|  |  |
| --- | --- |
| Открытое акционерное общество «РДТ-Темп» | |
|  | Экз. № \_\_\_\_ |
|  | УТВЕРЖДАЮ  Генеральный директор  ОАО «РДТ-Темп»  \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ А. А. Ноговицын  «\_\_\_»\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 20\_\_\_ г. |
|  |  |
| КОРПУС  Тепловой расчёт  Расчёты  МРД.10.000 РР1 | |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Содержание

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | Задачи расчёта | 3 |
| 2 | Исходные данные для расчёта | 4 |
| 3 | Расчёт | 5 |
|  | 3.1 Методика расчёта | 5 |
|  | 3.2 Результаты расчёта | 8 |
| 4 | Заключение | 9 |
| Приложение А. Схемы расположения расчётных сечений | | 10 |
| Приложение Б. Исходные данные | | 12 |
| Приложение В. Результаты расчёта | | 15 |
| Приложение Г. Принятые обозначения и сокращения | | 31 |
| Приложение Д. Список использованной литературы | | 33 |

1 Задачи расчёта

1.1 Определение распределения температур в расчётных сечениях сборочных единиц корпуса МРД.10.000 (далее по тексту – корпус МРД), нагруженного внутренним давлением и работающего при заданных внутренних тепловых воздействиях.

1.2 Определение среднеинтегральных температур силовых деталей корпуса МРД при нагружении в соответствии с п. 1.1.

2 Исходные данные для расчёта

2.1 Номинальные расчётные условия соответствуют среднеобъёмным начальным температурам корпуса МРД:

– tнач1 = – 40 °С;

– tнач2 =    50 °С.

2.2 Схемы расположения расчётных сечений корпуса МРД приведены на рисунках А.1 – А.3 приложения А. Конструкция корпуса МРД в местах расчётных сечений принята в соответствии с чертежом общего вида МРД.00.000 ВО [1].

2.3 Полное время работы МРД τп, с:

– τп1 = 5,5 при tнач1 = – 40 °С;

– τп2 = 3,8 при tнач2 =    50 °С.

2.4 Теплофизические характеристики материалов, входящих в расчётные сечения корпуса МРД, принятые в соответствии с [2], [3], приведены в таблице Б.1 приложения Б.

2.5 Термодинамические и максимальные газодинамические параметры продуктов работы ОИ в расчётных сечениях приведены в таблице Б.2, теплофизические характеристики продуктов работы – в таблице Б.3 приложения Б.

3 Расчёт

3.1 Методика расчёта

3.1.1 Тепловые расчёты проведены по методике [4], основанной на решении уравнения теплопроводности в многослойной стенке методом конечных разностей. Температурные поля рассчитываются по программе “UNOS”, написанной на языке TURBO PASCAL, в которой для каждого из расчётных сечений решается уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

. (1)

Начальное условие задается в виде температуры в слоях в начале процесса теплообмена:

Tнач = T(r,τ = 0). (2)

Граничные условия задаются на внутренней и наружной поверхностях твердого тела по закону Фурье:

Q = − λ·(∂T/∂r)с. (3)

При проведении настоящего расчёта со стороны внутренней поверхности расчётного сечения задавалось граничное условие третьего рода, которым описывается конвективный теплообмен между окружающей средой и внутренней поверхностью расчётного сечения:

Qк = α·(Tнач – Тc). (4)

Дифференциальное уравнение теплоотдачи конвективного теплообмена:

α·(Tнач – Tc) = − λ·(∂T/∂r)c . (5)

Коэффициент теплоотдачи α вычислялся как:

α = (Nu · a)/l. (6)

Критерий Нуссельта рассчитывается по уравнению:

Nu = 0,023· Re0,8 · Pr0,4. (7)

Лучистый тепловой поток от окружающей среды вычислялся как:

Qл = 5,67·10-8 · ε · [Tнач4 – Tc4]. (8)

В процессе теплообмена в камере происходит нагрев ТЗП, и при достижении на поверхности температуры деструкции 550 ºС происходит унос слоёв ТЗП с интенсивностью, зависящей от давления, температуры и параметров омывающего потока.

При теплообмене в застойной зоне температура в расчётном сечении lr определяется как:

Тз = Тk exp(–h · lr 0,5), (9)

где

h = (ln(Tk)-ln(Tнач)) / lз . (10)

В расчёте учитывается толщина застойной зоны, а также теплоотвод в стенку корпуса и ОИ.

Уравнение теплопроводности является дифференциальным уравнением в частных производных относительно температуры. Это уравнение не имеет аналитического решения и решается численным методом путем замены производных их разностными аналогами.

Время процесса разбивается на временные шаги Δτk:

, (11)

. (12)

Расчётное сечение разбивается на элементы с размером Δri.

Для получения устойчивого решения связь между временными шагами и элементами Δr устанавливается через критерий Фурье:

. (13)

Соотношение временных и линейных шагов ограничено условием:

Fо < 1/2. (14)

Решение уравнения теплопроводности осуществляется методом «прогонки». Для этого используется рекуррентная формула:

T(i) = M(i) · T(i+1) + L(i). (15)

3.2 Результаты расчёта

3.2.1 Определены распределения температур в расчётных сечениях сборочных единиц корпуса МРД, нагруженного внутренним давлением и работающего при заданных внутренних тепловых воздействиях (приложение В, таблицы В.1 – В.14).

3.2.2 Определены среднеинтегральные температуры силовых деталей корпуса МРД (таблицы В.15, В.16).

4 Заключение

4.1 Определены распределения температур в расчётных сечениях сборочных единиц корпуса МРД.10.000, нагруженного внутренним давлением и работающего при заданных внутренних тепловых воздействиях.

4.2 Определены среднеинтегральные температуры силовых деталей корпуса МРД. Максимальные среднеинтегральные температуры в расчётных сечениях приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Максимальные среднеинтегральные температуры в расчётных сечениях корпуса МРД

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Расчётные  сечения | tнач1 = – 40 °С | tнач2 = 50 °С |
| tср.макс, °С | |
| I | -39,4 | 49,6 |
| II | 1972,6 | 2157,3 |
| III | 134,3 | 197,8 |
| IV | -37,0 | 46,8 |
| V | -39,4 | 49,6 |
| VI | -39,7 | 49,9 |
| VII | -39,7 | 49,9 |
| VIII | -39,9 | 50,0 |
| IX | 333,3 | 373,6 |
| X | 478,5 | 521,2 |
| XI | 563,9 | 681,3 |
| XII | -38,3 | 49,5 |
| XIII | 1754,1 | 1825,9 |
| XIV | 811,7 | 590,5 |

Приложение А

(обязательное)

Схемы расположения расчётных сечений

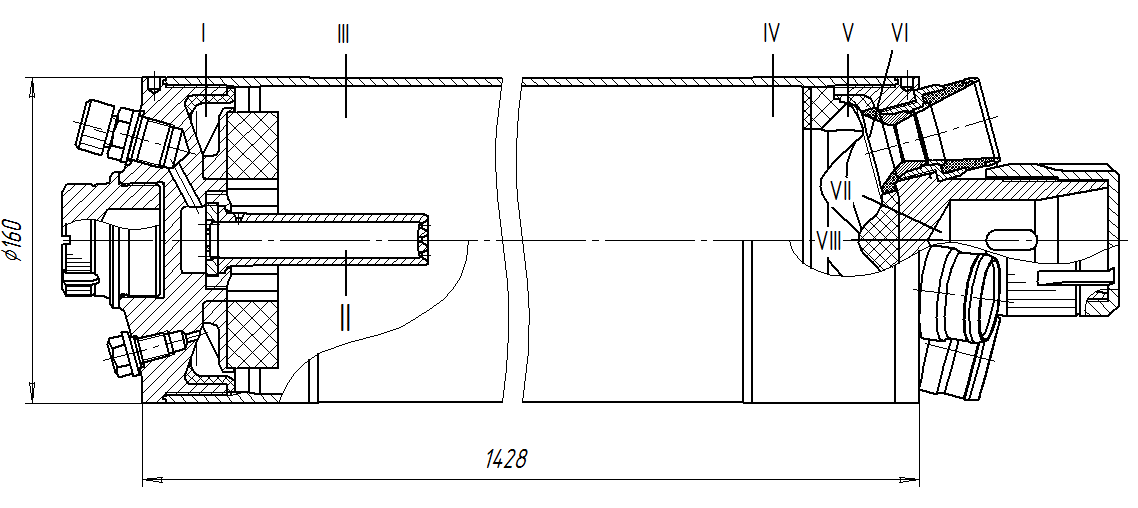


Рисунок А.1 – Схема расположения расчётных сечений в корпусе МРД

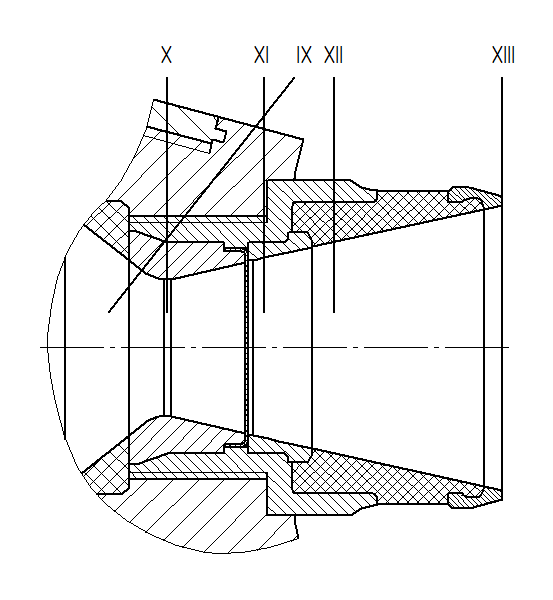


Рисунок А.2 – Схема расположения расчётных сечений в сопловом блоке МРД

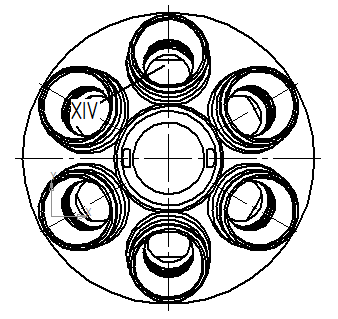


Рисунок А.3 – Схема расположения расчётного сечения в области перемычки между соплами МРД

Приложение Б

(обязательное)

Исходные данные

Таблица Б.1 – Теплофизические характеристики материалов, входящих в расчётные сечения корпуса МРД

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | t, ºС | λ, Вт/(м·К) | с, Дж/(кг·К) | ρ, кг/м3 |
| П–5–2М | – 40 | 0,6 | 2270,0 | 1640,0 |
| 50 | 0,4 | 1900,0 | 1640,0 |
| П–5–12У | – 40 | 0,6 | 1185,0 | 1340,0 |
| 50 | 0,6 | 1717,0 | 1340,0 |
| 30ХГСА | – 40 | 38,0 | 496,0 | 7850,0 |
| 50 | 32,0 | 693,0 | 7610,0 |
| 36ХНТЮ | – 40 | 10,0 | 502,0 | 8320,0 |
| 50 | 27,0 | 502,0 | 8320,0 |
| М–МП | – 40 | 138,0 | 255,0 | 9590,0 |
| 50 | 138,0 | 255,0 | 9590,0 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Таблица Б.2 – Термодинамические и максимальные газодинамические параметры продуктов работы ОИ в заданных расчётных сечениях корпуса МРД | vг, м/с | 299,0 | 300,0 | 995,3 | 1006,1 | 1760,0 | 1782,2 | 2042,7 | 2069,6 | 2135,1 | 2163,6 | 995,3 | 1006,1 |
| Т, К | 2851,0 | 2993,0 | 2534,0 | 2600,0 | 1963,0 | 2021,0 | 1653,0 | 1703,0 | 1540,0 | 1587,0 | 2534,0 | 2600,0 |
| Р, кгс/см2 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 198,9 | 198,9 | 39,6 | 64,1 | 9,4 | 15,2 | 3,8 | 6,1 | 2,6 | 4,2 | 39,6 | 64,1 |
| R, Дж/(кг·К) | 326,9 | 326,9 | 326,4 | 326,4 | 325,8 | 325,8 | 325,7 | 325,7 | 325,7 | 326,7 | 326,4 | 326,4 |
| k | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,2 |
| vзв, м/с | 1047,3 | 1061,3 | 995,3 | 1006,0 | 885,7 | 898,1 | 815,4 | 827,4 | 787,3 | 799,0 | 995,3 | 1006,0 |
| t, ºС |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| – 40 | 50 | – 40 | 50 | – 40 | 50 | – 40 | 50 | – 40 | 50 | – 40 | 50 |
| № сечения | I – IX | | X | | XI | | XII | | XIII | | XIV | |

Таблица Б.3 – Теплофизические характеристики продуктов работы ОИ в заданных расчётных сечениях корпуса МРД

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № сечения | tнач, ºС | ν, м2/с | с, Дж/(кг·К) | λ, Вт/(м·К) | Pr |
| I – IX | – 40 | 1,0е-5 | 1771,6 | 0,2 | 0,6 |
| 50 | 6,7е-6 | 1775,5 | 0,2 | 0,6 |
| X | – 40 | 1,6е-5 | 1750,9 | 0,2 | 0,6 |
| 50 | 1,0е-5 | 1756,6 | 0,2 | 0,6 |
| XI | – 40 | 4,3е-5 | 1685,9 | 0,2 | 0,6 |
| 50 | 2,8е-5 | 1693,7 | 0,2 | 0,6 |
| XII | – 40 | 8,0е-5 | 1640,1 | 0,2 | 0,6 |
| 50 | 5,2е-5 | 1648,0 | 0,2 | 0,6 |
| XIII | – 40 | 1,0е-4 | 1621,6 | 0,1 | 0,6 |
| 50 | 6,7е-5 | 1629,3 | 0,1 | 0,6 |
| IVX | – 40 | 1,6е-5 | 1750,9 | 0,2 | 0,6 |
| 50 | 1,0е-5 | 1759,6 | 0,2 | 0,6 |

Приложение В

(обязательное)

Результаты расчёта

Таблица В.1 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в свободном объёме дна переднего (сечение I)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | 550,0 | | 550,0 |
| 4,0 (т.2) | -40,0 | -39,9 | | -39,8 | | -39,2 | -38,2 | | -37,6 |
| 9,0 (т.3) | -39,9 | -39,9 | | -39,8 | | -39,7 | -39,6 | | -39,5 |
| 13,0 (т.4) | -39,8 | -39,7 | | -39,6 | | -39,5 | -39,4 | | -39,3 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | -39,9 | -39,9 | | -39,8 | | -39,7 | -39,5 | | -39,4 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | | | 550,0 | |
| 4,0 (т.2) | 50,0 | | 49,9 | | 49,9 | | | 49,9 | |
| 9,0 (т.3) | 50,0 | | 49,8 | | 49,6 | | | 49,6 | |
| 13,0 (т.4) | 49,6 | | 49,5 | | 49,3 | | | 49,2 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 49,9 | | 49,8 | | 49,7 | | | 49,6 | |

Таблица В.2 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса воспламенителя МРД (сечение II)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 701,0 | 1164,3 | | 1508,0 | 1749,0 | 1908,8 | | 1955,0 |
| 3,5 (т.2) | 623,1 | 1135,2 | | 1514,0 | 1778,3 | 1952,7 | | 2003,1 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.1 – т.2 | 615,0 | 1115,4 | | 1487,4 | 1748,7 | 1922,2 | | 1972,6 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 1110,6 | | 1669,9 | | 1981,1 | | 2103,2 | |
| 3,5 (т.2) | 1130,2 | | 1749,2 | | 2090,3 | | 2223,1 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.1 – т.2 | 1060,9 | | 1677,8 | | 2022,1 | | 2157,3 | |

Таблица В.3 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД на расстоянии 16,6 мм от переднего торца шашки (сечение III)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 12,2 | 45,4 | | 77,9 | 109,6 | 140,7 | | 152,9 |
| 4.0 (т.2) | -15,1 | 17,7 | | 49,8 | 81,1 | 111,8 | | 123,9 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.1 – т.2 | -6,0 | 27,1 | | 59,5 | 91,1 | 122,1 | | 134,3 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 114,9 | | 155,3 | | 194,7 | | 221,7 | |
| 4.0 (т.2) | 78,9 | | 118,7 | | 157,6 | | 184,3 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.2 | 91,4 | | 131,6 | | 170,9 | | 197,8 | |

Таблица В.4 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД на расстоянии 7,4 мм от заднего торца шашки (сечение IV)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | -39,6 | -39,0 | | -38,5 | -37,9 | -37,4 | | -37,2 |
| 4,5 (т.2) | -39,1 | -38,5 | | -37,9 | -37,4 | -36,9 | | -36,7 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.1 – т.2 | -39,4 | -38,9 | | -38,3 | -37,8 | -37,2 | | -37,0 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 49,4 | | 48,6 | | 47,7 | | 47,1 | |
| 4,5 (т.2) | 48,5 | | 47,6 | | 46,7 | | 46,2 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.1 – т.2 | 49,1 | | 48,2 | | 47,4 | | 46,8 | |

Таблица В.5 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в свободном объёме дна заднего (сечение V)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | 550,0 | | 550,0 | 550,0 | 550,0 | | 550,0 |
| 4,0 (т.2) | -40,0 | -39,9 | | -39,8 | -39,2 | -38,2 | | -37,6 |
| 9,0 (т.3) | -39,9 | -39,9 | | -39,8 | 39,7 | -39,6 | | -39,5 |
| 13,0 (т.4) | -39,8 | -39,7 | | -39,6 | 39,5 | -39,4 | | -39,3 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | -40,0 | -39,9 | | -39,8 | -39,7 | -39,5 | | -39,4 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | |
| 4,0 (т.2) | 50,0 | | 49,9 | | 49,9 | | 50,1 | |
| 9,0 (т.3) | 49,9 | | 49,8 | | 49,6 | | 49,6 | |
| 13,0 (т.4) | 49,6 | | 49,4 | | 49,3 | | 49,2 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 49,9 | | 49,8 | | 49,7 | | 49,6 | |

Таблица В.6 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в полости перед соплом (сечение VI)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | 550,0 | | 550,0 | 550,0 | 550,0 | | 550,0 |
| 5,7 (т.2) | -40,0 | -40,0 | | -40,0 | -40,0 | -39,9 | | -39,9 |
| 17,2 (т.3) | -39,9 | -39,9 | | -39,8 | -39,7 | -39,6 | | -39,6 |
| 21,2 (т.4) | -39,7 | -39,6 | | -39,5 | -39,4 | -39,3 | | -39,3 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | -39,9 | -39,9 | | -39,8 | -39,8 | -39,7 | | -39,7 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | |
| 5,7 (т.2) | 50,0 | | 50,0 | | 50,0 | | 49,9 | |
| 17,2 (т.3) | 49,9 | | 49,8 | | 49,7 | | 49,6 | |
| 21,2 (т.4) | 49,5 | | 49,3 | | 49,2 | | 49,1 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 49,9 | | 49,7 | | 49,7 | | 49,6 | |

Таблица В.7 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в зоне лобового натекания (сечение VII)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | 550,0 | | 550,0 | 550,0 | 550,0 | | 550,0 |
| 9,0 (т.2) | -40,0 | -40,0 | | -40,0 | -40,0 | -40,0 | | -39,9 |
| 27,0 (т.3) | -39,7 | -39,6 | | -39,5 | -39,5 | -39,4 | | -39,4 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | -40,0 | -39,9 | | -39,9 | -39,8 | -39,8 | | -39,7 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | |
| 9,0 (т.2) | 50,0 | | 50,0 | | 50,0 | | 50,0 | |
| 27,0 (т.3) | 49,6 | | 49,4 | | 49,2 | | 49,1 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 49,9 | | 49,8 | | 49,8 | | 49,7 | |

Таблица В.8 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в зоне лобового натекания (сечение VIII)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | 550,0 | | 550,0 | 550,0 | 550,0 | | 550,0 |
| 20,0 (т.2) | -40,0 | -40,0 | | -40,0 | -40,0 | -40,0 | | -40,0 |
| 38,0 (т.3) | -39,8 | -39,8 | | -39,7 | -39,7 | -39,6 | | -39,6 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.3 | -40,0 | -39,4 | | -39,9 | -39,9 | -39,9 | | -39,9 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | |
| 20,0 (т.2) | 50,0 | | 50,0 | | 50,0 | | 50,0 | |
| 38,0 (т.3) | 49,7 | | 49,6 | | 49,5 | | 49,5 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.3 | 50,0 | | 49,9 | | 49,9 | | 49,8 | |

Таблица В.9 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в части сопла с диаметром 21,5 мм (сечение IX)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 514,3 | 698,6 | | 821,7 | 913,8 | 986,8 | | 1012,2 |
| 5,0 (т.2) | 265,9 | 454,2 | | 584,2 | 682,9 | 761,9 | | 789,5 |
| 9,0 (т.3) | 2,5 | 99,2 | | 191,1 | 271,7 | 342,0 | | 367,6 |
| 25,0 (т.4) | -39,7 | -39,1 | | -35,3 | -25,2 | -8,3 | | 0,122 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 33,7 | 118,2 | | 191,2 | 255,0 | 312,0 | | 333,3 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 712,5 | | 919,9 | | 1054,4 | | 1125,9 | |
| 5,0 (т.2) | 417,7 | | 635,2 | | 781,2 | | 859,9 | |
| 9,0 (т.3) | 101,6 | | 216,4 | | 323,3 | | 389,3 | |
| 25,0 (т.4) | 49,5 | | 49,9 | | 54,3 | | 61,7 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 138,8 | | 238,1 | | 322,1 | | 373,6 | |

Таблица В.10 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в критической части сопла (сечение X)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | | 3,0 | | 4,0 | | 5,0 | | | 5,5 | |
| 0,0 (т.1) | 1161,7 | | 1404,8 | | | 1537,5 | | 1623,7 | | 1685,3 | | | 1705,4 | |
| 5,0 (т.2) | 643,8 | | 952,9 | | | 1129,5 | | 1246,7 | | 1331,7 | | | 1359,6 | |
| 8,5 (т.3) | 125,7 | | 361,8 | | | 537,0 | | 668,1 | | 770,1 | | | 804,9 | |
| 20,0 (т.4) | -39,9 | | -35,0 | | | -17,1 | | 13,2 | | 52,4 | | | 69,9 | |
| 23,5 (т.5) | -39,7 | | -39,0 | | | -33,0 | | -17,1 | | 9,6 | | | 22,8 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | | | | | | | |
| т.2 – т.5 | 96,5 | | | 218,5 | | | 310,9 | | 387,1 | | 453,7 | | | 478,5 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | | | | | | | |
| xi, мм | | τ, с | | | | | | | | | | | | |
| 1,0 | | | 2,0 | | | 3,0 | | | | 3,8 | | |
| 0,0 (т.1) | | 1517,4 | | | 1743,9 | | | 1857,6 | | | | 1909,8 | | |
| 5,0 (т.2) | | 902,3 | | | 1232,5 | | | 1406,8 | | | | 1488,6 | | |
| 8,5 (т.3) | | 262,5 | | | 540,4 | | | 733,6 | | | | 835,0 | | |
| 20,0 (т.4) | | 50,0 | | | 56,0 | | | 77,9 | | | | 102,0 | | |
| 23,5 (т.5) | | 49,5 | | | 50,1 | | | 57,3 | | | | 69,5 | | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | | | | | | | |
| т.2 – т.5 | | 222,3 | | | 362,2 | | | 462,9 | | | | 521,2 | | |

Таблица В.11 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в части сопла с диаметром 22 мм (сечение XI)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 664,0 | 866,9 | | 990,5 | 1078,0 | 1145,7 | | 1169,1 |
| 3,5 (т.2) | 538,8 | 751,6 | | 882,2 | 975,2 | 1047,3 | | 1072,3 |
| 7,0 (т.3) | 114,7 | 289,6 | | 418,6 | 518,8 | 601,3 | | 630,9 |
| 20,0 (т.4) | -39,5 | -29,9 | | 0,6 | 48,1 | 106,5 | | 131,4 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 145,2 | 274,6 | | 376,8 | 461,8 | 536,2 | | 563,9 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 1050,5 | | 1277,1 | | 1402,2 | | 1463,3 | |
| 3,5 (т.2) | 878,8 | | 1227,7 | | 1266,6 | | 1334,8 | |
| 7,0 (т.3) | 278,6 | | 511,8 | | 670,8 | | 755,9 | |
| 20,0 (т.4) | 49,9 | | 63,6 | | 106,8 | | 150,8 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.4 | 313,3 | | 485,7 | | 609,8 | | 681,3 | |

Таблица В.12 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в части сопла с диаметром 31 мм (сечение XII)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | 550,0 | | 550,0 | 550,0 | 550,0 | | 550,0 |
| 4,0 (т.2) | -39,8 | -39,5 | | -39,3 | -38,8 | -38,1 | | -37,7 |
| 6,0 (т.3) | -39,6 | -39,3 | | -39,1 | -38,8 | -38,4 | | -38,2 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.3 | -39,7 | -39,4 | | -39,2 | -38,9 | -38,5 | | -38,3 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | | 550,0 | |
| 4,0 (т.2) | 49,7 | | 49,2 | | 48,9 | | 48,7 | |
| 6,0 (т.3) | 49,4 | | 48,9 | | 48,5 | | 48,2 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.2 – т.3 | 49,5 | | 49,1 | | 48,6 | | 48,3 | |

Таблица В.13 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в части сопла с диаметром 39 мм (сечение XIII)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 818,5 | 1244,2 | | 1522,5 | 1683,7 | | 1769,6 | | 1790,7 |
| 1,5 (т.2) | 583,0 | 1100,4 | | 1421,0 | 1602,6 | | 1698,3 | | 1721,7 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | | |
| т.2 – т.3 | 667,8 | 1153,9 | | 1461,7 | 1637,9 | | 1731,2 | | 1754,1 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 1183,9 | | 1617,2 | | | 1837,7 | | 1916,9 | |
| 1,5 (т.2) | 827,0 | | 1374,5 | | | 1652,3 | | 1751,6 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | | |
| т.2 – т.3 | 953,7 | | 1467,4 | | | 1730,9 | | 1825,9 | |

Таблица В.14 – Распределение температур и среднеинтегральные температуры корпуса МРД в области перемычки между соплами (сечение XIV)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | | | | | | | |
| t1 = – 40 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | | 3,0 | 4,0 | 5,0 | | 5,5 |
| 0,0 (т.1) | 1175,8 | 1445,4 | | 1595,0 | 1698,5 | 1781,0 | | 1810,4 |
| 5,0 (т.2) | 685,1 | 1024,3 | | 1223,0 | 1365,1 | 1480,7 | | 1522,3 |
| 8,5 (т.3) | 141,6 | 409,7 | | 626,4 | 811,4 | 975,6 | | 1036,6 |
| 18,8 (т.4) | 141,6 | 409,7 | | 626,4 | 811,4 | 975,6 | | 1036,6 |
| 22,1 (т.5) | 685,1 | 1024,3 | | 1223,0 | 1365,1 | 1480,7 | | 1522,3 |
| 26,1 (т.6) | 1175,8 | 1445,4 | | 1595,0 | 1698,5 | 1781,0 | | 1810,4 |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.3 – т.4 | 8,1 | 163,6 | | 357,8 | 554,8 | 741,2 | | 811,7 |
| t2 = 50 °С | | | | | | | | |
| xi, мм | τ, с | | | | | | | |
| 1,0 | | 2,0 | | 3,0 | | 3,8 | |
| 0,0 (т.1) | 1280,1 | | 1547,3 | | 1694,4 | | 1768,2 | |
| 5,0 (т.2) | 784,8 | | 1124,3 | | 1321,7 | | 1423,8 | |
| 8,5 (т.3) | 234,4 | | 504,9 | | 722,3 | | 854,3 | |
| 18,8 (т.4) | 234,4 | | 504,9 | | 722,3 | | 854,3 | |
| 22,1 (т.5) | 784,8 | | 1124,3 | | 1321,7 | | 1423,8 | |
| 26,1 (т.6) | 1280,1 | | 1547,3 | | 1694,4 | | 1768,2 | |
| Среднеинтегральные температуры корпуса МРД tср, °С | | | | | | | | |
| т.3 – т.4 | 98,9 | | 255,9 | | 451,3 | | 590,5 | |

Таблица В.15 – Среднеинтегральные температуры силовых деталей корпуса МРД при начальной температуре tнач1= ‑ 40 °С

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Расчётные  сечения | Время воздействия, с | | | | | |
| 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 5,5 |
| tср, °С | | | | | |
| I | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,5 | -39,4 |
| II | 615,0 | 1115,4 | 1487,4 | 1748,7 | 1922,2 | 1972,6 |
| III | -6,0 | 27,1 | 59,5 | 91,1 | 122,1 | 134,3 |
| IV | -39,4 | -38,9 | -38,3 | -37,8 | -37,2 | -37,0 |
| V | -40,0 | -39,9 | -39,8 | -39,7 | -39,5 | -39,4 |
| VI | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,8 | -39,7 | -39,7 |
| VII | -40,0 | -39,9 | -39,9 | -39,8 | -39,8 | -39,7 |
| VIII | -40,0 | -39,4 | -39,9 | -39,9 | -39,9 | -39,9 |
| IX | 33,7 | 118,2 | 191,2 | 255,0 | 312,0 | 333,3 |
| X | 96,5 | 218,5 | 310,9 | 387,1 | 453,7 | 478,5 |
| XI | 145,2 | 274,6 | 376,8 | 461,8 | 536,2 | 563,9 |
| XII | -39,7 | -39,4 | -39,2 | -38,9 | -38,5 | -38,3 |
| XIII | 667,8 | 1153,9 | 1461,7 | 1637,9 | 1731,2 | 1754,1 |
| XIV | 8,1 | 163,6 | 357,8 | 554,8 | 741,2 | 811,7 |

Таблица В.16 – Среднеинтегральные температуры силовых деталей корпуса МРД при начальной температуре tнач2= 50 °С

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Расчётные  сечения | Время воздействия, с | | | |
| 1,0 | 2,0 | 3,0 | 3,8 |
| t ср, °С | | | |
| I | 49,9 | 49,8 | 49,7 | 49,6 |
| II | 1060,9 | 1677,8 | 2022,1 | 2157,3 |
| III | 91,4 | 131,6 | 170,9 | 197,8 |
| IV | 49,1 | 48,2 | 47,4 | 46,8 |
| V | 49,9 | 49,8 | 49,7 | 49,6 |
| VI | 49,9 | 49,7 | 49,7 | 49,6 |
| VII | 49,9 | 49,8 | 49,8 | 49,7 |
| VIII | 50,0 | 49,9 | 49,9 | 49,8 |
| IX | 138,8 | 238,1 | 322,1 | 373,6 |
| X | 222,3 | 362,2 | 462,9 | 521,2 |
| XI | 313,3 | 485,7 | 609,8 | 681,3 |
| XII | 49,5 | 49,1 | 48,6 | 48,3 |
| XIII | 953,7 | 1467,4 | 1730,9 | 1825,9 |
| XIV | 98,9 | 255,9 | 451,3 | 590,5 |
| Примечание – Температура в сечениях I, IV – VIII, XII понижается при работе изделия за счёт преобладающего влияния внешней температуры (принято в расчёте – минус 6 ºС) | | | | |

Приложение Г

(справочное)

Принятые обозначения и сокращения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Т | – температура, К; | |
| t | – температура, °С; | |
| a | – коэффициент температуропроводности; | |
| c | – теплоёмкость, кДж/(кг·К); | |
| Fо | – критерий Фурье; | |
| i | − номер узловой точки; | |
| h | − математический оператор; | |
| k | – показатель адиабаты; | |
| M, L | – прогоночные коэффициенты; | |
| l | – длина, м; | |
| Nu | – критерий Нуссельта; | |
| Р | – давление, кгс/см2; | |
| Pr | – число Прандтля; | |
| Q | – тепловой поток, Вт/м2; | |
| R | – газовая постоянная, Дж/(кг·К); | |
| r | – координата, м; | |
| Re | – число Рейнольдса; | |
| v | – скорость, м/с; | |
| ν | – кинематическая вязкость, м2/с; | |
| х | – расстояние от внутренней поверхности стенки, мм; | |
| т | – точка; | |
| α | – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м2·К); | |
| ε | | – эффективная степень черноты поверхности; | |
| I – XIV | | – расчётные сечения; | |
| λ | | – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); | |
| ρ | | – плотность, кг/м3; | |
| τ | | – время, с; | |
| Δ | | − интервал. | |
|  | | | |
| Надстрочные индексы | | | |
|  | |  | |
| k | | – номер временного шага. | |
|  | |  | |
| Подстрочные индексы | | | |
|  | | | |
| з | | – застойная зона; | |
| зв | | – звук; | |
| к | | – конвекция; | |
| л | | – лучистый; | |
| нач | | – начальное значение; | |
| п | | – полное (время); | |
| с | | – стенка; | |
| ср | | – среднее значение; | |
| ср.макс | | – максимальное среднеинтегральное значение; | |
| i | | – номер; | |
| k | | – камера; | |
| r | | – расчётное сечение; | |
| 1 | | – значение, соответствующее начальной температуре плюс 50 ºС; | |
| 2 | | – значение, соответствующее начальной температуре минус 40 ºС. | |
|  | |  | |
| МРД | | – маршевый ракетный двигатель; | |
| ОИ | | – основное изделие; | |
| т. | | – точка; | |
| ТЗП | | – теплозащитный материал. | |

Приложение Д

(справочное)

Список использованной литературы

1 Чертёж общего вида МРД.00.000 ВО «Двигатель», инв.  № 65685н от 13.06.2017 г.

2 Зубченко А. С. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машино-строение, 2003 г.

3 Состав, назначение и технические характеристики теплозащитных материалов, используемых в корпусах РДТТ. инв. № 1312/04, 2009 г.

4 Расчёт температурных полей в многослойных оболочках вращения. Методика. М 697-2009. ФГУП «ФЦДТ «Союз», 2009 г.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Лист регистрации изменений | | | | | | | | | |
| Изм. | Номера листов (страниц) | | | | Всего листов (страниц) в доку- менте | Номер документа | Входящий номер сопроводи- тельного документа и дата | Подпись | Дата |
| изменен- ных | заменен- ных | новых | аннулиро- ванных |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |