

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

---

Кафедра технической эксплуатации ЛА и АД

А.А. Ицкович, И.А. Файнбург, Г.Д. Файнбург

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

**Учебно-методическое пособие**  
по выполнению контрольной работы  
«Оценка и прогнозирование показателей надежности  
компонентов самолета SSJ-100»

*для студентов  
направления 25.03.01  
заочной формы обучения*

Москва  
ИД Академии Жуковского  
2024

УДК 629.7.017.1  
ББК 052-021.1  
И96

Рецензент:  
*Чинючин Ю.М.* – д-р техн. наук, профессор

**Ицкович А.А.**

И96 Основы теории надежности [Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению контрольной работы «Оценка и прогнозирование показателей надежности компонентов самолета SSJ-100» / А.А. Ицкович, Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург. – М.: ИД Академии Жуковского, 2024. – 36 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Основы теории надежности» по учебному плану направления подготовки 25.03.01 для студентов заочной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 07.05.2024 г. и методического совета 15.05.2024 г.

**УДК 629.7.017.1**  
**ББК 052-021.1**

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выполнение контрольной работы (КР) «Оценка и прогнозирование показателей надежности компонентов самолета SSJ-100» является этапом изучения дисциплины «Основы теории надежности» и предусматривает решение задач по основным разделам дисциплины: модели надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов, оценка показателей надежности по данным эксплуатационных наблюдений, прогнозирование потребного количества запчастей с учетом статистики отказов.

*Надежность (объекта)*: свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, стратегиях технического обслуживания, хранения и транспортирования. Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств [9].

Целью выполнения КР является овладение научными методами анализа надежности авиационной техники, систематизация и обобщение теоретических знаний, приобретенных при изучении материала по дисциплине «Основы теории надежности», получение навыков и умений применять теоретические знания к решению практических задач анализа надежности авиационной техники. При выполнении КР студент несет ответственность за правильность расчетов и принятые решения.

При выполнении КР студент должен использовать учебно-методические издания МГТУ ГА по дисциплине «Основы теории надежности» [1-5], основные ГОСТы системы стандартов «Надежность в технике» [8-10].

Преподаватель на лекции дает рекомендации по выполнению КР студентом, уточняет объем и глубину проработки отдельных заданий, проводит консультации.

При оформлении КР необходимо соблюдать определенные требования. Изложение материалов КР должно быть конкретным и четким. Заимствованные цитаты, таблицы и другие материалы должны иметь ссылку на источник. В тексте необходимо соблюдать единую техническую терминологию, принятую в учебных пособиях и стандартах.

Оформление материала, изложенного в КР, производится в соответствии со Стандартами «Единой системы конструкторской документации»: ГОСТ Р 2.105-2019. «Общие требования к текстовым документам» и ГОСТ Р 2.106-2019. «Текстовые документы». Титульный лист КР должен быть оформлен в соответствии с требованиями настоящего пособия (Приложение 2). За ним следует страница «Содержание», на которой выполняется основная надпись.

Текст КР должен быть написан разборчиво на одной стороне листа формата А4 (297х210 мм). При оформлении КР на компьютере текст набирается

шрифтом Times New Roman, размер шрифта – 14 пт., интервал – 1,5. Текст КР должен быть отформатирован по «ширине», отступ первой строки абзаца – 1,25. Числовые значения в формулах объясняются. Окончательный результат приводится с указанием размерности. Таблицы, помещенные в тексте, должны иметь номера и названия. При приведении результатов расчетов в табличной форме даются примеры расчетов с подстановкой исходных данных в расчетные формулы. Рисунки должны иметь номера и подрисуночные подписи. На графиках необходимо указывать масштаб и размерность изображаемых величин. На все таблицы и рисунки в тексте должны быть ссылки.

В тексте необходимо выделить заголовки отдельных частей КР, их разделов и подразделов в соответствии с «Содержанием». В конце пояснительной записки приводится литература, используемая при выполнении КР.

## **2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

### **2.1. Структура контрольной работы**

При выполнении КР необходимо решить следующие задачи:

- 1) Статистический анализ показателей безотказности невосстанавливаемых изделий ЛА параметрическим методом.
- 2) Статистический анализ показателей безотказности восстанавливаемых изделий ЛА.
- 3) Определение потребного количества запасных частей для эксплуатации парка ВС на установленный период.

Пояснительная записка КР должна включать:

- 1) Титульный лист.
- 2) Техническое задание (№ варианта задания, наименование ФС ЛА, формулировка задач, исходные данные, ограничения и допущения).
- 3) Основную часть, включающую решение поставленных задач, применяемые термины и определения, последовательное изложение материалов по решению задач согласно техническому заданию, а именно: расчеты, построенные графики, пояснения к ним, выводы. При приведении результатов расчетов в табличной (графической) форме даются примеры расчетов с подстановкой исходных данных в расчетные формулы.
- 4) Выводы по результатам решения задач выполненной работы и в целом по КР.
- 5) Список использованной литературы.

## 2.2. Техническое задание (ТЗ)

В качестве объектов в задачах оценки и прогнозирования показателей надежности изделий по № варианта выбираются компоненты системы кондиционирования воздуха (СКВ) самолета SSJ-100.

Исходные данные для выполнения КР приведены в Приложении 1. Выбор варианта задания студентами производится согласно шифру зачетной книжки по сумме трех последних цифр (таблица П.1.1 Приложения 1). Например, для шифра M73496, вариант №19 (4+9+6).

Исходные данные для выполнения заданий в соответствии с вариантом КР даны в таблицах П.1.1, П.1.2 Приложения 1.

Контрольная работа состоит из следующих задач:

- 1) Статистический анализ безотказности невосстанавливаемых изделий ФС ЛА параметрическим методом.
- 2) Статистический анализ показателей безотказности восстанавливаемых изделий ЛА.
- 3) Определение потребного количества запасных частей для эксплуатации парка ВС SSJ 100 на установленный период поддержания запаса.

## 2.3. Описание объекта исследования

### 2.3.1. Самолет Sukhoi Superjet 100 (SSJ 100)

SSJ-100 – ближнемагистральный реактивный самолет нового поколения. Лайнер востребован на российском рынке благодаря гармоничному сочетанию дальности, вместимости и комфорта [12].

Самолет разработан компанией «Гражданские самолеты Сухого», которая с 17 февраля 2020 года является филиалом ПАО «Яковлев» — «Региональные самолёты».

Высокие показатели безопасности, функциональности и надежности обеспечиваются использованием передовых технологических решений. Преимущества самолета включают в себя отличную аэродинамику, электродистанционную систему управления полетом, современную кабину с боковыми ручками управления. Основные характеристики самолета представлены в таблице 2.1.

SSJ-100 стал первым российским самолетом, который полностью спроектирован на основе цифровых технологий. Это первый 100-местный самолет, на котором установлена полноценная цифровая электродистанционная система управления (fly-by-wire). Она специально разработана для оптимизации управления, предотвращения выхода за пределы разрешенных параметров полета, снижения нагрузки на экипаж, и обеспечения максимальной топливной эффективности. Кабина пилотов оснащена интуитивно понятными системами индикации и органами управления, разработанными совместно с пилотами.

Самолет предлагает уровень комфорта пассажирам, сопоставимый с магистральными авиалайнерами за счет удачной схемы расположения кресел и вместительных багажных полок.

В настоящее время проект проходит программу импортозамещения и оснащения отечественными системами и агрегатами. Самолет в новом облике получил название SJ-100.

Таблица 2.1

## Основные характеристики самолета SSJ-100

<b>Вместимость</b>		
Минимальный состав экипажа, чел	2	
Максимальное количество мест	103	
<b>Основные размеры самолета</b>		
Размах крыла без ГЗК, м	27,8	
Размах крыла с ГЗК, м	29,7	
Длина, м	29,94	
Высота, м	10,28	
<b>Объем багажа</b>		
Общий объем багажа (в БГО + ручная кладь), м <sup>3</sup>	28,86	
Общий объем багажа на 1 пассажира, м <sup>3</sup>	0,33	
<b>Летно-технические характеристики</b>		
	SSJ 100/95B	SSJ 100/95LR
Макс. дальность полета в двухклассной компоновке, км	2960	4320
Крейсерская скорость, М	0,78	
Потребная длина ВПП для взлета, м	1675	1940
Потребная длина ВПП для посадки, м	1425	
<b>Весовые характеристики</b>		
Максимальная взлетная масса (MTOW), кг	45880	49450
Максимальная посадочная масса, (MLW), кг	41000	
Максимальная масса без топлива (MZFW), кг	40000	
Максимальная заправка топливом (0,8 кг/л). кг	12644	

Основные преимущества конструкции самолета SSJ-100:

- высокое аэродинамическое совершенство за счет рационального выбора параметров компоновки и многокритериальной оптимизации геометрии крыла;

- система управления fly-by-wire;
- двигатель SaM146, разработанный специально для этого самолета и обеспечивающий сниженный удельный расход топлива;
- заложены конструктивные возможности для улучшения взлетных и посадочных характеристик;
- обеспечена возможность всепогодной эксплуатации;
- более низкая стоимость технического обслуживания за счет энергосберегающих технологий, новейшего комплекса авионики и сниженного веса самолета;
- инновационная система освещения салона с применением светодиодов (LED) позволяет обеспечить минимальное техническое обслуживание.

Задачи планового ТО самолета SSJ-100 и их периодичность содержатся в исходных требованиях к плановому техническому обслуживанию (ИТПТО), которые разрабатываются рабочими группами, состоящими из представителей разработчиков авиационной техники, авиакомпаний и сертификационных центров [7].

В документе ИТПТО представлены, разработанные в процессе сертификации типа, исходные минимальные требования к плановому техническому обслуживанию для поддержания летной годности планера, двигателей, систем и зон самолета SSJ-100.

Целевые периодичности планового ТО функциональных систем и силовой установки для самолета SSJ-100, установленные ИТПТО:

- Минимальная кратность – 750 часов налета / 100 дней и им кратные;
- Базовая кратность – 7500 часов налета / 6000 полетов / 24 месяца и им кратные.

Целевые показатели периодичности планового ТО конструкции самолета SSJ-100:

- Минимальная кратность – 750 часов налета / 100 дней и им кратные;
- Базовая кратность – 7500 часов налета / 6000 полетов / 24 месяца и им кратные.

Целевые показатели периодичности зонных осмотров самолета SSJ-100:

- Минимальная кратность – 100 дней и им кратные;
- Базовая кратность – 24 месяца и им кратные.

### **2.3.2. Система кондиционирования воздуха (СКВ) самолета SSJ-100**

Система кондиционирования воздуха (СКВ) является частью комплексной системы кондиционирования воздуха (КСКВ), в состав которой также входят пневматическая система (ПС) и противообледенительная система (ПОС) крыла [11].

СКВ предназначена для:

- обеспечения нормальных условий жизнедеятельности пассажиров и экипажа;
- кондиционирования кабины и салона во всем диапазоне режимов полета (при полетах в различных климатических условиях);
- охлаждения радиоэлектронного оборудования во всем диапазоне режимов полета (при полетах в различных климатических условиях).

Условно СКВ представлена двумя системами кондиционирования: СКВ1 и СКВ2. Управление СКВ автоматическое и осуществляется двумя блоками управления КСКВ (IASC1 и IASC2). СКВ1 и СКВ2 управляется независимо от соответствующего блока управления. При отказе одного из блоков управления функции отказавшего переходят ко второму. В случае неисправности обоих блоков управления КСКВ СКВ управляется в ручном режиме.

Состояние работоспособности СКВ производится:

- контролем при подаче питания;
- при непрерывном полетном контроле.

Контроль работоспособности системы производится по данным, полученным от датчиков температуры и давления, и от заслонок и клапанов.

Система вентиляции блоков авионики обеспечивает поддержание требуемых температурных условий для работы блоков авионики и дисплеев кабины экипажа. Система вентиляции блоков авионики предназначена для:

- подачи и отвода воздуха из приборных отсеков в количестве, необходимом для поддержания температурных условий для работы блоков авионики;
- подачи и отвода воздуха с задней стороны дисплеев в кабине экипажа;
- отвода воздуха из кухонь и туалетов.

Для подачи воздуха на охлаждение блоков авионики и дисплеев кабины экипажа установлены два нагнетающих вентилятора между правой боковой стенкой БГО и фюзеляжем и два нагнетающих вентилятора между левой боковой стенкой БГО и фюзеляжем. Обдувом охлаждаются блоки авионики, расположенные в переднем приборном отсеке на стеллажах. Перед каждой парой нагнетающих вентиляторов установлено по одному фильтру нагнетания. Фильтр нагнетания очищает воздух, отбираемый из пассажирской кабины.

Отвод воздуха из переднего приборного отсека осуществляется с помощью двух вытяжных вентиляторов, которые расположены между левой боковой стенкой БГО и фюзеляжем.

Использованный в системе вентиляции воздух отводится за борт через выпускной клапан, который открывается автоматически при отказе обоих вытяжных вентиляторов переднего приборного отсека.

Для повышения надежности вентиляторы подключены к разным шинам электропитания и контролируются разными блоками управления КСКВ. С целью



снижения расходования ресурса вентиляторов блоки управления КСКВ автоматически обеспечивают попеременную работу вентиляторов.

Для удаления воздуха из среднего приборного отсека установлен один постоянно работающий вытяжной вентилятор, который расположен по левому борту самолета в отсеке СКВ. Управление вентилятором обеспечивается блоком управления КСКВ. Использованный воздух также отводится за борт через выпускной клапан.

Вентиляторы имеют схожую конструкцию (рис. 2.1) и состоят из:

- корпуса;
- электрического двигателя;
- вентилятора;
- электронного блока;
- электрического соединителя;
- обратного клапана.

Корпус вентилятора выполняет роль статора и задает направление воздушному потоку. Внутри корпуса расположен электрический двигатель, который перемещает осевое рабочее колесо.

Электронный блок контролирует скорость вращения. Обратный клапан предотвращает обратный поток воздуха в систему и установлен на выходе вентилятора.

Контроль количества воздуха, поступающего в отсек, производят датчики расхода. Фактическую температуру воздуха в переднем и среднем приборных отсеках, в месте расположения стеллажей с блоками авионики определяют вентилируемые датчики температуры:

- не выше плюс 65 °С в переднем приборном отсеке;
- не выше плюс 70 °С в среднем приборном отсеке.

Система охлаждения воздуха состоит из двух независимых идентичных установок охлаждения воздуха (УОВ), установленных в негерметичном отсеке передней части обтекателя крыло-фюзеляж (отсек Ф2) по левому и правому бортам. В автоматическом режиме система охлаждения воздуха обеспечивает следующие функции:

- понижение температуры воздуха до уровня, соответствующего комфортным условиям;
- встроенную защиту от обледенения.

УОВ является основным компонентом системы кондиционирования воздуха (СКВ) самолёта. УОВ понижает температуру воздуха, поступающего от двигателей, ВСУ или наземного кондиционера.

Основными компонентами УОВ являются:

- двойной теплообменник;
- турбоохладитель;
- заслонка регулирования температуры;
- влагоотделитель;

- подогреватель-конденсатор;
- перепускной коллектор.

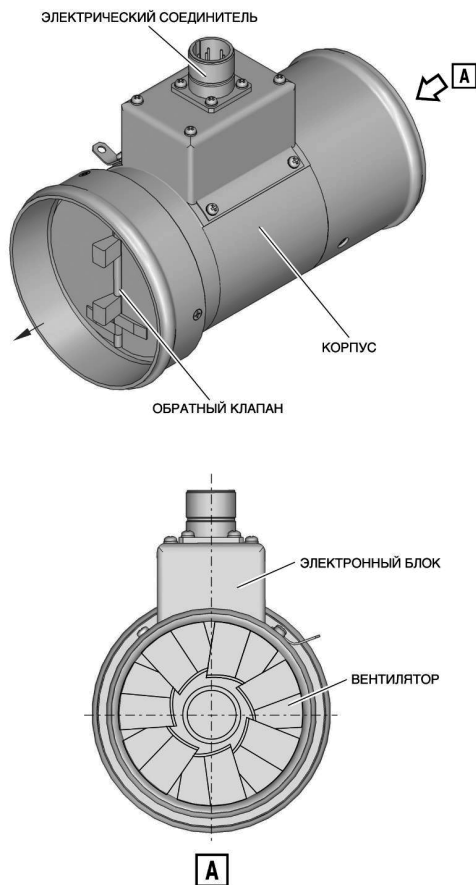


Рис. 2.1. Вытяжной вентилятор переднего приборного отсека.

Регулирование температуры воздуха осуществляется с помощью УОВ. Температура воздуха, поступающего в УОВ из системы отбора воздуха, понижается в турбине турбохолодильника (рис. 2.2).

Встроенная защита от обледенения срабатывает при появлении обледенения на выходе из турбины турбохолодильника. Обледенение обнаруживается с помощью датчика давления на выходе из УОВ. В этом случае

блок управления КСКВ автоматически открывает заслонку регулирования температуры для увеличения температуры воздуха на выходе из турбины турбохолодильника.

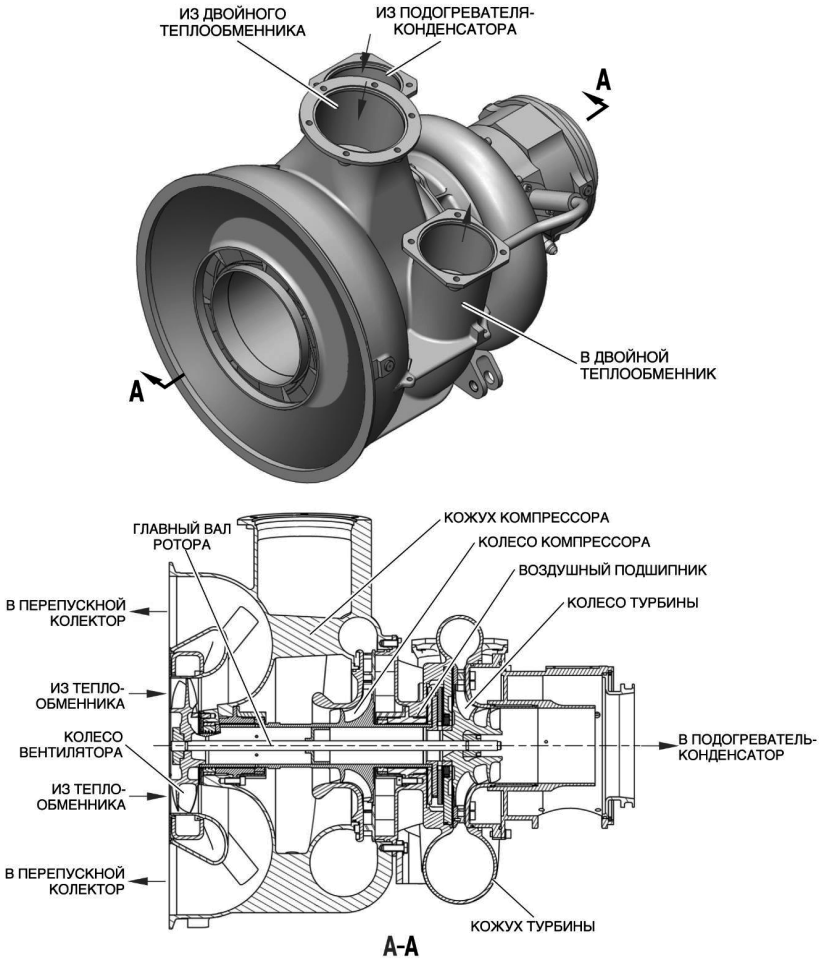


Рис. 2.2. Турбохолодильник

Система охлаждения воздуха обеспечивает работу КСКВ с одной работающей УОВ. При этом контроль расхода и температуры воздуха продолжают обеспечиваться автоматически. Компоненты УОВ соединены между собой трубопроводами.

Турбохолодильник устанавливается между перепускным коллектором и подогревателем-конденсатором и осуществляет подачу охлаждённого воздуха в трубопровод смешения. Турбина турбохолодильника обеспечивает вращение компрессора и вентилятора продувочного воздуха.

Турбохолодильник состоит из трех основных частей:

- компрессора;
- турбины;
- вентилятора продувочного воздуха.

Все компоненты турбохолодильника делятся на вращающиеся элементы:

- колесо компрессора и главный вал ротора;
- колесо турбины, закрепленное на одном конце роторного вала;
- лопасти вентилятора, закрепленные на другом конце роторного вала;

и неподвижные элементы:

- кожух компрессора, в котором устанавливаются колесо компрессора, лопасти вентилятора и два воздушных подшипника, которые удерживают вал ротора;
- кожух турбины, в котором устанавливается колесо турбины;
- фланец на выходе из турбины.

При наземной эксплуатации самолёта вентилятор турбохолодильника осуществляет вентиляцию кабины с помощью воздушного потока из воздухозаборника в нижней части подфюзеляжного обтекателя.

После заслонки регулирования расхода горячий воздух из системы отбора воздуха попадает в двойной теплообменник. Двойной теплообменник включает в себя первичный и основной теплообменники. Охлаждающей средой как для первичного, так и для основного теплообменников служит продувочный воздух, поступающий через воздухозаборник в нижней части подфюзеляжного обтекателя. Продувочный воздух сначала проходит через основной теплообменник, а затем через первичный теплообменник. После прохождения первичного и основного теплообменников и перепускного коллектора продувочный воздух направляется к выходному воздуховоду и сбрасывается за борт.

Воздух из системы отбора воздуха сначала частично охлаждается в первичном теплообменнике, затем поступает в компрессор турбохолодильника, где давление и температура воздуха возрастают.

Далее воздух поступает в основной теплообменник, где происходит его охлаждение продувочным воздухом. После выхода из двойного теплообменника воздух поступает в контур влагоотделителя высокого давления. Контур влагоотделителя включает подогреватель-конденсатор и влагоотделитель.

В подогревателе-конденсаторе происходит процесс конденсации влаги. Затем воздух и вода разделяются в центробежном влагоотделителе. Конденсированная вода подаётся во влагораспылитель, а воздух направляется в турбину турбохолодильника.

В турбине турбохолодильника воздух, поступающий под высоким давлением, расширяется. Кинетическая энергия воздуха преобразуется в энергию вращения турбины турбохолодильника. Температура воздуха снижается, давление воздуха также понижается до значения, близкого к величине давления в гермокабине. Турбина вращает компрессор и вентилятор продувочного воздуха. Вентилятор создаёт воздушный поток в системе продувочного воздуха при наземной эксплуатации самолёта.

Из турбины турбохолодильника воздух вновь поступает в конденсатор, где он используется в качестве охладителя для контура отделения воды. Затем кондиционированный воздух через выходной воздухопровод УОВ направляется в смесительный трубопровод системы вентиляции и распределения воздуха.

При нормальной работе УОВ автоматически управляется с помощью блока управления КСКВ в зависимости от конфигурации системы и выбора экипажа (выбор температуры, количества работающих блоков).

В случае выхода из строя одной из УОВ блок управления КСКВ формирует команду на закрытие заслонки регулирования расхода и на выдачу соответствующего сообщения экипажу. При этом вторая УОВ переходит в режим повышенного расхода. Если отказавшая УОВ автоматически не закроется, пилоту выдаётся рекомендация отключить ее вручную.

Количество воздуха, подаваемого в УОВ, регулируется заслонкой регулирования расхода (рис. 2.3) по показаниям датчика давления на входе в УОВ и датчика расхода на входе в УОВ. Заслонка регулирования расхода устанавливается между датчиком расхода Вентури и УОВ.

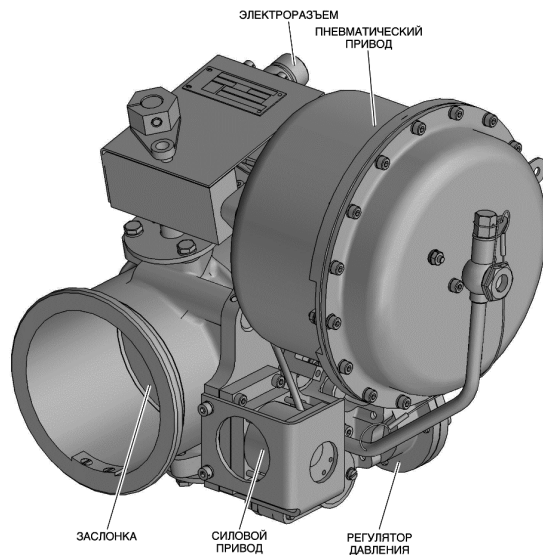


Рис. 2.3. Расположение заслонки регулирования подачи воздуха

Заслонка предназначена для управления расходом воздуха, поступающего из системы отбора в УОВ. Заслонка регулирования расхода регулирует количество воздуха в соответствии с данными, поступающими от датчика расхода Вентури. Положение заслонки регулируется силовым приводом. В случае отключения электропитания или отказа электродвигателя заслонка автоматически закрывается.

Заслонка регулирования расхода состоит из:

- заслонки, соединенной штоком с пневматическим приводом;
- пневматического привода;
- регулятора давления, поддерживающего постоянное давление в пневматическом приводе;
- силового привода.

Поток воздуха через впускное отверстие в корпусе заслонки поступает в регулятор давления.

В зависимости от текущего положения силового привода регулируется количество воздуха, поступающего в камеру пневматического привода. Поршень пневматического привода соединен штоком с дроссельной заслонкой. Угол поворота дроссельной заслонки зависит от текущего положения поршня пневматического привода. В зависимости от положения дроссельной заслонки на пульт управления AIR потолочного пульта поступают сигналы о текущем состоянии заслонки.

Запуск УОВ и регулирование расхода воздуха осуществляется автоматически с помощью блока управления КСКВ. Положение каждой заслонки регулирования расхода устанавливается блоком управления КСКВ в соответствии с данными, поступающими от:

- датчика давления на входе в УОВ;
- датчика расхода на входе в УОВ;
- датчика температуры на входе в УОВ.

В режиме запуска двигателя от ВСУ обе заслонки регулирования расхода постоянно закрыты.

В аварийном режиме работы системы регулирования расхода (отказ одной из УОВ) заслонка регулирования расхода на входе в отказавшую УОВ постоянно закрыта, а работа оставшейся УОВ регулируется с учетом увеличенного расхода.

В случае несрабатывания автоматического закрытия заслонки регулирования расхода имеется возможность принудительно закрыть заслонку.

## **2.4. Выполнение задач контрольной работы**

### **2.4.1. Задача 1. Статистический анализ безотказности невосстанавливаемых изделий ФС ЛА параметрическим методом**

*Безотказность:* Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения [9].

*Невосстанавливаемый объект*: объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации не предусмотрено технической и конструкторской документацией на объект.

У невосстанавливаемых изделий рассматриваются первичные отказы, у восстанавливаемых — первичные и повторные. Важно отметить, что большинство узлов и компонентов ВС являются восстанавливаемыми. В то же время, при рассмотрении первичных отказов восстанавливаемых изделий могут быть применены модели невосстанавливаемых изделий и их параметры.

Поскольку факторы, влияющие на отказ объекта, носят случайный характер, то отказ объекта является случайным событием, а время работы (наработка) объекта до отказа представляет собой случайную величину. Эти случайные величины подчиняются определенным закономерностям, которые выражаются законами распределения случайных величин.

Для невосстанавливаемых изделий в качестве моделей надежности рассматриваются законы распределения наработки до отказа (непрерывных случайных величин): экспоненциальный, нормальный и закон распределения Вейбулла. Характеристики этих законов приведены в таблице 2.2.

Установление закономерностей основывается на обработке статистических данных – наработки изделий до отказа, полученных в результате эксплуатационных наблюдений (испытаний). В таблице 2.3 приведены расчетные формулы для показателей безотказности невосстанавливаемых объектов.

Оценка показателей надежности невосстанавливаемых объектов может быть выполнена параметрическим и непараметрическим методами.

*Параметрический метод* оценки показателей надежности предусматривает при известном законе распределения наработки до отказа и других случайных величин выполнение следующих операций: оценку параметров закона распределения, входящих в расчетную формулу определенного показателя надежности, и оценку показателей надежности по вычисленным оценкам параметров закона распределения. Если закон распределения случайной величины априори неизвестен, то сначала на основе эксплуатационных данных определяется закон распределения.

*Непараметрический метод* предусматривает при неизвестном законе распределения наработки до отказа выполнение непосредственной оценки показателей надежности по данным эксплуатационных наблюдений.

Оценка показателей надежности изделий производится по результатам ограниченного количества наблюдений (выборки), представляющих некоторую часть генеральной совокупности распределения случайной величины. Под генеральной совокупностью подразумеваются результаты наблюдений по всем изделиям всего парка самолетов данного типа.

Последовательность решения задачи 1.

Исходные данные: № варианта; заданное изделие СКВ; значения наработок до отказа заданного изделия СКВ ( $t_i$ ).

- 1) Подготовка исходных данных для расчетов, приведенных в таблице П.1.1.
- 2) Разбиение вариационного ряда наработок до отказа на равные интервалы. Приближенная оценка ширины интервала может быть сделана по формуле

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{1 + 3,2 \lg n},$$

где  $\tau_{\max}, \tau_{\min}$  - максимальное и минимальное значение периода наблюдений,  $n$  - объем выборки.

Рекомендуется ширину интервала округлять до цифр кратных 10.

Примечание\*. Не желательно, чтобы в каком-либо интервале отсутствовали отказы.

- 3) Определение количества отказов в интервалах  $\Delta n_i$ .
- 4) Определение количества отказов  $n_i(t)$  до начала  $i$ -го интервала.
- 5) Определение средней наработки до отказа  $T_{\text{ср}}$ .

Формулы для расчета приведены в табл.2.3.

Для полной выборки  $n = N$

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^l t_i^{(c)} \Delta n_i, \quad (2.1)$$

где  $t_i^{(c)}$  – середина  $i$ -го интервала;

$$t_i^{(c)} = \frac{t_i^I + t_i^{II}}{2}, \quad (2.2)$$

$t_i^I$  и  $t_i^{II}$  – левая и правая границы  $i$ -го интервала;

$\Delta n_i$  – число отказавших элементов в  $i$ -м интервале;

$N$  – число наблюдаемых изделий.

- 6) Оценка статистических значений вероятности безотказной работы  $P^*(t)$ , плотности вероятности наработки до отказа  $f^*(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$  производится для каждого интервала  $\Delta t_i$  по формулам (2.3 – 2.5):

$$P_i^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N}, \quad (2.3)$$

$$f_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N_i * \Delta t_i}, \quad (2.4)$$

$$\lambda_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{[N_i - n_i(t)] * \Delta t_i}, \quad (2.5)$$

где:  $\Delta n_i$  – число отказавших изделий в интервале  $\Delta t_i$ ;

$N_i$  – число изделий, наблюдаемых в интервале  $\Delta t_i$ ;

$n_i(t)$  число отказавших изделий до начала  $i$ -го интервала.

- 7) Построение гистограмм плотности вероятности наработки до отказа  $f^*(t)$  и интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$  (рис. П.1.1, 1.2 Приложение 1).



- 8) Сравнение гистограмм  $f^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$  с графиками теоретических кривых законов распределения, приведенных в таблице 2.2, и выдвижение гипотезы о виде закона распределения рассматриваемой случайной величины.
- 9) Определение параметров предполагаемого теоретического закона распределения рассматриваемой случайной величины (табл. 2.2, табл. П.1.3, П.1.4). Оценка параметров распределения по формулам, приведенным в таблице 2.2:
- оценка параметра экспоненциального распределения  $\lambda$ ;
- $$\lambda = \frac{1}{T_{\text{cp}}}$$
- оценка параметров нормального распределения  $m_t$  и  $\sigma_t$ ;
- $$m_t = T_{\text{cp}}$$
- $$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^K (t_i^{(c)} - T_{\text{cp}})^2 \Delta n_i}$$
- оценка параметров распределения Вейбулла  $a$  и  $b$ :
- расчет коэффициента вариации  $\vartheta = \frac{\sigma_t}{m_t}$ ,
  - определение параметра распределения  $b$  и коэффициента  $K_b$  по табл. П.1.4, Приложение 1,
  - расчет параметра распределения  $a = \frac{m_t}{K_b}$ .
- 10) Проверка гипотезы о законе распределения наработки до отказа по критерию Пирсона  $\chi^2$  (2.6).
- 11) Определение вероятности безотказной работы по предполагаемому теоретическому закону распределения за наработку  $t = 750$  ч.
- 12) Оформление результатов выполненных расчетов по форме табл. 2.4.
- 13) Выводы по задаче.

Критерий  $\chi^2$  рассчитывается по формуле:

$$\chi^2_{\text{расч}} = \sum_{i=1}^L \frac{(\Delta n_i - NP_i)^2}{NP_i}, \quad (2.6)$$

где  $L$  — число интервалов группирования;

$\Delta n_i$  — число наблюдаемых статистических данных, попавших в  $i$ -й интервал;

$P_i$  — теоретическая (соответствующая предполагаемому закону распределения) вероятность нахождения случайной величины в  $i$ -м интервале.

Если  $t_i$  — правая граница  $i$ -го интервала и  $t_{i-1}$  — его левая граница, то

$$P_i = F(t_i) - F(t_{i-1}). \quad (2.7)$$

$F(t_i)$  и  $F(t_{i-1})$  — интегральные функции распределения наработки до отказа для конца и начала интервала наработки, соответственно, определяются

по расчетным формулам предполагаемого закона распределения наработки до отказа.

$$F(t) = 1 - P_i(t). \quad (2.8)$$

Рассчитанное по формуле (2.6) значение  $\chi^2_{\text{расч}}$  сравнивается с теоретическими значениями  $\chi^2_{\text{теор}}$ , которые определяются по табл. П.1.5.

$\chi^2_{\text{теор}}$  зависит от числа степеней свободы  $r$  и уровня значимости  $\alpha$ , где  $\alpha$  — принятый уровень значимости в %, который представляет собой максимально допустимую вероятность ошибочного отвержения гипотезы (ошибка первого рода). Для большинства задач уровень значимости принимают от 1 до 10%. В дальнейших расчетах мы будем использовать значение  $\alpha = 0,05$ . Число степеней свободы  $r$  зависит от процедуры обработки статистических наблюдений:

$r = k-s-1$ , где  $k$  - количество интервалов, используемых при обработке статистических наблюдений;  $s$  - количество параметров предполагаемого закона распределения наработки до отказа (экспоненциальное распределение имеет один параметр, распределение Вейбулла и нормальное распределение — по два параметра).

При  $\chi^2_{\text{расч}} \geq \chi^2_{\text{теор}}$  гипотеза отвергается, если  $\chi^2_{\text{расч}} \leq \chi^2_{\text{теор}}$ , то гипотеза о соответствии экспериментальных данных предполагаемому закону распределения принимается.

#### **2.4.2. Задача 2. Статистический анализ показателей безотказности восстанавливаемых изделий ЛА**

*Восстанавливаемый объект:* объект, восстановление работоспособного состояния которого в рассматриваемой ситуации предусмотрено технической и конструкторской документацией.

Эксплуатация восстанавливаемых изделий может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и работает до отказа, после отказа происходит восстановление работоспособности и объект вновь работает до отказа и т.д. При этом время восстановления не учитывается, т.е. учитывается только время наработки. Для таких объектов моменты отказов на оси суммарной наработки образуют поток отказов.

Основными показателями безотказности восстанавливаемых объектов являются:

- вероятность безотказной работы  $P(t_1, t_2)$  на интервале от  $t_1$  до  $t_2$ ;
- параметр потока отказов  $\omega_i^*(t)$ ;
- средняя наработка между отказами  $T$ /на отказ  $T_0$ .

Статистический анализ безотказности восстанавливаемых изделий проводится на основе оценки показателей безотказности и инженерного анализа физики отказов. Статистические расчеты, как и в случае определения показателей безотказности невосстанавливаемых изделий, проводятся путем разбиения всего периода наработки на интервалы.

Таблица 2.2

## Характеристики законов распределения наработки до отказа

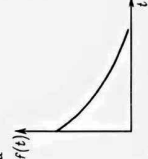
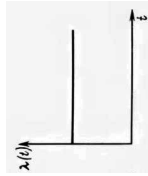
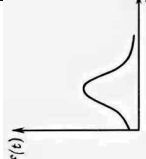
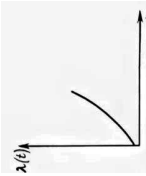
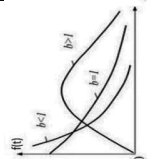
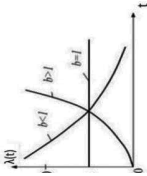
Закон распределения	Параметры	Математические выражения		Графики	
		Плотность распределения	Вероятность безотказной работы	Плотность распределения	Интенсивность отказов
1	2	3	4	5	6
Экспоненциальный	$S=1$ $\lambda = \frac{1}{T_{cp}}$	$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	$P(t) = e^{-\lambda t}$		
Нормальный	$S=2$ $m_t, \sigma_t,$ $\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^K (t_i^{(C)} - T_{cp})^2 \Delta n_i}$ П.3.2 приложения $m_t = T_{cp}$	$f(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma_t^2}}$	$P(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - m_t}{\sigma_t}\right)$		
Вейбулла	$S=2$ $a, b$ $\vartheta = \frac{\sigma_t}{m_t}, a = \frac{m_t}{K_b},$ $b = f(\vartheta),$ где $b$ и $K_b$ по табл. П.1.4 Приложения 1	$f(t) = \frac{b}{a} t^{b-1} e^{-\frac{1}{a} t^b}$	$P(t) = e^{-\frac{1}{a} t^b}$		

Таблица 2.3

## Показатели безотказности невосстанавливаемых объектов

Наименование показателей	Определения	Расчетные формулы		Примечания
		теоретические	статистические	
1	2	3	4	5
Вероятность безотказной работы, $P(t)$	Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет	$P(t) = 1 - F(t)$	$P_i^*(t) = 1 - \frac{n_i(t)}{N}$	$t$ - наработка объекта, ч $F(t)$ - функция распределения наработки до отказа, $n_i(t)$ - количество отказов за время (наработку) $t$ , $N$ - количество изделий, находящихся под наблюдением
Плотность вероятности наработки до отказа, $f(t)$	Плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для наработки $t$	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$f_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N * \Delta t_i}$	$\Delta n_i$ - количество отказов в интервале $\Delta t$ , $\Delta t$ - интервал времени (наработки)
Интенсивность отказов, $\lambda(t)$	Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$ $= - \frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt} =$ $= \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt}$	$\lambda_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{[N - n_i(t)] * \Delta t_i}$	

<p>Средняя наработка до отказа, <math>T_{cp}</math></p>	<p>Математическое ожидание наработки до отказа</p>	$T_{cp} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt =$ $= \int_0^{\infty} t dF(t)$	<p>Полная выборка</p> $n = N$ $T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N},$ $T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L t_i^{(c)} \Delta n_i,$ <p>где <math>t_i^{(c)}</math> – середина <math>i</math>-го интервала;</p> $t_i^{(c)} = \frac{t_i^I + t_i^{II}}{2},$ <p><math>t_i^I</math> и <math>t_i^{II}</math> – левая и правая границы <math>i</math>-го интервала;</p> <p><math>L</math> – количество интервалов при обработке статистики</p>	
---	--	--	--	--

Таблица 2.4

Расчет показателей безотказности параметрическим методом

Исходные статистические данные	Номер интервала	1	2	3	...	L
	Границы интервала	$t_0 - t_1$	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	...	$t_{L-1} - t_L$
	$\Delta t_i$					
	$\Delta n_i$					
Статистические характеристики  $N =$  $n =$	$n_i(t)$					
	$P_i^*(t)$					
	$f_i^*(t)$					
	$\lambda_i^*(t)$					
Средняя наработка до отказа	$T_{cp} =$					
Гипотеза о законе распределения наработки до отказа	наименование					
	вид функции распределения					
Параметры закона распределения	$\lambda$					
	$T_{cp} / \sigma$					
	$a / b$					
Расчет критерия $\chi^2_{расч}$	$P_i$					
	$NP_i$					
	$\Delta n_i - NP_i$					
	$\frac{(\Delta n_i - NP_i)^2}{NP_i}$					
	$\chi^2_{расч} = \sum_{i=1}^K \frac{(\Delta n_i - NP_i)^2}{NP_i}$					
Вывод	$\chi^2_{расч} \leq (\geq) \chi^2_{теор}$					
	Гипотеза ..... о законе распределения (не) принимается					
Показатели надежности Вероятность безотказной работы	$P(t=750 \text{ ч})$					

Последовательность решения задачи 2.

Исходные данные: № варианта; заданное изделие СКВ; значения наработок до отказа заданного изделия СКВ ( $t_i$ ).

Разбиение вариационного ряда наработок до отказа на интервалы выполняется аналогично Задаче 1.

- 1) Для каждого интервала производится расчет статистической оценки параметра потока отказов  $\omega^*(t)$  по формуле:

$$\omega_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N_i \Delta t_i}, \quad (2.9)$$

где:  $\Delta n_i$  – число отказавших изделий в  $i$ -м интервале,  
 $N_i$  – число наблюдаемых изделий в  $i$ -м интервале,  
 $\Delta t_i$  – интервал наработки изделий.

- 2) Сведение результатов расчета  $\omega_i^*(t)$  в таблицу по форме (табл. 2.5).  
 3) Построение гистограммы распределения  $\omega_i^*(t)$ .  
 4) Анализ характера изменения параметра потока отказов:  $\omega^*(t) = \text{const}$  или  $\omega^*(t) \neq \text{const}$ .  
 5) При допущении  $\omega^*(t) = \text{const}$ : расчет среднего значения параметра потока отказа  $\omega_{\text{ср}}^*$ ; средней наработки на отказ  $T_0$  и вероятности безотказной работы за наработку  $t = 750$  ч

$$\omega_{\text{ср}}^* = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \omega_i^*(t), \quad (2.10)$$

$$T_0 = 1/\omega_{\text{ср}}^*, \quad (2.11)$$

где  $L$  – количество интервалов гистограммы.

- 6) Определение вероятности безотказной работы за наработку  $t = 750$  ч  
 $P(t) = e^{-\omega t}$ ,  $\omega = \omega_{\text{ср}}^*$  (2.12)  
 7) Определение средней наработки между отказами  $T$  для  $\omega^*(t) \neq \text{const}$ .

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (2.13)$$

- 8) Моделирование зависимости  $\omega_i(t)$  для  $\omega^*(t) \neq \text{const}$ .

Зависимость параметра потока отказов от наработки аппроксимируется линейным уравнением  $\omega_i(t) = \alpha + \beta t$  с использованием метода наименьших квадратов.

Расчет параметров  $\alpha$  и  $\beta$  выполняется по формулам:

$$\alpha = \sum_{i=1}^L \gamma_i \omega_i^* - \beta \sum_{i=1}^L \gamma_i t_i^{(c)}, \quad (2.14)$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^L \gamma_i t_i^{(c)} \omega_i^* - (\sum_{i=1}^L \gamma_i \omega_i^*)(\sum_{i=1}^L \gamma_i t_i^{(c)})}{\sum_{i=1}^L \gamma_i (t_i^{(c)})^2 - (\sum_{i=1}^L \gamma_i t_i^{(c)})^2}, \quad (2.15)$$

$$t_i^{(c)} = \frac{t_i^I + t_i^{II}}{2}, \text{ – середина } i\text{-го интервала;}$$

$t_i^I$  и  $t_i^{II}$  – левая и правая границы  $i$ -го интервала;

$\gamma_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го интервала,  $\sum_{i=1}^L \gamma_i = 1$ . При равной ширине интервалов  $\gamma_i = 1/L$ .

Промежуточные результаты расчетов рекомендуется свести в таблицу 2.6.

- 9) Определение вероятности безотказной работы восстанавливаемых изделий за интервал наработки до формы периодического технического обслуживания ЛА  $t_{\text{пр}} = 750$  ч по формуле:

$$P(t) = e^{-\left(\alpha + \frac{\beta}{2}t\right)t} \quad (2.16)$$

Рассчитать значения  $P(t)$  с периодичностью 50 ч, представить в виде таблицы и построить график.

- 10) Выводы по задаче.

Таблица 2.5

Оценка параметра потока отказов  $\omega_i^*(t)$

Основные параметры	Интервалы $t_i - t_{i+1}$				
	1	2	3	...	$L$
	$t_0 - t_1$	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$	...	$t_{L-1} - t_L$
$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	...	$\Delta t_L$
$N$	$N$	$N$	$N$	...	$N$
$\Delta n_i$	$\Delta n_1$	$\Delta n_2$	$\Delta n_3$	...	$\Delta n_L$
$\omega_i^*(t)$	$\omega_1^*(t)$	$\omega_2^*(t)$	$\omega_3^*(t)$	...	$\omega_L^*(t)$

Таблица 2.6

Промежуточные результаты расчета параметров линейной зависимости  $\omega_i(t)$

Интервалы $t_i - t_{i+1}$	$t_i^{(c)}$	$\omega_i^*(t)$	$(t_i^{(c)})^2$	$t_i^{(c)} \omega_i^*(t)$
$t_0 - t_1$				
$t_1 - t_2$				
$t_2 - t_3$				
...				
$t_{L-1} - t_L$				

### 2.4.3. Задача 3. Определение потребного количества запасных частей для эксплуатации парка ВС SSJ 100 на установленный период поддержания запаса

В процессе эксплуатации ВС возникают отказы и повреждения комплектующих изделий. Для своевременного восстановления работоспособности ВС в рамках планового технического обслуживания авиапредприятие должно иметь в наличии необходимое количество запасных частей на период межремонтного ресурса ВС.

*Запасная часть:* отдельный узел, устройство или элемент, предназначенные для замены изношенных, неисправных или отказавших



составных частей объекта с целью поддержания или восстановления его работоспособного состояния [9].

Приобретение избыточного комплекта запасных частей приводит к неоправданным затратам, поэтому наиболее рациональным для авиапредприятия является приобретение запасных комплектующих изделий по потребности, в зависимости от количества возникающих отказов, что непосредственно связано с налетом парка ВС и параметрами надежности изделий. В такой постановке появляется задача прогнозирования потребного количества запасных частей на период межремонтного ресурса с учетом налета парка ВС.

Для управления объемами запасных частей используется уравнение Пуассона:

$$P_{r \text{ доп}} = \sum_{n=0}^r \frac{(\omega t)^n}{n!} e^{-\omega t}, \quad (2.17)$$

где  $P_{r \text{ доп}}$  - вероятность того, что для замены отказавших изделий будет достаточно  $r$  запасных частей;

$$P_{r \text{ доп}} = 1 - P_{\text{доп}}, \quad (2.18)$$

где  $P_{\text{доп}}$  - допустимая вероятность того, что число отказов изделия превысит их запас;

$\omega$  - параметр потока отказа;

$t$  - период эксплуатации в часах наработки.

Параметр потока отказа  $\omega$  вычисляется известными методами теории надежности на базе статистических данных наработки до отказа восстанавливаемых изделий (2.9, 2.10).

Ввиду сложного получения статистических данных по наработкам до отказа отдельных изделий одного типа, на практике для усредненной оценки надежности изделия используются данные эксплуатационных наблюдений для парка ВС.

Так, среднее значение параметра потока отказов можно рассчитать как отношение числа отказов за период наблюдения к суммарной наработке изделий за тот же период для парка ВС:

$$\omega_{\text{ср}}^* = \frac{N_i}{T n_i}, \quad (2.19)$$

где  $N_i$  - число отказов изделия на парке ВС за период наблюдений;

$T$  - налет парка ВС за период наблюдений, ч;

$n_i$  - количество изделий на одном ВС.

В данной задаче будет проводиться оценка среднего значения параметра потока отказов по формулам 2.19 и 2.10.

### Последовательность решения задачи 3.

Исходные данные: № варианта; заданное изделие СКВ; объем парка ВС ( $N_c$ ); количество изделий на ВС ( $n_i$ ); установленный срок для поддержания запаса изделий ( $T_p$ ), допустимая вероятность отсутствия запасного изделия на складе для замены отказавшего ( $P_{\text{доп}}$ ), средний суточный налет на одно ВС ( $H_d$ ); период наблюдений ( $T_n$ ).

1) Определение параметра потока отказа  $\omega_{\text{ср}}^*$  по формуле (2.19) на основе исходных данных таблицы П.1.1 в соответствии с вариантом КР:

- количество отказов  $N_i$  определяется по числу значений наработок на отказ;
- налет парка ВС в часах:  $T = T_{\text{п}} H_{\text{д}} N_{\text{с}} * 365$ , где  $T_{\text{п}}$  – период наблюдений, лет;  $H_{\text{д}}$  – средний суточный налет на одно ВС, ч;  $N_{\text{с}}$  – объем парка ВС.

2) Определение характеристик уравнения Пуассона.

Расчет потребного количества запасных изделий  $n_{\text{зи}}$  в течение установленного срока  $T_{\text{р}}$  (дней) выполняется с использованием формулы (2.17):

$$P_{r \text{ доп}} = 1 - P_{\text{доп}}, \omega = \omega_{\text{ср}}^* .$$

Значение  $t$  рассчитывается по формуле  $t = T_{\text{р}} H_{\text{д}} N_{\text{с}} n_{\text{и}}$ .

Значения  $T_{\text{р}}$  и  $P_{\text{доп}}$  выбираются из таблицы П.1.2 в соответствии с номером варианта КР.

3) Расчет и суммирование точечных значений  $P_{ri}$ .

Принимаем  $n = 0$  и определяем  $P_{r0} (n = 0)$ ; затем  $n = 1$  и находим

$P_{r1} (n = 1)$  и т.д. Суммируем накопительным итогом:  $\sum_{n=1}^r P_n$ . При этом, на каждом шаге проверяется условие:  $\sum_{n=1}^k P_n \geq P_{r \text{ доп}}$ .

Вычисления прекращаются на шаге, при котором достигнуто выполнение условия, и определяется  $n_{\text{зи}} = r$ .

4) Расчет потребного количества запчастей с параметром потока отказов, определенном на основе данных о наработках до отказа по формуле (2.10).

Расчет с использованием уравнения Пуассона выполняется аналогично предыдущему (п. 3).

5) Выводы по задаче.

## Приложение 1

Таблица П.1.1

Исходные данные для вариантов заданий

№ варианта	№ строки таблицы П.1.2	$T_p$ дней	$P_{доп}$ %	№ варианта	№ строки таблицы П.1.2	$T_p$ дней	$P_{доп}$ %
<b>0</b>	1	30	2	<b>14</b>	3	30	2
<b>1</b>	1	35	3	<b>15</b>	3	35	3
<b>2</b>	1	40	4	<b>16</b>	3	40	4
<b>3</b>	1	45	5	<b>17</b>	3	45	5
<b>4</b>	1	50	6	<b>18</b>	4	50	6
<b>5</b>	1	55	7	<b>19</b>	4	55	7
<b>6</b>	2	60	8	<b>20</b>	4	60	8
<b>7</b>	2	30	2	<b>21</b>	4	30	2
<b>8</b>	2	35	3	<b>22</b>	4	35	3
<b>9</b>	2	40	4	<b>23</b>	5	40	4
<b>10</b>	2	45	5	<b>24</b>	5	45	5
<b>11</b>	2	50	6	<b>25</b>	5	50	6
<b>12</b>	3	55	7	<b>26</b>	5	55	7
<b>13</b>	3	60	8	<b>27</b>	5	60	8

Таблица П.1.2

Исходные данные по отказам изделий системы СКВ

№	Наименование изделия	$N_c$	$n_{и}$	$H_d$ ч	$T_{п}$ лет	Наработка до отказа $t_i$ , ч
1	2	3	4	5	6	7
1	Вытяжной вентилятор переднего приборного отсека	18	2	5,5	2	857, 1081, 1150, 1624, 1658, 2263, 2279, 2319, 2338, 2385, 2412, 2537, 2563, 2598, 2724, 2811, 2880, 3263, 3681, 3820, 4173, 4309, 4618, 4668, 4721, 5031, 5635, 5914, 6028, 6104, 6121, 6382, 6511, 7340, 7749, 9248
2	Вытяжной вентилятор среднего приборного отсека	18	1	6,5	2	516, 607, 652, 989, 999, 1364, 1407, 1413, 1446, 1471, 1510, 1580, 1611, 1669, 1731, 1823, 1995, 2004, 2368, 2445, 2607, 2733, 2861, 2874, 2876, 3340, 3502, 3543, 3601, 3681, 3789, 3801, 3887, 3984, 4564, 5280
3	Вентилятор нагнетания воздуха в блок авионики	18	4	5,5	1	935, 1356, 1686, 1909, 2039, 2115, 2213, 2534, 2585, 2773, 3090, 3141, 3174, 3273, 3281, 3539, 3672, 3717, 3766, 3778, 4100, 4267, 4380, 4588, 4747, 4940, 5037, 5192, 5243, 5461, 5700, 5868, 6047, 6286, 6483, 7525

Продолжение табл. П.1.2

1	2	3	4	5	6	7
4	Турбохолодильник	18	2	5,5	3	1607, 2140, 2374, 2722, 2752, 3006, 3029, 3072, 4260, 4825, 4928, 5388, 5456, 5514, 5548, 5611, 5702, 5719, 5738, 5750, 5963, 6577, 6588, 6667, 6693, 7080, 7250, 7764, 8122, 8794, 8860, 10183, 10197, 11650, 12512, 14788
5	Заслонка регулирования расхода воздуха	12	2	7,0	3	1694, 1717, 2152, 2235, 2729, 4723, 4944, 5553, 5625, 5719, 5739, 5933, 7080, 7230, 7801, 7859, 9588, 9894, 10028, 11888, 12259, 12692, 14521, 16680

Таблица П.1.3

Функция стандартного нормального распределения  $F_0(X)$ 

X		0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	5000	5040	5080	5120	5160	5199	5239	5279	5319
0.1	0	5398	5438	5478	5517	5557	5596	5636	5675	5714
0.2	0	5793	5832	5871	5910	5948	5987	6026	6064	6103
0.3	0	6179	6217	6255	6293	6331	6368	6406	6443	6480
0.4	0	6554	6591	6628	6664	6700	6736	6772	6808	6844
0.5	0	6915	6950	6985	7019	7054	7088	7123	7157	7190
0.6	0	7257	7291	7324	7357	7389	7422	7454	7486	7517
0.7	0	7580	7611	7642	7673	7704	7344	7764	7794	7823
0.8	0	7881	7910	7939	7967	7995	8023	8051	8078	8106
0.9	0	8159	8186	8212	8238	8264	8289	8315	8340	8365
1	0	8413	8438	8461	8485	8508	8531	8554	8577	8599
1.1	0	8643	8665	8686	8708	8729	8749	8770	8790	8810
1.2	0	8849	8869	8888	8907	8925	8944	8962	8980	8997
1.3	0.9	0320	0490	0658	0824	0988	1149	1308	1466	1621
1.4	0.9	1924	2073	2220	2364	2507	2647	2785	2922	3056
1.5	0.9	3319	3448	3574	3699	3822	3943	4062	4179	4295
1.6	0.9	4520	4630	4738	4845	4950	5053	5154	5254	5352
1.7	0.9	5543	5637	5728	5818	5907	5994	6080	6164	6246
1.8	0.9	6407	6485	6562	6637	6712	6784	6856	6926	6995
1.9	0.9	7128	7193	7257	7320	7381	7441	7500	7558	7615
2	0.9	7725	7778	7831	7882	7932	7982	8030	8077	8124
2.1	0.9	8214	8257	8300	8341	8382	8422	8461	8500	8537
2.2	0.9	8610	8645	8679	8713	8745	8778	8809	8840	8870
2.3	0.9	8928	8956	8983	9010	9036	9061	9086	9111	9134
2.4	0.99	1802	2024	2240	2451	2656	2857	3053	3244	3431
2.5	0.99	3790	3963	4132	4297	4457	4614	4766	4915	5060
2.6	0.99	5339	5473	5603	5731	5855	5975	6093	6207	6319
2.7	0.99	6533	6636	6736	6833	6928	7020	7110	7197	7282
2.8	0.99	7445	7523	7599	7673	7744	7814	7882	7948	8012
2.9	0.99	8134	8193	8250	8305	8359	8411	8462	8511	8559

Продолжение табл.П.1.3

X		0	1	2	3	4	5	6	7	8
3	0.99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8930	8965
3.0	0.99	8650	8694	8736	8777	8817	8856	8893	8965	8999
3.1	0.93	0324	0646	0957	1260	1553	1836	2112	2636	2886
3.2	0.93	3129	3363	3590	3810	4024	4230	4429	4810	4991
3.3	0.93	5166	5335	5499	5658	5811	5959	6103	6376	6505
3.4	0.93	6631	6752	6869	6982	7091	7197	7299	7493	7585
3.5	0.93	7674	7760	7842	7922	7999	8074	8146	8282	8347
3.6	0.93	8409	8469	8527	8583	8637	8689	8739	8834	8879
3.7	0.93	8922	8964	9004	9043	9080	9116	9150	9216	9247
3.8	0.94	2765	3052	3327	3593	3848	4094	4331	4777	4988
3.9	0.94	5190	5385	5573	5753	5926	6092	6252	6554	6696
4.0	0.94	6833	6964	7090	7211	7327	7439	7546	7748	7843
4.1	0.94	7934	8022	8106	8186	8264	8338	8409	8542	8605
4.2	0.94	8665	8723	8778	8832	8882	8931	8978	9066	9107
4.3	0.95	1460	1837	2198	2544	2876	3193	3497	4066	4332
4.4	0.95	4588	4832	5065	5288	5502	5706	5902	6268	6439
4.5	0.95	6602	6759	6908	7051	7187	7318	7442	7675	7784
4.6	0.95	7888	7987	8081	8172	8258	8340	8419	8566	8634
4.7	0.95	8699	8761	8821	8877	8931	8983	9032	9124	9166
4.8	0.96	2067	2554	2822	3173	3508	3827	4131	4696	4958
4.9	0.96	5208	5446	5673	5888	6094	6289	6475	6821	6981
5.0	0.96	7134	7278	7416	7548	7672	7791	7904	8113	8210
5.1	0.96	8302	8389	8472	8551	8626	8698	8765	8891	8949
5.2	0.97	004	056	105	152	197	240	280	354	388
5.3	0.97	421	452	481	509	539	560	584	628	648
5.4	0.97	667	685	702	718	734	748	762	787	799
5.5	0.97	810	821	831	840	849	857	865	880	886
5.6	0.97	893	899	905	910	915	920	924	933	936
5.7	0.98	40	44	47	50	53	55	58	63	65
5.8	0.98	67	69	71	72	74	75	77	79	81
5.9	0.98	82	83	84	85	86	87	87	89	90
6.0	0.98	90	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица П.1.4

Коэффициенты для распределения Вейбулла

b	K <sub>b</sub>	C <sub>b</sub>	g
1	2	3	4
0.2	120	1900	15.83
0.3	8.86	46.9	5.29
0.4	3.32	10.4	3.14
0.5	2	4.47	2.24
0.6	1.50	2.61	1.74
0.7	1.27	1.86	1.46
0.8	1.13	1.43	1.26
0.9	1.05	1.17	1.11
1	1.00	1.00	1.00
1.1	0.965	0.878	0.910
1.2	0.941	0.787	0.837

Продолжение табл.П.1.4

1	2	3	4
1.3	0.924	0.716	0.775
1.4	0.911	0.659	0.723
1.5	0.903	0.612	0.678
1.6	0.897	0.574	0.640
1.7	0.892	0.540	0.605
1.8	0.889	0.512	0.575
1.9	0.887	0.485	0.547
2	0.886	0.463	0.523
2.1	0.886	0.441	0.489
2.2	0.886	0.425	0.480
2.3	0.886	0.409	0.461
2.4	0.887	0.394	0.444
2.5	0.887	0.380	0.428
3	0.893	0.326	0.365
3.5	0.900	0.285	0.316
4	0.906	0.255	0.281

Таблица П.1.5

Квантили  $\chi^2$  распределения

Число степеней свободы	$\chi_{0,1}^2$	$\chi_{0,3}^2$	$\chi_{0,5}^2$	$\chi_{0,7}^2$	$\chi_{0,9}^2$	$\chi_{0,95}^2$	$\chi_{0,99}^2$	$\chi_{0,999}^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,016	0,148	0,455	1,07	2,71	3,84	6,63	10,8
2	0,211	0,713	1,390	2,41	4,61	5,99	9,21	13,8
3	0,594	1,420	2,370	3,67	6,25	7,81	11,3	16,3
4	1,060	2,190	3,360	4,88	7,78	8,49	13,3	18,5
5	1,610	3,000	4,350	6,06	9,24	11,1	15,1	20,5
6	2,200	3,830	5,350	7,23	10,6	12,6	16,8	22,5
7	2,830	4,670	6,350	8,38	12,0	14,1	18,5	24,3
8	3,490	5,530	7,340	9,52	13,4	15,5	20,1	26,1
9	4,170	6,390	8,340	10,7	14,7	16,9	21,7	27,9
10	4,870	7,270	9,340	11,8	16,0	18,3	23,2	29,6
11	5,580	8,150	10,30	12,9	17,3	19,7	24,7	31,3
12	6,300	9,030	11,30	14,0	18,5	21,0	26,2	32,9
13	7,040	9,930	12,30	15,1	19,8	22,4	27,7	34,5
14	7,790	10,08	13,30	16,2	21,1	23,7	29,1	36,1
15	8,550	11,70	14,30	17,3	22,3	25,0	30,6	37,7
16	9,310	12,60	15,30	18,4	23,5	26,3	32,0	39,3
17	10,10	13,50	16,30	19,5	24,8	27,6	33,4	40,8
18	10,90	14,40	17,30	20,6	26,0	28,9	34,8	42,3
19	11,70	15,40	18,30	21,7	27,2	30,1	36,2	43,8
20	12,40	16,30	19,30	22,8	28,4	31,4	37,6	45,3
21	13,20	17,20	20,30	23,9	29,6	32,7	38,9	46,8
22	14,00	18,10	21,30	24,0	30,8	33,9	40,3	48,3
23	14,80	19,00	22,30	26,0	32,0	35,2	41,6	49,7
24	15,70	20,90	23,30	27,1	33,2	36,4	43,0	51,2

Продолжение табл.П.1.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	16,50	21,80	24,30	28,2	34,4	37,7	44,3	52,6
26	17,3	21,8	25,3	29,2	35,6	38,9	45,6	54,1
27	18,1	22,7	26,3	30,3	36,7	40,1	47,0	55,5
28	18,9	23,6	27,3	31,4	37,9	41,3	48,3	56,9
29	19,8	24,6	28,3	32,5	39,1	42,6	49,6	58,3
30	20,6	25,5	29,3	33,5	40,3	43,8	50,9	59,7

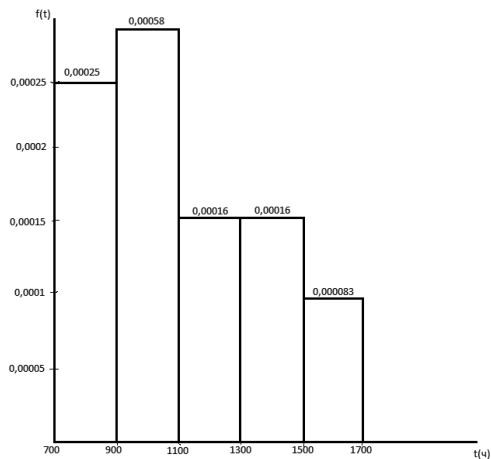


Рис. П.1.1. Гистограмма статистической оценки плотности распределения отказов  $f^*(t)$

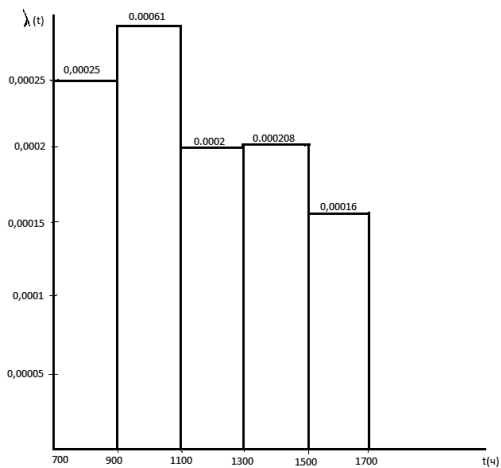


Рис. П.1.2. Гистограмма статистической оценки интенсивности отказов  $\lambda^*(t)$

**Приложение 2**

Титульный лист курсовой работы

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА  
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
 ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
 МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
 УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

**Кафедра технической эксплуатации ЛА и АД**

«Проверена»

«Защищена»

Контрольная работа

Руководитель контрольной

работы

с оценкой

\_\_\_\_\_

(степень, звание, Ф. И. О.)

\_\_\_\_\_

(подпись)

(Ф. И. О.)

\_\_\_\_\_

(подпись, дата)

**КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА**

«Оценка и прогнозирование показателей надежности  
 компонентов самолета SSJ-100»

ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
 «ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ»

Шифр студента:  
вариант № \_\_\_\_\_Курсовую работу  
выполнил

\_\_\_\_\_

студент

\_\_\_\_\_

группа

\_\_\_\_\_

(подпись)

\_\_\_\_\_

(дата)

Москва – 20 \_\_\_\_ г.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности. Ч.1. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013.
2. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности. Ч.2. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2016.
3. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Пособие по выполнению лабораторных работ «Анализ физической сущности типовых отказов и повреждений АТ» для студентов IV курса специальности 160901и направления 160900 дневного обучения. - М.: МГТУ ГА, 2011.
4. Ицкович А.А., Файнбург И.А., Файнбург Г.Д. Основы теории надежности. Учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы «Оценка показателей надежности авиационной техники» для студентов направления 25.03.01 очной формы обучения. – М.: МГТУ ГА, 2017.
5. Ицкович А.А., Файнбург И.А., Файнбург Г.Д. Основы теории надежности. Учебно-методическое пособие по проведению практических занятий «Оценка показателей надежности авиационной техники» для обучающихся по направлению подготовки 25.03.01и специальности 25.05.05 - М.: МГТУ ГА, 2020.
6. Ицкович А.А., Кабков П.К. Вероятностно-статистические модели эксплуатации ЛА: учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2009.
7. Яблонский С.Н., Кулешов А.А., Гостев А.В., Грузд А.Д. Техническая эксплуатация и поддержание летной годности самолетов RRJ-95 и MC-21 Система технического обслуживания самолетов RRJ-95 и MC-21. Учебное пособие. – М.: ИД Академии Жуковского, 2023.
8. ГОСТ Р 27.001–2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения – М.: Стандартиформ, 2010.
9. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.
10. ГОСТР 27.013–2019. (НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ Методы оценки показателей безотказности. – М.: Стандартиформ, 2019.

11. Руководство по технической эксплуатации самолёта RRJ-95B. М7.92.0АММ.000.000.RU. Ревизия В. – ЗАО «ГСС», 2010.
12. Сайт «[www.uacrussia.ru](https://www.uacrussia.ru)» (<https://www.uacrussia.ru/ru/>).

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>3</b>
<b>2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ.....</b>	<b>4</b>
2.1. Структура контрольной работы.....	4
2.2. Техническое задание (ТЗ).....	5
2.3. Описание объекта исследования.....	5
2.3.1. Самолет Sukhoi Superjet 100 (SSJ 100).....	5
2.3.2. Система кондиционирования воздуха (СКВ) самолета SSJ 100 .7	7
2.4. Выполнение задач контрольной работы .....	14
2.4.1. Задача 1. Статистический анализ безотказности невосстанавливаемых изделий ФС ЛА параметрическим методом .....	14
2.4.2. Задача 2. Статистический анализ показателей безотказности восстанавливаемых изделий ЛА.....	18
2.4.3. Задача 3. Определение потребного количества запасных частей для эксплуатации парка ВС SSJ 100 на установленный период поддержания запаса .....	24
Приложение 1.....	27
Приложение 2.....	32
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>33</b>
<b>СОДЕРЖАНИЕ .....</b>	<b>35</b>

А.А. Ицкович, И.А. Файнбург, Г.Д. Файнбург

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

*Учебно-методическое пособие*

В авторской редакции

Подписано в печать 04.12.2024 г.  
Формат 60x84/16 Печ. л. 2,25 Усл. печ. л. 2,09  
Заказ № 1048/0909-УМП06 Тираж 30 экз.

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А  
Тел.: (499) 755-55-43  
E-mail: zakaz@itsbook.ru