

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра ракетных двигателей

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЯ И ЕГО СИСТЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине
«Испытания и надежность жидкостных ракетных двигателей» для
студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и
ракетных двигателей» очной формы обучения



Воронеж 2019

УДК 621.45.015

Составители:

док. техн. наук Демьяненко Ю.В.

док. техн. наук Дроздов И.Г.

канд. техн. наук Кружаев К.В.

Методические указания к выполнению практических и самостоятельных работ по дисциплине «Испытания и надежность жидкостных ракетных двигателей» для студентов специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» очной формы обучения [Электронный ресурс]: Электрон. текстовые и граф. данные (240 Кбайт)/ / ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"; сост. А.А. Афанасьев, Ю.В. Демьяненко, К.В. Кружаев, Д.П. Шматов. 2019 г. — 36 с. Электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

Методические указания содержат описание практических и самостоятельных работ, выполняемых студентами 5 курса при изучении дисциплины "Испытания и надежность жидкостных ракетных двигателей". Приводятся постановка задачи и исходные данные, методика расчетов надежности, а также справочные таблицы, используемые при обработке статистических данных и расчетах надежности.

УДК 629.7. 017(07)

© ФГБОУ ВО "Воронежский
государственный технический
университет", 2019

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ надежности ракетных двигателей (РД) представляет собой сложную техническую задачу, необходимость решения которой характерна для всех стадий создания и эксплуатации двигателя. Ввиду ограниченного количества проводимых испытаний возникает необходимость наиболее полного использования при оценке надежности всех видов испытаний, производимых в процессе отработки двигателя и его составных систем.

Настоящие методические указания характеризуют специфику анализа надежности РД, при этом в качестве показателя надежности двигателя и его составных систем используется вероятность безотказной работы (ВБР).

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ

При расчетах обеспечить получение нижних доверительных границ ВБР отдельных систем и двигателя в целом при уровне доверительной вероятности $\gamma = 0,9$ и $\gamma = 0,95$ (указаны в заданном варианте курсовой работы).

При расчетах надежности двигатель представить как сложный объект, включающий три независимые системы, характеризующие следующие свойства двигателя:

- безотказность на запуске $P_{\text{зап}}$;
- безотказность на стационарном режиме $P_{\text{реж}}$, характеризующуюся созданием тяги установленного уровня $R_{\text{тр}}$;
- безотказность работы двигателя на останове $P_{\text{ост}}$.

При расчетах ВБР на запуске и останове использовать расчетную схему «успех – отказ».

Вычисление нижней доверительной границы ВБР на стационарном режиме провести с использованием расчетной схемы «параметр – заданное поле допуска». Это позволит получить более точное значение ВБР, однако потребует предварительно найти или обосновать закон распределения параметра.

При расчетах надежности использовать следующую исходную информацию:

- количество двигателей, прошедших безотказные испытания по проверке запуска $N_{\text{зап}} = 40$ (для всех вариантов выполнения курсовой работы);
- количество двигателей, прошедших безотказные выключения $N_{\text{ост}} = 35$ (для всех вариантов выполнения работы);
- безотказность двигателя на стационарном режиме подтверждена безотказными испытаниями $N_{\text{реж}} = 40$ двигателей с проведенными измерениями уровня тяги, приведенными в таблице 1 для двух базовых вариантов выполнения работы (для двух типов двигателей тягой ~ 3 и ~ 82 т).

Таблица 1

Измеренные значения тяги двигателя
для двух базовых вариантов статистики

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [Г]		Номер испытания	Тяга двигателя, R, [Г]	
	1-й вариант	2-й вариант		1-й вариант	2-й вариант
1	3,215	82,20	21	3,138	81,67
2	3,144	82,60	22	3,171	81,90
3	3,219	80,91	23	3,181	82,22
4	3,063	82,69	24	3,154	82,10
5	3,190	82,36	25	3,209	81,82
6	3,129	82,53	26	3,222	82,27
7	3,176	82,09	27	3,112	80,63
8	3,220	81,54	28	3,253	82,19
9	3,260	81,54	29	3,169	81,44
10	3,091	81,20	30	3,280	81,12
11	3,214	81,69	31	3,269	82,91
12	3,197	81,71	32	3,167	82,31
13	3,231	81,38	33	3,227	81,97
14	3,291	81,93	34	3,120	82,14
15	3,182	82,24	35	3,347	82,15
16	3,210	83,47	36	3,245	82,45
17	3,236	81,76	37	3,173	81,73
18	3,224	81,29	38	3, 188	83,18
19	3,193	81,87	39	3,318	81,88
20	3,193	82,80	40	3,201	82,01

В качестве допустимых интервалов изменения параметра
принять $[R_{\min} \div R_{\max}]$:

1-й вариант – [3,050–3,350] Г;

2-й вариант – [80,50–83,50] Г.

2. ОЦЕНКА БЕЗОТКАЗНОСТИ ПО СХЕМЕ «УСПЕХ – ОТКАЗ»

Вычисление нижних доверительных границ ВБР на запуске и останове производится по общей формуле (1)

$$P_{ни} = (1 - \gamma)^{1/N_i}. \quad (1)$$

Применение этой формулы возможно при обязательном условии отсутствия зачетных отказов, то есть отказов, причины которых еще не устранены и могут повториться.

Для заданных значений $N_{зап} = 40$, $N_{ост} = 35$ значения нижних доверительных границ безотказности двигателя на запуске и останове, вычисленные по формуле (1), составляют:

при $\gamma = 0,9$:

$$P_{зап.н} = (1 - 0,9)^{1/40} = 0,944,$$

$$P_{ост.н} = (1 - 0,9)^{1/35} = 0,936;$$

при $\gamma = 0,95$:

$$P_{зап.н} = (1 - 0,95)^{1/40} = 0,928,$$

$$P_{ост.н} = (1 - 0,95)^{1/35} = 0,918.$$

Заметим, что задание более высокой доверительной вероятности приводит к более низким значениям оценок безотказности при одинаковом количестве располагаемых зачетных испытаний.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОЦЕНКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПО СХЕМЕ «ПАРАМЕТР – ЗАДАННОЕ ПОЛЕ ДОПУСКА»

Чаще всего на практике принимают допущение о нормальном законе распределения параметра.

Для проверки этого допущения построим гистограмму измеренных значений тяги, для чего воспользуемся имеющейся в распоряжении стандартной программой (в составе программного обеспечения Windows или Excel). Более удобно воспользоваться специализированной программой статистической обработки

экспериментальных данных STATISTICA, предложенной фирмой STAT SOFT. Выбор способа построения гистограммы предоставлен студенту.

Соответствующие графики, иллюстрирующие удовлетворительное соответствие измеренных значений тяги нормальному закону распределения, представлены на рис. 1 и рис. 2. Рис. 1 построен для значений тяги, приведенных в таблице 1 для первого варианта работы, рис. 2 – для второго варианта.

Построение гистограммы предусматривает разделение всего диапазона измеренных значений параметра на 6–8 интервалов и подсчет количества численных значений параметра, попадающих в каждый конкретный интервал. Полученные гистограммы для двух вариантов статистики представлены на рис. 1 и рис. 2 с наложенными на них функциями теоретической плотности нормального распределения.

В качестве параметров теоретического нормального закона распределения принимаются величины:

- среднее измеренное значение параметра:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i; \quad (2)$$

- стандартное отклонение параметра, вычисленное по результатам измерений:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}. \quad (3)$$

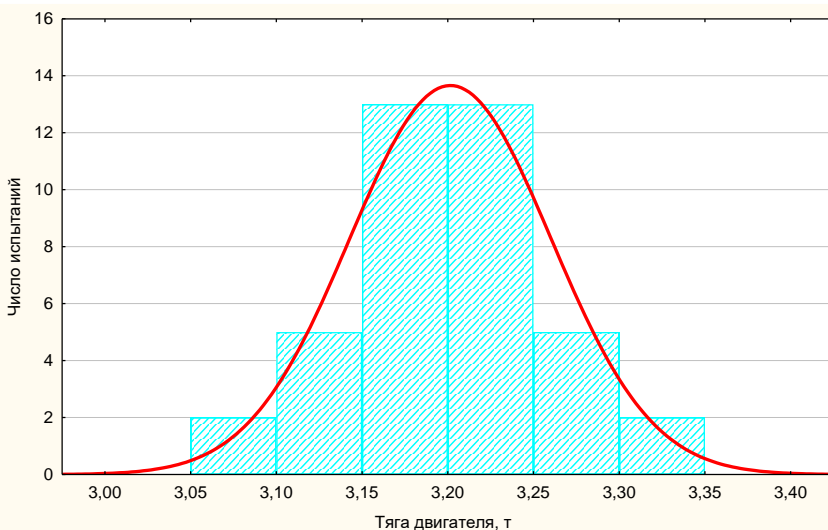


Рис. 1. Гистограмма измеренных значений тяги для варианта 1 с наложенным нормальным законом распределения

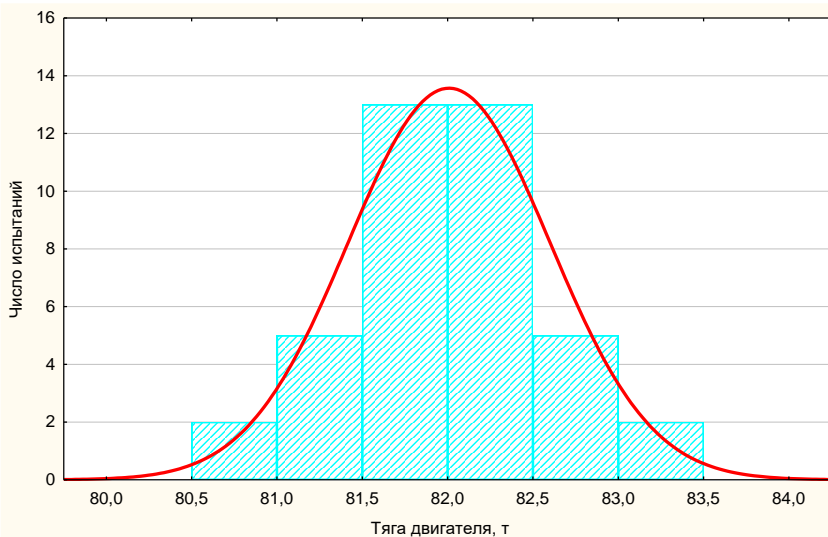


Рис. 2. Гистограмма измеренных значений тяги для варианта 2 с наложенным нормальным законом распределения

Для проверки правильности допущения о нормальном законе распределения тяги используем наиболее употребительный статистический критерий χ^2 (критерий Пирсона), по которому за меру расхождения между статистическим (экспериментально полученным) и теоретическим законами распределения принимается величина

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(m_i - NP_i)^2}{NP_i}. \quad (4)$$

Здесь l – число разрядов (интервалов) на которые разбит весь диапазон возможных значений параметра;

N – объем проведенных измерений;

m_i – количество измерений, попадающих в i -й разряд (интервал);

P_i – вероятность попадания параметра в i -й интервал, вычисленная для теоретического закона распределения.

Для вычисления значения P_i :

- для каждой границы i -го интервала подсчитывают значения:

$$U_{in} = \frac{R_{in} - \bar{R}}{S}; \quad (5)$$

$$U_{iv} = \frac{R_{iv} - \bar{R}}{S}. \quad (6)$$

При этом учитывают, что значения U_{iv} для i -го интервала и $U_{(i+1)}$ для $(i+1)$ -го интервала совпадают;

- находят теоретические вероятности попадания параметра в каждый i -й интервал, используя выражение:

$$P_i = \Phi \left[\frac{R_{vi} - \bar{R}}{S} \right] - \Phi \left[\frac{R_{ii} - \bar{R}}{S} \right], \quad (7)$$

в котором $\Phi(U_{iv})$ и $\Phi(U_{in})$ представляют собой значения нормирован-

ной функции нормального распределения, определяемые по таблицы П. 1.1 приложения в зависимости от вычисленных значений $U_{ив}$ и $U_{ин}$. С учетом симметрии рассматриваемой функции относительно начала координат таблица составлена только для положительных значений аргумента U , и в связи с этим для отрицательных аргументов необходимо пользоваться формулой:

$$F(-U) = 1 - F(U). \quad (8)$$

Теоретическое количество измерений параметра, попадающих в каждый i -й интервал, определяют по формуле:

$$m_{i\text{теор}} = NP_i. \quad (9)$$

При этом значения $m_{i\text{теор}}$, являющиеся действительными числами, определяются с точностью до одного знака после запятой. Расхождение между эмпирическим частотами m_i попадания в каждый i -й интервал и теоретическими NP_i частотами попадания в те же интервалы (в предположении нормального распределения) может оказаться случайным (незначимым), что объясняется малым числом проведенных измерений, способом их группирования или другими причинами.

Значение критерия χ^2 находят суммированием по формуле (4).

Вычисление теоретических и экспериментальных частот вероятностей попадания параметра в каждый i -й интервал целесообразно представить таблицей 2, полученной для варианта 1 исходных данных.

Таблица 2

Границы интервалов		Число попаданий в интервал	Нормированная нижняя граница интервала $U_H = (R_H - \bar{R})/S$	Нормированная верхняя граница интервала $U_B = (R_B - \bar{R})/S$	Вероятность попадания в интервал P_i	Теоретическое число попаданий в интервал $m_{теор} = N P_i$	Подсчет критерия соответствия χ^2
R_H	R_B						
3,05	3,10	2	-2,59	-1,72	0,037	1,5	0,167
3,10	3,15	5	-1,72	-0,86	0,152	6,1	0,192
3,15	3,20	13	-0,86	0,00	0,306	12,2	0,049
3,20	3,25	13	0,00	0,86	0,306	12,2	0,049
3,25	3,30	5	0,86	1,72	0,152	6,1	0,192
3,30	3,35	2	1,72	2,59	0,037	1,5	0,167
3,35	3,40	0	2,59	3,45	0,005	0,2	0,183
Сумма		40			Сумма	39,8	0,998

Вероятность попадания в каждый i -й интервал (P_i) определяется по формуле:

$$P_i = \Phi \left[\frac{R_{ai} - \bar{R}}{S} \right] - \Phi \left[\frac{R_{bi} - \bar{R}}{S} \right]. \quad (10)$$

Значение критерия χ^2 , полученное суммированием по всем интервалам и составляющее 0,998, необходимо сравнить с критическим значением, которое в нашем случае может быть принято равным 20–30. Так как полученное значение существенно меньше критического, принятое допущение о нормальном законе распределения тяги можно считать подтвержденным.

Оценку ВБР по параметру тяги производить по формуле:

$$P_{реж} = \Phi \left[\frac{R_{\max} - \bar{R}}{K_{\gamma} S} \right] - \Phi \left[\frac{R_{\min} - \bar{R}}{K_{\gamma} S} \right], \quad (11)$$

где в соответствии с исходными данными для 1 варианта

$R_{\max} = 3,350$ т – верхнее допустимое значение тяги,

$R_{\min} = 3,050$ т – нижнее допустимое значение тяги;

для 2 варианта:

$R_{\max} = 83,50$ т, $R_{\min} = 80,50$ т.

В приведенной формуле коэффициент K_{γ} , учитывающий ограниченность статистики измерений, принять равным 1,19 для $\gamma = 0,9$ и 1,24 – для $\gamma = 0,95$.

С учетом ранее вычисленных значений $\bar{R} = 3,2$ и $S = 0,058$ (для 1 варианта) получаем значение $P_{реж} = 0,990$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ НИЖНЕЙ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ БЕЗОТКАЗНОСТИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ В ЦЕЛОМ

Таким образом, ВБР отдельных систем двигателя составит:

$$P_{зап.н} = 0,944; P_{ост.н} = 0,936; P_{реж.н} = 0,990,$$

а надежность двигателя в целом будет оцениваться минимальной нижней доверительной границей, достигнутой для отдельных систем. Эту i -ю систему следует считать лимитирующей надежностью двигателя. В нашем случае это минимальное значение получено для безотказности на останове. Следовательно, именно это значение характеризует достигнутую безотказность двигателя.

$$P_{дв.н} = 0,936.$$

В связи с этим дальнейшее повышение безотказности двигателя

$R_{дв.н}$ следует обеспечивать мероприятиями, направленными на повышение безотказности лимитирующей системы – на увеличение числа безотказных испытаний, характеризующих останов двигателя.

Для этого не обязательно проведение длительных испытаний двигателей на основном режиме тяги. Прежде всего необходимо проведение коротких испытаний двигателей по проверке останова и запуска двигателя. Для подтверждения заданного уровня тяги двигателя с достаточно высокой нижней доверительной границей вероятности попадания в заданный допуск $R_n = 0,99$ потребовалось всего 40 испытаний с замером тяги. Это объясняется используемой для расчета надежности более совершенной расчетной схемы «параметр – поле допуска», не требующей набора большой статистики испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гмурман В.С. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие для вузов / 7-е изд. М.: «Высшая школа», 1999 г. – 479 с.
2. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. И. Коломенцев [и др.] ; Сиб. гос. аэрокосм. ун-т ; Моск. авиац. ин-т. – Красноярск, 2006 г. – 336 с.
3. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики (для технических приложений). М.: Наука, 1969 г. – 512 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения нормированной функции нормального распределения

$$F(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-t^2/2} dt$$

Таблица П. 1.1

U	Значения сотых долей U									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,5000	0,50399	0,50798	0,51197	0,51595	0,51994	0,52392	0,52790	0,53188	0,53586
0,1	0,5398	0,54380	0,54776	0,55172	0,55567	0,55962	0,56356	0,56749	0,57142	0,57535
0,2	0,5793	0,58317	0,58706	0,59095	0,59483	0,59871	0,60257	0,60642	0,61026	0,61409
0,3	0,6179	0,62172	0,62552	0,62930	0,63307	0,63683	0,64058	0,64431	0,64803	0,65173
0,4	0,6554	0,65910	0,66276	0,66640	0,67003	0,67364	0,67724	0,68082	0,68439	0,68793
0,5	0,6915	0,69497	0,69847	0,70194	0,70540	0,70884	0,71226	0,71566	0,71904	0,72240
0,6	0,7258	0,72907	0,73237	0,73565	0,73891	0,74215	0,74537	0,74857	0,75175	0,75490
0,7	0,7580	0,76115	0,76424	0,76730	0,77035	0,77337	0,77637	0,77935	0,78230	0,78524
0,8	0,7881	0,79103	0,79389	0,79673	0,79955	0,80234	0,80511	0,80785	0,81057	0,81327
0,9	0,8159	0,81859	0,82121	0,82381	0,82639	0,82894	0,83147	0,83398	0,83646	0,83891
1,0	0,8413	0,84375	0,84614	0,84850	0,85083	0,85314	0,85543	0,85769	0,85993	0,86214
1,1	0,8643	0,86650	0,86864	0,87076	0,87286	0,87493	0,87698	0,87900	0,88100	0,88298
1,2	0,8849	0,88686	0,88877	0,89065	0,89251	0,89435	0,89617	0,89796	0,89973	0,90147
1,3	0,9032	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91308	0,91466	0,91621	0,91774
1,4	0,9192	0,92073	0,92220	0,92364	0,92507	0,92647	0,92786	0,92922	0,93056	0,93189
1,5	0,9332	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408
1,6	0,9452	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95053	0,95154	0,95254	0,95352	0,95449
1,7	0,9554	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327
1,8	0,9641	0,96485	0,96562	0,96638	0,96712	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062
1,9	0,9713	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670
2,0	0,9773	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169
2,1	0,9821	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,9846	0,98500	0,98537	0,98574
2,2	0,9861	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98899
2,3	0,9893	0,98956	0,98983	0,99010	0,99036	0,99061	0,99086	0,99111	0,99134	0,99158

U	Значения сотых долей U									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,4	0,9918	0,99202	0,99224	0,99245	0,99266	0,99286	0,99305	0,99324	0,99343	0,99361
2,5	0,9938	0,99396	0,99413	0,99430	0,99446	0,99461	0,99477	0,99492	0,99506	0,99520
2,6	0,9953	0,99547	0,99560	0,99573	0,99585	0,99598	0,99609	0,99621	0,99632	0,99643
2,7	0,9965	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	0,99702	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736
2,8	0,9974	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807
2,9	0,9981	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,99856	0,99861
3,0	0,9987	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99896	0,99900
3,1	0,9990	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929
3,2	0,9993	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950
3,3	0,9995	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965
3,4	0,9997	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976
3,5	0,9997	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983
3,6	0,9998	0,99985	0,99985	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989
3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99992
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995
3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997	0,99997

Варианты заданий

Таблица П. 2.1

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
[80,50–83,50] т		[18,050–18,350] т		[30,50–34,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,90$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	82,200	1	18,215	1	33,231
2	82,600	2	18,144	2	31,078
3	80,910	3	18,219	3	33,355
4	82,690	4	18,063	4	30,737
5	82,360	5	18,190	5	32,462
6	82,530	6	18,129	6	30,635
7	82,090	7	18,176	7	32,036
8	81,540	8	18,220	8	33,386
9	81,540	9	18,260	9	33,646
10	81,200	10	18,091	10	30,532
11	81,690	11	18,214	11	33,200
12	81,710	12	18,197	12	32,676
13	81,380	13	18,231	13	33,730
14	81,930	14	18,291	14	33,644
15	82,240	15	18,182	15	32,218
16	83,470	16	18,210	16	33,076
17	81,760	17	18,236	17	33,886
18	81,290	18	18,224	18	33,511
19	81,870	19	18,193	19	32,553
20	82,800	20	18,193	20	32,553
21	81,670	21	18,138	21	30,900
22	81,900	22	18,171	22	31,885
23	82,220	23	18,181	23	32,188
24	82,100	24	18,154	24	31,375
25	81,820	25	18,209	25	33,045

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
26	82,270	26	18,222	26	33,448
27	80,630	27	18,112	27	31,138
28	82,190	28	18,253	28	32,423
29	81,440	29	18,169	29	31,825
30	81,120	30	18,280	30	32,800
31	82,910	31	18,269	31	32,934
32	82,310	32	18,167	32	31,765
33	81,970	33	18,227	33	33,604
34	82,140	34	18,120	34	31,371
35	82,150	35	18,347	35	33,494
36	82,450	36	18,245	36	32,170
37	81,730	37	18,173	37	31,946
38	83,180	38	18,188	38	32,401
39	81,880	39	18,318	39	32,528
40	82,010	40	18,201	40	32,799

Таблица П. 2.2

Вариант 4 [13,050–13,350] т		Вариант 5 [40,50–43,50] т		Вариант 6 [50,50–53,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,9$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	13,215	1	42,231	1	52,351
2	13,144	2	41,078	2	51,198
3	13,219	3	42,355	3	52,475
4	13,063	4	40,737	4	50,857
5	13,190	5	42,462	5	52,582

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
6	13,129	6	41,635	6	51,755
7	13,176	7	42,036	7	52,156
8	13,220	8	42,386	8	52,506
9	13,260	9	41,646	9	51,766
10	13,091	10	40,532	10	50,652
11	13,214	11	42,200	11	52,320
12	13,197	12	42,676	12	52,796
13	13,231	13	41,730	13	51,850
14	13,291	14	41,644	14	51,764
15	13,182	15	42,218	15	52,338
16	13,210	16	43,076	16	53,196
17	13,236	17	41,886	17	52,006
18	13,224	18	41,511	18	51,631
19	13,193	19	41,533	19	51,653
20	13,193	20	41,533	20	51,653
21	13,138	21	41,900	21	52,020
22	13,171	22	41,885	22	52,005
23	13,181	23	42,188	23	52,308
24	13,154	24	41,375	24	51,495
25	13,209	25	42,045	25	52,165
26	13,222	26	43,448	26	53,568
27	13,112	27	42,138	27	52,258
28	13,253	28	42,423	28	52,543
29	13,169	29	41,825	29	51,945
30	13,280	30	42,800	30	52,920
31	13,269	31	41,934	31	52,054
32	13,167	32	41,765	32	51,885
33	13,227	33	41,604	33	51,724
34	13,120	34	42,710	34	52,830
35	13,347	35	42,494	35	52,614

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
36	13,245	36	42,170	36	52,290
37	13,173	37	41,946	37	52,066
38	13,188	38	42,401	38	52,521
39	13,318	39	42,528	39	52,648
40	13,201	40	41,799	40	51,919

Таблица П. 2.3

Вариант 7		Вариант 8		Вариант 9	
[8,050–8,350] т		[3,050–3,350] т		[60,50–63,50] т	
$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,90$		$\gamma = 0,9$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	8,215	1	3,215	1	62,281
2	8,144	2	3,144	2	61,128
3	8,219	3	3,219	3	62,405
4	8,063	4	3,063	4	60,787
5	8,190	5	3,190	5	62,512
6	8,129	6	3,129	6	61,685
7	8,176	7	3,176	7	62,086
8	8,220	8	3,220	8	62,436
9	8,260	9	3,260	9	61,696
10	8,091	10	3,091	10	60,582
11	8,214	11	3,214	11	62,250
12	8,197	12	3,197	12	62,726
13	8,231	13	3,231	13	61,780
14	8,291	14	3,291	14	61,694
15	8,182	15	3,182	15	62,268

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
16	8,210	16	3,210	16	63,126
17	8,236	17	3,236	17	61,936
18	8,224	18	3,224	18	61,561
19	8,193	19	3,193	19	61,583
20	8,193	20	3,193	20	61,583
21	8,138	21	3,138	21	61,950
22	8,171	22	3,171	22	61,935
23	8,181	23	3,181	23	62,238
24	8,154	24	3,154	24	61,425
25	8,209	25	3,209	25	62,095
26	8,222	26	3,222	26	63,498
27	8,112	27	3,112	27	62,188
28	8,253	28	3,253	28	62,473
29	8,169	29	3,169	29	61,875
30	8,280	30	3,280	30	62,850
31	8,269	31	3,269	31	61,984
32	8,167	32	3,167	32	61,815
33	8,227	33	3,227	33	61,654
34	8,120	34	3,120	34	62,760
35	8,347	35	3,347	35	62,544
36	8,245	36	3,245	36	62,220
37	8,173	37	3,173	37	61,996
38	8,188	38	3,188	38	62,451
39	8,318	39	3,318	39	62,578
40	8,201	40	3,201	40	61,849

Таблица П. 2.4

Вариант 10		Вариант 11		Вариант 12	
[10,50–13,50] т		[70,50–73,50] т		[20,50–23,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,9$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	12,200	1	72,281	1	22,150
2	12,600	2	71,128	2	22,550
3	10,910	3	72,405	3	20,860
4	12,690	4	70,787	4	22,640
5	12,360	5	72,512	5	22,310
6	12,530	6	71,685	6	22,480
7	12,090	7	72,086	7	22,040
8	11,540	8	72,436	8	21,490
9	11,540	9	71,696	9	21,490
10	11,200	10	70,582	10	21,150
11	11,690	11	72,250	11	21,640
12	11,710	12	72,726	12	21,660
13	11,380	13	71,780	13	21,330
14	11,930	14	71,694	14	21,880
15	12,240	15	72,268	15	22,190
16	13,470	16	73,126	16	23,420
17	11,760	17	71,936	17	21,710
18	11,290	18	71,561	18	21,240
19	11,870	19	71,583	19	21,820
20	12,800	20	71,583	20	22,750
21	11,670	21	71,950	21	21,620
22	11,900	22	71,935	22	21,850
23	12,220	23	72,238	23	22,170
24	12,100	24	71,425	24	22,050
25	11,820	25	72,095	25	21,770
26	12,270	26	73,498	26	22,220
27	10,630	27	72,188	27	20,580

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
28	12,190	28	72,473	28	22,140
29	11,440	29	71,875	29	21,390
30	11,120	30	72,850	30	21,070
31	12,910	31	71,984	31	22,860
32	12,310	32	71,815	32	22,260
33	11,970	33	71,654	33	21,920
34	12,140	34	72,760	34	22,090
35	12,150	35	72,544	35	22,100
36	12,450	36	72,220	36	22,400
37	11,730	37	71,996	37	21,680
38	13,180	38	72,451	38	23,130
39	11,880	39	72,578	39	21,830
40	12,010	40	71,849	40	21,960

Таблица П. 2.5

Вариант 13		Вариант 14		Вариант 15	
[90,50–93,50] т		[13,050–13,350] т		[70,50–73,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,9$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	92,281	1	13,215	1	72,200
2	91,128	2	13,144	2	72,600
3	92,405	3	13,219	3	70,910
4	90,787	4	13,063	4	72,690
5	92,512	5	13,190	5	72,360
6	91,685	6	13,129	6	72,530
7	92,086	7	13,176	7	72,090

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
8	92,436	8	13,220	8	71,540
9	91,696	9	13,260	9	71,540
10	90,582	10	13,091	10	71,200
11	92,250	11	13,214	11	71,690
12	92,726	12	13,197	12	71,710
13	91,780	13	13,231	13	71,380
14	91,694	14	13,291	14	71,930
15	92,268	15	13,182	15	72,240
16	93,126	16	13,210	16	73,470
17	91,936	17	13,236	17	71,760
18	91,561	18	13,224	18	71,290
19	91,583	19	13,193	19	71,870
20	91,583	20	13,193	20	72,800
21	91,950	21	13,138	21	71,670
22	91,935	22	13,171	22	71,900
23	92,238	23	13,181	23	72,220
24	91,425	24	13,154	24	72,100
25	92,095	25	13,209	25	71,820
26	93,498	26	13,222	26	72,270
27	92,188	27	13,112	27	70,630
28	92,473	28	13,253	28	72,190
29	91,875	29	13,169	29	71,440
30	92,850	30	13,280	30	71,120
31	91,984	31	13,269	31	72,910
32	91,815	32	13,167	32	72,310
33	91,654	33	13,227	33	71,970
34	92,760	34	13,120	34	72,140
35	92,544	35	13,347	35	72,150
36	92,220	36	13,245	36	72,450
37	91,996	37	13,173	37	71,730

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
38	92,451	38	13,188	38	73,180
39	92,578	39	13,318	39	71,880
40	91,849	40	13,201	40	72,010

Таблица П. 2.6

Вариант 16		Вариант 17		Вариант 18	
[60,50–63,50] т		[40,50–43,50] т		[3,050–3,350] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,95$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	62,200	1	42,231	1	3,215
2	62,600	2	41,078	2	3,144
3	60,910	3	42,355	3	3,219
4	62,690	4	40,737	4	3,063
5	62,360	5	42,462	5	3,190
6	62,530	6	41,635	6	3,129
7	62,090	7	42,036	7	3,176
8	61,540	8	42,386	8	3,220
9	61,540	9	41,646	9	3,260
10	61,200	10	40,532	10	3,091
11	61,690	11	42,200	11	3,214
12	61,710	12	42,676	12	3,197
13	61,380	13	41,730	13	3,231
14	61,930	14	41,644	14	3,291
15	62,240	15	42,218	15	3,182
16	63,470	16	43,076	16	3,210
17	61,760	17	41,886	17	3,236

Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [т]
18	61,290	18	41,511	18	3,224
19	61,870	19	41,533	19	3,193
20	62,800	20	41,533	20	3,193
21	61,670	21	41,900	21	3,138
22	61,900	22	41,885	22	3,171
23	62,220	23	42,188	23	3,181
24	62,100	24	41,375	24	3,154
25	61,820	25	42,045	25	3,209
26	62,270	26	43,448	26	3,222
27	60,630	27	42,138	27	3,112
28	62,190	28	42,423	28	3,253
29	61,440	29	41,825	29	3,169
30	61,120	30	42,800	30	3,280
31	62,910	31	41,934	31	3,269
32	62,310	32	41,765	32	3,167
33	61,970	33	41,604	33	3,227
34	62,140	34	42,710	34	3,120
35	62,150	35	42,494	35	3,347
36	62,450	36	42,170	36	3,245
37	61,730	37	41,946	37	3,173
38	63,180	38	42,401	38	3,188
39	61,880	39	42,528	39	3,318
40	62,010	40	41,799	40	3,201

Таблица П. 2.7

Вариант 19		Вариант 20		Вариант 21	
[50,50–53,50] т		[60,50–63,50] т		[10,50–13,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,95$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	52,200	1	62,281	1	12,200
2	52,600	2	61,128	2	12,600
3	50,910	3	62,405	3	10,910
4	52,690	4	60,787	4	12,690
5	52,360	5	62,512	5	12,360
6	52,530	6	61,685	6	12,530
7	52,090	7	62,086	7	12,090
8	51,540	8	62,436	8	11,540
9	51,540	9	61,696	9	11,540
10	51,200	10	60,582	10	11,200
11	51,690	11	62,250	11	11,690
12	51,710	12	62,726	12	11,710
13	51,380	13	61,780	13	11,380
14	51,930	14	61,694	14	11,930
15	52,240	15	62,268	15	12,240
16	53,470	16	63,126	16	13,470
17	51,760	17	61,936	17	11,760
18	51,290	18	61,561	18	11,290
19	51,870	19	61,583	19	11,870
20	52,800	20	61,583	20	12,800
21	51,670	21	61,950	21	11,670
22	51,900	22	61,935	22	11,900
23	52,220	23	62,238	23	12,220
24	52,100	24	61,425	24	12,100
25	51,820	25	62,095	25	11,820
26	52,270	26	63,498	26	12,270
27	50,630	27	62,188	27	10,630

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
28	52,190	28	62,473	28	12,190
29	51,440	29	61,875	29	11,440
30	51,120	30	62,850	30	11,120
31	52,910	31	61,984	31	12,910
32	52,310	32	61,815	32	12,310
33	51,970	33	61,654	33	11,970
34	52,140	34	62,760	34	12,140
35	52,150	35	62,544	35	12,150
36	52,450	36	62,220	36	12,450
37	51,730	37	61,996	37	11,730
38	53,180	38	62,451	38	13,180
39	51,880	39	62,578	39	11,880
40	52,010	40	61,849	40	12,010

Таблица П. 2.8

Вариант 22		Вариант 23		Вариант 24	
[40,50–43,50] т		[70,50–73,50] т		[20,50–23,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	42,200	1	72,281	1	22,150
2	42,600	2	71,128	2	22,550
3	40,910	3	72,405	3	20,860
4	42,690	4	70,787	4	22,640
5	42,360	5	72,512	5	22,310
6	42,530	6	71,685	6	22,480
7	42,090	7	72,086	7	22,040

Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [т]
8	41,540	8	72,436	8	21,490
9	41,540	9	71,696	9	21,490
10	41,200	10	70,582	10	21,150
11	41,690	11	72,250	11	21,640
12	41,710	12	72,726	12	21,660
13	41,380	13	71,780	13	21,330
14	41,930	14	71,694	14	21,880
15	42,240	15	72,268	15	22,190
16	43,470	16	73,126	16	23,420
17	41,760	17	71,936	17	21,710
18	41,290	18	71,561	18	21,240
19	41,870	19	71,583	19	21,820
20	42,800	20	71,583	20	22,750
21	41,670	21	71,950	21	21,620
22	41,900	22	71,935	22	21,850
23	42,220	23	72,238	23	22,170
24	42,100	24	71,425	24	22,050
25	41,820	25	72,095	25	21,770
26	42,270	26	73,498	26	22,220
27	40,630	27	72,188	27	20,580
28	42,190	28	72,473	28	22,140
29	41,440	29	71,875	29	21,390
30	41,120	30	72,850	30	21,070
31	42,910	31	71,984	31	22,860
32	42,310	32	71,815	32	22,260
33	41,970	33	71,654	33	21,920
34	42,140	34	72,760	34	22,090
35	42,150	35	72,544	35	22,100
36	42,450	36	72,220	36	22,400
37	41,730	37	71,996	37	21,680

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
38	43,180	38	72,451	38	23,130
39	41,880	39	72,578	39	21,830
40	42,010	40	71,849	40	21,960

Таблица П. 2.9

Вариант 25		Вариант 26		Вариант 27	
[8,050–8,350] т		[50,50–53,50] т		[90,50–93,50] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,95$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	8,215	1	52,351	1	92,281
2	8,144	2	51,198	2	91,128
3	8,219	3	52,475	3	92,405
4	8,063	4	50,857	4	90,787
5	8,190	5	52,582	5	92,512
6	8,129	6	51,755	6	91,685
7	8,176	7	52,156	7	92,086
8	8,220	8	52,506	8	92,436
9	8,260	9	51,766	9	91,696
10	8,091	10	50,652	10	90,582
11	8,214	11	52,320	11	92,250
12	8,197	12	52,796	12	92,726
13	8,231	13	51,850	13	91,780
14	8,291	14	51,764	14	91,694
15	8,182	15	52,338	15	92,268
16	8,210	16	53,196	16	93,126
17	8,236	17	52,006	17	91,936

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
18	8,224	18	51,631	18	91,561
19	8,193	19	51,653	19	91,583
20	8,193	20	51,653	20	91,583
21	8,138	21	52,020	21	91,950
22	8,171	22	52,005	22	91,935
23	8,181	23	52,308	23	92,238
24	8,154	24	51,495	24	91,425
25	8,209	25	52,165	25	92,095
26	8,222	26	53,568	26	93,498
27	8,112	27	52,258	27	92,188
28	8,253	28	52,543	28	92,473
29	8,169	29	51,945	29	91,875
30	8,280	30	52,920	30	92,850
31	8,269	31	52,054	31	91,984
32	8,167	32	51,885	32	91,815
33	8,227	33	51,724	33	91,654
34	8,120	34	52,830	34	92,760
35	8,347	35	52,614	35	92,544
36	8,245	36	52,290	36	92,220
37	8,173	37	52,066	37	91,996
38	8,188	38	52,521	38	92,451
39	8,318	39	52,648	39	92,578
40	8,201	40	51,919	40	91,849

Таблица П. 2.10

Вариант 28		Вариант 29		Вариант 30	
[13,050–13,350] т		[30,50–34,0] т		[18,050–18,350] т	
$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,9$		$\gamma = 0,9$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	13,215	1	33,231	1	18,215
2	13,144	2	31,078	2	18,144
3	13,219	3	33,355	3	18,219
4	13,063	4	30,737	4	18,063
5	13,190	5	32,462	5	18,190
6	13,129	6	30,635	6	18,129
7	13,176	7	32,036	7	18,176
8	13,220	8	33,386	8	18,220
9	13,260	9	33,646	9	18,260
10	13,091	10	30,532	10	18,091
11	13,214	11	33,200	11	18,214
12	13,197	12	32,676	12	18,197
13	13,231	13	33,730	13	18,231
14	13,291	14	33,644	14	18,291
15	13,182	15	32,218	15	18,182
16	13,210	16	33,076	16	18,210
17	13,236	17	33,886	17	18,236
18	13,224	18	33,511	18	18,224
19	13,193	19	32,553	19	18,193
20	13,193	20	32,553	20	18,193
21	13,138	21	30,900	21	18,138
22	13,171	22	31,885	22	18,171
23	13,181	23	32,188	23	18,181
24	13,154	24	31,375	24	18,154
25	13,209	25	33,045	25	18,209
26	13,222	26	33,448	26	18,222
27	13,112	27	31,138	27	18,112

Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
28	13,253	28	32,423	28	18,253
29	13,169	29	31,825	29	18,169
30	13,280	30	32,800	30	18,280
31	13,269	31	32,934	31	18,269
32	13,167	32	31,765	32	18,167
33	13,227	33	33,604	33	18,227
34	13,120	34	31,371	34	18,120
35	13,347	35	33,494	35	18,347
36	13,245	36	32,170	36	18,245
37	13,173	37	31,946	37	18,173
38	13,188	38	32,401	38	18,188
39	13,318	39	32,528	39	18,318
40	13,201	40	32,799	40	18,201

Таблица П. 2.11

Вариант 31		Вариант 32	
[80,50–83,50] т		[30,50–33,50] т	
$\gamma = 0,95$		$\gamma = 0,95$	
Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]	Номер испытания	Тяга двигателя, R, [т]
1	82,200	1	32,231
2	82,600	2	31,078
3	80,910	3	32,355
4	82,690	4	30,737
5	82,360	5	32,462
6	82,530	6	31,635
7	82,090	7	32,036
8	81,540	8	32,386

Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [г]	Номер испытания	Тяга двигателя, Р, [г]
9	81,540	9	31,646
10	81,200	10	30,532
11	81,690	11	32,200
12	81,710	12	32,676
13	81,380	13	31,730
14	81,930	14	31,644
15	82,240	15	32,218
16	83,470	16	33,076
17	81,760	17	31,886
18	81,290	18	31,511
19	81,870	19	31,533
20	82,800	20	31,533
21	81,670	21	31,900
22	81,900	22	31,885
23	82,220	23	32,188
24	82,100	24	31,375
25	81,820	25	32,045
26	82,270	26	33,448
27	80,630	27	32,138
28	82,190	28	32,423
29	81,440	29	31,825
30	81,120	30	32,800
31	82,910	31	31,934
32	82,310	32	31,765
33	81,970	33	31,604
34	82,140	34	32,710
35	82,150	35	32,494
36	82,450	36	32,170
37	81,730	37	31,946
38	83,180	38	32,401
39	81,880	39	32,528
40	82,010	40	31,799

Содержание

Введение	3
1. Постановка задачи и исходная информация, используемая при оценке надежности	4
2. Оценка безотказности по схеме «успех – отказ»	6
3. Последовательность оценки безотказности по схеме «параметр – заданное поле допуска»	6
4. Результаты оценки нижней доверительной границы безотказности для двигателя в целом	12
Библиографический список	14
Приложения	15

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЯ
И ЕГО СИСТЕМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практических и самостоятельных работ
по дисциплине «Испытания и надежность
жидкостных ракетных двигателей» для студентов
специальности 24.05.02 «Проектирование авиационных и
ракетных двигателей» очной формы обучения

Составители:

Афанасьев Александр Александрович
Демьяненко Юрий Васильевич
Кружаев Константин Владимирович
Шматов Дмитрий Павлович

В авторской редакции
Подписано в печать

Подписано к изданию _____.
Объем данных 240 Кбайт.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14