

УДК 621.4-536.27

Х. С. ГУМЕРОВ, Т. Р. КАРИМОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ АВИАЦИОННОГО ГТД С СИСТЕМОЙ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Рассматривается проблема внедрения энергетических установок на основе авиационных газотурбинных двигателей в качестве ГТУ-ТЭЦ при реконструкции действующих котельных и развитии существующих паросиловых электростанций, при давлениях природного газа в сети газоснабжения более низком, чем давление воздуха и продуктов сгорания в камере сгорания установки. Предложена математическая модель рабочего процесса энергоустановки с учётом схемных особенностей системы газоснабжения, в том числе и содержащей газодожимной компрессор. Приведены результаты численного исследования для газотурбинной установки ГТЭ-10/95. *Газотурбинные двигатели; энергетические установки; природный газ; система газоснабжения; математическая модель*

Энергетическая проблема в России обостряется с каждым годом. Общеизвестно, что значительная часть энергетических мощностей, используемых в энергетике, морально устарела, физически изношена, требует модернизации или замены. Для поддержания старых электростанций в работоспособном состоянии требуются значительные инвестиции, которые сравнимы с затратами на новое строительство. Установлено, что модернизация и замена машинного парка энергетического комплекса должны производиться с приоритетным развитием газотурбинных (ГТУ) и парогазовых (ПГУ) установок с комбинированной выработкой электрической энергии и теплоты. Целесообразность комбинированной выработки электричества и теплоты обусловлена экономией топлива при меньших капитальных затратах и существенно меньших сроках окупаемости оборудования [1–3]. Однако в области промышленного использования газотурбинных и парогазовых технологий Россия значительно отстала от передовых стран мира, так как до сих пор отсутствуют газовые турбины российского производства, удовлетворяющие требованиям энергетиков.

Разумным выходом из сложившейся ситуации является использование газотурбинных энергетических установок на основе авиационных двигателей. Авиационное двигателестроение обладает необходимым научно-техническим и производственным потенциалом, способно производить модернизирован-

ные авиационные двигатели в качестве источников механической, электрической и тепловой энергии в различных областях народного хозяйства.

Наибольший эффект в энергетике достигается при применении энергетических установок на основе авиационных газотурбинных двигателей в качестве ГТУ-ТЭЦ при реконструкции действующих котельных и развитии существующих паросиловых электростанций, расположенных на территории городов, поселков и промышленных предприятий и обеспечивающих комбинированную выработку электрической и тепловой энергии с высоким коэффициентом использования топлива [4, 5]. Основным видом топлива является природный газ, применение которого позволяет удовлетворять жёстким экологическим требованиям и приблизить энергетические установки к потребителю, за счёт чего удаётся сократить потери энергии при её транспортировке. Наряду с этим проектирование, строительство и реконструкция систем газоснабжения газотурбинных и парогазовых установок, сооружаемых на территории населённых пунктов, регламентируется нормативной документацией, согласно которой газопроводы систем газоснабжения подразделяются на:

- газопроводы высокого давления I категории — при избыточном рабочем давлении газа свыше 0,6 МПа (6 кгс/см²) до 1,2 МПа (12 кгс/см²) включительно;

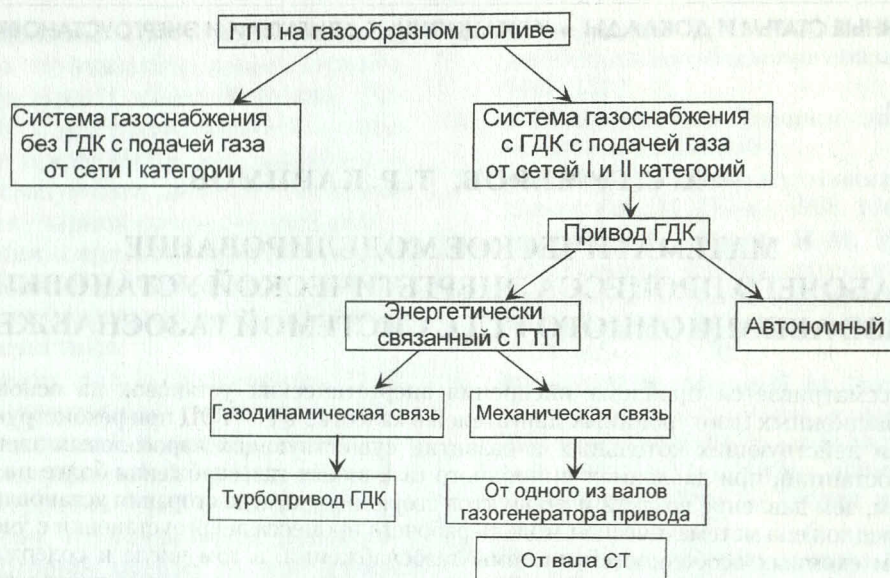


Рис. 1

• газопроводы высокого давления II категории — при избыточном рабочем давлении газа свыше $0,3 \text{ МПа}$ (3 кгс/см^2) до $0,6 \text{ МПа}$ (6 кгс/см^2).

Однако специфическая для энергетических установок проблема обеспечения работоспособности установки при использовании природного газа с избыточным давлением, не превышающим $1,2 \text{ МПа}$ (12 кгс/см^2), в литературе практически не рассматривается.

Таким образом, одна из основных проблем для энергетических установок на базе авиационных ГТД заключается в обеспечении работоспособности при давлении природного газа в сети газоснабжения, более низком, чем давление воздуха и продуктов сгорания в камере сгорания установки. Решение её возможно при установке в системе газоснабжения ГТУ газодожимного компрессора. В связи с изложенным, возникает необходимость оценки параметров и исследования особенностей режимов работы ГТУ с учётом характеристик системы газоснабжения, в том числе и содержащей газодожимный компрессор.

Системы газоснабжения газотурбинных приводов энергетических установок на базе авиационных ГТД можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся системы с подачей на вход в ГТУ природного газа непосредственно от сети. Область применения таких систем ограничена — это газотурбинные приводы со степенью повышения давления в компрессоре $\pi_K^* \leq 8,5$ при подаче газа от сети I категории. Вторая группа — системы газоснабжения с дожимным компрес-

сором. Такие системы следует рассматривать как основные, ибо только они могут обеспечить работу ГТУ с высоким уровнем π_K^* в сетях как I, так и II категорий. Классификация возможных систем газоснабжения газотурбинной установки приведена на рис. 1.

Схема системы газоснабжения с газодожимным компрессором, привод которого осуществляется на основе газодинамической связи с ГТП (турбопривод ГДК), показана на рис. 2. Привод ГДК осуществляется турбиной, которая работает на продуктах сгорания, отбираемых из газозоудного тракта ГТП перед силовой турбиной. Регулирование отбора выполняется управляемой заслонкой. Кинематическая связь приводной турбины с ГДК обеспечивается через редуктор.

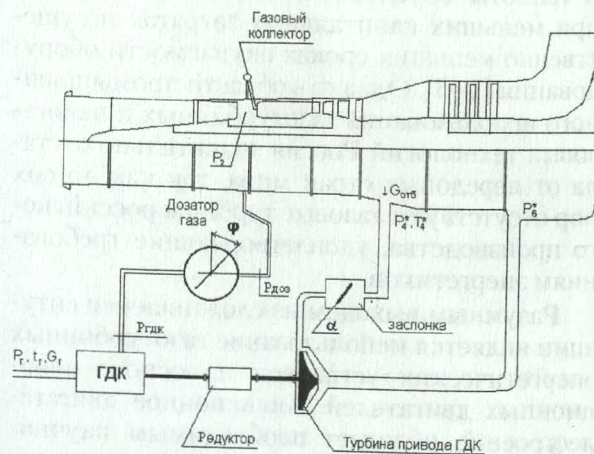


Рис. 2. Система газоснабжения с турбоприводом ГДК

Вариант схемы системы газоснабжения с газодожимным компрессором, привод которого осуществляется на основе механической связи с одним из валов ГТУ, показан на рис. 3.

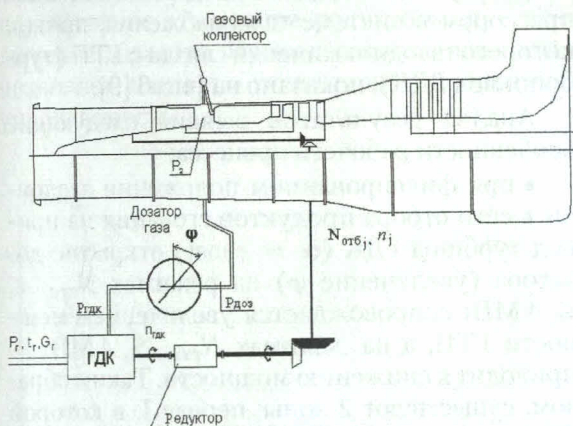


Рис. 3. Система газоснабжения с механическим приводом ГДК от вала ГТУ

Вариант схемы системы газоснабжения с автономным приводом газодожимного компрессора приведен на рис. 4. Таким источником может быть двигатель внутреннего сгорания или электродвигатель.

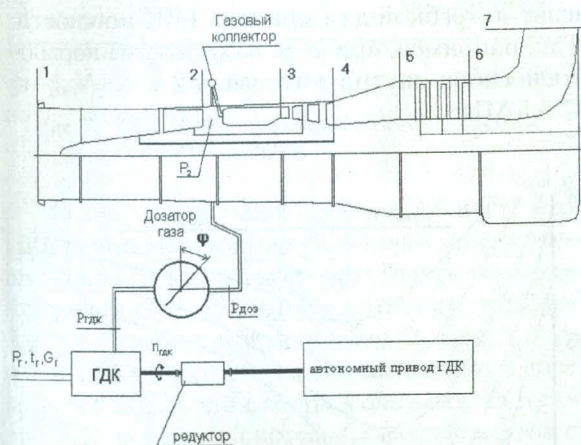


Рис. 4. Система газоснабжения с автономным приводом ГДК

Основными элементами системы дозирования, определяющими подачу природного газа в камеру сгорания газотурбинной установки, являются дозатор газа и коллектор подачи газа в камеру сгорания. Остальные агрегаты системы — кран запорный, кран обратный, отсечной клапан, задвижка клиновая — предназначены только для включения подачи газа при запуске и выключения при штатных или аварийных остановах. На основе анализа результатов опытно-промышленной эксплуатации газотурбинной установки ГТЭ-10/95

и экспериментальных продувок на воздухе агрегатов системы дозирования получены характеристики системы газоснабжения, которые приведены в [6].

Для расчёта и исследования рабочего процесса ГТУ на газовом топливе с учётом схемных особенностей системы газоснабжения разработана математическая модель, которая включает алгоритмы и реализующие их программы расчёта рабочего процесса ГТУ с системой газоснабжения на установившихся режимах. Разработка модели выполнена на основе принципов, сформулированных в работах Л. Н. Дружинина [7], А. П. Тунакова [8]. Модель имеет блочную структуру, иерархическое построение и трёхуровневое построение вычислительного процесса. Первый уровень — расчёт параметров ГТУ при заданных внешних условиях на основе определяющей системы уравнений, второй уровень — расчёт параметров системы газоснабжения и третий уровень — согласование параметров рабочего процесса ГТУ и системы газоснабжения с применением итерационных циклов. Такой способ построения модели позволяет использовать в её составе существующие и широко применяемые программы расчёта параметров газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. В рассматриваемой математической модели на первом уровне вычислительного процесса для расчёта параметров ГТУ используется программный комплекс «ГРАД», который разработан в Казанском авиационном институте под руководством проф. А. П. Тунакова.

Программная реализация выполнена на языке программирования Паскаль в программной среде Turbo Pascal фирмы Borland International.

По разработанной программе проведено исследование рабочего процесса газотурбинной установки ГТЭ-10/95, созданной на базе конвертированного двухвального авиационного двигателя Р95Ш, с различными вариантами системы газоснабжения. Основные параметры установки в условиях ISO на режиме максимальной мощности на валу силовой турбины $N_{ГТП} = 10$ МВт: КПД на валу силовой турбины $\eta_{ГТП} = 27,8\%$, расход воздуха $G_B = 58,4$ кг/с, степень повышения давления в компрессоре $\pi_K^* = 8,35$, температура газового потока перед турбиной газогенератора $T_3^* = 1093$ К, температура за силовой турбиной $T^* = 693$ К.

Результаты моделирования работы газотурбинной установки с подачей газа от се-

ти представлены на рис. 5, где в качестве аргумента принята величина пропускной способности дозатора a , а параметром является абсолютное давление газа на входе в систему газоснабжения. Как следует из данных рис. 5, при работе установки с абсолютным давлением газа 0,392 ... 0,686 МПа (сеть II категории) прирост мощности установки при увеличении пропускной способности дозатора незначителен и обеспечить работу установки с $N_{ГТП} > 5$ МВт за счёт повышения пропускной способности дозатора невозможно.

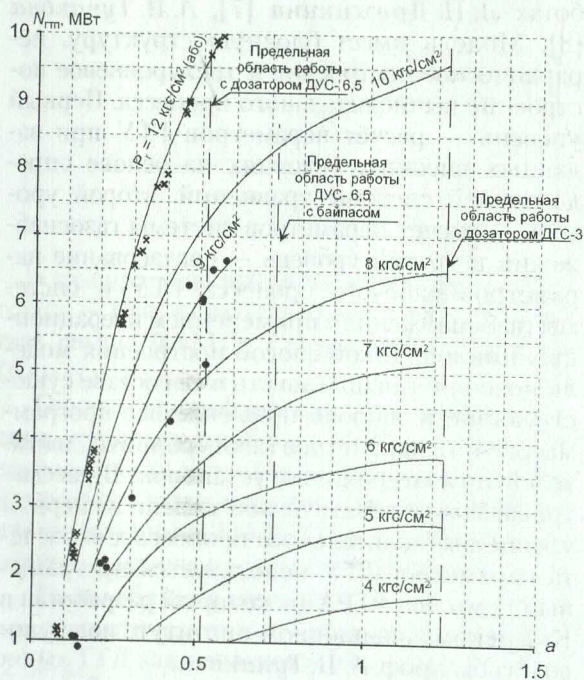


Рис. 5. Влияние пропускной способности дозатора на режимы работы ГТЭ-10/95: — расчет по математической модели; x — испытания при давлении газа $P_r \sim 12$ кгс/см²; • — испытания при давлении газа $P_r \sim 8,9$ кгс/см²

С повышением абсолютного давления газа до уровня, соответствующего сетям I категории 0,686 ... 1,275 МПа, влияние пропускной способности дозатора на мощность становится более значительным. Таким образом, графическое представление результатов моделирования в виде рис. 5 позволяет устанавливать требования к пропускной способности и характеристике дозатора, исходя из режимов нагружения установки и уровня давления газа в сети.

Исследование рабочего процесса установки совместно с системой газоснабжения, содержащей газодожимной компрессор, выполнено при абсолютном давлении газа на входе в систему газоснабжения $P_r = 0,3923$ МПа, соответствующем минимальному значению,

разрешенному на территории населённых пунктов, температура газа принята равной $T_r = 293,15$ К.

Влияние управляющих воздействий φ и α на работу ГТЭ-10/95 с газодожимным компрессором в системе газоснабжения, привод которого газодинамически связан с ГТП (турбопривод ГДК), показано на рис. 6 [9].

Анализ результатов выявил следующие особенности рабочего процесса:

- при фиксированном положении заслонки в сети отбора продуктов сгорания на привод турбины ГДК ($\alpha = \text{const}$) открытие дозатора (увеличение φ) на режимах $N_{ГТП} \leq 4$ МВт сопровождается увеличением мощности ГТП, а на режимах $N_{ГТП} > 4$ МВт — приводит к снижению мощности. Таким образом, существуют 2 зоны: первая I, в которой $\frac{dN_{ГТП}}{d\varphi} > 0$, и система является управляемой, и вторая II, в которой управляемость системы нарушается, ибо $\frac{dN_{ГТП}}{d\varphi} < 0$;

- при полностью открытой заслонке отбора ($\alpha = 0$) и положениях дозатора $\varphi < 62,5\%$ существует область значений $N_{ГТП}$, где решения не находятся — система неработоспособна, так как расход и параметры отбираемого из тракта ГТП газового потока не обеспечивают потребной для привода ГДК мощности. Так, например, при $\varphi = 55\%$ система неработоспособна внутри интервала $2,4 \leq N_{ГТП} \leq 5,5$ МВт.

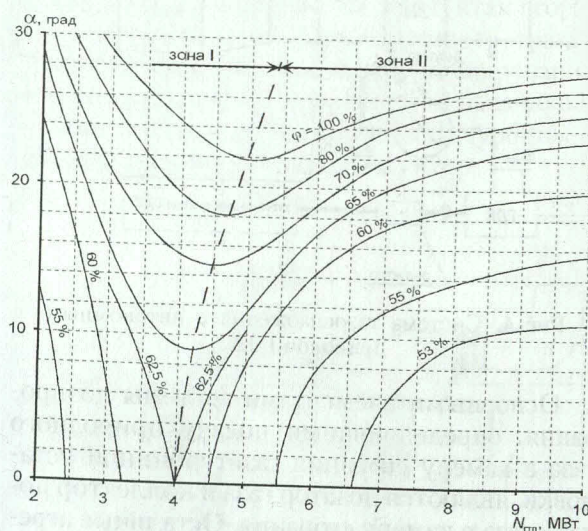


Рис. 6. ГТЭ-10/95 с турбоприводом ГДК

Разработанная математическая модель рабочего процесса ГТУ на базе авиационного ГТД с системой газоснабжения, содержащей турбоприводной газодожимной компрессор, позволяет выявлять режимы статической

неустойчивости и осуществлять поиск способов устранения статической неустойчивости.

Результаты расчёта с механическим приводом ГДК представлены на рис. 7 в виде зависимости $I = f(\varphi, N_{ГТП})$, где $I = \frac{n_j}{n_{ГДК}}$ — передаточное отношение редуктора, φ — положение дозатора. Приведённая зависимость позволяет наглядно сопоставить и оценить управляемость.

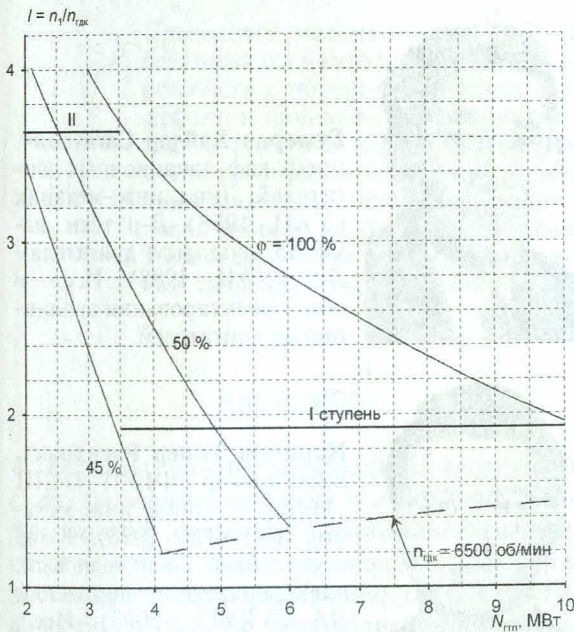


Рис. 7. ГТЭ-10/95 с механическим приводом ГДК

Из представленных данных следует, что управление мощностью установки может осуществляться как за счёт изменения положения дозатора φ , так и передаточного отношения редуктора с применением 2- или 3-ступенчатого редуктора (в зависимости от выбора ротора ГТУ для отбора мощности на привод ГДК). Схемы системы газоснабжения с газодожимным компрессором, привод которого осуществляется на основе механической связи с одним из валов энергетической установки, являются управляемыми. Это следует из характеристик $I = f(\varphi, N_{ГТП})$, показанных на рис. 7, где при $I = \text{const}$ величина $\frac{dN_{ГТП}}{d\varphi} > 0$.

Автономный привод не оказывает непосредственного влияния на рабочий процесс газотурбинной установки. Особенность схемы с автономным приводом ГДК проявляется в учёте затрат энергии при оценке коэффициента полезного действия ГТУ ($\eta_{ГТП}$), которая должна определяться по уравнению (1) при использовании в качестве привода газо-

дожимного компрессора двигателя внутреннего сгорания или по уравнению (2) — при использовании электродвигателя:

$$\eta_{ГТП} = \frac{N_{ГТП}}{G_{Г}Hu + N_{ГДК}q_eH_T}, \quad (1)$$

где $G_{Г}$ — массовый расход природного газа; Hu — низшая теплотворная способность топлива; $N_{ГДК}$ — мощность на привод газодожимного компрессора; q_e — удельный эффективный расход топлива двигателя внутреннего сгорания; H_T — низшая теплота сгорания для дизельного топлива.

$$\eta_{ГТП} = \frac{N_{ГТП} - N_{ГДК}/\eta_{эл}}{G_{Г}Hu}. \quad (2)$$

$\eta_{эл}$ — коэффициент полезного действия электродвигателя.

При работе ГТЭ-10/95 с системой газоснабжения, содержащей ГДК с энергопитанием от автономного источника — электрического двигателя или двигателя внутреннего сгорания, потребная степень повышения давления в газодожимном компрессоре — $\pi_{ГДК} \sim 3$ (при избыточном давлении газа на входе в систему газоснабжения установки $P_{Г} = 0,3 \text{ МПа}$), необходимая мощность силового агрегата $N_{ГДК} \sim 200 \text{ кВт}$. Снижение коэффициента полезного действия ГТЭ-10/95 в относительных величинах составляет 1,45 ... 1,61%.

Разработанная математическая модель и реализующая её программа позволяют обосновать выбор схемного решения по критериям функциональных характеристик и управляемости (статической устойчивости) на этапах проектирования и доводки газотурбинной установки на базе авиационного ГТД с различными вариантами системы газоснабжения. Результаты исследований и разработанная математическая модель внедрены на предприятии ФГУП «НПП „Мотор“» и используются при проектировании и доводке энергетической установки ГТЭ-10/95 на базе конвертированного авиационного ГТД типа Р95П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крайнов В. К., Салихов А. А.** Повышение эффективности энергопроизводства. Анализ и пути реализации // Теплоэнергетика. 1997. № 11. С. 26–30.
2. **Особов И. В., Особов В. И.** Инвестиционная привлекательность проектов газотурбинных и парогазовых энергетических установок // Газотурбинные технологии. 2000. № 1. С. 5–10.
3. **Хрилев Л. С., Смирнов И. А., Рафиков Л. Г., Хрилев И. Л.** Роль природного газа в развитии малой энергетики // Газовая промышленность. 1997. № 4. С. 67–70.
4. **Ольховский Г. Г.** Газотурбинные и парогазовые установки в России // Теплоэнергетика. 1999. № 1. С. 2–9.
5. **Фаворский О. Н.** Создание высокотехнологичных малоразмерных газотурбинных установок – путь развития энергетики России // Конверсия в машиностроении. 2000. № 5. С. 105–109.
6. **Гумеров Х. С., Каримов Т. Р.** Влияние характеристик системы дозирования на режимы работы газотурбинного привода энергетической установки ГТЭ–10/95 при подаче газа из газопровода с избыточным давлением до 1,2 МПа // Вопросы теории и расчёта рабочих процессов тепловых двигателей: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2003. № 20. С. 49–54.
7. **Теория двухконтурных турбореактивных двигателей** / Под ред. С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунова, Л. Н. Дружинина. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
8. **Тунаков А. П.** Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
9. **Каримов Т. Р.** Две схемы повышения давления в системе топливопитания энергетической установки с помощью приводного дожимного компрессора // Вопросы теории и расчёта рабочих процессов тепловых двигателей: Межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2003. № 20. С. 74–82.

ОБ АВТОРАХ

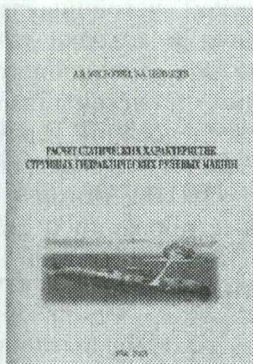


Гумеров Хайдар Сагитович, проф. каф. авиационных двигателей. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1988). Иссл. в обл. проектирования авиационных двигателей.



Каримов Тимер Расихович, инж.-констр. ФГУП «НПП „Мотор“». Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетн. двигателям ЛА (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. мат. моделирования процессов энергетических установок.

Сигнальная информация



А. В. Месропян, В. А. Целищев
**Расчет статических характеристик
 струйных гидравлических рулевых машин**

Учебное пособие

Научный редактор канд. техн. наук, доц. **А. В. Месропян**

Уфа: УГАТУ, 2003

76 с. Табл. 4. Ил. 38. Библиогр.: 36 назв. ISBN 5-86911-423-3

Рекомендовано УМО по университетскому и политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению 657400 «Гидравлическая, вакуумная и компрессорная техника», специальности 121100 «Гидравлические машины, гидроприводы и гидроавтоматика».

Предназначено для студентов авиационных специальностей, изучающих дисциплины «Гидропривод и гидравлические средства автоматики», «Динамика гидро-, пневмосистем».