

И.А. Биргер

Авиационные поршневые двигатели
Кинематика, динамика и расчет на прочность

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 030
ББК 92
И11

И11 **И.А. Биргер**
Авиационные поршневые двигатели. Кинематика, динамика и расчет на прочность / И.А. Биргер – М.: Книга по Требо-
ванию, 2023. – 876 с.

ISBN 978-5-458-29696-0

Пособие для инженеров.

ISBN 978-5-458-29696-0

© Издание на русском языке, оформление
«УОУО Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1

КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА КРИВОШИПНО-ШАТУННЫХ МЕХАНИЗМОВ УРАВНОВЕШИВАНИЕ СИЛ ИНЕРЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кинематика кривошипно-шатунных механизмов	110000
Кинематика нормального кривошипно-шатунного механизма	111000
Кинематика кривошипно-шатунного механизма с прицепным шатуном. Случай, когда $\gamma_1 = \gamma$	112000
Кинематика кривошипно-шатунного механизма с прицепным шатуном. Случай, когда $\gamma_1 \neq \gamma$	113000
Силы, действующие в кривошипно-шатунных механизмах	120000
Силы от инерции двигающихся масс кривошипно-шатунного механизма	121000
Силы от рабочих газов в цилиндрах двигателя	122000
Суммарные силы от газов и инерции двигающихся масс, действующие в кривошипно-шатунном механизме двигателя	123000
Уравновешивание сил инерции авиационных двигателей	130000
Силы, вызывающие неуравновешенность авиационного двигателя	131000
Общие условия уравновешенности сил инерции авиационного двигателя	132000
Уравновешивание сил инерции вращающихся масс авиационного двигателя	133000
Уравновешивание сил инерции поступательно двигающихся масс авиационного двигателя	134000
Уравновешивание сил инерции двигателей различных типов	135000
Влияние крутильных колебаний системы коленчатого вала на уравновешенность двигателя	136000
Литература и источники к 100000.	

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЧАСТИ 1

ТАБЛИЦЫ ДЛЯ ПОДСЧЕТА КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ НОРМАЛЬНОГО КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА

<i>Таблица 1.</i> Угловые скорости коленчатого вала ω и их квадраты ω^2 .	
<i>Таблица 2.</i> Величины $\sin \alpha$, $\cos \alpha$, $\sin 2\alpha$, $\cos 2\alpha$, $\sin 3\alpha$, $\cos 3\alpha$, $\sin 4\alpha$, $\cos 4\alpha$ при изменении α от 0 до 360°.	
<i>Таблица 3.</i> Углы β°	в зависимости от α и λ .
<i>Таблица 4.</i> Сумма углов $(\alpha + \beta)$	» » » α и λ .
<i>Таблица 5.</i> Величины $\cos \beta$	» » » α и λ .
<i>Таблица 6.</i> Величины $\tg \beta$	» » » α и λ .
<i>Таблица 7.</i> Величины $\frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta}$	» » » α и λ .

Таблица 8. Величины $\frac{\cos(\alpha+\beta)}{\cos\beta}$ в зависимости от α и λ .

Таблица 9. Значения $\frac{S_p}{R}$ для определения путей поршня.

Таблица 10. Значения $\frac{j_p}{R\omega^2}$ для определения ускорений поршня.

Таблица 11. Значения $\frac{T_j}{M_{II} R \omega^2}$ для определения тангенциальных сил T_j от инерции поступательно двигающихся масс.

Таблица 12. Значения $\frac{\omega L}{\omega}$ для определения угловых скоростей шатуна.

Часть 2

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Прочность материала и определение запасов	210000
Напряжения и деформации	211000
Прочность, пластичность и упругость при статических напряжениях	212000
Прочность и долговечность при переменных напряжениях	213000
Прочность и пластичность при повышенных температурах	214000
Определение запасов прочности	215000
Данные для расчета запасов прочности	216000
Литература и источники к 210000.	
Расчет на прочность коленчатых валов	220000
Типичные поломки коленчатых валов	221000
Расчетные нагрузки	222000
Методы расчета коленчатых валов	223000
Номинальные напряжения в опасных точках коленчатых валов V-образных двигателей	224000
Номинальные напряжения в опасных точках коленчатых валов звездообразных двигателей	225000
Коэффициенты концентрации напряжений	226000
Определение запасов прочности	227000
Влияние колебаний системы коленчатого вала на его запасы прочности в V-образных и звездообразных двигателях	228000
Способы повышения прочности коленчатых валов конструктивными и технологическими средствами	229000
Литература и источники к 220000.	
Расчет на прочность шатунов	230000
Расчет поршневой головки шатуна	231000
Расчет стержня шатуна	232000
Расчет кривошипной головки шатуна	233000
Литература и источники к 230000.	
Расчет на прочность поршневого пальца	240000
Типичные поломки поршневого пальца	241000
Силовая схема и нагрузки, действующие на поршневой палец	242000
Поперечные деформации поршневого пальца	243000
Определение напряжений в поршневом пальце, возникающих от овализации поперечного сечения	244000

Определение напряжений в поршневом пальце от изгиба	245000
Определение касательных напряжений в поршневом пальце	246000
Выбор размеров поршневого пальца	247000
Мероприятия, повышающие прочность поршневого пальца	248000
Литература и источники к 240000.	
Расчет на прочность резьбовых соединений	250000
Типичные поломки резьбовых соединений	251000
Нагрузки на резьбовое соединение	252000
Совместное действие нагрузок	253000
Распределение нагрузки по виткам резьбы	254000
Прочность резьбовых соединений при статических нагрузках	255000
Прочность резьбовых соединений при переменных нагрузках	256000
Влияние конструктивных и технологических факторов на прочность резьбового соединения	257000
Затяжка резьбовых соединений	258000
Примеры расчета на прочность резьбовых соединений	259000
Литература и источники к 250000.	
Статические и динамические испытания деталей авиационных двигателей	260000
Статические испытания	261000
Динамические испытания	262000
Литература и источники к 260000.	

Часть 3

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА НА КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Расчет эквивалентной системы вала	310000
Расчет жесткостей эквивалентной системы	311000
Расчет моментов инерции масс эквивалентной системы	312000
Приведение масс и жесткостей, связанных с валом двигателя передачей	313000
Составление эквивалентной схемы	314000
Расчет чисел собственных колебаний системы	320000
Типичные эквивалентные системы и формы их колебаний	321000
Приближенная оценка чисел собственных колебаний	322000
Метод подбора	323000
Расчет вынужденных колебаний	330000
Силы, вызывающие крутильные колебания	331000
Силы, демпфирующие крутильные колебания	332000
Расчет вынужденных колебаний	333000
Оценка напряжений по форме колебаний при резонансных оборотах вала . .	340000
Определение резонансных оборотов	341000
Уравнение работ	342000
Определение коэффициента демпфирования для одного колена	343000
Определение напряжений по форме колебаний	344000
Расчет необходимых изменений системы и выбор демпфера	350000
Формулы изменения метода подбора	351000
Выбор демпфера	352000
Нелинейные системы	353000

Торсиографирование	360000
Проведение опыта	361000
Обработка торсиограмм	352000
Расчет напряжений по форме колебаний и результатам торсиографирования	363000
Примеры поломок валов от колебаний	364000
Расчет демпфера	370000
Расчет маятникового демпфера	371000
Определение частот собственных колебаний системы с маятниками	372000
Расчет роликового демпфера	373000
Расчет демпфера трения	374000
Расчет колебаний системы вал—винт	380000
Принцип расчета	381000
Определение динамической жесткости винта	382000
Определение динамической жесткости системы коленчатого вала двигателя	383000
Определение частот системы вал—винт	384000
Электрическое моделирование крутильных колебаний валов поршневых двигателей	390000
Литература и источники к 300 000.	

Часть 4

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Выбор осевых размеров	410000
Выбор диаметра горловины и высоты подъема клапана	411000
Фазы распределения	412000
Зазор в клапанном механизме	413000
Кинематика клапанных механизмов	420000
Скорости вращения кулачков распределительного механизма	421000
Кинематика толкателя, закон движения которого задан	422000
Построение профиля кулачка при заданном прямолинейном движении толкателя	423000
Построение профиля кулачка рычажных распределительных механизмов при заданном законе движения клапана	424000
Кинематика толкателя, приводимого в движение кулачком, очерченным дугами кругов и прямыми	425000
Кинематика клапана, приводимого в движение рычагом	426000
Кинематика профилированного дугой рычага, приводимого в движение кулачком, очерченным дугами кругов и прямыми	427000
Кинематика пространственного механизма распределения звездообразных двигателей	428000
Динамика клапанных механизмов	430000
Силы, действующие в клапанном механизме	431000
Силы и моменты, действующие в клапанном механизме, при передаче движения от кулачка к клапану через траверсу	432000
Силы и моменты, действующие в клапанном механизме, при непосредственной передаче движения от кулачка к клапану с плоской тарелкой	433000

Силы и моменты, действующие в клапанном механизме, при передаче движения от кулачка к клапану через рычаг, профилированный дугой	434000
Силы и моменты, действующие в клапанном механизме звездообразного двигателя	435000
Расчет на прочность	440000
Профиль кулачка	441000
Траверса и толкатель	442000
Клапан	443000
Рычаг клапана	444000
Оси роликов и рычагов	445000
Кронштейн рычагов	446000
Тяга	447000
Кулачковый вал	448000
Пружины	449000
Выбор основных кинематических параметров клапанных механизмов	450000
Общие положения для выбора кинематических параметров клапанных механизмов	451000
Выбор кинематических параметров рычажного распределительного механизма	452000
Наивыгоднейший профиль кулачка в отношении время-сечения и клапанных пружин при заданном их запасе сил	453000
Способы уменьшения величин ударных нагрузок в распределительном механизме	454000
Примерный расчет клапанного механизма авиационного двигателя Даймлер-Бенц 603	460000
Расчет шайбового распределительного механизма	470000
Литература и источники к 400000.	
Гильзовое газораспределение четырехтактных авиационных двигателей	480000
Общие положения к расчету гильзового газораспределения	481000
Кинематика и динамика гильзового механизма	482000
Определение основных размеров привода и окон гильзового газораспределения	483000
Уравновешивание сил инерции гильзового распределительного механизма	484000
Литература и источники к 480000.	

Часть 5

РАСЧЕТ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основные геометрические соотношения и корригирование зубчатых зацеплений, применяемых в авиационных двигателях	510000
Основные свойства и зависимости зубчатых зацеплений	511000
Основные свойства и зависимости эвольвентного зацепления	512000
Корригирование профилей зубьев цилиндрических прямозубых передач внешнего зацепления	513000
Цилиндрические прямозубые передачи внутреннего зацепления	514000
Подрезание вершинами головок зубьев долбяка профилей головок зубьев колеса, имеющего внутренний зубчатый венец	515000
Конические прямозубые передачи	516000
Литература и источники к 510000.	

От редакции.

Расчет прямозубых зубчатых колес на прочность и долговечность	520000
Определение расчетной нагрузки на зубья зубчатых колес	521000
Расчет на контактные напряжения	522000
Расчет зубьев на изгиб	523000
Расчет зубчатых колес на заедание	524000
Влияние конструкции зубчатой передачи на прочность и износостой-	
кость зубчатых колес	525000
Пример расчета зубчатой передачи	526000
Литература и источники к 520000.	
Расчет прямозубых зубчатых колес на прочность по сокращенному методу . .	530000
Расчетные нагрузки на зубья зубчатых колес	531000
Напряжения в зубьях зубчатых колес	532000
Особенности расчета на прочность конических зубчатых колес	533000
Пример расчета зубчатых колес	534000
Таблицы основных данных и расчетных величин зубчатых колес неко-	
торых авиационных двигателей	535000
Литература и источники к 530000.	

Часть 6

РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Основные понятия и положения	610000
Определение минимальной толщины масляного слоя в подшипнике	620000
Определение минимальной толщины масляного слоя в подшипнике при	
равномерно вращающейся нагрузке постоянной величины	621000
Определение минимальной толщины масляного слоя в подшипнике при	
переменной по величине нагрузке постоянного направления	622000
Определение момента и работы трения в подшипнике скольжения	630000
Определение момента трения в подшипнике скольжения	631000
Определение работы трения в подшипнике скольжения	632000
Охлаждение подшипника скольжения	640000
Простейшие случаи прокачки масла	641000
Рекомендуемые формулы для определения прокачки масла через под-	
шипник	642000
Тепловой баланс подшипника скольжения	643000
Метод расчета смазки подшипника скольжения	650000
Определение толщины масляного слоя	651000
Определение момента трения	652000
Определение температуры подшипника и прокачки масла	653000
Требования к конструкции подшипника скольжения и эксплуатационные	
 условия, обеспечивающие его надежную работу	660000
Литература и источники к 600000.	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Связанный с развитием конструкций авиационных двигателей рост литровой мощности, достигнутый увеличением наддува, числа оборотов и улучшением качества топлива, обусловил повышение напряженности важнейших деталей. Это повышение явилось результатом возрастания как основных сил газовых и инерционных, действующих на детали, так и сил, связанных с упругими колебаниями, причем габариты, удельный вес двигателя, а также его числа оборотов всегда ограничивали абсолютные размеры деталей. В то же время характеристики механической прочности применяемых сталей существенных изменений не претерпели, и поэтому обеспечение надежности деталей в условиях эксплуатации достигалось улучшением их формы, применением специальной упрочняющей технологии, усовершенствованием расчета и широким использованием экспериментальных данных о действительной прочности деталей и узлов.

Основными факторами, определяющими прочность силовых деталей двигателя, являются: переменный характер действующих напряжений, вызывающих усталость металла; общая неравномерность распределения напряжений и их концентрации, связанные с конструктивной формой детали; жесткости сопрягаемых деталей и узлов, влияющие на величину и распределение в частях двигателя внутренних усилий, обычно являющихся статически неопределимыми; технология обработки поверхностных слоев детали, позволяющая существенно изменять ее прочность, особенно в зонах концентрации напряжений.

В связи с этим расчет на прочность деталей двигателя потребовал существенной модернизации, которая должна предусматривать, в первую очередь, отображение влияния усталости, неравномерности распределения напряжений и технологических обработок, а также опытных данных о действительной прочности и жесткости деталей. Однако это усовершенствование расчета в настоящее время представляется возможным распространить лишь на часть важнейших силовых деталей (коленчатый вал, шатун, болты и шпильки).

Для многих деталей, за недостатком опытных данных и практики применения новых способов расчета, приходится пользоваться условным расчетом по номинальным напряжениям, руководствуясь величинами допускаемых напряжений и деформаций, вытекающими из статистики применения таких расчетов для однотипных деталей.

В связи с этим в настоящей работе, наряду с использованием методов определения запасов прочности, основывающихся на современных представлениях о влиянии режима напряженности, конструктивных и техно-

логических факторов на прочность, приведены также условные расчеты по допускаемым напряжениям.

Большое значение опытных данных о действительном распределении напряжений и сопротивляемости деталей усталости, для суждения об их прочности и предпосылках расчета, потребовало затронуть в настоящей книге в краткой форме вопросы методов статических и динамических испытаний деталей.

Расширение номенклатуры режимов использования авиационных поршневых двигателей и применение сильно форсированных режимов требует пересмотра исходных данных для расчета на прочность. Целесообразность проведения расчета применительно к параметрам чрезвычайных или боевых и повышенных чрезвычайных (с впрыском смесей внутреннего охлаждения) режимов зависит от общей длительности наработки на этих режимах и степени увеличения механической напряженности на них. Если напряженность на чрезвычайных режимах увеличивается более чем на 20% по сравнению с напряженностью на номинальном режиме и общая длительность наработки на них превышает 5 часов ($1 \div 2 \cdot 10^6$ циклов), то следует производить расчет на прочность авиационного двигателя на двух режимах: на номинальном и на чрезвычайном.

В последующих изданиях, по мере накопления соответствующих данных и опыта, расчет по допускаемым напряжениям будет заменен расчетом на переменные напряжения для деталей, не охваченных этим новым методом расчета в настоящем издании (например, расчет на прочность деталей распределительных механизмов).

В составлении книги принимали участие следующие авторы:

В. Н. Ширяев—часть 1.

С. В. Серенсен—разделы 210 000 и 260 000.

М. Я. Кушуль—раздел 220 000.

Н. К. Смольянинов—разделы 230 000 и 530 000 и соавтор части 4.

Т. А. Сыромятникова—раздел 240 000.

И. А. Биргер—раздел 250 000.

В. К. Житомирский—часть 3.

И. М. Тетельбаум—раздел 390 000.

Н. И. Дружинин—соавтор части 4.

И. А. Пугачев—раздел 510 000.

А. И. Петрусеви́ч—раздел 520 000.

С. Н. Куцаев—часть 6.

Редактором разделов, касающихся вопросов прочности (часть 2 и раздел 520 000), является действительный член АН УССР С. В. Серенсен.

Редактором разделов, касающихся вопросов кинематики и динамики (части 1, 3, 4, 6 и разделы 510 000 и 530 000), является доктор технических наук И. Ш. Нейман.

ЧАСТЬ 1

**КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА
КРИВОШИПНО-ШАТУННЫХ МЕХАНИЗМОВ
УРАВНОВЕШИВАНИЕ СИЛ ИНЕРЦИИ
АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

