



### Ледуховский Григорий Васильевич

Кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций ИГЭУ, автор 170 научных работ, 12 свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ, восьми учебных пособий. Профессиональные интересы: технико-экономический анализ и нормирование показателей работы оборудования тепловых электростанций; моделирование и повышение эффективности процессов теплообмена и деаэрации воды; вспомогательное оборудование тепловых электростанций.



### Пospelов Анатолий Алексеевич

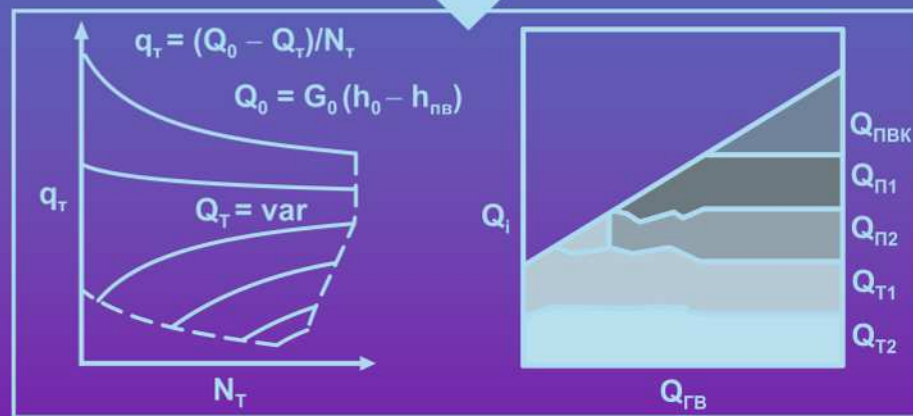
Кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций ИГЭУ, автор более 100 научных работ, 12 учебно-методических разработок, шести патентов на изобретения, семи свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ. Специалист в области эксплуатации и режимов работы оборудования тепловых электростанций.

В книге систематизированы сведения о нормировании показателей тепловой экономичности оборудования тепловых электрических станций, назначении и структуре нормативно-технической документации по топливоиспользованию, об энергетических характеристиках паротурбинных установок, паровых котлов, механизмов, установок и аппаратов электрических и тепловых собственных нужд, алгоритмах расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС и удельных расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии. Издание предназначено для лиц, осваивающих образовательные программы бакалавриата и магистратуры по направлению подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника», профилю подготовки «Тепловые электрические станции» и рекомендуется в качестве основной литературы по курсу «Нормирование показателей тепловой экономичности ТЭС» и дополнительной литературы по курсу «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях». Книга будет полезной инженерно-техническому персоналу производственно-технических отделов и служб ТЭС и энергообъединений, а также специалистам, занимающимся разработкой нормативно-технической документации ТЭС по топливоиспользованию.

РАСЧЕТ И НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС



## Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, А.А. ПОСПЕЛОВ



## РАСЧЕТ И НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

**Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, А.А. ПОСПЕЛОВ**

**РАСЧЕТ И НОРМИРОВАНИЕ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ  
ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС**

**Учебное пособие**

Иваново 2015

УДК 621.321

Л 39

Ледуховский Г.В., Поспелов А.А. Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 468 с.

ISBN 978-5-00062-069-4

В книге систематизированы сведения о нормировании показателей тепловой экономичности оборудования тепловых электрических станций, назначении и структуре нормативно-технической документации по топливоиспользованию, об энергетических характеристиках паротурбинных установок, паровых котлов, механизмов, установок и аппаратов электрических и тепловых собственных нужд, алгоритмах расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС и удельных расходов топлива на отпуск электрической и тепловой энергии. Особое внимание уделено типовым ошибкам, встречающимся как в практических расчетах, так и в руководящих документах.

Издание предназначено для лиц, осваивающих образовательные программы бакалавриата и магистратуры по направлению подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника», профилю подготовки «Тепловые электрические станции» и рекомендуется в качестве основной литературы по курсу «Нормирование показателей тепловой экономичности ТЭС» и дополнительной литературы по курсу «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях». Книга будет полезной инженерно-техническому персоналу производственно-технических отделов и служб ТЭС и энергообъединений, а также специалистам, занимающимся разработкой нормативно-технической документации ТЭС по топливоиспользованию.

Табл. 32. Ил. 88. Библиогр.: 31 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

#### НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ:

канд. техн. наук, доц. Г.В. Ледуховский,  
канд. техн. наук, канд. экон. наук А.А. Андреев

#### РЕЦЕНЗЕНТЫ:

канд. техн. наук, доц. В.А. Буданов (ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»);  
канд. техн. наук А.А. Коротков (ЗАО «Ивэнергосервис»)

ISBN 978-5-00062-069-4

© Г.В. Ледуховский,  
А.А. Поспелов, 2015

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>9</b>
<b>Раздел 1. Организация контроля над эффективностью использования топлива на тепловых электрических станциях .....</b>	<b>13</b>
1.1. Общие принципы нормирования показателей тепловой экономичности оборудования тепловых электрических станций .....	13
1.2. Государственный контроль над эффективностью использования топлива на ТЭС .....	15
<b>Раздел 2. Общая характеристика нормативно-технической документации по топливоиспользованию ТЭС.....</b>	<b>19</b>
2.1. Состав документации по топливоиспользованию ТЭС...	19
2.2. Основные термины и определения, используемые при нормировании показателей работы энергетического оборудования .....	25
2.3. Общие сведения об энергетических характеристиках оборудования тепловых электрических станций .....	28
<b>Раздел 3. Энергетические характеристики турбоагрегатов</b>	<b>30</b>
3.1. Понятие об энергетической характеристике турбоагрегата .....	30
3.2. Исходно-номинальные и номинальные значения показателей .....	35
3.3. Энергетические характеристики конденсационных турбоагрегатов .....	38
3.4. Особенности энергетических характеристик турбоагрегатов с регулируемыми отборами пара .....	41
3.5. Типы и нормируемые режимы работы турбоагрегатов с регулируемыми отборами пара и противодавлением.....	46
3.6. Энергетические характеристики конденсаторов паровых турбин .....	55
3.6.1. Влияние давления пара в конденсаторе на тепловую экономичность паротурбинной установки .....	55
3.6.2. Предельный и экономический вакуум в конденсаторе паровой турбины .....	58

3.6.3. Особенности технологических процессов конденсации пара .....	65
3.6.4. Основы расчета энергетических характеристик конденсаторов .....	69
3.7. Энергетические характеристики турбоагрегатов с противодавлением .....	83
3.8. Энергетические характеристики турбоагрегатов типа «П», «Т», «ПТ» и «ПР» .....	88
3.8.1. Общие сведения.....	88
3.8.2. Диаграмма режимов турбоагрегата с конденсацией пара и регулируемым производственным отбором (типа «П») .....	89
3.8.3. Диаграмма режимов турбоагрегата с противодавлением и одним дополнительным регулируемым отбором пара (типа «ПР») .....	94
3.8.4. Диаграмма режимов турбоагрегата с конденсацией пара и двумя регулируемыми отборами – производственным и теплофикационным (типа «ПТ») .....	96
3.8.5. Диаграмма режимов турбоагрегата с конденсацией пара и регулируемым теплофикационным отбором (типа «Т»).....	101
3.8.6. Характеристики экономичности турбоагрегатов с конденсацией пара и регулируемыи отборами .....	108
<b>Раздел 4. Энергетические характеристики котлов .....</b>	<b>114</b>
4.1. Тепловой баланс и КПД брутто котла.....	114
4.2. Расчет промежуточных технико-экономических показателей работы котла .....	121
4.2.1. Выработка тепла брутто котлом .....	121
4.2.2. Потери тепла с уходящими газами котла .....	122
4.2.3. Потери тепла от химической неполноты сгорания топлива.....	124
4.2.4. Потери тепла от механической неполноты сгорания топлива.....	125
4.2.5. Потери тепла от наружного охлаждения котла.....	127
4.2.6. Потери тепла с физическим теплом шлака.....	128



4.2.7. Потери тепла с охлаждением конструкций и узлов, не включенных в циркуляционную схему котла .....	128
4.2.8. Коэффициент избытка воздуха в дымовых газах ....	129
4.2.9. Присосы воздуха в газовый тракт .....	131
4.2.10. Температура уходящих газов .....	131
4.2.11. Температура холодного воздуха.....	134
4.3. Состав энергетических характеристик котлов.....	135
4.3.1. Условия построения энергетических характеристик котлов .....	135
4.3.2. Основные энергетические характеристики котлов..	136

<b>Раздел 5. Энергетические характеристики оборудования ТЭС в части расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды .....</b>	<b>142</b>
5.1. Общие сведения .....	142
5.2. Структура затрат тепловой и электрической энергии на собственные нужды ТЭС .....	142
5.2.1. Механизмы электрических собственных нужд энергетических котлов .....	144
5.2.2. Механизмы электрических собственных нужд турбоагрегатов .....	146
5.2.3. Механизмы теплофикационной установки .....	147
5.2.4. Механизмы электрических собственных нужд, связанных с отпуском тепловой энергии внешним потребителям с паром .....	148
5.2.5. Особые расходы электроэнергии, не относящиеся к электрическим собственным нуждам... ..	149
5.2.6. Установки и аппараты тепловых собственных нужд энергетических котлов.....	149
5.2.7. Установки и аппараты тепловых собственных нужд турбоагрегатов .....	150
5.2.8. Технологические потери тепла, связанные с его отпуском внешним потребителям от энергетических и пиковых водогрейных котлов с горячей водой .....	151
5.2.9. Технологические потери тепла, связанные с его отпуском внешним потребителям от энергетических котлов с паром .....	151

5.3. Порядок разработки энергетических характеристик затрат тепловой и электрической энергии на собственные нужды .....	152
5.3.1. Общие сведения .....	152
5.3.2. Методика разработки энергетических характеристик затрат электрической энергии на собственные нужды .....	154
5.3.3. Разработка энергетических характеристик затрат мощности на привод группы параллельно работающих центробежных насосов .....	158
5.3.4. Разработка энергетических характеристик затрат мощности на привод центробежных насосов с частотным регулированием производительности .....	176
5.3.5. Методика разработки энергетических характеристик затрат тепловой энергии на собственные нужды .....	181
5.3.6. Расчет затрат тепловой энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование зданий и сооружений ТЭС .....	182
5.3.7. Расчет затрат тепловой энергии на нужды мазутного хозяйства .....	194
5.3.8. Расчет затрат тепла на собственные нужды водоподготовительных установок .....	200
<b>Раздел 6. Расчет номинальных показателей тепловой экономичности ТЭС .....</b>	<b>206</b>
6.1. Расчеты показателей тепловой экономичности в комплексной системе мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации режимов работы оборудования ТЭС.....	206
6.2. Тепловая экономичность простейшей конденсационной ТЭС .....	218
6.3. Тепловая экономичность ТЭС при комбинированном производстве тепловой и электрической энергии.....	226
6.4. Проблема метода отнесения затрат топлива на отпуск электрической и тепловой энергии при их комбинированном производстве .....	231

6.5. Алгоритмы расчета удельных расходов топлива на отпуск тепловой и электрической энергии ТЭС .....	239
6.6. Алгоритмы расчета показателей тепловой экономичности турбоустановок .....	273
6.7. Алгоритмы расчета показателей тепловой экономичности энергетических котлов.....	350
<b>Раздел 7. Основы оптимизации режимов работы оборудования ТЭС .....</b>	<b>400</b>
7.1. Возможность оптимального распределения нагрузок между отдельными агрегатами электростанции. Типы оптимизационных расчетов.....	400
7.2. Порядок выполнения расчетов по оптимизации режимов работы оборудования теплоэлектроцентрали.....	404
7.3. Принципиальные типы математических моделей оборудования электростанций.....	407
7.4. Методы оптимизации режимов работы оборудования электростанций.....	411
7.4.1. <i>Метод относительных приростов</i> .....	413
7.4.2. <i>Метод перебора вариантов</i> .....	416
7.5. Пример прикладного программного комплекса по оптимизации режимов работы оборудования ТЭС.....	432
7.6. Эффективность оптимизации в зависимости от тепловой нагрузки ТЭС.....	444
7.7. Особенности распределения нагрузки между двумя однотипными теплофикационными турбинами.....	446
<b>Библиографический список.....</b>	<b>464</b>



**Посвящается памяти наших учителей, коллег и друзей  
Мошкаринна Андрее Васильевича,  
Девочкина Михаила Алексеевича,  
Антипина Александра Вениаминовича**

## Введение

Нормативно-техническая документация по топливоиспользованию (далее – НТД по ТИ) является основой нормирования показателей тепловой экономичности процессов производства тепловой и электрической энергии на тепловых электростанциях (далее – ТЭС), а также базой для разработки математических моделей оборудования, используемых в прикладных программных комплексах по оптимизации состава работающего оборудования и распределению нагрузок между параллельно работающими агрегатами. Анализ показателей экономичности работы оборудования, планирование режимов его работы, поиск путей экономии топливно-энергетических ресурсов – все это задачи, решаемые производственно-техническими отделами (ПТО) электростанций и энергообъединений. Указанные направления работы персонала ПТО так или иначе связаны с НТД по ТИ, поэтому знание структуры и содержания НТД по ТИ является обязательным элементом системы знаний специалиста, работающего на соответствующем энергетическом предприятии.

Исторически сложилась практика подготовки инженерных кадров в области НТД по ТИ «на местах», то есть усвоение отдельных, часто узкоспециализированных и обрывочных, аспектов рассматриваемого специального знания непосредственно в процессе практической работы в ПТО электростанций или в соответствующих сервисных организациях, деятельность которых связана с НТД по ТИ. Этот подход, практически лишенный широкого обмена опытом, привел к образованию весьма немногочисленных центров знаний в области НТД по ТИ, к которым в первую очередь следует отнести такие сервисные организации, как ОАО «Фирма ОРГРЭС» и его региональные филиалы, ОАО «Центртехэнерго», ОАО «Сибтехэнерго» и др. Такие центры занимались разработкой НТД по ТИ электростанций страны, её регламентным пересмотром, составлением и изданием ряда основополагающих руководящих документов, регламентирующих эти виды работ, а также оказанием технической помощи спе-

специалистам ПТО электростанций по вопросам нормирования показателей тепловой экономичности энергетического оборудования.

В процессе проведения реформы энергетической отрасли России описанный механизм взаимодействия специалистов хотя и не совершенный, но все же функционирующий, был существенно нарушен: многие из авторитетных сервисных организаций прекратили свое существование, в других нарушена преемственность поколений специалистов или вовсе прерван приток молодых кадров; численность персонала ПТО электростанций и энергообъединений повсеместно уменьшена, в результате специалисты ПТО из-за нехватки времени лишены возможности повышать квалификацию и совершенствовать свои знания, в том числе в области НТД по ТИ. В предшествующие годы авторам неоднократно приходилось работать с ПТО, в которых инженерная деятельность сведена практически к статистике – по разработанным многие десятилетия назад алгоритмам выполняются расчеты технико-экономических показателей (далее – ТЭП) работы оборудования, значения которых на поверку часто оказываются весьма далекими от действительности, заполняются многочисленные отчетные формы; при этом вовсе не проводится аналитическая работа, соответственно не разрабатываются пути повышения эффективности технологического процесса. Одной из причин такого положения является отсутствие сколько-нибудь систематизированных учебно-методических материалов, объединяющих весь комплекс необходимых специалисту знаний в области НТД по ТИ.

В целях восполнения указанного информационного пробела коллективом кафедры «Тепловые электрические станции» Ивановского государственного энергетического университета разрабатывается цикл учебно-методических и производственно-практических материалов по направлению «Комплексная система мониторинга технико-экономических показателей и оптимизации режимов работы оборудования тепловых электрических станций». В цикл планируется включить материалы, охватывающие следующие темы: структура НТД

по ТИ ТЭС; энергетические характеристики паротурбинных установок, паровых и водогрейных котлов, потребителей собственных нужд; нормируемые технико-экономические показатели работы оборудования ТЭС; основы расчета фактических, номинальных и нормативных ТЭП работы энергетического оборудования; расчет составляющих резерва тепловой экономичности ТЭС; оптимизация режимов работы оборудования ТЭС.

Авторы выражают надежду, что их многолетний опыт практической работы в области энергетического аудита и разработки НТД по ТИ ТЭС, проведения балансовых испытаний энергетического оборудования, разработки прикладных программных комплексов по расчету фактических и нормативных технико-экономических показателей и оптимизации режимов работы ТЭС окажется полезным специалистам, занимающимся указанными выше видами практической инженерной деятельности на ТЭС, в сервисных организациях, а также студентам и аспирантам вузов, обучающимся по профилю «Тепловые электрические станции».

Книга ориентирована на работников производственно-технических отделов электростанций и написана таким образом, чтобы необходимые сведения в рассматриваемой предметной области мог получить читатель, имеющий базовое теплоэнергетическое образование. Этим обусловлено включение в состав ряда разделов развернутых выводов основополагающих выражений, а также подробных расчетных примеров. Материал некоторых разделов, например касающихся расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды, целиком построен на конкретных примерах, что даст читателю возможность воспроизвести эти расчеты при других исходных данных. Методические особенности, касающиеся, например, выбора значений тех или иных коэффициентов, использования различных расчетных зависимостей читатель может уточнить, обратившись к нормативным документам, ссылки на которые он найдет в тексте соответствующего раздела.

Глава по оптимизации распределения нагрузок между агрегатами включена в состав книги в сокращенном изложении,

раскрывающем лишь суть проблемы оптимизации и некоторые выводы из практических расчетов. Собственно методы оптимизации и обширный пласт ограничений на область допустимых значений параметров оптимизации остались за рамками рассмотрения, поскольку их изложение займет значительную часть книги, а освоение этого материала потребует от читателя соответствующей математической и технологической подготовки.

Введение, главы 1–4 написаны канд. техн. наук, доц. Г.В. Ледуховским и канд. техн. наук, доц. А.А. Поспеловым; глава 5 – Г.В. Ледуховским и канд. техн. наук А.Е. Барочкиным; глава 6 – Г.В. Ледуховским, А.А. Поспеловым, В.С. Арсеновым, А.П. Зиминим и А.А. Разинковым; глава 7 – Г.В. Ледуховским и канд. техн. наук А.А. Борисовым.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам: канд. техн. наук, доц. кафедры паровых и газовых турбин ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» В.А. Буданову; канд. техн. наук, ведущему специалисту отдела нормирования энергетического оборудования ЗАО «Ивэнергосервис» А.А. Короткову, – за ценные советы по улучшению книги, а также редактору УИУНЛ ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» М.А. Ивановой за проделанную ей большую работу по подготовке книги к изданию.