний ЛА, владение методами оценки влияния параметров элементов СОТР на тепловой режим ЛА.

Указанные знания и умения аспирант приобретает в процессе освоения дисциплин учебного плана подготовки аспирантов по направленности.

### **1. Динамика конструкций и прочность летательных аппаратов (ЛА). Расчет тонкостенных элементов конструкции**

*Основы механики твердого деформируемого тела.*

Кинематика деформируемой среды. Эйлеровы и Лагранжевы координаты. Перемещения. Малые и конечные деформации. Выражение деформаций через перемещение. Напряжения. Дифференциальные уравнения равновесия и движения. Граничные условия. Физические законы деформирования. Обобщенный закон Гука для изотропных и анизотропных материалов с учетом температуры. Модели и законы деформирования для пластического, упруго пластического и вязко упругого тел. Формулировка краевых задач статики и динамики деформируемого тела.

Потенциальная энергия деформации линейноупругого тела. Вариационные принципы Лагранжа, Даламбера Лагранжа, Кастильяно. Смешанный вариационный принцип. Теоремы взаимности, Клапейрона, Кастильяно. Вариационные методы Ритца, Бубнова Галеркина, Трефца, конечных элементов (КЭ).

Плоская деформация и плоское напряженное состояние. Бигармоническое уравнение для функции напряжений. Кручение призматических стержней. Уравнение для функции касательных напряжений. Вариационные и численные методы решения задач плоского напряженного состояния и кручения.

*Прикладные модели и методы расчета тонкостенных элементов конструкций.*

Изгиб тонких пластин; дифференциальное уравнение для функции прогиба и граничные условия; вариационная формулировка задачи; вариационные и численные методы решения (методы Ритца, Бубнова Галеркина, Власова Канторовича, конечных элементов, конечных разностей).

Основные соотношения и уравнения общей теории оболочек. Оболочки вращения: использование разложений в ряды Фурье; численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений; применение метода КЭ (МКЭ), когда в качестве КЭ рассматриваются кольцевые полоски. Осесимметричная и антисимметричная деформация оболочки вращения: безмоментное состояние; краевой эффект. Полубезмоментная теория цилиндрических оболочек.

Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния составных

тонкостенных конструкций: деление конструкции на КЭ; модели деформирования и аппроксимации для КЭ; обобщенные координаты конечно-элементной модели конструкции; условия сопряжения КЭ; составление уравнений равновесия в обобщенных координатах; редуцирование больших систем (методы суперэлементов и подконструкций).

*Устойчивость элементов конструкции.*

Статический и энергетический критерии устойчивости. Устойчивость стержней. Устойчивость пластин при сжатии и сдвиге. Линеаризованные уравнения устойчивости оболочек. Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии и при внешнем давлении.

Нелинейное деформирование и критические нагрузки [процелкивания] пологих панелей. Устойчивость стержней и пластин за пределом упругости.

Применение вариационных и численных методов для расчета критических нагрузок потери устойчивости упругих элементов конструкций.

*Динамика конструкций ЛА.*

Колебания упругой конструкции как системы конечным числом степеней свободы. Уравнения малых колебаний в обобщенных координатах. Собственные колебания. Уравнения в нормальных координатах и их решения.

Использование (балочных) моделей без учета и с учетом поперечных сдвигов для расчета колебаний удлиненных конструкций типа корпуса ракеты, фюзеляжа и крыла; применение метода Ритца и МКЭ для получения уравнений колебаний конструкции в виде системы с конечным числом степеней свободы. Использование моделей в виде эквивалентных анизотропных пластин без учета и с учетом поперечных сдвигов для расчета колебаний крыльев малого удаления.

Применение МКЭ для расчета колебаний нерегулярных тонкостенных конструкций ЛА.

Продольные и поперечные колебания ракеты с отсеками и баками, частично заполненными жидкостью; формулировка задачи гидроупругости и методы ее решения; уравнения в обобщенных координатах.

*Прочность агрегатов ЛА.*

Нагрузки, действующие на ЛА в полете; зависимость их от кинематических параметров движения. Перегрузка и коэффициент безопасности.

Расчет на прочность и местную устойчивость оболочек корпусов, топливных баков, гермокабин. Учет краевых изгибов в местах соединения оболочек с упругими шпангоутами.

Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструкций ЛА.

Основы механики разрушения и накопления повреждений. Усталость и ресурс конструкций.

Оптимальное проектирование конструкций ЛА по условию минимума массы с учетом ограничений по прочности, жесткости и устойчивости.

## **2. Основы теории теплопередачи**

*Теплопроводность при стационарном режиме.*

Основное дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Простейшие задачи стационарной теплопроводности в твердых телах плоской, цилиндрической и шаровой стенках, теплопроводность стержня конечной и бесконечной длины, задача о распределении температуры в ребре прямоугольной формы. Теплопроводность при объемном тепловыделении в бесконечной плоской пластине.

*Конвективный теплообмен.*

Уравнения конвективного теплообмена. Подобие физических явлений. Теоремы подобия. Критерии гидродинамического и теплового подобия. Понятия о критериальных уравнениях. Связь между теплопередачей и трением. Понятия о пограничном слое. Критериальное уравнение теплопередачи и канала. Теплопередача при свободном движении в гравитационном поле массовых сил. Особенности теплопередачи в химически реагирующем газе.

*Теплообмен излучением.*

Физический механизм испускания излучения. Излучательные свойства абсолютно черного тела: интенсивность и направленная сила излучения, плотность потока излучения, формула Планка, функции излучения абсолютно черного тела, закон смещения Вина, закон излучения Вина, закон РэлеяДжинса, закон СтефанаБольцмана. Теплообмен излучением между черными изотермическими поверхностями: понятие углового коэффициента, свойство взаимности, свойство эквивалентности, свойство замкнутости, алгебра угловых коэффициентов, методы определения угловых коэффициентов.

Особенности теплообмена излучением в излучающих, поглощающих и рассеивающих средах: уравнение переноса излучения, радиационное равновесие, уравнение переноса излучения для плоскопараллельного случая.

Понятие о радиационной, яркостной и цветовой температуре. Основные особенности контактного теплообмена. Контактное термическое сопротивление.

*Обратные задачи теплообмена и методы их решения.*

Постановка обратных задач теплообмена. Обратные задачи теплопроводности (ОЗТ). Восстановление тепловых граничных условий и определение теплофизических характеристик из решения обратных задач. Роль обратных задач при разработке, обосновании и коррекции математических моделей процессов тепло- и массообмена. Некорректность обратных задач и регуляризации по Тихонову. Приближенно-аналитические методы решения ОЗТ. Экстремальные постановки обратных задач и методы их решения. Регуляризация итерационных методов решения обратных задач.

### **3. Теплообмен в пограничном слое**

*Критериальные соотношения и частные случаи.*

Критериальные соотношения конвективного теплообмена при ламинарном и турбулентном режимах течения. Поправочные множители. Теплообмен на лобовой поверхности затупленного тела. Учет влияния неравновесных процессов в пограничном слое и на поверхности тела.

Теплообмен в двухфазном потоке.

Обтекание затупленных тел излучающим газом. Модели излучающего газа. Влияние излучения на термодинамические параметры газа. Радиационные тепловые потоки при обтекании затупленных тел. Опережающее излучение. Влияние вдува на интенсивность излучения поверхности тела.

Теплообмен в свободномолекулярном потоке газа.

### **4. Системы обеспечения тепловых режимов космических аппаратов (КА)**

*Характеристика околоземного космического пространства.*

Физические характеристики околоземного космического пространства: давление и состав газа, электромагнитное излучение Солнца, корпускулярные потоки, метеороидные потоки, собственное излучение Земли, отраженное от Земли солнечное излучение. Влияние этих факторов на радиационные характеристики покрытий.

*Математические модели и методы расчета.*

Модели излучения Солнца и планет для расчета внешнего теплового воздействия на КА.

Расчет относительно величины солнечного миделя поверхности КА.

Расчет локального и комбинированного углового коэффициента для элемента поверхности КА. Оценка облученности КА при зеркальном отражении солнечного излучения от планеты.

*Классификация систем обеспечения теплового режима КА и их особенности.*

Основные элементы систем обеспечения теплового режима, их общая характеристика терморегулирующие покрытия, экранно-вакуумная теплоизоляция, тепловые аккумуляторы, испарители, теплообменники (в том числе и радиационные), тепловые трубы, вентиляторы, насосы.

Методы оценки холодо- и теплопроизводительности радиационных теплообменников, эффективность оребрения. Использование термодинамических циклов в системах терморегулирования. Термоэлектрическое охлаждение.

### **Вопросы к кандидатскому экзамену**

1. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих экспериментальную обработку прочности.
2. Содержание типичного документа "Нормы прочности на изделие".
3. Дифференциальные уравнения равновесия и движения. Граничные условия. Физические законы деформирования.
4. Обобщенный закон Гука для изотропных и анизотропных материалов с учетом температуры.
5. Формулировка краевых задач статики и динамики деформируемого тела.
6. Потенциальная энергия деформации линейноупругого тела.
7. Вариационные принципы Лагранжа, Даламбера Лагранжа, Кастильяно.
8. Плоская деформация и плоское напряженное состояние. Бигармоническое уравнение для функции напряжений.
9. Кручение призматических стержней.
10. Изгиб тонких пластин; дифференциальное уравнение для функции прогиба и граничные условия.
11. Основные соотношения и уравнения общей теории оболочек.
12. Оболочки вращения: использование разложений в ряды Фурье; численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений; применение метода КЭ (МКЭ), когда в качестве КЭ рассматриваются кольцевые полосы.
13. Осесимметричная и антисимметричная деформация оболочки вращения: безмоментное состояние; краевой эффект.
14. Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния составных тонкостенных конструкций.
15. Деление конструкции на КЭ.
16. Модели деформирования и аппроксимации для КЭ.
17. Обобщенные координаты конечно-элементной модели конструкции; условия сопряжения КЭ.
18. Составление уравнений равновесия в обобщенных координатах;
19. Редуцирование больших систем (методы суперэлементов и подконструкций).
20. Статический и энергетический критерии устойчивости.
21. Устойчивость стержней.
22. Устойчивость пластин при сжатии и сдвиге.
23. Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии и при внешнем давлении.
24. Применение вариационных и численных методов для расчета критических нагрузок потери устойчивости упругих элементов конструкций.
25. Колебания упругой конструкции как системы конечным числом степеней свободы.

26. Уравнения малых колебаний в обобщенных координатах.
27. Собственные колебания. Уравнения в нормальных координатах и их решения.
28. Нагрузки, действующие на ЛА в полете.
29. Перегрузка и коэффициент безопасности.
30. Расчет на прочность и местную устойчивость оболочек корпусов, топливных баков, гермокабин
31. Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструкций ЛА.
32. Основы механики разрушения и накопления повреждений. Усталость и ресурс конструкций.
33. Система обеспечения теплового режима: определение, назначение.
34. Структурная и функциональная схемы СОТР.
35. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих экспериментальную отработку СОТР.
36. Способы обеспечения теплового режима.
37. Классификации СОТР.
38. Подсистема теплозащиты: область применения, элементы подсистемы.
39. Подсистема вентиляции: область применения, элементы подсистемы.
40. Подсистема поддержания влажности: область применения, элементы подсистемы.
41. Подсистема терморегулирования: конвекционного типа: область применения, элементы подсистемы.
42. Испарительная система терморегулирования разомкнутого типа: область применения, элементы подсистемы.
43. Испарительная система терморегулирования замкнутого типа: область применения, элементы подсистемы.
44. Нагревательные и управляющие элементы СОТР.
45. Теплообменные агрегаты (РТО, ЖЖТ, ГЖТ, ВВТ, ТИ, ТК, ТП).
46. Тепловые трубы, контурные тепловые трубы,
47. Гидроагрегаты (насосы, РРЖ, краны перепускные, дроссели регулирующие).
48. Арматура (компенсаторы, дренажно-заправочные клапаны, электромагнитные клапаны, гидроразъемы).
49. Основы теплового и гидравлического расчета теплообменных аппаратов
50. Тепловой и гидродинамический расчет тепловых труб.
51. Гидравлических расчет жидкостных и воздушных контуров.
52. Уравнение теплового баланса ЛА.
53. Электротепловая аналогия: назначение, область применения, вывод основных соотношений.
54. Методы определения термического сопротивления элементов конструкции.
55. Внешний теплообмен космического аппарата.
56. Методы расчёта угловых коэффициентов.
57. Внутренние источники тепла в космическом аппарате.
58. Способы термостатирования бортового оборудования.
59. Численные методы решения уравнения теплопроводности.
60. Методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений.
61. Применение метода конечных элементов для решения задач проектирования СОТР.
62. Элементы теории подобия: назначение, область применения, вывод основных соотношений.
63. Определение тепловой связи между теплоносителем и элементами конструкции.
64. Проведение нестационарного теплового расчёта элементов ЛА.
65. Влияние полной теплоёмкости элемента на диапазон температур в квазистационарном режиме.
66. Элементы теории управления: назначение, область применения, вывод основных соотношений.
67. Моделирование управляющих элементов СОТР, анализ работы, требования размещения.

## 68. Оптимизация в анализе и проектировании СОТР.

### 4.3 Примеры экзаменационных билетов для курса «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

#### Экзаменационный билет №1

1. Система обеспечения теплового режима: определение, назначение
2. Нагревательные и управляющие элементы СОТР
3. Перечень основных нормативных документов, регламентирующих экспериментальную отработку прочности.

#### Экзаменационный билет №2

1. Структурная и функциональная схемы СОТР
2. Содержание типичного документа "Нормы прочности на изделие".
3. Обобщенный закон Гука для изотропных и анизотропных материалов с учетом температуры.

#### Экзаменационный билет №3

1. Подсистема теплозащиты: область применения, элементы подсистемы
2. Деление конструкции на КЭ.
3. Уравнение теплового баланса ЛА.

#### Экзаменационный билет №4

1. Потенциальная энергия деформации линейноупругого тела.
2. Способы термостатирования бортового оборудования..
3. Методы определения термического сопротивления элементов конструкции.

#### Экзаменационный билет №5

1. Статический и энергетический критерии устойчивости.
2. Нагрузки, действующие на ЛА в полете..
3. Проведение нестационарного теплового расчёта элементов ЛА..

#### Экзаменационный билет №6

1. Подсистема терморегулирования: конвекционного типа: область применения, элементы подсистемы.
2. Классификация силовых отсеков КЛА в аспекте отработки прочности.
3. Перегрузка и коэффициент безопасности..

#### Экзаменационный билет №7

1. Применение МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния составных тонкостенных конструкций.
2. Внешний теплообмен космического аппарата.
3. Элементы теории подобия: назначение: область применения, вывод основных соотношений.

#### Критерии оценивания кандидатского экзамена:

| Оценка за экзамен     | Критерии оценивания  |
|-----------------------|--|
| «Неудовлетворительно» | Аспирант не знает значительной части программного материала (менее 50% правильно выполненных заданий от общего объема работы), допускает существенные ошибки, неуверенно, с большими затруднениями выполняет практические работы, не подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой экзамена. |



|                     |  |
|---------------------|--|
| «Удовлетворительно» | Аспирант показывает знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, в целом, не препятствует усвоению последующего программного материала, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, испытывает затруднения при выполнении практических работ, подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой экзамена на минимально допустимом уровне.  |
| «Хорошо»            | Аспирант показывает, что твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов и задач, владеет необходимыми навыками и приемами их выполнения, допуская некоторые неточности; демонстрирует хороший уровень освоения материала, информационной и коммуникативной культуры и в целом подтверждает освоение компетенций, предусмотренных программой экзамена.  |
| «Отлично»           | Аспирант глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, свободно справляется с задачами, вопросами и другими видами применения знаний, причем не затрудняется с ответом при видоизменении заданий, использует в ответе материал монографической литературы, правильно обосновывает принятое решение, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических задач, подтверждает полное освоение компетенций, предусмотренных программой экзамена. |

### Основная литература

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред совет: К.В. Фролов (пред.) и др. МЗ8 М.: Машиностроение. Ракетно-космическая техника. Т. IV- 22 / И.П. Абрамов, И.В. Алдашкин, Э.В. Алексеев и др.; под ред. В.П. Легостаева. В 2 кн. Кн.1. 2014. 563с. Кн. 2 Ч. II. 2014. 548 с.
2. Методы проектирования летательных аппаратов / Е.В. Тарасов, В.М. Балык. - М. : Вузовская Книга, 2011.
3. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущих жидкостях / И. В. Кудинов [и др.] ; ред. Э. М. Карташов. - СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2015. - 208 с. Труханов В.М., Клюев В.В. – Надежность, испытания, прогнозирование ресурса на этапе создания сложной техники, Москва, изд-во «Спектр», 2014, 312 с.
4. Кузьмин, Михаил Александрович. Расчеты на прочность элементов многослойных композитных конструкций : учеб. пособие / М. А. Кузьмин, Д. Л. Лебедев, Б. Г. Попов. - М. : Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012. – 341.
5. Расчеты теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники / Б. Маринюк. - М. : Машиностроение, 2015. - 272 с
6. Применение интеллектуальных материалов в авиационно- космической технике : учебное пособие / В. В. Ефанов, А. Ю. Колобов ; Московский авиационный институт. - М. : Издательство МАИ, 2014. - 48 с. :

## Дополнительная литература

1. Резник С.В., Денисов О.В. Постановка тепловых испытаний элементов композитных стержневых космических конструкций: учеб. пособие. — Часть 1: Моделирование температурного состояния стержневых космических конструкций, 2014 г.» - коллекция «Инженерно-технические науки» - Издательство «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», ЭБС «Издательство Лань».
2. Обзорные лекции по основным направлениям деятельности РКК «Энергия», г. Королев, 2014. 487с.

### **Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Электронно-библиотечная система (ЭБС):

[www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com) - неограниченный доступ по договору с ЭБС «Издательство Лань»

Интернет-ресурсы:

1. <http://www.energia.ru/ktt/archive.html> (журнал «Космическая техника и технологии»)
2. <http://doc.rsc.energia.ru/webtop/>
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/> - электронная свободная энциклопедия «Википедия»
4. <http://www.roscosmos.ru/> - государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос».
5. <http://www.nasa.gov/> - американское космическое агентство
6. [http://doc.rsc.energia.ru/webtop/component/main?\\_\\_dmfClientId=1457510569398&\\_\\_dmfRequestId=\\_\\_client1~~2&\\_\\_dmfJumpType=jump](http://doc.rsc.energia.ru/webtop/component/main?__dmfClientId=1457510569398&__dmfRequestId=__client1~~2&__dmfJumpType=jump) – труды ученых РКК «Энергия»
7. <http://vip.aspirantura/DocLib3/Forms/AllItems.aspx> - электронная библиотека на портале Аспирантура