

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

УТВЕРЖДАЮ
Первый проректор –
проректор по учебной работе
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Б.В. Падалкин
«08» апреля 2025 г.



Дополнительное профессиональное образование

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА
ПРОГРАММА ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ
«Цифровые двойники изделий в промышленности»

Регистрац. № 06.05-41/2025

Москва, 2025

Оглавление

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДПП.....	3
1.1. Цель ДПП.....	3
1.2. Планируемые результаты обучения.....	3
1.3. Дополнительные характеристики ДПП	3
1.4. Перечень профессиональных компетенций в рамках имеющейся квалификации, качественное изменение которых осуществляется в результате обучения	3
1.5. Соответствие видов деятельности профессиональным компетенциям и их составляющих.....	4
2. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ДПП	5
2.1. Категория слушателей ДПП.....	5
2.2. Общая трудоёмкость программы, аудиторная и самостоятельная работа	5
2.3. Форма обучения	5
2.4. Учебный план	5
3. КАЛЕНДАРНЫЙ УЧЕБНЫЙ ГРАФИК	6
4. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДПП	8
5. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДПП.....	10
5.1. Организационные условия реализации ДПП.....	10
5.2. Педагогические условия реализации ДПП.....	10
5.3. Учебно-методическое обеспечение ДПП	10
5.4. Методические рекомендации.....	11
6. ФОРМЫ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ ДПП.....	12
7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ.....	13
7.1. Паспорт комплекта оценочных средств.....	13
7.2. Комплект оценочных средств	13

154884

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДПП

Программа подготовлена на основе:

- Федерального закона от 29 декабря 2012 года № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации»;
- требований Приказа Минобрнауки России от 01.07.2013 года № 499 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам»;
- методических рекомендаций-разъяснений Минобрнауки России по разработке дополнительных профессиональных программ на основе профессиональных стандартов от 22 апреля 2015 года № ВК-1030/06.

Реализация программы ДПП направлена на получение новой компетенции, необходимой для профессиональной деятельности.

1.1. Цель ДПП

Сформировать у обучающихся знания, навыки и умения в области детальной конструктивной проработки механических конструкций, узлов и агрегатов систем летательных аппаратов (далее – ЛА), выпуска конструкторской документации для серийного производства).

1.2. Планируемые результаты обучения

Планируемые результаты обучения по ДПП:

- освоение профессиональных компетенций в процессе изучения перечисленных тем в учебном плане;
- успешное освоение программы повышения квалификации;
- успешное прохождение итоговой аттестации (зачет).

Обучающимся, успешно прошедшим обучение, выполнившим текущие контрольные задания и выдержавшим предусмотренный учебным планом зачет, выдается удостоверение о повышении квалификации по ДПП «Цифровые двойники изделий в промышленности».

1.3. Дополнительные характеристики ДПП

Характеристики новой квалификации определены в приказе Минтруда России от 31.08.2021 №598н «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по проектированию и конструированию механических конструкций, узлов и агрегатов систем летательных аппаратов».

Вид профессиональной деятельности:

- Проектирование и конструирование механических конструкций, узлов и агрегатов систем летательных аппаратов (Код 32.003).

Трудовые функции:

- Проектировочный расчет механических конструкций, узлов и агрегатов систем ЛА (С/01.6).

1.4. Перечень профессиональных компетенций в рамках имеющейся квалификации, качественное изменение которых осуществляется в результате обучения

Получаемые компетенции базируются на основании Приказа Минобрнауки России от 5 февраля 2018 г. № 81 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 24.03.04 «Авиационное строительство».

Перечень компетенций:

ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общепрофессиональные знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности.

1.5. Соответствие видов деятельности профессиональным компетенциям и их составляющих

Профессиональные компетенции	Практический опыт	Умения	Знания
Проектировочный расчет механических конструкций, узлов и агрегатов систем ЛА (С/01.6)			
ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общепрофессиональные знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности	Проведение предварительных расчетов узлов и агрегатов на прочность	Применять методические материалы по конструированию и проектированию механических конструкций систем ЛА	Основы расчета на прочность и жесткость; Основы конструирования и проектирования ЛА

2. УЧЕБНЫЙ ПЛАН ДПП

2.1. Категория слушателей ДПП

Имеющаяся квалификация (требования к слушателям) к освоению ДПП – допускаются лица, имеющие высшее образование.

2.2. Общая трудоёмкость программы, аудиторная и самостоятельная работа

Общая трудоёмкость программы 24 академических часа, из них 20 академических часов аудиторной работы и 4 академических часа итоговой аттестации.

2.3. Форма обучения

Форма обучения по ДПП – очная.

2.4. Учебный план

ДПП «Цифровые двойники изделий в промышленности» реализуется семью модулями.

№ п/п	Наименование темы, модуля	Форма контроля	Всего, час	В том числе			
				Лекции	Практ. занятия	Самост. работа	Итоговая аттестация
1.	Концепция цифровых двойников на примере газотурбинных двигателей	-	4	4	-	-	-
2.	Работа с требованиями в рамках цифровых двойников	-	6	4	2	-	-
3.	Верификация и валидация компьютерных моделей и цифровых двойников	-	2	2	-	-	-
4.	Основы оптимизации и автоматизации	-	2	2	-	-	-
5.	Эскизное проектирование на примере малоразмерного газотурбинного двигателя с использованием технологии цифровых двойников	-	6	-	6	-	-
6.	Итоговая аттестация	Зачет	4	-	-	-	4
	ИТОГО	-	24	12	8	-	4

3. КАЛЕНДАРНЫЙ УЧЕБНЫЙ ГРАФИК

№ п/п	Наименование модуля	1 день	2 день	3 день
1.	Концепция цифровых двойников на примере газотурбинных двигателей			
2.	Работа с требованиями в рамках цифровых двойников			
3.	Верификация и валидация компьютерных моделей и цифровых двойников			
4.	Основы оптимизации и автоматизации			
5.	Эскизное проектирование на примере малоразмерного газотурбинного двигателя с использованием технологии цифровых двойников			
6.	Итоговая аттестация			Зачет

Рекомендуемый срок освоения ДПП – 3 дня.

4. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДПП

4.1. Рабочая программа модуля «Цифровые двойники изделий в промышленности»

4.1.1. Цель изучения модуля: сформировать у обучающихся знания, навыки и умения в области детальной конструктивной проработки механических конструкций, узлов и агрегатов систем ЛА, выпуска конструкторской документации для серийного производства.

4.1.2. Задачи изучения модуля:

1. Ознакомление с концепцией компьютерного моделирования и технологией цифровых двойников;
2. Ознакомление с концепцией работы с требованиями в рамках технологии цифровых двойников на разных этапах разработки;
3. Ознакомление с концепцией верификации и валидации компьютерных моделей и цифровых двойников;
4. Ознакомление с методами оптимизации и автоматизации;
5. Ознакомление с эскизным проектированием на примере ГТД с применением технологии ЦД на примере малоразмерного газотурбинного двигателя.

4.1.3. Планируемые результаты обучения

Процесс изучения раздела направлен на формирование следующих компетенций

Код компетенции	Перечень планируемых результатов обучения по модулю	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
ОПК-1	Знать: Основы расчета на прочность и жесткость. Основы конструирования и проектирования ЛА. Уметь: Применять методические материалы по конструированию и проектированию механических конструкций систем ЛА. Владеть: Проведение предварительных расчетов узлов и агрегатов на прочность.	Формы обучения: Фронтальная. Методы обучения: Лекция; Практическое занятие.

4.1.4 Содержание курса

Тема 1. Концепция цифровых двойников на примере газотурбинных двигателей (4 часа)

Лекции (4 часа). Концепция компьютерного моделирования. Компьютерная модель. Матрица требований. Матрица расчетов. Структура процесса проектирования технического

объекта. Актуальность автоматизации процессов проектирования. Автоматизации процесса проектирования на примере компрессора.

Концепция цифрового двойника на примере газотурбинного двигателя. Основные этапы жизненного цикла ГТД. Процесс проектирования ГТД.

Функциональная схема ЦД ГТД. Цифровое сопровождение проектирования. Цифровое сопровождение испытаний. Цифровое сопровождение эксплуатации.

Тема 2. Работа с требованиями в рамках цифровых двойников (6 часов)

Лекции (4 часа). Общая концепция формирования требования. Обзор документов, регламентирующих разработку и сертификацию на примере ГТД.

Практические занятия (2 часа). Работа с требованиями на этапе эскизного и начала технического проекта. Работа с требованиями на этапе окончания технического проекта. Работа с требованиями на этапе сертификации. Конструктор требований.

Тема 3. Верификация и валидация компьютерных моделей и цифровых двойников (2 часа)

Лекции (2 часа). Верификация и валидация (ВВ) компьютерных моделей (КМ). Иерархический подход. План верификации и валидации. Верификация кода. Верификация КМ. Учет погрешностей. Требования к эксперименту. Пример ВВ газодинамической модели турбины. ВВ цифрового двойника.

Тема 4. Основы оптимизации и автоматизации (2 часа)

Лекции (2 часа). Основные методы оптимизации. Штрафные функции. Генетические алгоритмы. Автоматизация прочностных расчетов. Автоматизация газодинамических расчетов.

Тема 5. Эскизное проектирование на примере малоразмерного газотурбинного двигателя с использованием технологии цифровых двойников (6 часов)

Практические занятия (6 часов). Демонстратор цифрового двойника на примере ГТД. Описание состава и компьютерных моделей. Термодинамическая модель. Аналитические модели узлов. 2D CAD модель проточной части. Прочностные модели дисков. 3D CAD модель двигателя. 3D CAD модели рабочих колес. 3D прочностные модели рабочих колес. 3D газодинамические модели компрессора и турбины.

Демонстратор цифровой платформы. Работа с документами и требованиями в цифровой платформе. Конструктор требований. Конструктор двигателя. Работа с КМ в

цифровой платформе. Создание расчетных цепочек и передача данных между КМ в цифровой платформе. Связь требований и расчетных данных. Создание «слоев»/шагов проектирования в цифровой платформе. Загрузка КМ демонстратора в цифровую платформу. Реализация этапа эскизного проектирования для малоразмерного двигателя (вариант 1). Анализ результатов. Подходы к автоматизации. Реализация этапа эскизного проектирования для малоразмерного двигателя (вариант 2).

5. УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДПП

5.1. Организационные условия реализации ДПП

Наименование аудитории	Вид занятия	Наименование оборудования, программного обеспечения
Аудитория для проведения лекций/семинаров	Лекции	ПК с доступом в Интернет и возможностью просмотра файлов в формате *.ppt, *.pptx, *.pdf, проектор/телевизор/монитор, MS Excel, ANSYS.
Компьютерный класс	Практические занятия	ПК с доступом в Интернет и возможностью просмотра файлов в формате *.ppt, *.pptx, *.pdf, проектор/телевизор/монитор, MS Excel, ANSYS.
Аудитория для проведения лекций/семинаров	Итоговая аттестация	ПК с доступом в Интернет и возможностью просмотра файлов в формате *.ppt, *.pptx, *.pdf, проектор/телевизор/монитор, MS Excel, ANSYS.

5.2. Педагогические условия реализации ДПП

Реализация программы обеспечивается преподавательским составом, удовлетворяющим следующим условиям:

- наличие высшего профессионального образования, соответствующее профилю программы, из числа штатных преподавателей, или привлеченных на условиях почасовой оплаты труда;
- значительный опыт практической деятельности в соответствующей сфере из числа штатных преподавателей или привлеченных на условиях почасовой оплаты труда

5.3. Учебно-методическое обеспечение ДПП

Основная литература:

1. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. / РАН; гл. ред. Фролов К.В. – М.: Машиностроение, 1994. – ISBN 5-217-01949-2. Разд. IV: Расчёт и конструирование машин, т. IV-21: Самолеты и вертолеты, кн. 3: Авиационные двигатели / отв. ред. Колесников К.С.; ред.-сост. Скибин В.А., Темис Ю.М., Сосунов В.А. – 2010. – 719 с.: ил. – Библиогр.: с. 39-40, в конце разделов. – ISBN 978-5-217-03482-6.

Дополнительная литература:

1. Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2007.
2. Прохоров А., Лысачев М. Боровков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 стр., ил.

3. Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н., Никулин А.С., Макаров П.В., Французов М.С. Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 4, с. 60–72, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72.
4. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2022, № 9, с. 100–115, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

5.4. Методические рекомендации

ДПП построена по модульному принципу, каждый модуль представляет собой логически завершённый материал.

Преподавание программы основано на личностно-ориентированной технологии образования, сочетающей два равноправных аспекта этого процесса: обучение и учение. Личностно-ориентированный подход развивается при участии слушателей в активной работе на практических занятиях. Личностно-ориентированный подход направлен, в первую очередь, на развитие индивидуальных способностей обучающихся, создание условий для развития творческой активности слушателя и разработке инновационных идей, а также на развитие самостоятельности мышления при решении учебных задач разными способами, нахождение рационального варианта решения, сравнения и оценки нескольких вариантов их решения и т.п. Это способствует формированию приемов умственной деятельности по восприятию новой информации, ее запоминанию и осознанию, созданию образов для сложных понятий и процессов, приобретению навыков поиска решений в условиях неопределенности.

Практические занятия проводятся для приобретения навыков решения практических задач в предметной области модуля. Задания, выполняемые на практических занятиях, выполняются с использованием активных и интерактивных методов обучения.

Самостоятельная работа слушателей предназначена для проработки дополнительной литературы. Результаты практических заданий слушателей учитываются на итоговой аттестации.

При изучении курса предусмотрены следующие методы организации и осуществления учебно-познавательной деятельности:

- объяснительно-иллюстративный метод;
- репродуктивный метод;
- частично-поисковый метод.

6. ФОРМЫ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ ДПП

Итоговая аттестация проводится в форме зачета. Результатом зачета служат правильные ответы на вопросы билета.

По результатам итоговой аттестации слушателю выставляется оценка «ЗАЧТЕНО/НЕ ЗАЧТЕНО»:

Оценка «ЗАЧТЕНО» выставляется слушателю, который:

- правильно ответил не менее, чем на 60% вопросов теста;
- правильно решил практическую задачу;
- продемонстрировал необходимые систематизированные знания и достаточную степень владения принципами предметной области программы, понимание их особенностей и взаимосвязь между ними в течение всего срока обучения по программе.

Оценка «НЕ ЗАЧТЕНО» ставится слушателю, который:

- правильно ответил менее, чем на 60% вопросов теста;
- неправильно решил практическую задачу;
- имеет крайне слабые теоретические и практические знания, обнаруживает неспособность к построению самостоятельных заключений.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ

7.1. Паспорт комплекта оценочных средств

Предметы оценивания	Объекты оценивания	Показатели оценки
ОПК-1. Способен применять естественнонаучные и общинженерные знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в профессиональной деятельности	Ответы на вопросы теста, решение практического задания	Количество правильных ответов, корректность практического задания

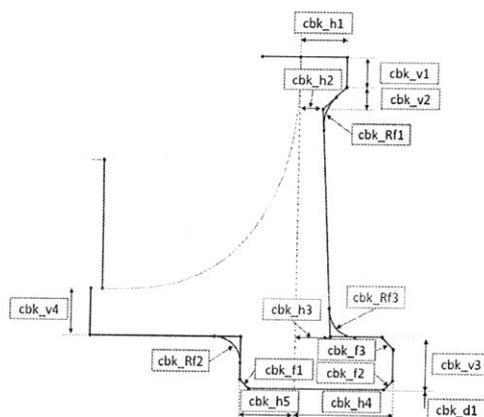
7.2. Комплект оценочных средств

7.2.1. Примеры практических заданий для проведения зачета:

Аттестационное задание (вариант 1)

1. Используя созданную в процессе обучения расчетную цепочку эскизного проектирования, спроектировать рабочее колесо компрессора для следующих параметров двигателя – диаметр 170 мм, тяга 40 кгс.

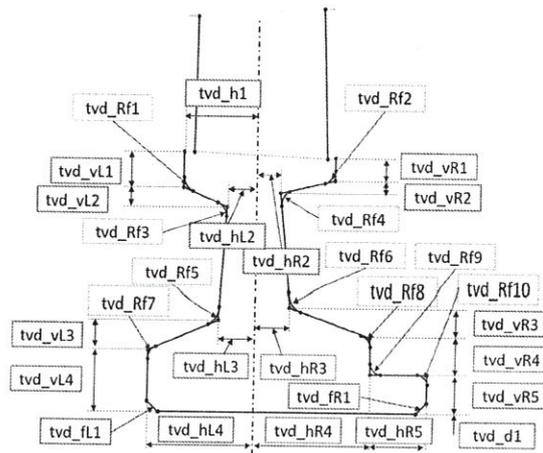
- Провести прочностную 2D оптимизацию рабочего колеса компрессора.
- Проверить выполнение требований в цифровой платформе.



Аттестационное задание (вариант 2)

1. Используя созданную в процессе обучения расчетную цепочку эскизного проектирования, спроектировать рабочее колесо турбины для следующих параметров двигателя – диаметр 170 мм, тяга 45 кгс.

- Провести прочностную 2D оптимизацию рабочего колеса турбины.
- Проверить выполнение требований в цифровой платформе.



7.2.2. Примерные вопросы теста для проведения зачета:

- 1) Выберите цели компьютерного моделирования изделия (может быть несколько ответов):
 - а) прогнозирование выполнения требований к изделию;
 - б) вычисление характеристик изделия;
 - в) определение конструктивного облика изделия, который будет соответствовать поставленным требованиям;
 - г) вычисление требований к изделию.

- 2) В структуре задачи проектирования изделия какой этап стоит после анализа задачи (может быть несколько ответов):
 - а) формирование требований;
 - б) проверка требований к расчетным характеристикам;
 - в) конкретизация требований в виде расчетных характеристик;
 - г) выбор математического аппарата.

- 3) Что описывает данное определение - совокупность требований, структурированная согласно конструкции двигателя, этапам жизненного цикла, документам и т.д.:
 - а) матрица расчетов;
 - б) матрица требований;
 - в) документы с требованиями;
 - г) расчетные цепочки.

- 4) Выберите направления автоматизации расчетов (может быть несколько ответов):
- а) параметризация;
 - б) верификация;
 - в) определение характеристик;
 - г) оптимизация.
- 5) Что описывает данное определение - Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными:
- а) модель;
 - б) концептуальная модель;
 - в) компьютерная модель;
 - г) математическая модель.
- 6) Что описывает данное определение - Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений:
- а) модель;
 - б) концептуальная модель;
 - в) компьютерная модель;
 - г) математическая модель.
- 7) Для решения каких задач подходит частичная параметризация модели:
- а) определение влияния отклонений размеров на характеристики изделия;
 - б) оптимизация конструкции изделия;
 - в) вычисление характеристик изделия;
 - г) проверка выполнения требований.
- 8) Заполните недостающую фразу в определении «Цифровой двойник изделия - система, состоящая из _____ и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями»:
- а) компьютерных моделей изделия;
 - б) математических и компьютерных моделей изделия;
 - в) цифровой модели изделия;
 - г) требований и компьютерных моделей изделия.

- 9) На каком этапе жизненного цикла изделия его цифровой двойник воспринимается как «технология интеграции в едином информационном пространстве множества применяемых методик разработки и совокупности 0D→1D→2D→3D CAE моделей, описывающих работу двигателя и его отдельных элементов»:
- а) проектирование изделия;
 - б) испытание изделия;
 - в) эксплуатация изделия;
 - г) производство изделия.
- 10) Что описывает данное определение - система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям:
- а) комплексная компьютерная модель изделия;
 - б) цифровая модель изделия;
 - в) компьютерная модель;
 - г) цифровой двойник изделия.

- 11) Какой из представленных ниже терминов не является вариантом цифрового двойника ГТД:
- а) ЦД разработчика ГТД;
 - б) ЦД для сопровождения испытаний ГТД;
 - в) ЦД головного разработчика;
 - г) ЦД экземпляра.
- 12) На каком этапе проектирования ГТД осуществляется утверждение системы требований для деталей:
- а) аван. проект;
 - б) эскизный проект;
 - в) технический проект;
 - г) сертификация.
- 13) На каком этапе проектирования ГТД возможна реализация прямой связи «требование – модель – проверка»:
- а) аван. проект;
 - б) эскизный проект;
 - в) технический проект;
 - г) сертификация.
- 14) На каком этапе жизненного цикла ГТД требование может значительно разветвляться в виде древообразного шаблона:
- а) аван. проект;
 - б) эскизный проект;
 - в) технический проект;
 - г) сертификация.
- 15) Что описывает данное определение - процесс определения того, что вычислительная модель точно представляет лежащую в ее основе математическую модель и ее решение:
- а) сертификация;
 - б) верификация;
 - в) проверка качества компьютерной модели;
 - г) валидация.

- 16) Что описывает данное определение - процесс определения степени, в которой модель является точным представлением рассматриваемой физической системы в рамках предполагаемого использования этой модели:
- а) сертификация;
 - б) верификация;
 - в) проверка качества компьютерной модели;
 - г) валидация.
- 17) Что является первым этапом процесса верификации и валидации:
- а) верификация;
 - б) разработка плана верификации и валидации;
 - в) проверка качества компьютерной модели;
 - г) валидация.
- 18) Верификация вычислений состоит из следующих частей (возможны несколько вариантов ответов):
- а) верификация численного кода;
 - б) разработка плана верификации и валидации;
 - в) проверка качества и корректности используемой вычислительной модели;
 - г) оценка погрешности численного решения.
- 19) Какие из ниже представленных терминов являются частью верификации цифрового двойника (возможны несколько вариантов ответов):
- а) верифицированы все вычислительные модели, входящие в ЦД;
 - б) проверены все данные, передаваемые в ЦД из внешних источников;
 - в) все модели внутри ЦД валидированы;
 - г) проведена экспертиза матрицы требований.
- 20) Какие методы оптимизации являются методами нулевого порядка (возможны несколько вариантов ответов):
- а) метод Хука-Дживса;
 - б) градиентные методы;
 - в) применение аппроксимационных моделей;
 - г) случайный поиск.