

# Содержание

---

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Предисловие</b>                                                                                        | <b>3</b>  |
| <b>Сокращения и условные обозначения</b>                                                                  | <b>4</b>  |
| Сокращения .....                                                                                          | 4         |
| Условные обозначения .....                                                                                | 5         |
| <b>Глава 1. Предпосылки работы</b>                                                                        | <b>14</b> |
| 1.1 Краткая история по созданию вертолетов<br>с двигателями на концах лопастей<br>несущего винта .....    | 19        |
| 1.1.1 Поршневые двигатели на лопастях<br>несущего винта .....                                             | 19        |
| 1.1.2 Компрессорный вертолет-автожир .....                                                                | 20        |
| 1.1.3 Прямоточные реактивные двигатели<br>на лопастях несущего винта .....                                | 22        |
| 1.1.4 Жидкостные ракетные двигатели<br>на лопастях несущего винта .....                                   | 24        |
| 1.1.5 Турбореактивные двигатели на лопастях<br>несущего винта .....                                       | 24        |
| 1.1.6 Импульсно-детонационные двигатели<br>на лопастях несущего винта .....                               | 24        |
| 1.2 История создания реактивного вертолета В-7 .....                                                      | 24        |
| <b>Глава 2. Особенности реактивного вертолета<br/>с двигателями на концах лопастей<br/>несущего винта</b> | <b>36</b> |
| 2.1 Особенности аэродинамики реактивного вертолета                                                        | 36        |
| 2.1.1 Результаты испытаний макетов лопастей<br>вертолета В-7 в ЦАГИ .....                                 | 36        |

|        |                                                                                               |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.2  | Эффект концевой шайбы .....                                                                   | 37 |
| 2.1.3  | Эффект кругового движения мотогондолы .....                                                   | 41 |
| 2.1.4  | Особенности течения газа<br>в турбореактивных двигателях на лопастях .....                    | 43 |
| 2.1.5  | Влияние угла установки мотогондолы<br>к плоскости вращения .....                              | 45 |
| 2.1.6  | Соппротивление конца лопасти<br>несущего винта с работающим двигателем .....                  | 46 |
| 2.1.7  | Увеличение профильного сопротивления<br>лопасти с мотогондолой .....                          | 47 |
| 2.1.8  | Скоростные характеристики реактивного<br>несущего винта .....                                 | 47 |
| 2.1.9  | Особенности авторотации реактивного<br>вертолета .....                                        | 50 |
| 2.1.10 | Кинетическая энергия реактивного ротора .....                                                 | 51 |
| 2.1.11 | Взлет прыжком .....                                                                           | 53 |
| 2.1.12 | Потеря тяги несущего винта вертолета<br>на обдувку фюзеляжа и хвостовой балки....             | 54 |
| 2.1.13 | Методика определения коэффициента тяги<br>для несущего винта реактивного вертолета .....      | 55 |
| 2.1.14 | Затраты мощности на путевое управление<br>и привод агрегатов реактивного вертолета .....      | 56 |
| 2.1.15 | Выводы .....                                                                                  | 57 |
| 2.2    | Особенности нагрузок на несущем винте.<br>Управление реактивным вертолетом .....              | 58 |
| 2.2.1  | Изгибающий момент в плоскости вращения .....                                                  | 59 |
| 2.2.2  | Увеличение напряжения свеса .....                                                             | 59 |
| 2.2.3  | Новая форма изгибающего момента .....                                                         | 60 |
| 2.2.4  | Уменьшение маховых движений<br>в плоскости тяги и увеличение их<br>в плоскости вращения ..... | 60 |
| 2.2.5  | Изменения маховых движений лопастей<br>по скорости.....                                       | 61 |
| 2.2.6  | Аэродинамический и массовый моменты<br>на лопасти реактивного винта.....                      | 62 |

|        |                                                                                                                         |    |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.7  | Гироскопический момент от ротора двигателя.....                                                                         | 64 |
| 2.2.8  | Результаты продувок макетов лопастей вертолета В-7 с совмещенными горизонтальными шарнирами втулки несущего винта ..... | 66 |
| 2.2.9  | Результаты продувок макетов лопастей вертолета В-7 с разнесенными горизонтальными шарнирами втулки несущего винта ..... | 68 |
| 2.2.10 | Анализ нагрузок карданного несущего винта вертолета В-7 .....                                                           | 68 |
| 2.2.11 | Влияние разности тяг двигателей на вибрации реактивного вертолета .....                                                 | 70 |
| 2.2.12 | Выводы .....                                                                                                            | 72 |
| 2.3    | Весовой расчет несущего винта.....                                                                                      | 72 |
| 2.3.1  | Статический расчет лопасти с грузом на конце .....                                                                      | 72 |
| 2.3.2  | Расчет напряжений от веса и статического прогиба .....                                                                  | 74 |
| 2.3.3  | Вес реактивного несущего винта.....                                                                                     | 77 |
| 2.3.4  | Анализ графиков .....                                                                                                   | 79 |
| 2.3.5  | Перспектива снижения веса реактивного несущего винта .....                                                              | 82 |
| 2.3.6  | Оптимальный тяжелый реактивный вертолет с взлетным весом 780 кН.....                                                    | 83 |
| 2.3.7  | Относительный вес статора реактивного вертолета.....                                                                    | 84 |

|                                                                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Глава 3. Особенности турбореактивных двигателей на концах лопастей несущего винта вертолета</b>                         | <b>86</b> |
| 3.1 Краткое обоснование выбора типа силовой установки .....                                                                | 86        |
| 3.2 Постоянные нагрузки, действующие на турбореактивный двигатель, установленный на лопасти несущего винта вертолета ..... | 87        |

|       |                                                                                                                  |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 | Центробежная перегрузка .....                                                                                    | 87  |
| 3.2.2 | Гироскопический момент .....                                                                                     | 88  |
| 3.2.3 | Способы снижения гироскопического<br>момента турбореактивного двигателя<br>на конце лопасти несущего винта ..... | 91  |
| 3.2.4 | Сила тяги двигателя .....                                                                                        | 93  |
| 3.2.5 | Огуречный момент .....                                                                                           | 94  |
| 3.3   | Переменные силы, действующие<br>на турбореактивные двигатели на концах<br>лопастей несущего винта .....          | 94  |
| 3.3.1 | Вертикальное переменное напряжение .....                                                                         | 95  |
| 3.3.2 | Радиальное переменное напряжение .....                                                                           | 96  |
| 3.3.3 | Кориолисово переменное напряжение .....                                                                          | 96  |
| 3.3.4 | Переменное напряжение от инерционных сил .....                                                                   | 97  |
| 3.3.5 | Выводы .....                                                                                                     | 98  |
| 3.4   | Анализ влияния лопастных сил на конструкцию<br>деталей турбореактивного двигателя .....                          | 99  |
| 3.4.1 | Лопатки компрессора и турбины .....                                                                              | 100 |
| 3.4.2 | Валы, фланцы и диски ротора .....                                                                                | 103 |
| 3.4.3 | Критические числа оборотов ротора .....                                                                          | 105 |
| 3.4.4 | Подшипники роторов .....                                                                                         | 106 |
| 3.4.5 | Неподвижные детали двигателя .....                                                                               | 107 |
| 3.4.6 | Расчет утяжеления турбореактивного<br>двигателя на лопастях несущего винта .....                                 | 108 |
| 3.4.7 | Выводы .....                                                                                                     | 109 |
| 3.5   | Особенности топливной системы .....                                                                              | 111 |
| 3.5.1 | Создание давления перед форсунками<br>турбореактивного двигателя столбом<br>топлива в трубопроводе лопасти ..... | 111 |
| 3.5.2 | Регулирование двигателя разрывным<br>столбом топлива в трубопроводе лопасти ...                                  | 113 |
| 3.5.3 | Переменное давление воздуха на входе<br>в двигатель в полете .....                                               | 115 |
| 3.5.4 | Топливная система реактивного<br>вертолета В-7 .....                                                             | 118 |

|       |                                                                                                                      |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.5 | Увеличение удельных расходов топлива двигателей АИ-7 и МД-3 .....                                                    | 119 |
| 3.5.6 | Выводы .....                                                                                                         | 120 |
| 3.6   | Особенности маслосистемы .....                                                                                       | 120 |
| 3.6.1 | Система смазки .....                                                                                                 | 120 |
| 3.6.2 | Маслорадиатор .....                                                                                                  | 123 |
| 3.6.3 | Потеря тяги двигателя на продувку маслорадиатора .....                                                               | 124 |
| 3.6.4 | Перспективная масляная система реактивного вертолета с турбореактивными двигателями на лопастях несущего винта ..... | 125 |
| 3.6.5 | Описание перспективной маслосистемы турбореактивных двигателей на лопастях несущего винта .....                      | 126 |
| 3.6.6 | Выводы .....                                                                                                         | 130 |
| 3.7   | Система запуска .....                                                                                                | 131 |
| 3.7.1 | Электрический запуск .....                                                                                           | 131 |
| 3.7.2 | Воздушный запуск .....                                                                                               | 131 |
| 3.7.3 | Выводы .....                                                                                                         | 133 |
| 3.8   | Особенности некоторых элементов силовой установки .....                                                              | 134 |
| 3.8.1 | Крепление двигателя АИ-7 .....                                                                                       | 134 |
| 3.8.2 | Мотогондола .....                                                                                                    | 134 |
| 3.8.3 | Приборы контроля двигателя .....                                                                                     | 134 |

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 4. Расчет турбореактивного двигателя для лопастей несущего винта вертолета</b>                    | <b>136</b> |
| 4.1 Перспектива создания турбореактивных двигателей с малым удельным весом для реактивных вертолетов ..... | 136        |
| 4.2 Логика выбора рабочей и взлетной тяги двигателей реактивного вертолета .....                           | 140        |
| 4.3 Выбор конструктивных и газодинамических параметров турбореактивных двухконтурных двигателей .....      | 141        |

|       |                                                                                                                                                    |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4   | Четырехлопастный тяжелый реактивный вертолет с двухконтурными турбореактивными двигателями на лопастях.....                                        | 143 |
| 4.4.1 | Заданные требования.....                                                                                                                           | 143 |
| 4.4.2 | Расчет параметров реактивного вертолета-крана при $T_n = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $H = 0$ ...                                                 | 143 |
| 4.4.3 | Расчет параметров реактивного транспортного вертолета при $T_n = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $H = 0$ .....                                       | 146 |
| 4.4.4 | Расчет параметров вертолета при нормальных атмосферных условиях $T_n = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $H = 0$ .....                                 | 148 |
| 4.5   | Пересчет аэродинамической характеристики трансмиссионного вертолета на аэродинамическую характеристику реактивного вертолета.....                  | 148 |
| 4.6   | Расчет основных данных тяжелых реактивных вертолетов, спроектированных на базе лопасти четырехлопастного тяжелого трансмиссионного вертолета ..... | 150 |
| 4.6.1 | Четырехлопастный реактивный вертолет...                                                                                                            | 150 |
| 4.6.2 | Двухлопастный реактивный вертолет .....                                                                                                            | 152 |
| 4.6.3 | Шестилопастный реактивный вертолет .....                                                                                                           | 153 |
| 4.7   | Расчет коэффициентов экономичности и продолжительности полета трансмиссионных вертолетов.....                                                      | 155 |
| 4.7.1 | Вертолет Ми-26 .....                                                                                                                               | 155 |
| 4.7.2 | Вертолет Ми-8АМТ.....                                                                                                                              | 155 |
| 4.8   | Оптимальный тяжелый реактивный вертолет с взлетным весом 780 кН .....                                                                              | 156 |
| 4.9   | Выводы .....                                                                                                                                       | 158 |

## Глава 5. Реактивные вертолеты

|                                                                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>с импульсно-детонационными реактивными двигателями на концах лопастей несущего винта</b>                                                                           | <b>161</b> |
| 5.1 Введение .....                                                                                                                                                    | 161        |
| 5.2 Принцип работы импульсно-детонационного двигателя (модуля) .....                                                                                                  | 165        |
| 5.3 Реактивный двухлопастный вертолет с одним импульсно-детонационным модулем на лопасти несущего винта .....                                                         | 174        |
| 5.4 Реактивный двухлопастный вертолет с блоком из двух импульсно-детонационных модулей на лопасти несущего винта .....                                                | 177        |
| 5.5 Реактивный шестилопастный вертолет МИ-8Р с блоком из четырех импульсно-детонационных модулей на каждой лопасти несущего винта .....                               | 181        |
| 5.6 Расчет реактивного восьмилопастного вертолета МИ-26Р с взлетным весом 550 кН с блоком импульсно-детонационных двигателей на каждой лопасти несущего винта .....   | 185        |
| 5.7 Расчет реактивного восьмилопастного тяжелого вертолета с взлетным весом 735 кН с блоком импульсно-детонационных двигателей на каждой лопасти несущего винта ..... | 189        |

## Глава 6. Расчет реактивного вертолета

|                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>с прямоточными воздушно-реактивными двигателями на концах лопастей несущего винта</b> | <b>193</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

## Глава 7. Расчет реактивного вертолета

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>с жидкостными ракетными двигателями на концах лопастей несущего винта</b>                 | <b>198</b> |
| 7.1 Реактивный вертолет с жидкостным ракетным двигателем тягой 200 Н на каждой лопасти ..... | 199        |
| 7.2 Реактивный вертолет с жидкостным ракетным двигателем тягой 500 Н на каждой лопасти ..... | 201        |
| 7.3 Выводы .....                                                                             | 204        |

|                                                                                                                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 8. Коэффициенты полезного действия<br/>трансмиссионных и реактивных силовых<br/>установок вертолетов</b>                                                                           | <b>205</b> |
| 8.1 Коэффициент полезного действия<br>трансмиссионной силовой установки .....                                                                                                               | 205        |
| 8.2 Коэффициент полезного действия реактивной<br>силовой установки с турбореактивными<br>двигателями на лопастях несущего винта.....                                                        | 206        |
| 8.3 Коэффициент полезного действия реактивной<br>силовой установки с импульсно-детонационными<br>двигателями на лопастях тяжелого вертолета<br>с взлетным весом 590 кН .....                | 207        |
| 8.4 Коэффициент полезного действия реактивной<br>силовой установки с прямоточными реактивными<br>двигателями на лопастях легкого вертолета.....                                             | 207        |
| 8.5 Коэффициент полезного действия реактивной<br>силовой установки с жидкостными ракетными<br>двигателями на лопастях вертолета .....                                                       | 208        |
| 8.6 Вывод .....                                                                                                                                                                             | 208        |
| <b>Глава 9. Оценка влияния конструкции вертолета<br/>на стоимость нормо-часа полета</b>                                                                                                     | <b>209</b> |
| <b>Глава 10. Удельные и экономические параметры<br/>вертолетов с трансмиссионной силовой<br/>установкой и реактивными приводами<br/>несущего винта с двигателями на концах<br/>лопастей</b> | <b>211</b> |
| <b>Заключение</b>                                                                                                                                                                           | <b>213</b> |
| <b>Приложение 1. Распространение выхлопных<br/>газов турбореактивного двигателя на лопасти<br/>несущего винта</b>                                                                           | <b>216</b> |
| П1.1 Расчет траектории выхлопных газов .....                                                                                                                                                | 216        |
| П1.2 Реальное распространение выхлопной струи газа                                                                                                                                          | 218        |
| П1.3 Изменение температуры газа в выхлопной струе                                                                                                                                           | 221        |

|                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| П1.4 Примеры расчета расстояния и избыточной температуры газа на краю выхлопной струи у входа в двигатель ..... | 222 |
| П1.5 Выводы .....                                                                                               | 225 |

## **Приложение 2. Сравнение уровней шумов**

|                                                                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>тяжелого реактивного вертолета</b>                                                                                                                      |            |
| <b>с трансмиссионным вертолетом</b>                                                                                                                        | <b>226</b> |
| П2.1 Методика расчета .....                                                                                                                                | 226        |
| П2.2 Расчет уровня шума от реактивного вертолета с турбореактивными двигателями на концах лопастей .....                                                   | 228        |
| П2.3 Расчет уровня шума от реактивного вертолета с турбореактивными двухконтурными двигателями на лопастях несущего винта с форсажем второго контура ..... | 229        |
| П2.4 Расчет уровня шума от вертолета Ми-6 .....                                                                                                            | 231        |
| П2.5 Расчет уровня шума трансмиссионного вертолета поперечной схемы с перспективными двигателями (типа В-12М) .....                                        | 233        |
| П2.6 Выводы .....                                                                                                                                          | 235        |

|                   |            |
|-------------------|------------|
| <b>Литература</b> | <b>236</b> |
|-------------------|------------|