

Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок

Под общей редакцией М.И. Осипова

*Допущено УМО по образованию в области энергетики и электротехники
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
«Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели»
направления подготовки «Энергомашиностроение»*



Москва 2009

УДК 621.438:539.4
ББК 31.363-02
К65

Издание учебника осуществлено при финансовой поддержке
ФГУП «ММПП «Салют»

Авторы:

Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев

Рецензенты:

зав. кафедрой транспортных газотурбинных двигателей Московского государственного
технического университета «МАМИ», д-р техн. наук, проф. *Ю. С. Кустарев*;
зав. кафедрой паровых и газовых турбин Московского энергетического института
(технического университета), д-р техн. наук, проф. *В. Г. Грибин*

**Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных
и комбинированных установок :** учебник / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов,
Э. А. Манушин, И. Г. Суровцев ; под общ. ред. М. И. Осипова. — М. :
Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 519, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3233-2

В учебнике, который написан на основе учебного пособия, вышедшего под тем же названием в издательстве «Машиностроение» в 1990 г. под редакцией профессора Н. Н. Малинина, изложены основы конструирования и расчета на прочность основных деталей и узлов компрессоров, паровых и газовых турбин газотурбинных и комбинированных установок различного назначения. Рассмотрены условия работы деталей и узлов, требования к конструкциям, их особенности, подходы к выбору материалов, перспективные конструкции и материалы для них, современные методы расчета на статическую и динамическую прочность.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н. Э. Баумана и других российских университетах при подготовке бакалавров, магистров и инженеров.

Для студентов высших учебных заведений энергомашиностроительных специальностей. Может быть полезен аспирантам, инженерам и научным работникам.

УДК 621.438:539.4
ББК 31.363-02

ISBN 978-5-7038-3233-2

© Осипов М. И., 2009
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Список основных условных обозначений	7
Список основных сокращений	9
Введение	10
1. Особенности конструкций и условий работы основных узлов и деталей турбомашин	19
1.1. Типовые конструктивные схемы стационарных и транспортных турбомашин	19
1.2. Силы и моменты, действующие на элементы	27
1.3. Условия работы деталей	30
1.4. Особенности прочностных расчетов деталей ГТУ	33
2. Конструкция и статическая прочность неохлаждаемых лопаток	44
2.1. Рабочие и направляющие лопатки осевых компрессоров и турбин	44
2.2. Силы и моменты, действующие в поперечных сечениях профильной части лопатки	54
2.3. Напряжения и деформации в профильной части лопатки	67
2.4. Расчет бандажных полок и замков лопаток	82
2.5. Расчет лопаток с большой начальной закруткой	88
2.6. Конструктивные схемы ветротурбин и особенности их расчета	94
3. Конструкция и статическая прочность охлаждаемых лопаток газовых турбин	111
3.1. Особенности конструкций охлаждаемых турбин	112
3.2. Конструкции охлаждаемых лопаток	128
3.3. Напряженно-деформированное состояние охлаждаемых лопаток	158
4. Конструкция и статическая прочность дисков, барабанов и валов турбомашин	187
4.1. Типовые конструкции роторов	187
4.2. Расчет напряженно-деформированного состояния дисков на основе теории пластин и оболочек	210
4.3. Расчет дисков на ползучесть	248
4.4. Расчет посадок дисков на валы	256
4.5. Расчет на прочность роторов барабанного типа	263
4.6. Запасы прочности дисков и барабанов компрессоров и турбин	268
4.7. Особенности расчета на прочность валов турбомашин	276
5. Колебания лопаток и дисков турбомашин	282
5.1. Причины возбуждения колебаний лопаток и дисков. Формы колебаний	282
5.2. Собственные колебания лопаток	289
5.3. Напряжения в лопатках при резонансных колебаниях и способы их уменьшения	305
5.4. Веерные колебания дисков	313
6. Определение критической угловой скорости роторов	323
6.1. Понятие о критической угловой скорости вала	323
6.2. Влияние гироскопического момента диска на критическую угловую скорость	330
6.3. Влияние сил сопротивления и упругости опор	334
6.4. Приближенные методы определения критической угловой скорости вала с несколькими дисками	337
6.5. Меры предупреждения резонансных колебаний роторов	344

7. Конструкция и расчет корпусов турбомашин	348
7.1. Конструктивные особенности корпусов паровых турбин	348
7.2. Конструктивные особенности корпусов компрессоров	360
7.3. Конструктивные особенности корпусов газовых турбин	368
7.4. Расчет корпусов турбомашин на прочность	378
8. Конструирование и расчет опор роторов турбомашин	391
8.1. Расчет и конструирование опор с подшипниками скольжения	392
8.2. Расчет и конструирование опор с подшипниками качения	406
8.3. Электромагнитные опоры турбомашин	429
8.4. Газовые опоры турбомашин	443
9. Материалы деталей компрессоров и турбин	457
9.1. Металлы, сплавы и композиционные материалы деталей компрессоров	459
9.2. Металлы, сплавы и композиционные материалы деталей газовых турбин	475
9.3. Материалы деталей паровых турбин	495
9.4. Конструкционные керамические материалы деталей компрессоров и турбин	503
Литература	512
Предметный указатель	514

*Посвящается 60-летию
кафедры «Турбостроение» МГТУ им. Н. Э. Баумана
и 110-летию со дня рождения ее основателя профессора В. В. Уварова*

Предисловие

Одной из актуальных проблем, связанных с прогрессом в современном энергомашиностроении, является обеспечение прочности и надежности деталей и узлов турбомашин — компрессоров, паровых и газовых турбин, а также ветротурбин — при снижении их массы и материалоемкости. Эта проблема неразрывно связана с разработкой прогрессивных конструкций турбомашин на основе использования последних достижений науки и техники: новых методов расчета и конструирования, высокопрочных материалов и прогрессивной технологии.

Характерным для всех типов энергетических установок, включающих турбомашин, является существенное повышение параметров (температуры и давления) рабочей среды при удлинении срока их службы и повышении надежности. Такая тенденция объясняется, прежде всего, широким использованием опыта конструирования турбомашин, а также достижениями в разработке новых высокопрочных материалов. При выборе материалов для деталей и узлов турбомашин должны учитываться напряжения, рабочая температура, условия эксплуатации, срок службы, запасы прочности, перспективы применения новых композиционных и керамических материалов, а также технологические особенности материалов, оказывающие существенное влияние на формообразование заготовок.

Особенностью создания конструкций современных турбомашин является связь конструирования с газодинамическими, тепловыми и прочностными расчетами. Конструктор должен хорошо знать теоретические основы и практические методы расчетов.

В учебниках, учебных пособиях и других литературных источниках достаточно полно представлен материал по газовой динамике и теплопередаче. Поэтому в настоящем учебнике рассмотрены вопросы, непосредственно связанные с конструированием и прочностными расчетами узлов и деталей турбомашин стационарных и транспортных газотурбинных и комбинированных установок (ГТ и КУ) (лопаток, дисков, валов, роторов и корпусов и их элементов) с учетом условий их работы. Приведены методы расчета на прочность и колебаний лопаток, дисков, валов и других деталей турбомашин; конкретные методики расчетов представлены в виде, удобном для вычислений на ЭВМ.

Данная книга представляет собой дополненное и частично переработанное издание учебного пособия с таким же названием (авторы Э. А. Манушин и И. Г. Суворцев), вышедшего в 1990 г. под редакцией известного ученого в области прочности турбомашин и ползучести материалов профессора Н. Н. Малинина, чье учебное пособие «Прочность турбомашин» (1962) долгое время служило настольной книгой для многих поколений турбинистов. Авторы глубоко ему благодарны.

При написании данного учебника авторы учли большой опыт, накопленный отечественными и зарубежными научно-исследовательскими учреждениями и промышленными предприятиями по конструированию и расчету на прочность ГТ и КУ различных типов. При этом они учли достижения передовой отрасли — авиадвигателестроения, которыми определяется прогресс в создании энергетических и приводных установок и двигателей.

Многие методы расчета на прочность элементов и узлов турбомашин ГТ и КУ давно стали классическими и широко используются. В данном учебнике отдается предпочтение именно таким методам, которые позволяют не только выявить сущность явлений и привести к достаточно точным количественным результатам, но и судить о работоспособности созданной конструкции.

В настоящем учебнике по сравнению с учебным пособием 1990 г. отражены большие достижения в разработке новых материалов для деталей и узлов турбомашин, новых способов изготовления деталей, в первую очередь лопаток и дисков высокотемпературных газовых турбин, полученные за последние 20 лет. В связи с этим существенно перестроена глава, посвященная выбору материалов для деталей турбомашин. В последние десятилетия значительно расширилось производство комбинированных парогазовых энергетических установок, конструкции которых продолжают совершенствоваться, поэтому в книге значительно большее внимание уделено особенностям конструирования и расчета деталей паровых турбин. Широкое применение в турбомашинах находят электромагнитные и газовые опоры. Наконец, повышенное внимание, которое уделяется развитию ветроэнергетики и в мире и в России, заставило авторов включить раздел о турбинных установках, работающих на энергии ветра. Кроме того, практически все главы учебника претерпели те или иные содержательные и редакционные изменения. В частности, из соответствующих глав исключены алгоритмы расчетов, которые в свое время были полезны для программирования на ЭВМ, но в настоящее время устарели.

Книга издается в период перехода высшего профессионального образования России к многоуровневой системе — к подготовке специалистов, бакалавров и магистров. При этом нет необходимости выпускать учебники и учебные пособия отдельно для каждого уровня подготовки — они должны быть такими, в которых каждый студент под руководством преподавателя мог бы при изучении предмета найти для себя материал, соответствующий выбранному уровню подготовки. По мнению авторов, структура и содержание учебника в полной мере удовлетворяют этому условию.

Данный учебник продолжает серию учебных пособий по курсам газотурбинных и комбинированных установок, а также энергоустановок, использующих возобновляемые источники энергии, кафедры Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, создателем которой был профессор В. В. Уваров. Научно-инженерная школа этой кафедры — одна из ведущих в энергомашиностроении страны. Учебник стоит в ряду других, в частности, учебников «Газовая динамика» (1997), «Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок» (2000), «Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок» (2004).

Список основных условных обозначений

A	— площадь, м^2
b	— хорда лопатки, м; ширина, м
C	— коэффициент жесткости, Н/м
c	— линейная скорость, м/с
c_p	— удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К)
d	— диаметр, м
E	— модуль упругости, Па
E_k	— кинетическая энергия, Дж
E_p	— потенциальная энергия, Дж
f	— собственная угловая частота колебаний
G	— расход, кг/с; модуль сдвига, Па
g	— ускорение свободного падения, м/с^2
I	— момент инерции массы, кг/м^2
I_a	— осевой момент площади плоской фигуры, м^4
I_p	— полярный момент площади плоской фигуры, м^4
I_{xy}	— инерционный момент площади плоской фигуры, м^4
L	— момент количества движения (момент импульса) , $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}$; логарифмический декремент колебаний
l	— длина, м
M	— момент силы, Н·м
m	— масса, кг
N	— мощность, Вт
n	— частота вращения, с^{-1}
n_N	— запас долговечности
n_σ	— запас прочности
P	— инерционная сила, Н
P_a	— осевая сила, Н
p	— давление, Па
Q	— поперечная сила, Н; количество теплоты, Вт
q	— интенсивность распределенной нагрузки, Н/м
r	— радиус, м
T	— температура, К
t	— время, с
u	— окружная скорость, м/с; координата, м