

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

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

Кафедра технической эксплуатации летательных аппаратов
и авиационных двигателей

Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург, Ю.И. Пичкин

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ И ПРОЦЕССАМИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Учебно-методическое пособие
по проведению практических занятий
«Определение потребности в запасных частях
парка воздушных судов в процессе эксплуатации»

*для студентов
специальности 25.05.05
очной формы обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2025

УДК 629.7.084
ББК 052-082
Ф17

Рецензент:

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

Файнбург Г.Д.

Ф17

Управление системами и процессами технической эксплуатации летательных аппаратов [Текст] : учебно-методическое пособие по проведению практических занятий «Определение потребности в запасных частях парка воздушных судов в процессе эксплуатации» / Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург, Ю.И. Пичкин. – М.: ИД Академии Жуковского, 2025. – 24 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Управление системами и процессами технической эксплуатации летательных аппаратов» по учебному плану для обучающихся по направлению подготовки 25.05.05 очной формы обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 09.06.2025 г. и методического совета 19.06.2025 г.

УДК 629.7.084
ББК 052-082

1. Общие положения

1.1. Целью проведения практических занятий является овладение знаниями по определению необходимого количества запасных частей для снижения времени простоя воздушных судов.

1.2. Практическое занятие № 3 проводится с использованием программы Microsoft Excel.

1.3. Исходные данные для выполнения практических занятий 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 М73496, вариант №19 (4+9+6).

1.4. По результатам выполнения практического занятия студент составляет отчет. Отчет должен содержать тему и цель работы, исходные данные, построенные диаграммы, ответы на вопросы и выводы.

2. Характеристика практических занятий

Практическое занятие №1. Тема: Определение параметра потока отказов компонентов системы кондиционирования воздуха самолета SSJ-100.

Практическое занятие №2. Тема: Определение необходимого количества запасных частей на установленный период поддержания запаса на основе допустимой вероятности достаточности запасных частей для замены отказавших изделий.

Практическое занятие №3. Тема: Определение необходимого количества запасных частей на установленный период поддержания запаса на основе оценки вероятных потерь от простоя ВС.

3. Методические указания по выполнению практических занятий

3.1. Практическое занятие №1

Тема: Определение параметра потока отказов компонентов системы кондиционирования воздуха самолета SSJ-100.

Цель: Овладение навыками и знаниями по определению параметра потока отказов изделий воздушного судна на основе эксплуатационных данных авиакомпании.

Безотказность: Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения [2].

У невосстанавливаемых изделий рассматриваются первичные отказы, у восстанавливаемых — первичные и повторные. Важно отметить, что большинство узлов и компонентов ВС являются восстанавливаемыми.

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

Основными показателями безотказности восстанавливаемых объектов являются [1]:

- 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 .

Мгновенным параметром потока отказов является предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к продолжительности этого интервала, стремящемуся к нулю. Средним параметром потока отказов является математическое ожидание мгновенного параметра потока отказов за заданный период времени [2].

Средняя наработка определяется как отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

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 [3].

Объектами при выполнении практических занятий являются компоненты системы кондиционирования воздуха (СКВ) самолета SSJ-100 (П.1.1 и П.1.2).

SSJ-100 – ближнемагистральный реактивный самолет нового поколения. Лайнер востребован на российском рынке благодаря гармоничному сочетанию дальности, вместимости и комфорта [5].

Система кондиционирования воздуха (СКВ) является частью комплексной системы кондиционирования воздуха (КСКВ), в состав которой также входят пневматическая система (ПС) и противообледенительная система (ПОС) крыла [4].

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).

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 вентиляторы 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. 3.1) 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

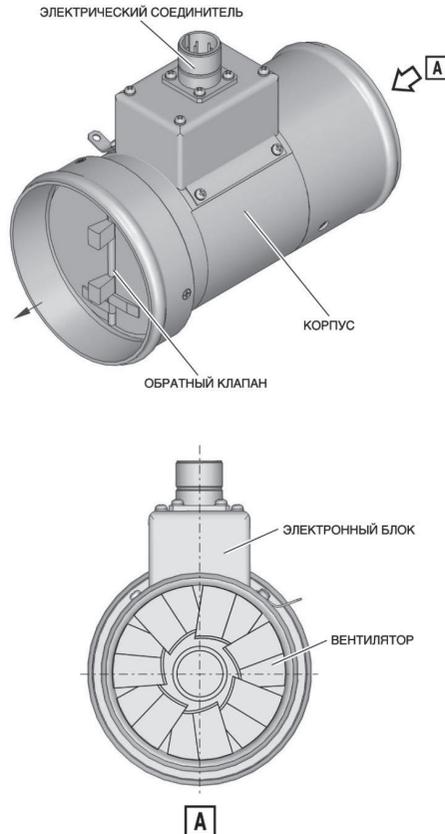


Рис. 3.1. Вытяжной вентилятор переднего приборного отсека.

передней части обтекателя крыло-фюзеляж (отсек Ф2) по левому и правому бортам.

УОВ понижает температуру воздуха, поступающего от двигателей, ВСУ или наземного кондиционера.

Основными компонентами УОВ являются:

- двойной теплообменник;
- турбохолодильник;
- заслонка регулирования температуры;
- влагоотделитель;
- подогреватель-конденсатор;
- перепускной коллектор.

Регулирование температуры воздуха осуществляется с помощью УОВ. Температура воздуха, поступающего в УОВ из системы отбора воздуха, понижается в турбине турбохолодильника (рис. 3.2).

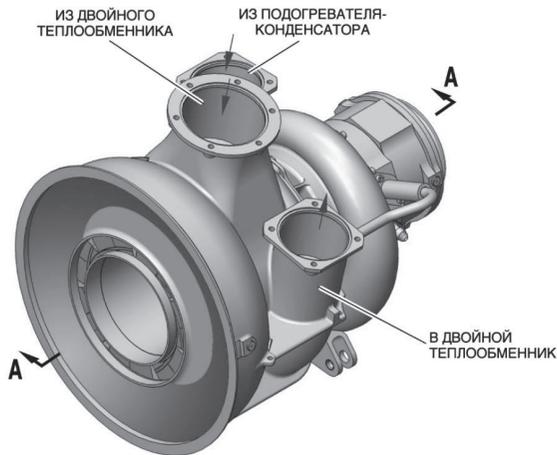


Рис. 3.2. Турбохолодильник

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 воздуховод 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. 3.3) 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.

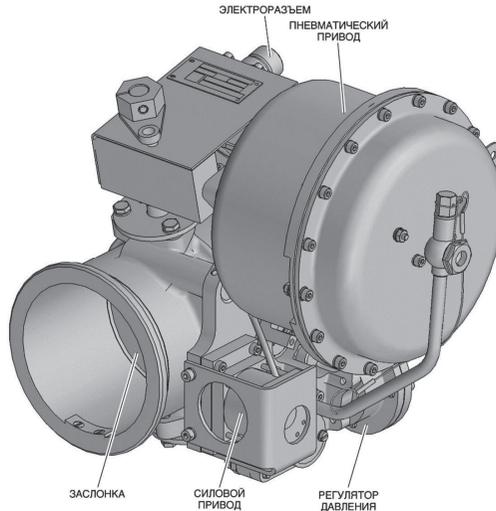


Рис. 3.3. Расположение заслонки регулирования подачи воздуха

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.

Задание

3.1.1. Определение параметра потока отказов на базе статистических данных наработки до отказа изделий СКВ

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

Последовательность определения параметра потока отказа ω :

- 1) Подготовка исходных данных для расчетов, приведенных в таблице П.1.2.
- 2) Разбиение вариационного ряда наработок до отказа на равные интервалы. Приближенная оценка ширины интервала может быть сделана по формуле

$$\Delta t = \frac{t_{max} - t_{min}}{1 + 3,2 \lg N} \quad (3.1)$$

где t_{max} , t_{min} - максимальное и минимальное значение наработки до отказа;

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 Δn_i .

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

$$\omega_i^*(t) = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t_i}, \quad (3.2)$$

где: Δn_i – число отказавших изделий в i -м интервале,
 N – объем выборки,
 Δt – интервал наработки изделий.

- 5) Сведение результатов расчета $\omega_i^*(t)$ в таблицу по форме (табл. 3.1).

Таблица 3.1

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

Основные параметры	Интервалы $t_i - t_{i+1}$				
	1	2	3	...	L
	$t_0 - t_1$	$t_1 - t_2$	$t_2 - t_3$...	$t_{L-1} - t_L$
$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$	Δt_1	Δt_2	Δt_3	...	Δt_L
N	N	N	N	...	N
Δn_i	Δn_1	Δn_2	Δn_3	...	Δn_L
$\omega_i^*(t)$	$\omega_1^*(t)$	$\omega_2^*(t)$	$\omega_3^*(t)$...	$\omega_L^*(t)$

- 6) Построение гистограммы распределения $\omega_i^*(t)$.
 7) Анализ характера изменения параметра потока отказов: $\omega^*(t) = \text{const}$ или $\omega^*(t) \neq \text{const}$.
 8) При допущении $\omega^*(t) = \text{const}$: расчет среднего значения параметра потока отказов ω_{cp}^* по формуле:

$$\omega_{\text{cp}}^* = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \omega_i^*(t), \quad (3.3)$$

где L – количество интервалов гистограммы.

- 9) Выводы по задаче.

3.1.2. Определение параметра потока отказов на основе эксплуатационных наблюдений для парка ВС

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.

Исходные данные: № варианта; заданное изделие СКВ; число отказов изделия за период наблюдений (n); объем парка ВС ($N_{\text{с}}$); количество изделий на ВС ($n_{\text{и}}$); средний суточный налет на одно ВС ($H_{\text{д}}$); период наблюдений ($T_{\text{п}}$).

Последовательность определения параметра потока отказов ω :

- 1) Подготовка исходных данных для расчетов, приведенных в таблице П.1.2.
- 2) Определение налета парка ВС за период наблюдений:
Налет парка ВС в часах:

$$T = T_{\text{п}} H_{\text{д}} N_{\text{с}} * 365, \quad (3.4)$$

где

$T_{\text{п}}$ – период наблюдений, лет;

$H_{\text{д}}$ – средний суточный налет на одно ВС, ч;

$N_{\text{с}}$ – объем парка ВС.

- 3) Среднее значение параметра потока отказов рассчитывается как отношение числа отказов за период наблюдения к суммарной наработке изделий за тот же период для парка ВС:

$$\omega_{\text{ср}}^* = \frac{N}{T n_{\text{и}}} \quad (3.5)$$

где N – число отказов изделия на парке ВС за период наблюдений;

T – налет парка ВС за период наблюдений, ч;

$n_{\text{и}}$ – количество изделий на одном ВС.

Количество отказов N определяется по числу значений наработок на отказ в таблице П.1.2.

- 4) Выводы по задаче.

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте функции, которые выполняют рассматриваемые изделия системы СКВ самолета SSJ-100.
2. Что представляют собой параметры потока отказов и наработки на отказ восстанавливаемого изделия?
3. Как выполнить оценку ширины интервала при разбиении вариационного ряда наработок до отказа на интервалы?
4. Как рассчитать среднее значение параметра потока отказов при условии его постоянства во времени?
5. Как определить налет парка ВС в часах за выбранный период?
6. Как рассчитать параметр потока отказов по эксплуатационным данным парка ВС?
7. Какое влияние оказывает количество однотипных изделий на ВС на величину параметра потока отказов?

3.2. Практическое занятие №2

Тема: Определение потребного количества запасных частей на установленный период поддержания запаса на основе допустимой вероятности достаточности запасных частей для замены отказавших изделий.

Цель: Овладение навыками и знаниями по определению потребного количества запасных частей на основе заданной допустимой вероятности превышения количества отказов.

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 [2].

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 определения количества запасных частей r для замены отказавших изделий используется распределение Пуассона:

$$P_{r \text{ доп}} = \sum_{n=0}^r \frac{(\omega t)^n}{n!} e^{-\omega t}, \quad (3.6)$$

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

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

ω - параметр потока отказов;

t - период эксплуатации в часах наработки.

Задание

Исходные данные: № варианта; заданное изделие СКВ; объем парка ВС (N_c); количество изделий на ВС (n_n); установленный срок для поддержания запаса изделий (T_p), допустимая вероятность того, что число отказов изделия превысит их запас ($P_{\text{доп}}$), средний суточный налет на одно ВС (H_d).

Последовательность решения:

1) Определение характеристик распределения Пуассона.

Значение t рассчитывается по формуле:

$$t = T_p H_d N_c n_n, \quad (3.7)$$

где

T_p - установленный срок для поддержания запаса изделий;

H_d – средний суточный налет на одно ВС, ч;

N_c – объем парка ВС;

n_n – количество изделий на одном ВС;

2) Определение параметров $P_{r \text{ доп}}$ и ω :

$$P_{r \text{ доп}} = 1 - P_{\text{доп}},$$

$$\omega = \omega_{\text{ср}}^*.$$

Значения T_p и $P_{\text{доп}}$ выбираются из таблицы П.1.1 в соответствии с номером варианта КР.

3) Определение потребного количества запасных изделий n_{zi} в течение установленного срока T_p для параметра потока отказов $\omega = \omega_{\text{ср}}^*$, определенного по формуле (3.3).

Расчет и суммирование точечных значений P_{ri} :

$$P_{ri} = \frac{(\omega t)^{n_i}}{n_i!} e^{-\omega t}$$

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: $\sum_{n=1}^k P_{rn} \geq P_{r \text{ доп}}$.

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

4) Определение потребного количества запасных изделий n_{zi} в течение установленного срока T_p для параметра потока отказов $\omega = \omega_{\text{ср}}^*$, определенного по формуле (3.5).

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

5) Выводы по задаче.

Вопросы для самопроверки

1. В чем суть задачи определения потребного количества запчастей?
2. Охарактеризуйте параметр ωt в распределении Пуассона.
3. Как влияет значение параметра потока отказов на потребное количество запчастей?
4. Как влияет установленный срок поддержания запаса на потребное количество запчастей?
5. Как найти точечное значение вероятности события в распределении Пуассона?
6. Поясните смысл методики итерационного расчета достаточного количества запчастей.

3.3. Практическое занятие №3

Тема: Определение потребного количества запасных частей на установленный период поддержания запаса на основе оценки вероятных потерь от простоя ВС

Цель: Овладение навыками и знаниями по определению потребного количества запасных частей на основе оценки вероятных потерь от простоя ВС с использованием надстройки «Поиск решения» программы Excel.

В предыдущей задаче в качестве исходной информации для расчета потребного количества запчастей использовалась допустимая вероятность возникновения события $P_{\text{доп}}$, когда количество отказов изделия может превысить имеющийся запас для его замены. Величина $P_{r \text{ доп}} = 1 - P_{\text{доп}}$, являющаяся результатом расчета (3.6), устанавливается на основе практического опыта эксплуатации парка ВС.

В данной задаче $P_{r \text{ доп}}$ будет определяться исходя из оценки стоимости складского запаса изделия и возможного убытка авиакомпании в случае недостаточности складского запаса.

Убыток авиакомпании V от простоя в ожидании запчастей при 100%-ной вероятности наступления события нехватки запчастей рассчитывается по формуле:

$$V = v * T_p * 24, \quad (3.8)$$

где

T_p – установленный срок для поддержания запаса изделий, дней;

v – стоимость 1 ч простоя в ожидании запчастей, руб.

Количество запчастей n с учетом вероятности $P_{\text{доп}}$ может быть рассчитано по формуле:

$$n = P_{\text{доп}} V / c_i, \quad (3.9)$$

где c_i – стоимость i – й запчасти, руб.

Согласно уравнению Пуассона $P_{r \text{ доп}} = \sum_{n=0}^r \frac{(\omega t)^n}{n!} e^{-\omega t}$.

Тогда

$$n = (1 - \sum_{n=0}^r \frac{(\omega t)^n}{n!} e^{-\omega t}) V / c_i \quad (3.10)$$

Потребное количество запчастей $n_{zi} = r$ может быть найдено путем решения нелинейного уравнения с использованием надстройки «Поиск решения» программы Excel.

Задание

Исходные данные: № варианта; заданное изделие СКВ; объем парка ВС (N_c); количество изделий на ВС (n_n); установленный срок для поддержания запаса изделий (T_p), средний суточный налет на одно ВС (H_d), стоимость 1 ч простоя в ожидании запчастей (v), стоимость запчасти (c_i).

Последовательность решения:

1) Настройка программы Excel

1.1. Выбрать вкладку **Файл**/Параметры/Надстройки.

1.2. В диалоговом окне «Управление надстройками Microsoft Office» перейти в «Надстройки Excel» (рис. 3.4.).

1.3. В диалоговом окне «Надстройки» поставить отметку в строке «Поиск решения» и подтвердить выбор (рис. 3.5).

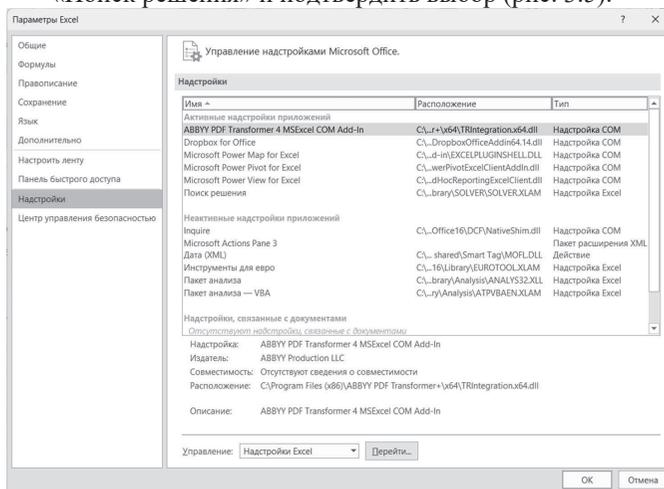


Рис. 3.4. Управление надстройками Microsoft Office.

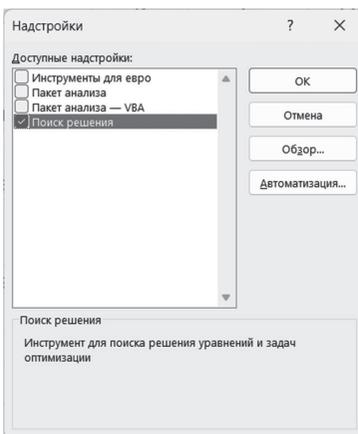


Рис. 3.5. Надстройки Excel

2) Ввод исходных данных

2.1. На листе Excel в ячейках A1-A8, B1-B8 заполнить наименования и условные обозначения всех характеристик, являющихся исходной информацией для расчета.

2.2. В ячейки C1-C8 внести количественные значения характеристик в соответствии с вариантом работы. Значение стоимости 1 часа простоя в ожидании запчастей (ячейка C4) установить в размере 200000 руб.

3) Расчет параметров уравнения (3.10)

- 3.1. В ячейках E1-E6, F1-F6 разместить наименования и условные обозначения параметров V , ω , t , ωt , вероятностей $P_{r \text{ доп}}$ и $P_{\text{доп}}$.
 - 3.2. Значения характеристик в ячейках G1-G4 рассчитать по формулам (3.4), (3.5), (3.7) и (3.8).
 - 3.3. В ячейки A10, B10 введите наименование и условное обозначение параметра уравнения (3.9) n ; в ячейки E10, F10 – то же для искомого параметра n_{zi} .
 - 3.4. В ячейки A11, B11 разместите наименование и условное обозначение абсолютного отклонения Δn между значениями n_{zi} и n , которое нужно рассчитать в ячейке C11, установив формулу $=\text{ABS}(G10-C10)$.
- 4) Расчет вероятностей $P_{r \text{ доп}}$ и $P_{\text{доп}}$.
- 4.1. Рассчитать вероятность $P_{r \text{ доп}}$ с использованием распределения Пуассона:
Выделить ячейку G5 и нажать на значок f_x в командной строке. В появившемся окне в строке «X» установить ячейку G10, в строке «Среднее» - ячейку G4, в строке «Интегральная» ввести «ИСТИНА» (рис. 3.6).
 - 4.2. В ячейке G6 рассчитать значение $P_{\text{доп}}$.

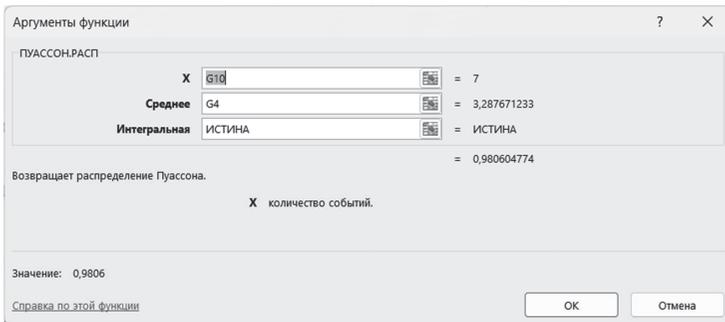


Рис. 3.6. Меню «Аргументы функции распределения Пуассона».

- 5) Определение необходимого количества запчастей с использованием надстройки «Поиск решения».
- 5.1. Ввести в ячейку C10 формулу (4).
 - 5.2. Выбрать вкладку **Данные** / **Поиск решения**
 - 5.3. В открывшемся окне «Параметры поиска решения» (рис. 3.7):
 - В строке «Оптимизировать целевую функцию» выбрать ячейку C11;
 - Установить отметку «Минимум»;
 - Изменяя ячейки переменных: выбрать ячейку G10;
 - Добавить в поле «В соответствии с ограничениями»: $G10 = \text{целое}$;

- Выбрать метод решения: «Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ».

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию: SCS11

До: Максимум Минимум Значения: 0

Изменяя ячейки переменных: SG\$10

В соответствии с ограничениями:

SG\$10 = целое

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Метод решения
Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Справка Найти решение Закрыть

Рис. 3.7. Окно «Параметры поиска решения».

5.4. Найти решение и сохранить результаты (рис. 3.8).

Результаты поиска решения

Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Сохранить найденное решение
 Восстановить исходные значения

Вернуться в диалоговое окно параметров поиска решения

Отчеты
Результаты

Отчеты со структурами

ОК Отмена Сохранить сценарий..

Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.
Если используется модуль ОПГ, то найдено по крайней мере локально оптимальное решение. Если используется модуль поиска решений линейных задач симплекс-методом, то найдено глобально оптимальное решение.

Рис. 3.8. Сохранение результатов поиска решения

Вариант решения задачи представлен на скриншоте (рис. 3.9).

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Парк ВС	N_c	15		Убыток от простоя (100% вер.)	V	192000000	
2	Кол-во изделий на ВС	$n_{ц}$	2			t	6600	
3	Средний суточный налет на ВС, ч	H_d	5,5		Параметры уравнения Пуассона	ω	0,000498	
4	Стоимость 1 ч простоя, руб.	V	200000			ωt	3,288	
5	Срок поддержания запаса, дней	T_p	40		Доп. вер-сть достаточности	$P_{г доп}$	0,9806	
6	Стоимость запчаст. руб.	C_i	500000		Доп. вер-сть недостаточности	$P_{доп}$	0,0194	
7	Период наблюдений, лет	T_n	1					
8	Кол-во отказов изделия за период наблюдений	N	30					
9								
10	Кол-во запчастей	n	7,447767		Потребное кол-во запчастей	n_{zi}		7
11	Отклонение	Δn	0,447767					
12								
13								
14								
15								

Рис. 3.9. Пример решения задачи

б) Анализ зависимости потребного количества запчастей от параметра потока отказов

6.1. При помощи надстройки «Поиск решения» провести расчеты потребного количества запчастей для значений ω в диапазоне $5 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-4}$ с шагом $5 \cdot 10^{-5}$.

6.2. Составить таблицу значений ω ; n_{zi} и построить график зависимости n_{zi} от ω .

7) Выводы по задаче.

Вопросы для самопроверки

1. В чем суть методики определения потребного количества запасных частей на основе оценки вероятных потерь от простоя ВС?
2. Как рассчитать убыток авиакомпания от простоя в ожидании запчастей при 100%-ной вероятности наступления события нехватки запчастей?
3. Как рассчитать вероятность того, что число отказов изделия превысит их запас с использованием функции «Распределение Пуассона» в программе Excel?
4. Как интерпретировать понятие «среднее» в меню «Аргументы функции распределения Пуассона»?
5. Какой алгоритм определения потребного количества запчастей с использованием надстройки «Поиск решения»?
6. С какой целью устанавливается ограничение искомого значения как целого числа?
7. Поясните зависимость потребного количества запчастей от параметра потока отказов.

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	$P_{доп}$ %
0	1	30	2	14	3	30	2
1	1	35	3	15	3	35	3
2	1	40	4	16	3	40	4
3	1	45	5	17	3	45	5
4	1	50	6	18	4	50	6
5	1	55	7	19	4	55	7
6	2	60	8	20	4	60	8
7	2	30	2	21	4	30	2
8	2	35	3	22	4	35	3
9	2	40	4	23	5	40	4
10	2	45	5	24	5	45	5
11	2	50	6	25	5	50	6
12	3	55	7	26	5	55	7
13	3	60	8	27	5	60	8

Таблица П.1.2

Исходные данные по отказам изделий системы СКВ

№	Наименование изделия	N_c	n_u	H_d ч	T_p лет	c_i руб.	Наработка до отказа t_i , ч
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Вытяжной вентилятор переднего приборного отсека	18	2	5,5	2	480000	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	36	1	6,5	1	300000	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

Продолжение табл. П.1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
3	Вентилятор нагнетания воздуха в блок авионики	9	4	5,5	2	220000	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
4	Турбохолодильник	18	2	5,5	3	2500000	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	730000	1694, 1717, 2152, 2235, 2729, 4723, 4944, 5553, 5625, 5719, 5739, 5933, 7080, 7230, 7801, 7859, 9588, 9894, 10028, 11888, 12259, 12692, 14521, 16680

ЛИТЕРАТУРА

1. Ицкович А.А., Файнбург И.А. Основы теории надежности. Ч.1. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2013.
2. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021.
3. ГОСТР 27.013–2019. (НАДЕЖНОСТЬ В ТЕХНИКЕ. Методы оценки показателей безотказности. – М.: Стандартиформ, 2019.
4. Руководство по технической эксплуатации самолёта RRJ-95B. М7.92.0АММ.000.000.RU. Ревизия В. – ЗАО «ГСС», 2010.
5. Сайт «www.uacrussia.ru» (<https://www.uacrussia.ru/ru/>).

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения	3
2. Характеристика практических занятий	3
3. Методические указания по выполнению практических занятий.....	3
3.1. Практическое занятие №1	3
3.1.1. Определение параметра потока отказов на базе статистических данных наработки до отказа изделий СКВ	10
3.1.2. Определение параметра потока отказов на основе эксплуатационных наблюдений для парка ВС.....	11
<i>Вопросы для самопроверки</i>	12
3.2. Практическое занятие №2	12
<i>Вопросы для самопроверки</i>	14
3.3. Практическое занятие №3	14
<i>Вопросы для самопроверки</i>	19
Приложение 1	20
ЛИТЕРАТУРА	22
СОДЕРЖАНИЕ	23

Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург, Ю.И. Пичкин

Управление системами и процессами
технической эксплуатации летательных аппаратов

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Подписано в печать 17.11.2025 г.
Формат 60x84/16 Печ. л. 1,5 Усл. печ. л. 1,395
Заказ № 2019/0929-УМП05 Тираж 25 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