

Национальная академия наук Украины

Институт технической теплофизики

Комиссия по промышленным газовым турбинам  
и электроприводам  
при Отделении физико-технических проблем энергетики

**НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЯ**

*Сборник опубликованных статей*

**в 2-х томах**

**ТОМ 1**

Киев – 2014

УДК 621.438

**Научные и прикладные вопросы промышленного газотурбостроения (сборник опубликованных статей). – Scientific and Applied Problems of Industrial Gas Turbine Engineering (printed papers collection) – Изд. 2-ое: исправленное и дополненное (в 2-х томах) – /составитель А.А.Халатов/ Институт технической теплофизики НАН Украины.– Киев, – 2014. – Т. 1 - 382 с., Т. 2 - 386 с.– ISBN 978-966-02-7115-9 (общий)**

ISBN 978-966-02-7116-6 (том 1)

Настоящий сборник статей подготовлен по результатам работ, опубликованных в открытой печати членами Комиссии по промышленным газовым турбинам и электроприводам. В нем представлено 49 научных статей из ведущих журналов Украины, России и др. стран. Статьи охватывают следующие научные направления:

1. Энергетическое газотурбостроение.
2. Газотранспортная система Украины.
3. Регенераторы, воздухоподогреватели и утилизаторы теплоты.
4. Теплообмен, горение и газовая динамика.

Текст статей соответствует оригиналу и языку публикования.

Сборник предназначен для научных работников, инженеров и конструкторов, занимающихся исследованием, проектированием и испытанием газовых турбин различного назначения. Он может быть полезным студентам старших курсов и аспирантам теплоэнергетических, теплофизических и физико-технических специальностей высших учебных заведений.

Рецензенты: докт. техн. наук, проф. Е.Н. Письменный (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев)  
докт. техн. наук, проф. В.И. Терехов (Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск).

Утверждено к печати Ученым советом Института технической теплофизики НАН Украины (Протокол № 2 от 21 марта 2013 г.)

Все права принадлежат авторам. Какое-либо использование этого издания или его элементов, фрагментов, т.е. копирование, тиражирование, распространение и т.п. возможно только при наличии письменного согласия авторов издания.

E-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua

Заказ № 23 от 08.01.2014. Тираж 300 экз.

**ISBN 978-966-02-7115-9 (общий)**

**ISBN 978-966-02-7116-6 (том 1)**

© ХАЛАТОВ А.А., 2014



24 февраля 2014 г. является знаменательной датой для отечественного газотурбостроения – исполняется 80 лет со дня рождения директора Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, академика НАН Украины Ю.М. Маевитого.

Юрий Михайлович – известный ученый в области теплофизики и теплозергетики. Являясь основателем научной школы, связанной с моделированием нелинейных тепловых процессов в сложных технических объектах, включая газотурбинные и паротурбинные установки, юбиляр внес значительный вклад в развитие этой области знаний. Его научное наследие насчитывает более 400 работ, из них 16 монографий и более 90 изобретений. Среди его учеников – 26 кандидатов и 10 докторов технических наук. Одна из монографий "Обратные задачи теплопроводности" в 2-х томах переведена на английский язык, что принесло широкое признание мирового научного сообщества автору и руководимому им институту. Ю.М. Маевитый внес большой вклад в дело подготовки кадров высшей школы, он является инициатором создания Академического научно-образовательного комплекса в г. Харькове, много лет руководит одной из кафедр Харьковского политехнического института.

Все разработки, выполненные под руководством Ю.М. Мацевитого, имеют не только фундаментальное, но и прикладное значение. Как руководитель этих работ он удостоен Государственных премий СССР и Украины в области науки и техники, именных премий НАН Украины, академий наук Беларуси и Молдовы. За выдающийся личный вклад в развитие отечественной науки, укрепление научно-технического потенциала Украины Юрий Михайлович в 2008 г. награжден высокой государственной наградой – орденом князя Ярослава Мудрого V степени.

Регулярно проводимые международные научно-технические конференции "Современные технологии в газотурбостроении" и "Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования" под председательством академика Ю.М. Мацевитого собирают ведущих ученых и специалистов многих стран, что способствует координации усилий, обмену передовым опытом и поддержанию конкурентоспособности отечественного энергомашино-строения, как одной из базовых отраслей экономики Украины.

Юбиляр полон новых научных планов и идей, его многочисленные друзья и коллеги желают ему новых творческих успехов и активного долголетия!

*Члены научного совета "Научные основы тепловых машин" НАН Украины при отделении Физико-технических проблем в энергетике НАН Украины*

## **СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 1**

<b>Введение .....</b>	<b>11</b>
<b>1 ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЕ</b>	
1.1 Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології ...	17
<i>Б.Є. Патон, А.А. Долінський, А.А. Халатов,         Б.Д. Блека, Д.А. Костенко, О.С. Письменний</i>	
1.2 Моделирование процесса самозатачивания алмазных кругов .....	28
<i>А.И. Грабченко, А.А. Жданов, В.А. Фадеев         В.А. Коваль, В.А. Федорович, И.Н. Пыжов</i>	
1.3 Парогазові установки в електроенергетиці: сучасний стан і перспективи розвитку в Україні .....	41
<i>А.А. Халатов</i>	
1.4 Помогут ли газовые турбины преодолеть проблемы энергосистемы Украины? .....	53
<i>А.А. Халатов, Б.Е. Патон</i>	
1.5 Досягнення і перспективи розвитку промислового газотурбобудування .....	63
<i>А.А. Халатов, К.А. Ющенко</i>	
1.6 Микротурбинные установки децентрализованного энергоснабжения .....	84
<i>А.А. Халатов, И.И. Борисов</i>	
1.7 Современное состояние и перспективы использования газотурбинных технологий в тепловой и ядерной энергетике, металлургии и ЖКХ Украины .....	98
<i>А.А. Халатов, К.А. Ющенко</i>	
1.8 Газотурбинный энергетический комплекс внешнего сгорания для газотурбинных установок наземного применения производства АО «МОТОР СІЧ» .....	143
<i>В.А. Богуслаев, П.Д. Жеманюк, В.П. Трофимов,         В.И. Морозов, В.П. Митин, Е.В. Шевцова</i>	

1.9	Комплексное энерго- и ресурсосбережение при использовании контактных газопаровых турбинных установок на морских объектах .....	151
	<i>С.А. Кузнецова, С.Н. Мовчан, О.С. Кучеренко, В.Н. Чобенко, А.П. Шевцов</i>	
1.10	Критерии эффективности процесса сжатия реального газа в неохлаждаемом компрессоре .....	161
	<i>И.И. Петухов, А.В. Минячихин, В.П. Парафейник</i>	
1.11	Развитие принципов конвертирования авиационных ГТД с целью создания на их основе промышленного газотурбинного привода .....	176
	<i>С.В. Епифанов, П.Д. Жеманюк, В.П. Парафейник, И.И. Петухов</i>	
1.12	Энергетическая эффективность ПГТУ на базе авиапривода Д-336-2 с теплонасосным утилизатором .....	187
	<i>А.В. Минячихин, И.И. Петухов, П.Д. Жеманюк, Ф.Г. Сорогин</i>	

## **2 ГАЗОТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА УКРАИНЫ**

2.1	Концепція (проект) Державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики» .....	197
	<i>Б.Є. Патон, А.А. Халатов, Д.А. Костенко, Б.Д. Білека, О.С. Письменний, А.Л. Бочула, В.П. Парафейник, В.І. Коняхін</i>	
2.2	Какие промышленные газотурбинные двигатели нужны Украинской ГТС? .....	207
	<i>А.А. Халатов, Б.Е. Патон</i>	
2.3	Модернизация газотранспортной системы Украины: проблемы создания новых газоперекачивающих агрегатов .....	219
	<i>Д.А. Костенко, В.В. Романов, А.А. Халатов</i>	
2.4	Вопросы реконструкции компрессорных станций газотранспортной системы Украины .....	227
	<i>Д.А. Костенко, В.П. Парафейник, А.В. Смирнов, А.А. Халатов</i>	

2.5	Оценка и анализ технических требований к газотурбинным приводам ГПА газотранспортной системы Украины .....	241
	<i>A.B. Сударев, A.A. Халатов, B.B. Сударев</i>	
2.6	Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины .....	254
	<i>A.A. Халатов, A.A. Долинский, Д.А. Костенко, В.П.Парафейник</i>	
2.7	Газотранспортная система Украины. Факты .....	269
	<i>C.A. Смирнов</i>	
2.8	Сравнительный анализ энергетической эффективности новых газоперекачивающих агрегатов с приводом различного типа в условиях КС «Бердичев» .....	274
	<i>A.A. Мирошниченко, И.Н. Тертышный, Д.А. Костенко</i>	
2.9	Анализ эффективности ГТП Д-336-2 с отбором воздуха для распылительной системы охлаждения .....	284
	<i>Ф.Г. Сорогин, Ю.Ф. Басов, Ю.В. Шахов, И.И. Петухов, А.В. Минячихин</i>	
2.10	Анализ эффективности ГТП Д-336-2 с распылительной системой охлаждения циклового воздуха .....	293
	<i>Ф.Г. Сорогин, Ю.Ф. Басов, П.Д. Жеманюк, В.П. Трофимов, А.В. Минячихин, И.И. Петухов, Ю.В. Шахов</i>	
2.11	Распылительные системы охлаждения циклового воздуха газотурбинного привода и их эффективность .....	302
	<i>Ю.Ф. Басов, П.Д. Жеманюк, А.В. Минячихин, И.И. Петухов, Ф.Г. Сорогин, Ю.В. Шахов</i>	

### **3 РЕГЕНЕРАТОРЫ, ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛИ И УТИЛИЗАТОРЫ ТЕПЛОТЫ**

3.1	Трубчатый воздухоподогреватель из унифицированных модулей для регенеративных ГПУ мощностью 6...16 МВт .....	313
	<i>A. В. Сударев, A.A. Халатов, B. В. Сударев</i>	
3.2	Повышение компактности и снижение металлоемкости воздухоподогревателей ГТД .....	324
	<i>A. В. Сударев, A.A. Халатов, B.B. Сударев</i>	

3.3 Повышение эффективности и снижение металлоемкости газотурбинных трубчатых воздухоподогревателей на основе применения пассивных методов интенсификации теплообмена в их трактах .....	331
A. B. Сударев, A.A. Халатов, B.B. Сударев	
3.4 Рекуператоры для микротурбинных установок децентрализованного энергоснабжения .....	342
И.И. Борисов, A.A. Халатов, С.Г. Кобзарь	
3.5 Утилизация сбросной теплоты ГПА в энергоустановках с низкокипящими рабочими телами .....	354
Б.Д. Билека, Е.П. Васильев, В.Я. Кабков, Д.А. Костенко, В.И. Избаш, В.Н. Коломеев	
3.6 Модульный регенератор для регенеративной газотурбинной установки .....	366
B.B. Кузнецов, С.Н. Мовчан, A.P. Шевцов	

## СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 2

### 4 ТЕПЛОБМЕН, ГОРЕНIE И ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА

4.1 Тенденции развития систем охлаждения лопаток высокотемпературных энергетических ГТД .....	391
A.A. Халатов, B.B. Романов, Ю.Я. Дащевский, Д.Н. Письменный	
4.1.1 Современное состояние .....	391
4.1.2 Перспективные схемы охлаждения .....	404
4.2 Новые вихревые технологии аэродинамики для энергетического газотурбостроения .....	419
A.A. Халатов, Ю.Я. Дащевский, И.А. Изгорева	
4.2.1 Циклонное охлаждение лопаток .....	423
4.2.2 Лопатки с поверхностью-вихревыми углублениями .....	441
4.2.3 Совершенствование термогазодинамических процессов .....	453

4.3 Работы ИТТФ НАН Украины по теплообмену и гидродинамике закрученных и вихревых потоков .....	477
A.A. Халатов	
4.4 Интенсификация теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования проволочными спиральными вставками .....	513
A.B. Сударев, A.A. Халатов, B.B. Сударев	
4.5 Особенности гидродинамики и теплообмена при поперечном обтекании цилиндров с лунками в однорядных пучках .....	523
Г.В. Коваленко, A.A. Халатов.	
4.6 Пленочное охлаждение сопловых аппаратов высокотемпературных газовых турбин .....	539
A.A. Халатов, A.C. Коваленко	
4.7 Метод оптимального проектирования проточных частей газовых турбин с учётом их режима эксплуатации .....	561
A.B. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, A.P. Усатый, A.C. Руденко	
4.8 К вопросу оптимизации геометрии проточной части центробежных компрессоров природного газа с газотурбинным приводом .....	579
B.P. Парафейник, B.E. Евдокимов, И.Н. Тертышний, A.H. Нефедов	
4.9 Улучшение характеристик камеры сгорания газотурбинного двигателя за счет использования трубчатой технологии газосжигания .....	596
Г.Б. Варламов, Ю.Н. Камаев, П.О. Позняков, Д.Н. Юрьев	
4.10 Трубчаста технологія газоспалювання – прорив у енергозбереженні і екологічності транспортування природного газу .....	612
Г.Б. Варламов, Я.С. Марчук, M.B. Беккер, Г.М. Любчик, Ю.М. Камаев, П.О. Позняков, Д.О. Кузьменко	

4.11 Модернизация горелочной системы газотурбинного двигателя ДН80 с использованием трубчатой технологии газосжигания .....	620
<i>Г.Б. Варламов, Ю.Н. Камаев, П.О. Позняков, Д.Н. Юрашев</i>	
4.12 Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі газоперекачувального агрегату типу ГТК-10 .....	634
<i>Г.Б. Варламов, П.О. Позняков, Д.М. Юрашев</i>	
4.13 Особенности горелочной системы трубчатого типа для камеры сгорания ГТУ в составе ГТК-10 .....	648
<i>Г.Б. Варламов, Ю.М. Камаев, П.О. Позняков, Д.Н. Юрашев</i>	
4.14 Новое поколение горелочных систем ГТУ на основе трубчатой технологии сжигания газа .....	659
<i>Г.Б. Варламов, А.А. Халатов, П.О. Позняков, Д.Н. Юрашев</i>	
4.15 Совершенствование гидравлических характеристик камер сгорания ГТД методами вычислительной аэрогидродинамики и оптимизации .....	672
<i>В.Е. Костюк, Е.И. Кирилаш,</i>	
4.16 Метод определения закона регулирования поворотными направляющими аппаратами многоступенчатого осевого компрессора в условиях неопределенности входных данных .....	687
<i>Е.С. Меняйлов, А.А. Трончук, М.Л. Угрюмов, Ю.Ф. Басов, А.В. Меняйлов</i>	
4.17 Термодинамический цикл Майсоценко и перспективы его применения в Украине .....	697
<i>А.А. Халатов, И.Н. Карп, Б.В. Исаков</i>	
4.18 Влияние радиального зазора на границу газодинамической устойчивости осевых компрессоров ГТД .....	723
<i>В.А. Коваль, Е.А. Ковалева, В.В. Романов</i>	

4.19 Использование 3-D и 2-D комплексов CFD при аэродинамической доводке осевых компрессоров газотурбинных двигателей .....	733
<i>Ю.М. Ануров, В.А. Коваль, Е.А. Ковалева, В.В. Романов</i>	
4.20 Энергетические возможности газотурбинных установок с воздушной утилизацией тепла .....	744
<i>В.А. Коваль, Ю.М. Ануров, А.И. Васильев</i>	
<b>Contents .....</b>	<b>757</b>

Основу инфраструктуры газотурбинных установок составляют газотурбинные пары в промышленности, а также ядерные электростанции ГТУ мощностью 375 МВт («Балаковская», «Пакистанская»), а также ГТУ средней мощностью 650 МВт.

Основу инфраструктуры газотурбинных установок составляют газотурбинные пары в промышленности, а также ядерные электростанции ГТУ мощностью 375 МВт («Балаковская», Нововоронежская, БН-600 «Маяк»-Прогресс) и 650 МВт («Белоярская Сибирь»). Заводы-изготовители ГТУ: ОАО «Турбомаш-Энергия», ОАО «Сименс АГД» (в МИ Франции). Крупнейшие газотурбинные пары «Балаковской» и «Нововоронежской» ядерных электростанций работают в режиме средней производительности, сидя на плаву, изменяя производительность, неизменно, электрическими, газовыми и горючими настройками. Крупнейшие газотурбинные пары для Оренбургских газотурбинных предприятий (ОГУП «Оренбурггаз») работают в режиме полной производительности. В Казахстане действующие установки и газотурбинные пары введенны в эксплуатацию в 2005 году. В Казахстане действующие установки и газотурбинные пары введенны в эксплуатацию в 2005 году.

Крупнейшей парой газотурбинной установки Украины является паровая турбина «Бориспольской ТЭС» – для ядерных, гидро-термальных флагманов газотурбинной индустрии и энергетики. Продукция – «Бориспольской ТЭС» газотурбины более 30 лет назад в экспортных газотурбинных газотурбинных установках, которые освоены около 10% газотурбинных пароводяных турбин флагмана «Лимкита». Поставки составляют 33% от мировой концепции газотурбинных электрических машин. Самые крупные и высокотехнологичные газотурбинные установки от 6 до 30 МВт установлены в России, Болгарии, Китае, Турции, Индии, Китае и др. странах. В последние годы Продукция имеет широкий спектр применения ГТУ мощностью 110 МВт, для ЕЭС разработан проект генераторов ГТУ 160-кварточными 15 МВт с КПД около 40%.