



ЭНЕРГЕТИКА ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Информационно-аналитический
бюллетень
ПАО «Мосэнерго»



Выпуск № 4 / 2022

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТЭС

УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1
Э 40

Издание выходит с 2022 года

Главный редактор академик РАН **А.В. Клименко**

Э 40 **Экология, энергетика, энергосбережение** : бюллетень / под редакцией академика РАН А.В. Клименко. — Москва : ПАО «Мосэнерго», 2022 —.

ISBN 978-5-383-01604-6

Вып. 4. Об эффективности использования детандер-генераторных агрегатов на ТЭС / [В.С. Агабабов ; Опыт работы детандер-генераторных установок в Мосэнерго / А.Н. Вивчар, В.А. Сердюков, Н.В. Попов]. — 2022 — 32 с.

ISBN 978-5-383-01650-3

Выпуск посвящен вопросам использования детандер-генераторных агрегатов (ДГА) на тепловых электрических станциях. Рассмотрены устройство и принцип действия ДГА, история развития и опыт эксплуатации этих установок. Показаны основные особенности применения ДГА на электростанциях различных типов (КАС и ТЭЦ). Часть статьи посвящена вопросам правильных подходов к оценке эффективности детандер-генераторной технологии: показано, что при использовании ДГА на электростанциях необходимо использовать системный подход, учитывающий влияние ДГА на технико-экономические показатели работы основного оборудования электростанции. Рассмотрены вопросы перспективы использования ДГА на ТЭЦ Мосэнерго. Предложены технические решения, позволяющие значительно повысить эффективность использования детандер-генераторной технологии на электростанциях.

УДК 620.9:502/504
ББК 31+20.1

ISBN 978-5-383-01650-3 (вып. 4)
ISBN 978-5-383-01604-6

© ПАО «Мосэнерго», 2022
© Агабабов В.С., Вивчар А.Н.,
Сердюков В.А., Попов Н.В., 2022

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЕТАНДЕР- ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТЭС

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1. Устройство и принцип действия ДГА | 7 |
| 2. Особенности применения ДГА на электростанциях | 13 |
| 3. История развития и опыт эксплуатации ДГА | 19 |
| 4. Оценка эффективности и возможности использования ДГА на ТЭЦ Мосэнерго | 25 |
| 5. Развитие ДГА-технологии | 27 |
| Опыт работы детандер-генераторных установок в Мосэнерго | 32 |

ОБ АВТОРАХ



АГАБАБОВ

Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор.
Заслуженный ветеран труда «Мосэнерго»
Автор разделов 1—5

Авторы раздела «Опыт работы детандер-генераторных установок
в Мосэнерго»

ВИВЧАР

Антон Николаевич

начальник инженерного управления,
канд. геогр. наук, ПАО «Мосэнерго»

ПОПОВ

Николай Витальевич

эксперт службы экспертизы
и технического развития
ПАО «Мосэнерго»

СЕРДЮКОВ

Виталий Александрович

главный специалист службы
экспертизы и технического развития
ПАО «Мосэнерго»



ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗА
КАК ТОПЛИВА ТРЕБУЕТ СНИЖЕНИЯ
ЕГО АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ ПЕРЕД
ГАЗОИСПОЛЬЗУЮЩИМИ АГРЕГАТАМИ

Введение



Природный газ как топливо. Среди известных видов топлива природный газ занимает особое место. Основными его преимуществами по сравнению с твердым (уголь) и жидким (мазут, дизельное) топливами, наряду с высокой теплотой сгорания, являются его хорошие экологические характеристики, значительно превосходящие характеристики угля и нефти. Читатели бюллетеня уже могли ознакомиться с приведенными в первом номере данными об экологических характеристиках различных видов ископаемого топлива. Отсутствие шлака и золы в уходящих газах энергетических котлов делает возможным без дополнительных больших капитальных вложений использование газа как топлива на крупных ТЭЦ, расположенных в городе. Кроме того, существующая система транспорта природного газа от места его добычи до потребителя позволяет полезно использовать потенциальную энергию сжатого газа для выработки дополнительной электроэнергии на станциях технологического понижения давления.

Несомненные преимущества природного газа как топлива способствуют все более широкому его использованию в энергетике. Так, в России на ТЭС производится 2/3 всей вырабатываемой электроэнергии, из них около 73 % производится на ТЭС, использующих в качестве топлива природный газ. Подчеркнем, что эта доля в нынешнем веке склонна к увеличению. В этом можно убедиться, рассматривая данные о вводе генерирующих мощностей в России в 2000—2021 гг. (рис. 1).

Видно, что тепловые станции по-прежнему играют ведущую роль, на их долю приходится 68 % построенных мощностей. При этом почти 86 % этих станций используют газ.

Существующая система газоснабжения. Как известно, подземный пласт природного газа обладает большим запасом потенциальной энергии, определяемой высоким по отношению к окружающей среде давлением газа. Эта энергия частично используется для транспортировки природного газа по магистральным трубопроводам к месту потребления. При значительных расстояниях транспортировки давление в трубопроводе поддерживается компрессорными станциями, располагающимися через каждые 100—150 км. Перед сжиганием природного газа в промышленности или в быту его давление должно быть значительно снижено по сравнению с давлением в магистральных трубопроводах. Принципиальная схема системы газоснабжения потребителя, который использует природный газ в качестве топлива, представлена на рис. 2.

Природный газ из пласта 1 поступает на поверхность в головку скважины 2. Давление газа на выходе из скважины достигает 16,0 МПа, температура — +35 °С. Пройдя очистку в механическом фильтре 3 и освободившись от транспортируе-

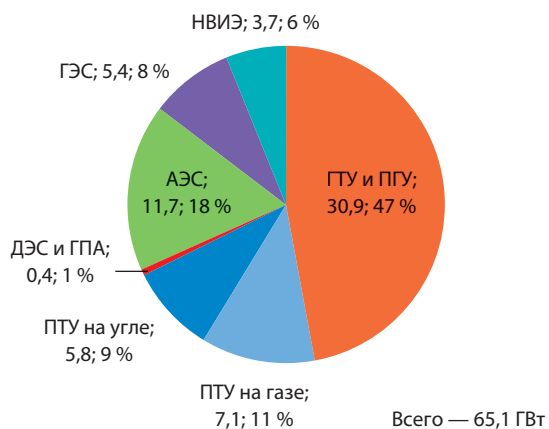


Рис. 1. Данные о вводе генерирующих мощностей в России в 2000—2021 гг. (числа на диаграмме обозначают объемы производства электроэнергии, ГВт, и доли в общем объеме производства, %): ГТУ и ПГУ — газотурбинные и парогазовые установки; ПТУ — паротурбинные установки; ДЭС — дизельные электростанции; ГПА — газоперекачивающий агрегат; АЭС — атомные электростанции; ГЭС — гидроэлектростанция; НВИЭ — здесь энергетические установки на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии

мой им влаги в осушителе 4, природный газ через дросселирующее устройство 5 поступает в магистральный трубопровод 6. В дросселирующем устройстве 5 происходит снижение давления газа до давления в магистральном трубопроводе, которое на территории России составляет от 5,5 до 11,0 МПа в зависимости от типа трубопровода. При транспортировке на большие расстояния происходит снижение давления газа из-за трения в трубопроводе. Потери давления газа компенсируются по мере необходимости на компрессорных станциях 7.

Технология дальнейшего использования газа как топлива при существующей системе газопотребления требует снижения его абсолютного давления перед газоиспользующими агрегатами до 0,15—0,3 МПа. Снижение давления газа осуществляется обычно в двух ступенях (рис. 2): на газораспределительных станциях (ГРС) 8 — от давления в магистральном трубопроводе до 1,0—1,5 МПа и на газорегуляторных пунктах (ГРП) 9 — от 1,0—1,5 до 0,15—0,3 МПа. После ГРП природный газ направляется на сжигание в топливоиспользующие устройства 10 (например, схематично изображенный на рис. 2 энергетический котел электростанции). Необходимо отметить, что организационно ГРС являются собственностью системы газоснабжения, а ГРП относятся к системе газоснабжения потребителя газа

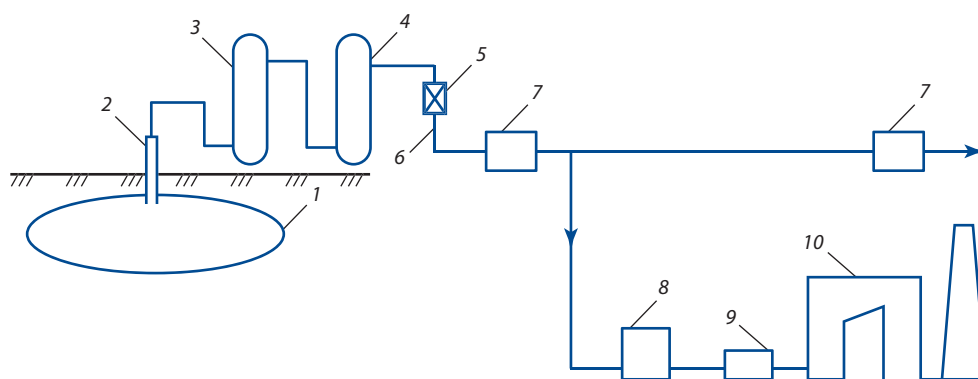


Рис. 2. Принципиальная схема системы газоснабжения:
 1 — газовый пласт; 2 — головка скважины; 3 — механический фильтр; 4 — осушитель; 5 — дросселирующее устройство; 6 — магистральный трубопровод; 7 — компрессорная станция; 8 — ГРС; 9 — ГРП; 10 — котел

и в рассматриваемом случае являются собственностью электростанции.

Давление газа на ГРС и ГРП в настоящее время снижается, как правило, путем дросселирования. Это приводит к потерям энергии, определяемой высоким давлением потока транспортируемого газа. Использовать теряемую при дросселировании энергию потока газа позволяет применение вместо дросселирующих устройств детандер-генераторных агрегатов (ДГА).

Итак, основная задача ДГА в системе газоснабжения та же, что и у дросселирующего устройства, — это уменьшение давления транспортируемого газа до уровня, необходимого по технологическим условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования. Однако уменьшение давления транспортируемого газа с помощью ДГА позволяет получать дополнительные преимущества по сравнению с использованием для этой цели дросселирующего устройства.





ОСНОВНЫМ ОТЛИЧИЕМ ДГА
ОТ ДРОССЕЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
ЯВЛЯЕТСЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

1 Устройство и принцип действия ДГА



Детандер-генераторный агрегат представляет собой технологический комплекс, основными составными частями которого являются детандер, электрический генератор, теплообменники подогрева газа перед детандером и после него, регулирующая и запорная арматура, система КИП и автоматики.

Принципиальная схема включения ДГА на ГРП электростанции показана на рис. 3. На рисунке видно, что ДГА на станциях технологического понижения давления включают параллельно дросселирующему устройству, частично или полностью заменяя его.

Принцип действия ДГА заключается в следующем. Поток транспортируемого природного газа высокого давления, либо его часть, отводится перед станционным дросселирующим устройством 2 из трубопровода 1 по газопроводу 5 и подается в теплообменник 6, где подогревается до необходимой по условиям работы ДГА температуры, после чего направляется в детандер 10. На электростанциях обычно используются турбодетандеры, представляющие собой аппараты расширительного действия с вращающимся ротором, в которых газ используется в качестве рабочего тела. Принцип действия турбодетандера такой же, как и принцип работы паровой либо газовой турбины. В детандере 10 энергия потока транспортируемого природного газа (без сжигания газа) преобразуется в механическую энергию вращения ротора детандера, в результате чего давление и температура транспортируемого газа уменьшаются до необходимой величины. Величина изменения давления потока газа в ДГА определяется конструкцией детандера. Температура транспортируемого газа на выходе из детандера зависит от величины подогрева газа в теплообменнике 6 перед детандером 10, определяемой температурой подводимого теплоносителя, как правило воды (линия 8), и соотношения давлений газа на входе и выходе ДГА. Выработанная в детандере потоком транспортируемого газа энергия передается на механически связанный с ним ротор электрогенератора 9, где вырабатывается электрическая энергия, передаваемая потребителю по линии 12. После детандера транспортируемый газ по газопроводу 7 поступает в газопровод низкого давления 3, откуда подается потребителю газа.

В некоторых случаях в составе ДГА применяется теплообменник 11 подогрева газа после детандера. Этот теплообменник предназначен для получения дополнительной теплоты либо холода, отводимого из теплообменника 11 по линии 13. Температура потока в линии 13 зависит в первую очередь от температуры транспортируемого газа на выходе из детандера, а также от температуры подводимого теплоносителя (либо хладоносителя) в линии 14. Потоки теплоносителя (либо хладоносителя), отводимые от теплообменника 11 по линии 13, могут использоваться на электростанции для собственных нужд.

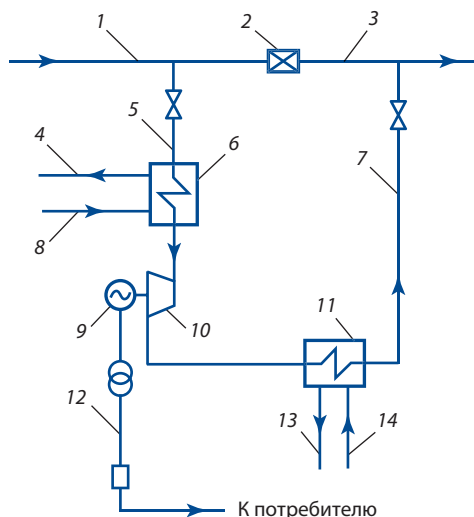


Рис. 3.
Принципиальная схема включения детандер-генераторного агрегата с подогревом газа до и после детандера:

1 — газопровод высокого давления; 2 — станционное дросселирующее устройство; 3 — газопровод низкого давления; 4 — отвод теплоносителя из теплообменника перед детандером; 5 — газопровод подвода газа высокого давления к детандеру; 6 — теплообменник подогрева газа перед детандером; 7 — газопровод отвода газа низкого давления после детандера; 8 — подвод теплоносителя в теплообменник перед детандером; 9 — электрогенератор; 10 — детандер; 11 — теплообменник подогрева газа после детандера; 12 — линия подачи электроэнергии потребителю; 13 — отвод теплоносителя из теплообменника после детандера; 14 — подвод теплоносителя в теплообменник после детандера

Основным отличием ДГА от дросселирующего устройства является возможность генерации электрической энергии. Для пояснения принципа действия ДГА, а также его термодинамической эффективности как отдельного устройства, т.е. без учета влияния работы ДГА на показатели эффективности основного оборудования ТЭС, следует рассмотреть графики процессов (рис. 4), происходящих при дросселировании газового

потока и при снижении давления с применением ДГА.

Процесс дросселирования, как правило, проводится в адиабатических условиях (теплообмен с окружающей средой исключен). В конце этого процесса (процесс 0–1 на рис. 4) энтальпия потока газа остается такой же (точка 1), какой она была на входе на станцию понижения давления (точка 0). Таким образом, технологическое уменьшение давления потока газа на ГРП электростанции с применением дросселирования не оказывает влияния на работу потребителя газа, так как физическая теплота потока газа, определяемая его энтальпией, остается постоянной.

При использовании ДГА теоретически возможны несколько различных вариантов организации процесса уменьшения давления газа (рис. 4). Процесс расширения в детандере **без подогрева газа перед детандером** изображен линией 0–2. Этот процесс соответствует выработанной детандером ДГА механической энергии, а разность энтальпий $h_0 - h_2$ определяет величину этой энергии. Необходимо подчеркнуть, что вся отданная газом энергия превращается в механическую

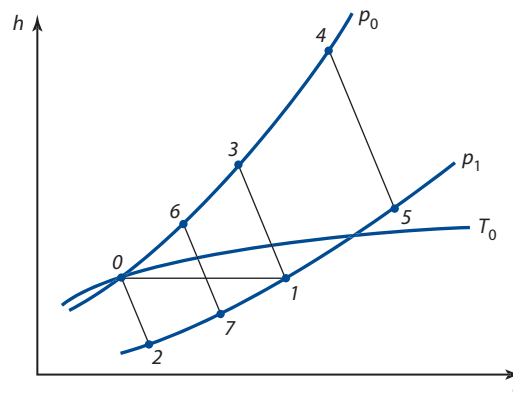


Рис. 4.
Процессы в h, s -диаграмме при дросселировании и в ДГА:

p_0 — давление транспортируемого газа на входе на станцию понижения давления; p_1 — давление транспортируемого газа на выходе со станции понижения давления; T_0 — изотерма, соответствующая температуре газа на входе на станцию понижения давления

энергию движения детандера. Таким образом, КПД преобразования энергии подведенной теплоты в механическую оказывается равным единице! Это не должно вызывать удивления, дело в том, что детандер, в отличие от традиционных установок для генерации электроэнергии, применяемых на ТЭС, а также и на АЭС, не является тепловой машиной — устройством для преобразования теплоты в механическую работу, действие которого основано на циклическом процессе. В этом заключена важная особенность ДГА-технологии. Как известно, в соответствии со вторым началом термодинамики, не вся подведенная к тепловой машине теплота может быть преобразована в ней в механическую работу. Часть подведенной теплоты обязательно передается в окружающую среду. В составе ДГА нет устройства, в котором часть подведенной к нему теплоты, как это требуется в установке, относящейся к тепловым машинам, должна отводиться в окружающую среду.

После расширения в детандере энтальпия и температура газа будут значительно ниже, чем при дросселировании. Для того чтобы газ обладал той же энтальпией, что и до детандера, к нему необходимо подвести теплоту. Эти затраты теплоты определяются разностью энтальпий ($h_1 - h_2$). В свою очередь, эта разность в точности равна полезной энергии, полученной при расширении газа в детандере ($h_0 - h_2$).

Следует отметить, что подводимая к потоку газа энергия, необходимая для повышения энтальпии газа до первоначального состояния (процесс 2–1), может быть получена в теплообменнике 11 (см. рис. 3) после детандера при использовании низкопотенциальной энергии окружающей среды или вторичных энергетических ресурсов, так как при существующих в реальных условиях параметрах транспортируемого газа и при отсутствии его подогрева перед детандером температура газа на выходе из детандера была бы значительно ниже температуры окружающей среды и при реальных величинах начального p_0 и конечного p_1 давлений могла бы составлять от -60 до -100 °С.

При расширении в детандере с **подогревом газа перед ним** в зависимости от степени подогрева возможны несколько вариантов.

В одном из них газ подогревается перед детандером за счет энергии высокого потенциала так (линия 0–3 на рис. 4), что энтальпия газа после расширения в детандере (линия 3–1) оказывается равной энтальпии газа после дросселирования (точка 1). При этом вся подведенная к газу энергия, пропорциональная разности энтальпий $h_3 - h_0$, преобразуется в детандере в механическую энергию, определяемую разностью энтальпий $h_3 - h_1$. При преобразовании теплоты в ДГА коэффициент полезного действия, как и в предыдущем случае, будет равен единице.

Газ перед детандером может быть подогрет и так (линия 0–4 на рис. 4), что его энтальпия на выходе из детандера (точка 5) будет выше, чем при дросселировании. В этом случае лишь часть подведенной к газу энергии, пропорциональная $h_4 - h_0$, будет израсходована на выработку механической энергии в детандере, пропорциональной разности энтальпий $h_4 - h_5$. Вторая часть подведенной к газу энергии, пропорциональная разности энтальпий $h_5 - h_0$, при использовании ДГА на ГРП не будет потеряна в окружающую среду, а также будет полезно использована — затрачена на увеличение физической теплоты топлива, поступающего потребителю. При постоянной тепловой нагрузке увеличение физической теплоты топлива приведет к снижению необходимой энергии, получаемой при сжигании топлива, также на величину, пропорциональную $h_5 - h_0$, и к соответствующему уменьшению расхода топлива.

Возможны также и другие схемы подогрева газа в ДГА. Так, газ может быть *частично подогрет перед детандером* (процесс 0–6 на рис. 4), *частично подогрет после детандера* (процесс 7–1). Существуют также схемы с *подогревом газа перед детандером с последующим промежуточным его подогревом после прохождения им части ступеней детандера*. Однако все они являются различными комбинациями рассмотренных выше способов подогрева газа.

Из сказанного ясно, что во всех случаях определения эффективности ДГА необходимо, кроме учета генерируемой электрической мощности, принимать во внимание затраты теплоты на подогрев газа в ДГА либо после детандера (про-

цессы 2–1 и 7–1), либо перед ним (процессы 0–3, 0–4, 0–6).

В тех случаях, когда подогрев газа обеспечивает равенство его энтальпии до и после расширения в детандере (например, процессы 0–3–1, 0–2–1 и 0–6–7–1 на рис. 4), вся поступающая в ДГА теплота преобразуется в механическую работу в детандере с последующим использованием ее для выработки электроэнергии в генераторе. Если КПД ДГА по выработке электроэнергии определять отношением полученной электроэнергии к подведенной теплоте, то он оказывается близким к 100 % (окончательно КПД ДГА зависит от эффективности преобразования механической энергии в электрическую в генераторе), что значительно превосходит КПД устройств, работающих по принципу тепловой машины.

В других случаях (например, процесс 0–4–5) отношения полученной механической работы ($h_4 - h_5$) к затратам теплоты ($h_4 - h_0$) будут несколько ниже, однако при этом часть теплосодержания потока, определяемая разностью энтальпий ($h_5 - h_1$), также может быть полезно использована в топке газопотребляющего оборудования, так как энтальпия потока газа, а именно она определяет тепловую энергию потока, в этом случае будет больше, чем при его дросселировании.

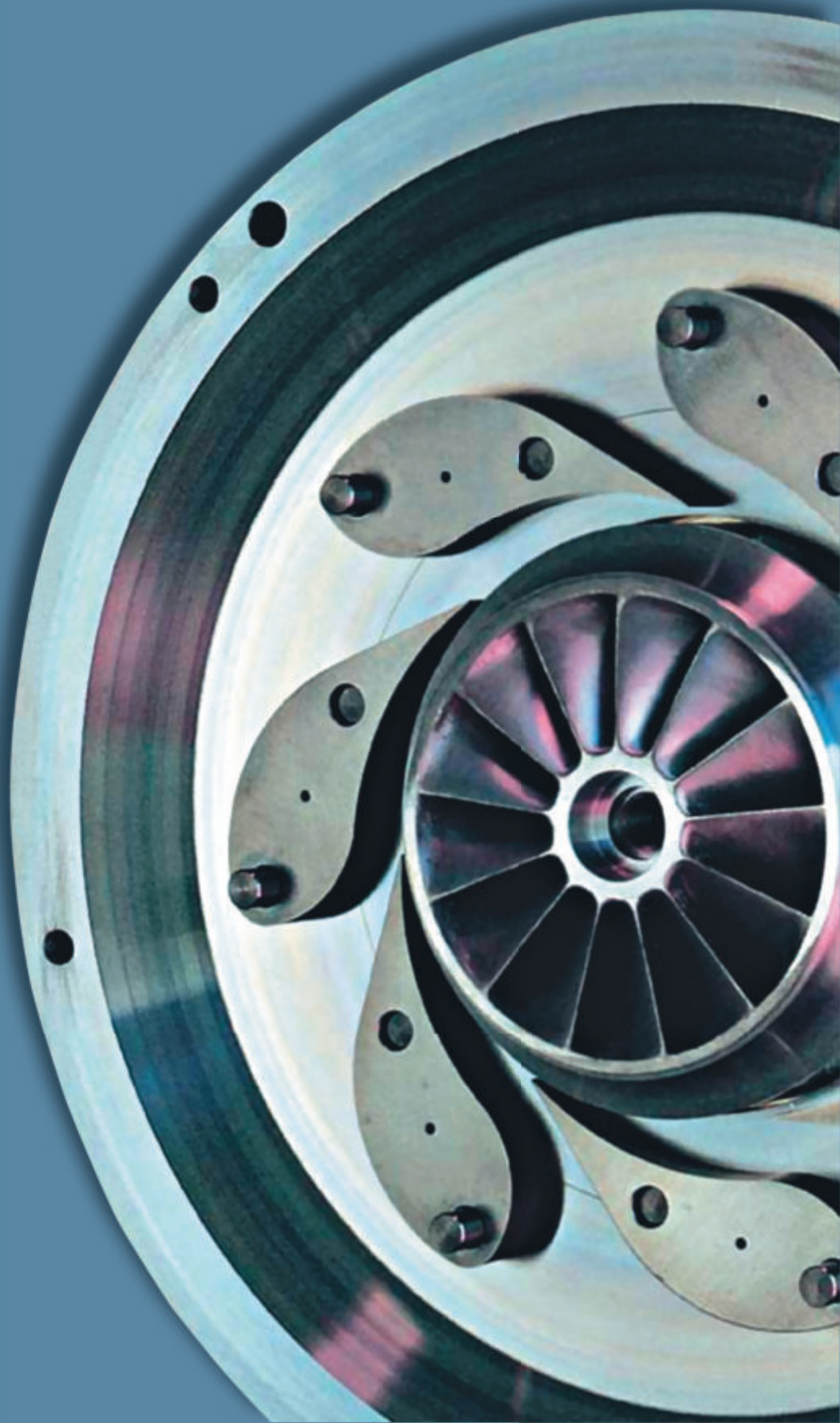
Анализ процессов на ГРП — станции технологического уменьшения давления природного

газа, используемого как топливо на электростанциях, — позволяет определить основные термодинамические преимущества ДГА при сравнении с применением для этой цели дросселирующих устройств. Эти преимущества определяются тремя основными факторами:

- * участвуя в технологическом процессе уменьшения давления, ДГА позволяет полезно использовать теряемую при традиционном дросселировании механическую энергию газового потока для генерации электроэнергии;

- * ДГА, в отличие от традиционных установок для генерации электроэнергии, применяемых на ТЭС, а также и АЭС, не относится к тепловым машинам — устройствам для преобразования теплоты в механическую работу, действие которых основано на циклическом процессе. В связи с этим эффективность использования теплоты для подогрева потока газа в ДГА, определяемая КПД ДГА по выработке электроэнергии, превосходит КПД устройств, работающих по принципу тепловой машины;

- * в процессе преобразования энергии в ДГА может быть получен поток холода либо теплоты в теплообменнике на выходе из детандера. Это позволяет использовать ДГА для реализации более сложных процессов, чем только лишь генерация электроэнергии.





ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫЕ АГРЕГАТЫ
ОКАЗЫВАЮТ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ
ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ВСЕЙ ТЭС

2 Особенности применения ДГА на электростанциях



Применение ДГА на электростанциях значительно отличается от их применения на предприятиях, не генерирующих электроэнергию. Основное отличие определяется тем, что такие предприятия получают ее со стороны и установка генерирующих электроэнергию ДГА позволяет им уменьшить внешнее потребление электроэнергии, при этом на работу основного оборудования предприятий использование ДГА влияния не оказывает. На электростанциях, наоборот, детандер-генераторные агрегаты оказывают влияние на работу основного оборудования и, следовательно, на эффективность работы всей ТЭС.

Проведенные исследования позволили оценить влияние ДГА на работу электростанций. При этом было показано, что необходимы различные подходы при определении этого влияния на работу конденсационных электростанций (КЭС) и теплоэлектроцентралей (ТЭЦ).

Ранее отмечалось, что нормальная работа ДГА предполагает подогрев газа. Рассмотрим те источники теплоты, которые могут использоваться для этой цели на ТЭС.

Возможные источники подогрева газа в ДГА на ТЭС. Подогрев газа в ДГА на ТЭС может быть организован с использованием источников энергии высокого и низкого потенциала.

Использование источников высокого потенциала определяется параметрами транспортируемого газа (давлением и температурой) на входе и выходе ГРП. При расширении газа в детандере одноступенчатого ДГА (см. рис. 3) его температура при реально существующих на электростанциях давлениях может опускаться, как уже отмечалось, без предварительного подогрева перед детандером до $-60 \dots -100$ °С. Такие температуры газа, согласно правилам эксплуатации системы газоснабжения, не допустимы, что требует соответствующего подогрева газа перед детандером до температур $50 \text{—} 90$ °С (например, процесс 0–3 на рис. 4).

В качестве источников энергии высокого потенциала для подогрева газа перед детандером ДГА на ТЭС могут быть использованы источники, связанные с работой паротурбинного и котельного оборудования: пар из регенеративных или теплофикационных отборов турбин, конденсат пара из подогревателей высокого (ПВД) и низкого (ПНД) давления, прямая сетевая вода, а также уходящие газы энергетических котлов. Высокой эффективности работы ДГА можно достичь при использовании для подогрева газа в них уходящих газов газотурбинных установок (ГТУ), в том числе входящих в состав ПГУ. Энергия высокого потенциала на ТЭС для подогрева газа в ДГА может быть получена также и при сжигании топлива в специально для

этой цели предназначенных котлах и пиковых подогрейных котлах.

К источникам энергии низкого потенциала для подогрева газа в ДГА могут быть отнесены циркуляционная вода, обратная сетевая вода на ТЭЦ. Эти источники могут быть использованы в тех случаях, когда соотношение давлений входа/выхода газа невелико и температуры газа на выходе детандера ДГА без предварительного подогрева не оказываются столь низкими. Кроме того, существуют так называемые многоступенчатые схемы ДГА, которые содержат несколько последовательно включенных детандеров, а подогрев газа производится перед каждым детандером (рис. 5).

Принцип действия трехступенчатого ДГА понятен из приведенной на рис. 5 схемы: подогрев газа осуществляется перед каждым из детандеров высокого 3, среднего 9 и низкого 10 давлений в подогревателях газа 2, 7 и 8 соответственно.

Результаты проведенных расчетов показали, что при двухступенчатом детандере необходимая температура подогрева газа составляет 30—45 °С в зависимости от отношения давлений газа на входе и выходе детандера. При применении трехступенчатого детандера необходимая тем-

пература подогрева газа может составить 15—20 °С, что позволит использовать для подогрева газа источники теплоты относительно низкого потенциала.

Безусловно, изменение конструкции ДГА с использованием промежуточных подогревов приведет к увеличению капитальных затрат на установку, однако эти капитальные вложения могут быть компенсированы отсутствием затрат на выработку высокопотенциальной теплоты подогрева газа. Окончательное решение о целесообразности использования источника низкого потенциала и многоступенчатых ДГА необходимо принимать после проведения технико-экономической оценки.

Особенности применения ДГА на КЭС. Особенности использования ДГА на КЭС определяются назначением этих электростанций, а именно производством электроэнергии. При этом на технические решения при разработке схемы ДГА влияют следующие основные факторы: мощность основного оборудования, режимы работы энергосистемы, к которой относится КЭС, годовые и суточные режимы работы КЭС, параметры транспортируемого газа, поступающего на ГРП электростанции и подаваемого затем на котельные установки. При этом основным вопросом при

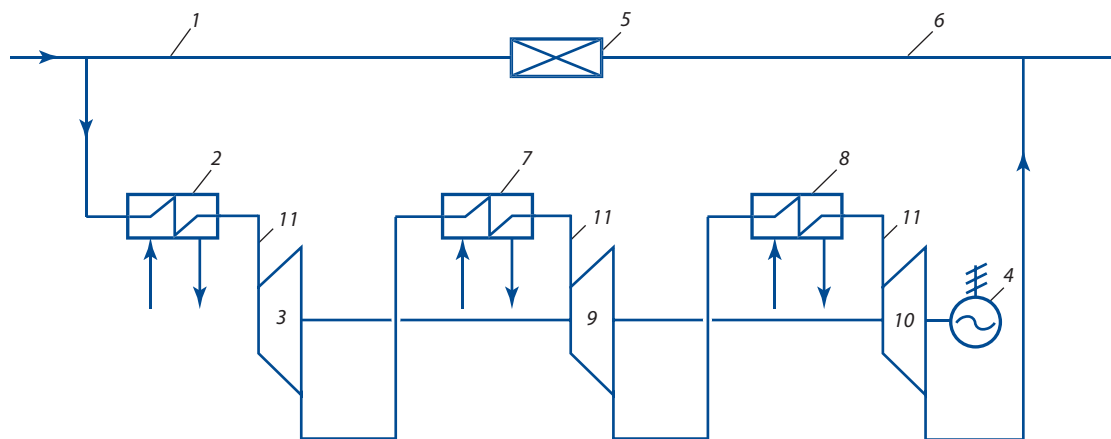


Рис. 5.

Принципиальная схема трехступенчатого ДГА:

1 — трубопровод высокого давления; 2, 7, 8 — подогреватели газа; 3, 9, 10 — детандеры соответственно высокого, среднего и низкого давлений; 4 — электрогенератор; 5 — дросселирующее устройство ГРП (ГРС); 6 — трубопровод низкого давления; 11 — соединительные трубопроводы

разработке схемы ДГА является выбор системы подогрева газа перед детандером ДГА.

Основное, что необходимо учитывать при выборе системы подогрева газа, это *дефицитной* или *избыточной* является энергосистема, в которой работает электростанция. Для дефицитных и избыточных энергосистем условия эксплуатации основного оборудования КЭС при использовании на них ДГА будут отличаться друг от друга.

Так, если энергосистема дефицитна и среди режимов работы основного оборудования входящих в нее электростанций преобладают режимы с максимальной нагрузкой, эксплуатация ДГА должна быть организована таким образом, чтобы не только не снизить общую электрическую мощность электростанции, но и иметь возможность повысить ее. При работе электростанции с максимальной нагрузкой расход пара на турбины также максимален. Отбор пара из пароводяного цикла для подогрева газа в ДГА без снижения мощности основного оборудования невозможен. В этом случае для подогрева газа перед детандером может и должен быть использован автономный источник, не связанный с пароводяным циклом КЭС. Это может быть либо пиковый, либо водогрейный котел. Мощность основного оборудования КЭС при такой системе подогрева при подключении ДГА остается постоянной и появляется возможность генерации дополнительной мощности в ДГА.

Таким образом, на электростанциях, входящих в *дефицитные энергосистемы*, термодинамические преимущества использования ДГА определяются более высокой эффективностью генерации электроэнергии в результате того, что ДГА, в отличие от паротурбинных установок электростанций, по своей сути не является тепловой машиной и отвод части поступившей на него теплоты в окружающую среду не требуется.

При работе ДГА на электростанциях, входящих в избыточные энергосистемы, для обеспечения постоянной мощности электростанции в каждом из режимов работы энергосистемы, электрическая мощность основного оборудования КЭС при включении ДГА должна будет снижаться на величину мощности, генерируемой ДГА. Уменьшение мощности основного оборудования может

привести к снижению эффективности его работы, что обязательно необходимо учитывать при определении показателей использования ДГА на ТЭС.

Таким образом, на электростанциях, работающих в *избыточной системе*, на термодинамическую эффективность использования ДГА влияют два основных фактора. С одной стороны, это более высокая эффективность генерации электроэнергии в ДГА благодаря тому, что он по своей сути не является тепловой машиной, с другой — это уменьшение эффективности генерации электроэнергии основным оборудованием КЭС из-за снижения его мощности на величину мощности, генерируемой ДГА. Окончательный результат определяется результатами «борьбы» этих двух факторов.

Использование для подогрева газа автономного либо водогрейного котла в случае избыточной системы также возможно, хотя обычно для этого используется отборный пар энергоблоков. Как показали исследования, при таком способе подогрева газа термодинамическая эффективность работы ТЭС оказывается, как правило, выше.

Особенности применения ДГА на ТЭЦ. Особенности применения ДГА на ТЭЦ по сравнению с конденсационными электростанциями определяются спецификой работы теплоэлектроцентралей. Объясняется это в первую очередь тем, что режимы работы ТЭЦ определяются в соответствии с заданной энергосистемой тепловой нагрузкой на отопление и горячее водоснабжение. Поэтому при решении задачи повышения эффективности работы ТЭЦ в результате включения в ее схему ДГА в качестве основного условия должно быть принято обязательное выполнение диспетчерского задания по тепловой нагрузке ТЭЦ.

Основная особенность применения ДГА на ТЭЦ связана с тем, что при работе ТЭЦ в режимах с отключенными пиковыми водогрейными котлами (ПВК) для выполнения температурного графика прямой сетевой воды необходимо поддерживать вполне определенные значения давлений в теплофикационных отборах турбины.

Теоретический и практический анализ работы ДГА, установленных на электростанциях, показал,

Возможные режимы работы ТЭЦ

| Номер режима | График работы ТЭЦ | Расход пара на турбины | Нагрузка ПВК |
|--------------|--|------------------------|---------------------|
| 1 | По тепловому графику | Максимальный | Максимальная |
| 2 | По тепловому графику | Максимальный | Меньше максимальной |
| 3 | По тепловому графику | Максимальный | Отключен |
| 4 | По тепловому графику | Не максимальный | Отключен |
| 5 | По электрическому графику | Максимальный | Отключен |
| 6 | По электрическому графику | Не максимальный | Отключен |
| 7 | По электрическому графику с минимально возможной электрической нагрузкой | Не максимальный | Отключен |
| 8 | Конденсационный | Не максимальный | Отключен |

что степень влияния ДГА на тепловую экономичность теплоэлектроцентрали, так же как и при их использовании на КЭС, в основном определяется организацией подогрева газа в ДГА. При этом на ТЭЦ добавляется еще один возможный источник теплоты — пиковые водогрейные котлы.

Проведенные исследования возможностей подогрева газа перед детандером ДГА на ТЭЦ позволили определить восемь возможных режимов работы электростанции (см. таблицу), различающихся по способам организации подогрева газа перед детандером ДГА.

Важно отметить, что во всех рассмотренных режимах газ перед детандером ДГА может быть без каких-либо ограничений подогрет на ТЭЦ до необходимой температуры с помощью автономных высокопотенциальных источников энергии, а также уходящими дымовыми газами котлов. Если для подогрева использовать энергию источников высокого потенциала, связанных с пароводяным циклом ТЭЦ, а также ПВК, то при обязательном выполнении диспетчерского задания по тепловой и электрической нагрузкам ТЭЦ это сделать не всегда удастся. Существуют такие режимы работы основного оборудования ТЭЦ (режим 1), при котором подогреть газ с помощью этих источников без снижения отдаваемой потребителю тепловой мощности оказывается невозможным. В режимах 3 и 7 для обеспечения возможно-

сти подогрева газа одним из указанных способов необходимо изменить состав работающего основного оборудования ТЭЦ. В остальных режимах работы основного оборудования подогрев газа перед детандером может быть осуществлен, во-первых, за счет энергии источников высокого потенциала, связанных с пароводяным циклом ТЭЦ: либо при изменении расхода пара в голову как минимум одной турбины (режимы 4, 8), либо положением диафрагмы (режим 5), либо расходом и положением диафрагмы одновременно (режим 6), а во-вторых, в ПВК (режим 2). Одновременное сохранение постоянными тепловой и электрической нагрузок ТЭЦ после включения ДГА оказывается возможным только в одном режиме, когда ТЭЦ работает по электрическому графику с не максимальным расходом пара на турбины, — режиме 6.

Таким образом, выбор системы подогрева газа перед детандером на ТЭЦ представляет собой достаточно сложную, многофакторную задачу. Для ее обоснованного решения требуются тщательный анализ в первую очередь режимов работы ТЭЦ, в том числе и перспективных, а также научно обоснованные методики, позволяющие рассчитать, в частности, изменение тепловой экономичности работы ТЭЦ при использовании на ней детандер-генераторного агрегата для выработки электроэнергии при различных способах подогрева газа в ДГА.





КАК ЗАМЕНА ДРОССЕЛИРУЮЩИМ
УСТРОЙСТВАМ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ
ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ГАЗА ДГА СТАЛИ
ШИРОКО ВНЕДРЯТЬСЯ С 70-Х ГОДОВ
ПРОШЛОГО СТОЛЕТИЯ

3 История развития и опыт эксплуатации ДГА



Необходимо отметить, что как агрегаты для получения низких температур промышленные детандеры были известны еще в первой половине прошлого века и широко использовались в криогенной технике. Однако их назначением в криогенных установках являлось не производство электроэнергии, а лишь значительное уменьшение температуры различных газовых потоков.

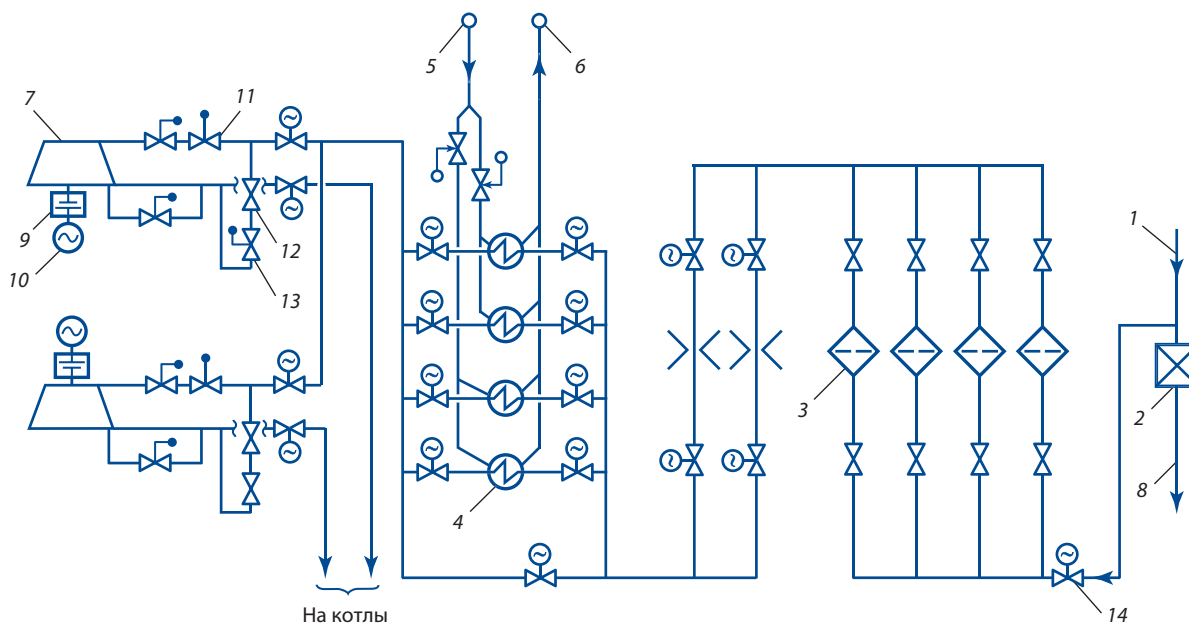
Как замена дросселирующим устройствам для уменьшения давления транспортируемого газа ДГА стали достаточно широко внедряться на ряде газораспределительных станций и газорегуляторных пунктов промышленных предприятий Западной Европы, США, а также других стран начиная с 70-х годов прошлого столетия.

В ряде стран Европы с 1973 по 1995 год было внедрено около пятидесяти установок с использованием детандер-генераторных агрегатов или, как их еще называли, газорасширительных машин. Детандер-генераторные агрегаты установлены на сегодняшний день в Италии, Голландии, Германии, США, странах Азии. Их количество непрерывно возрастает, и, по нашим оценкам, число действующих ДГА на сегодняшний день близко к тремстам агрегатам. Их электрическая мощность обычно не превышает 1—2 МВт.

В состав ДГА входят детандеры либо поршневого типа, либо турбодетандеры. Турбодетандеры применяются при больших расходах газа и мощностях, именно это тип детандеров используется на ТЭС.

Научные исследования и последующие успешные внедрения детандер-генераторных агрегатов в США и в некоторых европейских странах показали весьма высокую как термодинамическую, так и экономическую эффективность этих агрегатов. Во всех известных публикациях были приведены результаты испытаний и опыта эксплуатации ДГА, подтверждающие их высокую термодинамическую эффективность, а также перспективы развития ДГА-технологии.

Успешный опыт эксплуатации ДГА за рубежом, положительные результаты первых исследований термодинамической эффективности этой энергосберегающей технологии привели к внедрению в 1994 г. фирмой «Криокор» на московской ТЭЦ-21 установки, в состав которой входили два одинаковых ДГА номинальной мощностью по 5000 кВт каждый. В 2007—2008 гг. практически такая же установка была внедрена и на ТЭЦ-23 Мосэнерго. Необходимо отметить, что инициатором внедрения был генеральный директор Мосэнерго Н.И. Серебрянников.

**Рис. 6.****Технологическая схема детандер-генераторного агрегата на ТЭЦ-21 Мосэнерго:**

1 — магистральный трубопровод; 2 — ГРП; 3 — газовый фильтр; 4 — газовойдяной теплообменник; 5, 6 — общестанционные коллекторы соответственно прямой и обратной сетевой воды; 7 — турбодетандер; 8 — газопровод; 9 — редуктор; 10 — электрогенератор; 11 — стопорный кран; 12 — клапан защиты; 13 — регулятор давления газа; 14 — задвижка на трубопроводе подачи газа на ДГА

Принцип действия схемы ДГА, установленного на ТЭЦ-21, заключается в следующем (рис. 6). Газ с давлением 0,8—1,2 МПа из магистрального газопровода 1 диаметром 720 × 8 мм, идущего к распределительному пункту 2 (станционное обозначение ГРП-2), отводится в блок параллельно соединенных механических газовых фильтров 3, откуда направляется в систему подогрева газа, состоящую из четырех параллельно соединенных газовойдяных теплообменников 4. Сетевая вода на подогрев газа поступает из общестанционного коллектора 5 прямой сетевой воды ТЭЦ и после подогревателей 4 направляется в общестанционный коллектор 6 обратной сетевой воды. Газ после подогрева направляется в два параллельно работающих турбодетандера 7 номинальной мощностью 5 МВт каждый, после чего поступает в газопровод 8, идущий от ГРП-2 к котлам ТЭЦ, где смешивается с основным потоком газа. Таким образом, ДГА подключен по газу параллельно основной системе газоснабжения котлов ТЭЦ.

Вал каждого турбодетандера 7 соединен через редуктор 9 с валом соответствующего электрогенератора 10. На схеме показана также запорная и регулирующая арматура, в частности стопорный клапан 11 (станционное обозначение СК-2), клапан защиты 12 и регулятор 13 давления газа на байпасном трубопроводе турбодетандера, задвижка 14 на трубопроводе подачи газа на турбодетандер.

Для организации технически грамотной, эффективной эксплуатации были проведены испытания детандер-генераторных агрегатов в промышленных условиях с целью определения их эксплуатационных характеристик и степени влияния основных режимных параметров ДГА на их работу.

Результаты проведенных испытаний подтвердили достаточно высокую термодинамическую эффективность этих установок. Все

полученные результаты отражены в отчете о проведенных исследованиях, хранящемся на ТЭЦ-21 ПАО «Мосэнерго».

Результаты исследований, проведенных на ТЭЦ-21 Мосэнерго, позволили обоснованно планировать возможности использования ДГА при различных внешних условиях: режимах работы ТЭЦ (тепловых и электрических нагрузках), температурах наружного воздуха, расходах, давлениях и температурах газа на входе ГРП и т.п.

За период с 1994 по 2002 г., с учетом проводимых в 1995 и 1996 гг. испытаний и перерыва в эксплуатации в 1999 г., связанном с организационными вопросами, число часов использования оборудования на 01.01.2003 составило 62 650, при этом на ДГА было выработано 257 102 тыс. кВт·ч электроэнергии.

Еще один детандер-генераторный агрегат на ТЭС России был внедрен в 2002 г. на Среднеуральской ГРЭС в составе комплекса, получившего название газотурбинная расширительная станция (ГТРС), включающая в себя газорегуляторный пункт и ДГА, изготовленный в ОАО «Турбомоторный завод». Назначением ГТРС было обозначено «получение дополнительной электрической мощности на перепаде газа». Пропускная способность ГТРС составляет 478 тыс. м³/ч, из которых 215 тыс. м³/ч могут быть направлены на турбодетандер. Номинальная электрическая мощность турбодетандера составляет 11,5 МВт при давлении газа на входе 1,1 МПа и на выходе 0,15 МПа. Детандер-генераторный агрегат успешно эксплуатируется по настоящее время, т.е. в течение 20 лет. Мнение руководства электростанции о работе ДГА весьма положительное. Проведенные на Среднеуральской ГРЭС расчеты показали, что средний удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии в ДГА составил 64 г/(кВт·ч).

Турбодетандерные технологии с 2000 г. нашли применение на электростанциях Беларуси. Во всех случаях использования ДГА (в Беларуси принято название ДГУ — детандер-генераторная установка) показали высокую эффективность. Удельный расход условного топлива на ДГА в Беларуси оказался значительно более

низким, чем та же величина на существующих на электростанциях энергоблоках, как на КЭС, так и на ТЭЦ.

Так, на Лукомльской ГРЭС 28 февраля 2000 г. был внедрен ДГА электрической мощностью 5 тыс. кВт. Двухлетняя эксплуатация позволила определить, что удельный расход топлива на отпуск электроэнергии на этой установке был равен 72 г/(кВт·ч). Для сравнения: на энергоблоках мощностью 300 МВт Лукомльской ГРЭС эта величина составила 316,1 г/(кВт·ч). Себестоимость отпущенной ДГА электроэнергии в 2,2 раза меньше, чем в среднем по электростанции. По мнению руководства Лукомльской ГРЭС, детандер-генераторная установка представляет собой вполне надежную и эффективно работающую энергосберегающую технологию.

С 2008 г. успешно эксплуатировалась утилизационная турбодетандерная установка УТДУ-4000 на Гомельской ТЭЦ-2. При расходе газа 102,3 тыс. м³/ч получена электрическая мощность 4,56 МВт. При этих условиях удельный расход топлива на отпуск электроэнергии составил 130 г у.т./кВт·ч. Аналогичные результаты были получены и на Минской ТЭЦ-4, где установлены две утилизационные детандер-генераторные установки суммарной мощностью 5 МВт.

Опыт эксплуатации всех перечисленных агрегатов показал их высокую надежность и термодинамическую эффективность. К сожалению, прямое сопоставление данных об эффективности невозможно, поскольку использовались разные методы ее определения. В приведенных выше оценках эффективности ДГА на Среднеуральской ГРЭС и белорусских электростанциях в качестве критерия эффективности рассматривался удельный расход топлива на отпуск электроэнергии, выработанной на ДГА как на отдельном агрегате, без учета влияния использования ДГА на режимы и эффективность работы основного оборудования электростанции. Полученные на разных электростанциях значения этой величины, хотя они и отличаются друг от друга, значительно меньше, чем при генерации электроэнергии на ПТУ и ГТУ. Как было отмечено выше, объясняется это просто: ДГА не является тепловой машиной. Выше было показано, что такой метод оценки эффективности ДГА может

быть использован при работе электростанции с максимально возможной нагрузкой. Однако, если нагрузка электростанции не максимальна, у такого методического подхода определения термодинамической эффективности ДГА существует общий существенный недостаток: такой подход не позволяет учесть влияние включения в схему электростанции детандер-генераторного агрегата на работу ее основного оборудования. Действительно, существуют режимы работы электростанции (это режимы работы в избыточной энергосистеме), при которых использование ДГА будет оказывать влияние на работу основного оборудования электростанции. При этом мощность основного оборудования при постоянной электрической нагрузке всей ТЭС должна быть уменьшена на величину мощности, вырабатываемой ДГА, что может привести к уменьшению эффективности работы основного оборудования.

Методика, позволяющая учитывать влияние ДГА на эффективность работы основного оборудования ТЭС была разработана по результатам, полученным при проведении испытаний ДГА на ТЭЦ-21 Мосэнерго. Расчеты, проведенные по этой методике и опубликованные в научно-технической литературе, показали, что при работе оборудования ТЭЦ по тепловому графику использование ДГА позволяет уменьшить удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии для всей ТЭЦ на 0,1—0,3 %, а при работе оборудования в конденсационном режиме уменьшение удельного расхода условного топлива может составить 1,0—1,2 %. Расчеты, проведенные на ТЭЦ-21, показали, что в 2002 г. снижение среднегодового удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии благодаря использованию ДГА составило 1,25 г/(кВт·ч).

Говоря о перспективах использования ДГА, следует отметить внедрение детандер-генераторных агрегатов, изготовленных в России (на Калужском турбинном заводе — КТЗ), которое было осуществлено в Иране в 2015—2018 гг. Были внедрены две установки электрической

мощностью по 8 МВт каждая. Установки показали свою работоспособность и успешно эксплуатируются.

Анализируя перспективы развития ДГА-технологии в России, необходимо отметить, что в 2020 г. в ПАО «Газпром» принято решение об установке в России двух ДГА общей мощностью 12 МВт на ГРС в системе газоснабжения в Пермской области в районе Пермской ГРЭС. Работы по реализации проекта с участием КТЗ уже начались.

Таким образом, практически во всех известных автору настоящей статьи публикациях, связанных именно с опытом использования ДГА-технологии на электростанциях, отмечаются высокие энергетическая эффективность и надежность детандер-генераторных агрегатов, а также возможность их эксплуатации в автоматическом режиме. Заметим, что авторами этих публикаций являются либо сотрудники электростанций, либо представители научных организаций, непосредственно занимавшиеся проведением испытаний ДГА и исследований режимов их работы на электростанциях.

Нельзя не отметить, что экономия топлива при выработке электроэнергии на ТЭС в результате применения ДГА приводит к уменьшению выбросов наиболее заметно влияющего на климат парникового газа — диоксида углерода, что имеет существенное значение в свете постепенно вводимых ограничений на эти выбросы.

Необходимо особо отметить, что ни в российских, ни в иностранных научно-технических журналах отрицательные отзывы об эксплуатации детандер-генераторных агрегатов автору настоящей статьи обнаружить не удалось. Исключением являются две-три статьи одного автора, в которых ДГА-технология рассматривалась как невыгодная для электростанций, однако автором при анализе результатов использования ДГА, к сожалению, были допущены элементарные термодинамические ошибки, а также выбран совершенно не правильный метод оценки термодинамической эффективности ДГА.





ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДГА
НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ СЛЕДУЕТ
ИСПОЛЬЗОВАТЬ СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

4 Оценка эффективности и возможности использования ДГА на ТЭЦ Мосэнерго



С учетом всего вышесказанного могут быть сформулированы основные методические принципы оценки эффективности применения ДГА:

- * общую эффективность применения ДГА во всех случаях необходимо определять на основе технико-экономического анализа, учитывая как капитальные затраты, так и влияние ДГА на эффективность производства, в первую очередь на топливную составляющую затрат в себестоимости энергии;

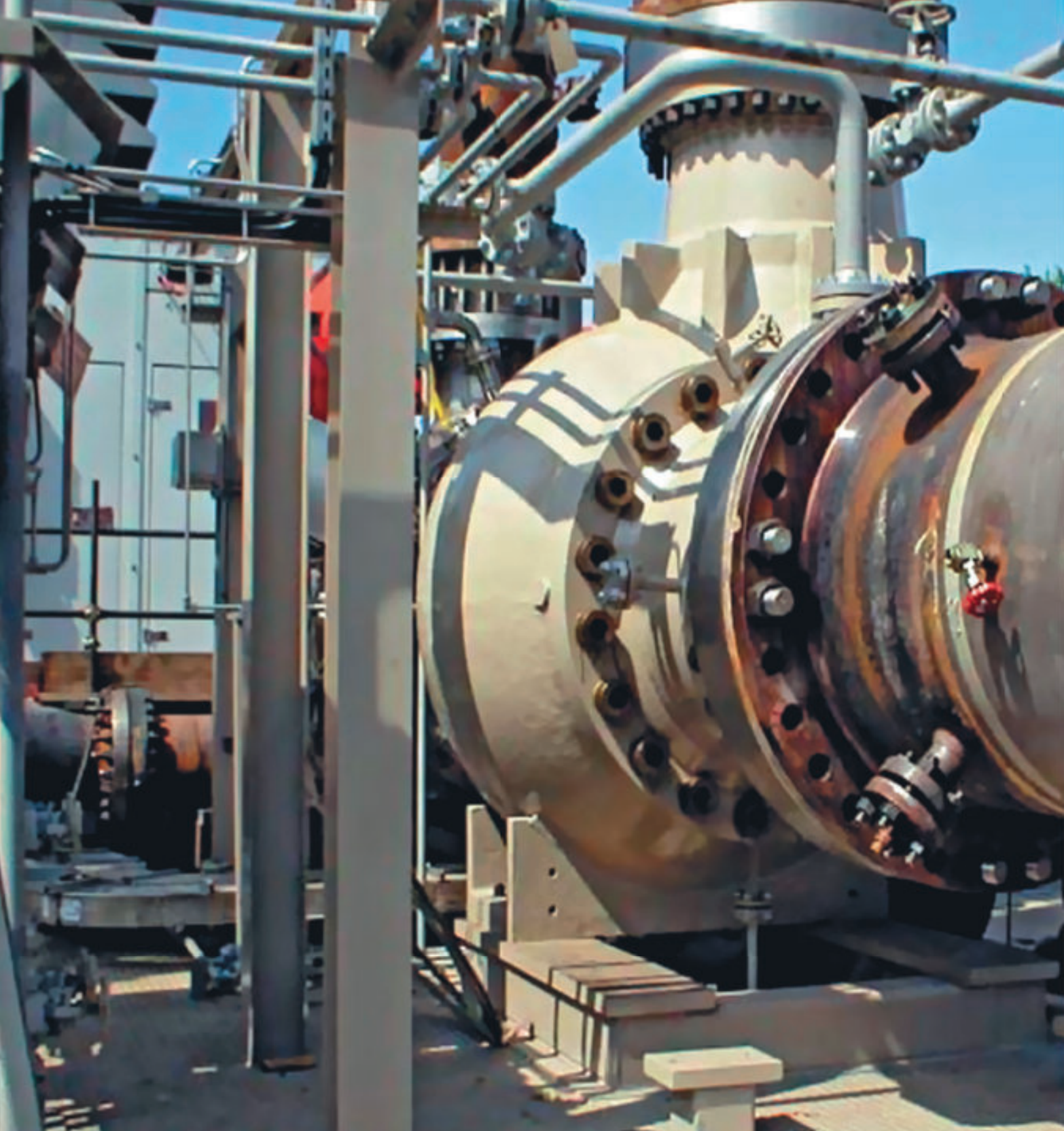
- * при определении энергетической эффективности использования ДГА на предприятии, в том числе и влияния ДГА на тепловую экономичность работы ТЭС, должно быть обязательно учтено, какое влияние оказывает ДГА на работу основного оборудования электростанции. Это влияние проявляется в возможных изменениях режимов работы основного оборудования электростанции (прежде всего в изменении генерируемой мощности) и связанных с ними изменениях удельных показателей тепловой экономичности.

Таким образом, при определении эффективности использования ДГА на электростанциях следует использовать системный подход, т.е. рассматривать изменение показателей эффективности всего предприятия в целом.

Основываясь именно на таком принципе, сотрудники Национального исследовательского университета «МЭИ» в 2012 г. провели исследования возможности и целесообразности применения ДГА-технологии в Мосэнерго. Для этого были проведены расчеты на основе данных о работе ТЭЦ Мосэнерго за 2011 г. В них определялась возможная мощность ДГА при полном расходе газа через детандер и при расходе газа через детандер, равном 0,75 полного расхода, а также возможная выработка электроэнергии по месяцам.

Расчеты показали, что в результате применения ДГА наибольшие дополнительные мощности были бы получены на ТЭЦ-21, ТЭЦ-22, ТЭЦ-23, ТЭЦ-25 и ТЭЦ-26. Даже при 0,75 полного расхода газа через детандер эти мощности могут достигать существенных значений — от 15 до 19 МВт (в летние месяцы от 4 до 10 МВт).

Развитие мощностей ТЭЦ Мосэнерго в результате внедрения и освоения ПГУ на некоторых электростанциях (ТЭЦ-12, ТЭЦ-16, ТЭЦ-20, ТЭЦ-21, ТЭЦ-26, ТЭЦ-27) суммарной мощностью 2,9 ГВт дает возможность повысить общую мощность ДГА, однако этот вопрос требует проведения дополнительных исследований. Следует особо подчеркнуть, что при выборе схемы ДГА, основного оборудования, источника теплоты для подогрева газа в ДГА каждый конкретный случай возможного внедрения ДГА должен быть рассмотрен отдельно, с учетом всех специфических особенностей ТЭЦ: ее мощности, состава основного оборудования, режимов работы электростанции и т.п. Только такой подход к решению задачи внедрения ДГА может привести к положительному результату.



ОСНОВНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ РАЗВИТИЯ ДГА-ТЕХНОЛОГИИ ЯВЛЯЮТСЯ РАЗРАБОТКА БЕСТОПЛИВНЫХ ДГА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ НИЗКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ГАЗА ПОСЛЕ ДЕТАНДЕРА

5 Развитие ДГА-технологии



Основным научным направлением развития ДГА-технологии на сегодняшний день является разработка технических решений, связанных с созданием бестопливных ДГА и технологических комплексов, в которых кроме вырабатываемой им электроэнергии может быть полезно использована низкая температура потока транспортируемого газа после детандера ДГА.

Бестопливные детандер-генераторные агрегаты. В предложенных выше технических решениях для подогрева газа в ДГА на ТЭС рассматривались источники высокопотенциальной энергии, получаемой в основном путем сжигания органического топлива. Как правило, это часть транспортируемого природного газа.

Таким образом, существующие детандер-генераторные агрегаты хотя и позволяют использовать избыточное давление транспортируемого природного газа для получения электроэнергии, но их работа все же приводит к загрязнению окружающего воздушного бассейна из-за сжигания органического топлива.

Обеспечить работу ДГА без сжигания топлива можно несколькими способами. Рассмотрим основные из них.

Схема без подогрева газа с предварительным дросселированием известна и была реализована на ГРС-3 («Южная») в Москве. Принципиальная схема такой установки приведена на рис. 7. Процессы с газом, происходящие в установке, показаны в h, s -диаграмме на рис. 8.

Установка работает следующим образом. Транспортируемый газ направляется на детандер 1 ДГА через дросселирующее устройство 7. Если напрямую, без дросселирования, направить газ в детандер, то расширение газа (линия 0–1 на рис. 8) будет сопровождаться заметным снижением его температуры, которая в точке 1 может достигать недопустимых по условиям эксплуатации значений. Давление транспортируемого газа снижается в дросселирующем устройстве (процесс 0–2) до такого значения, чтобы температура T_k газа на выходе из детандера была не больше наперед заданной, определяемой требованиями к работе станции технологического понижения давления и правилами эксплуатации газопроводов. При этом теплообменник 5 (см. рис. 7) установки может использоваться для получения холода.

Преимущества и недостатки схемы очевидны. Несомненным преимуществом является ее сравнительная простота, связанная с отсутствием системы подогрева газа. К недостаткам схемы следует отнести значительно меньшую мощность на единицу расхода транспортируемого газа, чем это возможно при располагаемых перепадах давлений транспортируемого газа на входе и выходе станции понижения давления.

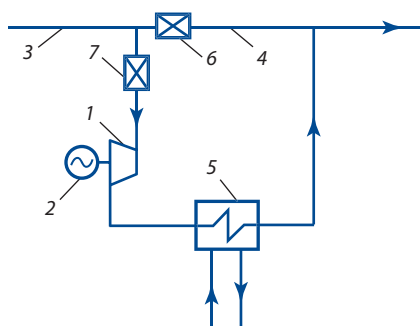


Рис. 7.
Принципиальная схема ДГА без подогрева газа с предварительным дросселированием:

1 — детандер; 2 — генератор; 3 — трубопровод высокого давления; 4 — трубопровод низкого давления; 5 — теплообменник (холодильник); 6 — дросселирующее устройство ГРС (ГРП); 7 — дросселирующее устройство перед детандером

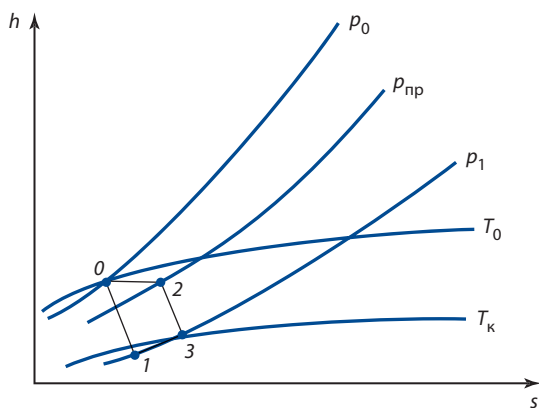


Рис. 8.
Процессы работы ДГА без подогрева газа с предварительным дросселированием в h, s -диаграмме:

$p_0, p_{пр}, p_1$ — соответственно начальное, промежуточное и конечное давление газа; T_0, T_k — соответственно начальная и конечная температура газа

Бестопливный режим работы ДГА можно обеспечить, используя схему подогрева газа перед детандером с помощью термотрансформато-

ра — теплонасосной установки (ТНУ), использующей часть энергии, вырабатываемой электрогенератором ДГА, для обеспечения своей работы. При таком техническом решении для обеспечения нормальной работы ДГА используется лишь энергия потока транспортируемого природного газа и низкопотенциальная энергия. В качестве источника низкопотенциальной энергии при этом могут быть использованы вторичные энергетические ресурсы и/или теплота окружающей среды.

Принципиальная схема установки, в которой для подогрева транспортируемого газа перед детандером используется парокompрессионный термотрансформатор, приведена на рис. 9.

Установка содержит кинематически соединенный с электрическим генератором 1 детандер 2. Детандер подключается параллельно стационарному дросселирующему устройству Dp , разделяющему трубопроводы высокого 3 и низкого 4 давления. Теплообменник 5, служащий для подогрева газа высокого давления, является одновременно и элементом ТНУ, в состав которой входят также компрессор 6, приводимый в действие электродвигателем 7, дросселирующее устройство 8, испаритель 9. Вода низкого температурного потенциала подводится к испарителю 9 по линии 10 и отводится от него по линии 11. Линии 12 и 13 предназначены для подачи электроэнергии внешнему потребителю и на электродвигатель 7 ТНУ.

Установка работает следующим образом. Газ высокого давления поступает в теплообменник 5, греющей средой в котором является хладагент контура ТНУ. Теплонасосная установка повышает уровень температурного потенциала теплоты, полученной от низкопотенциального источника в испарителе 9. Нагретый в теплообменнике 5 газ высокого давления подается в детандер 2. После расширения в детандере газ направляется в трубопровод низкого давления 4, а совершенная в детандере механическая работа преобразуется в электрическую энергию в электрогенераторе 1. Часть электроэнергии, выработанной генератором, должна быть израсходована на технологический подогрев газа перед детандером посредством ТНУ. Оставшаяся электроэнергия может быть полезно использована для отпуска внешнему потребителю или производства дополнитель-

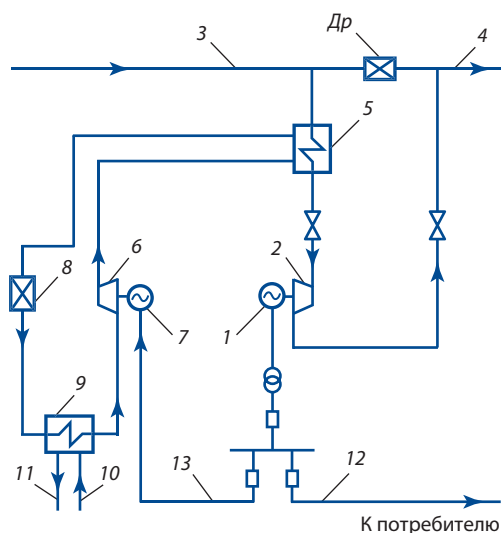


Рис. 9.
Принципиальная схема установки с подогревом газа перед детандером тепловым насосом:

Dr — дросселирующее устройство; 1 — электрогенератор; 2 — детандер; 3, 4 — газопровод соответственно высокого и низкого давления; 5 — теплообменник; 6 — компрессор; 7 — электродвигатель; 8 — дросселирующее устройство; 9 — испаритель; 10, 11 — трубопроводы для подвода и отвода воды; 12, 13 — электрические линии

ной теплоты с помощью той же теплонасосной установки. Дополнительно выработанная теплота может быть использована для дополнительного подогрева газа в теплообменнике 5. (Дополнительный подогрев газа перед его использованием в топках котлов или печей, как известно, позволяет снизить расход топлива.)

Проведенные расчеты показали, что для условий ГРП электростанции полезная мощность, отдаваемая комплексом в сеть, составляет от 52 до 81 % вырабатываемой ДГА электроэнергии (при давлениях от 8 до 12 бар и температурах, близких к обычным температурам окружающей среды).

Для обеспечения работы таких установок не требуется сжигания топлива, т.е. они работают без выбросов продуктов сгорания в атмосферу.

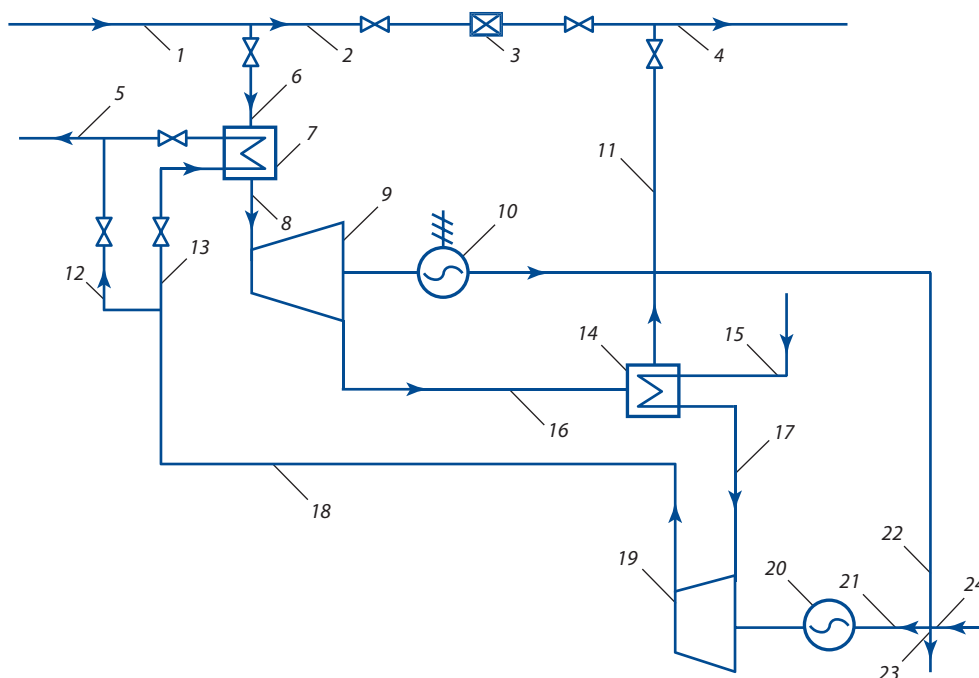
Технологические комплексы с использованием низкой температуры потока транспортируемого газа после детандера ДГА. Другие возможности развития ДГА-технологии связаны с использованием низкой температуры потока транспортируемого газа после детандера ДГА. Поток газа после детандера может использоваться как хладоноситель при создании различного рода технологических комплексов.

Так, например, низкая температура потока газа после ДГА может быть использована в схеме парогазовой установки для охлаждения циклового воздуха входящей в ее состав ГТУ.

Другой пример полезного использования холода, получаемого после ДГА, представлен на рис. 10. В нем ДГА работает в паре с компрессором. Такая комбинация может входить как составная часть в технологические комплексы различного назначения. Общим для них является использование в качестве топлива природного газа с избыточным давлением на входе и необходимость компримирования какого-либо газа.

Основными элементами установки являются компрессор 19 и детандер-генераторный агрегат. В состав ДГА входят детандер 9, электрогенератор 10, а также теплообменники 7 и 14, являющиеся составными элементами как ДГА, так и компрессорной установки. В состав компрессорной установки входят компрессор 19 и электродвигатель 20. Теплообменник 7 предназначен для подогрева газа перед детандером ДГА и охлаждения сжатого воздуха, подаваемого потребителю. Второй теплообменник (14) служит для охлаждения воздуха перед компрессором с одновременным нагревом газа, направляемого потребителю.

Принцип действия установки заключается в следующем. Поток газа высокого давления, поступающий на ГРП по линии 1, разделяется на две части. Одна из частей потока газа по линии 2 направляется к дросселирующему устройству 3, где его давление уменьшается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, после чего поступает в линию 4 отвода газа низкого давления из ГРП потребителям. Вторая часть газа высокого давления по линии 6 поступает в теплообменник 7, где производится подогрев этого потока газа за счет теплоты воз-

**Рис. 10.****Технологическая схема установки на базе ДГА и компрессора с электроприводом:**

1, 2, 6 — газопроводы высокого давления; 3 — дросселирующее устройство; 4 — газопровод низкого давления; 5, 12, 13, 15, 17, 18 — воздухопроводы; 7, 14 — теплообменники; 8, 11, 16 — газопроводы; 9 — детандер; 10 — электрогенератор; 19 — компрессор; 20 — электродвигатель; 21—24 — электрические линии

духа высокого давления, направляемого в этот теплообменник из компрессора 19 по линии 13. После подогрева в теплообменнике 7 газ по линии 8 направляется в детандер 9 ДГА, а отдавший часть теплоты воздух по линии 5 отводится потребителям.

Поток газа, часть потенциальной энергии которого в детандере 9 преобразуется в механическую работу, в результате чего его давление снижается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, а температура уменьшается, отводится из детандера 9 по линии 16 в теплообменник 14. В этот же теплообменник 14 по линии 15 направляется поток воздуха из атмосферы с начальным давлением и температурой более высокой, чем температура потока газа на входе в теплообменник. В теплообменнике 14 происходит охлаждение потока воздуха, после чего этот поток по линии 17

поступает на сжатие в компрессор 19, а газ из теплообменника 14 по линии 11 направляется в линию 4 отвода газа низкого давления из ГРП потребителям.

Поток сжатого воздуха отводится из компрессора 19 по линии 18. В схеме установки предусмотрена возможность отвода части потока сжатого воздуха из линии 18 по линии 12 помимо теплообменника 7 непосредственно в линию 5 подачи сжатого воздуха потребителям, что позволяет при необходимости регулировать температуру подогрева газа в теплообменнике 7, а также и температуру воздуха в линии 5.

Механическая работа, произведенная потоком газа в детандере 9 ДГА, в генераторе 10 ДГА преобразуется в электроэнергию, которая отводится из него по линии 22. В тех случаях, когда электрическая мощность ДГА достаточна для обеспечения

работы компрессора, одна часть выработанной генератором 10 электроэнергии отводится из линии 22 по линии 21 на электродвигатель 20 компрессора 19, вторая часть отводится из линии 22 по линии 23 потребителям. В тех же случаях, когда электрическая мощность ДГА не достаточна для обеспечения работы компрессора, предусмотрен подвод дополнительной электрической мощности из сети по линии 24.

Повышение термодинамической эффективности работы компрессорной установки происходит благодаря уменьшению температуры воздуха, направляемого в компрессор для сжатия, с применением для этого имеющего низкую температуру потока газа после детандера (детандер-генераторный агрегат генерирует также и электроэнергию, используемую для привода компрессора). В свою очередь, для обеспечения необходимых параметров работы ДГА необходим подогрев газа в теплообменнике перед детандером, для чего используется вторичный энергетический ресурс компрессора — теплота потока сжимаемого газа (в данном случае воздуха). При практическом использовании такого комплекса, в зависимости от расходов газа на ДГА и расходов сжимаемого воздуха, возможны различные варианты организации режимов его работы.

Для определения эффективности предложенной схемы был проведен расчет для реальных расходов газа и воздуха при следующих условиях: в компрессоре происходит сжатие воздуха для технологических нужд доменного производства от атмосферного давления до 5 бар; номинальная производительность компрессора 84 кг/с; номинальная мощность электропривода компрессора, потребляемая из сети, составляет при этом 17,2 МВт. При установке ДГА, в котором осуществляется снижение давления газа от 9 до 3 бар, при расходе природного газа 28,2 кг/с может быть получена дополнительная электрическая мощность 3,62 МВт. Таким образом, возможно снизить расход электроэнергии, потребляемой из сети на привод компрессора, на 21 %.

При подогреве природного газа в теплообменнике перед детандером до 50 °С при заданных параметрах процесса его температура на выходе из детандера будет равна –9,6 °С. Полученный поток холода может использоваться для охлаждения

воздуха перед его сжатием в компрессоре до 5 °С. В этом случае плотность воздуха увеличится приблизительно в 1,033 раза, что при прочих равных параметрах процесса повысит массовую производительность компрессора на 3—4 %. При этом температура воздуха на выходе из компрессора будет достигать приблизительно 180 °С. Транспортируемый сжатым воздухом тепловой поток мощностью 3850 кВт при принятых параметрах процесса, достаточен для подогрева газа перед детандером от 10 до 50 °С, для чего потребуется 2590 кВт. Оставшаяся тепловая мощность потока воздуха может быть использована, например, для подогрева газа перед подачей его на сжигание или для иных нужд предприятия.

Таким образом, при принятых вполне реальных условиях расчета использование ДГА в сочетании с компрессором в качестве взаимовос требованных установок позволяет обеспечить их автономную работу частично, а в определенных случаях и полностью, благодаря использованию энергии потока газа, теряемой при технологическом уменьшении давления потока газа при применении дросселирования.

Заключение

Детандер-генераторная технология является одной из известных применяемых на практике в мировой энергетической промышленности энергосберегающих технологий. Ее использование на тепловых электрических станциях, в зависимости от типа основного оборудования ТЭС и режимов его работы, а также характеристик газа, поступающего на электростанцию, позволяет уменьшить расход условного топлива на генерацию электроэнергии от 1,5 до 4,0 г/(кВт·ч).

Эксплуатация детандер-генераторных агрегатов на электростанциях России показала их высокую надежность и простоту организации их обслуживания персоналом станции.

Массовое внедрение ДГА в промышленности России, в том числе и в энергетической ее отрасли, позволит повысить эффективность использования природного газа и уменьшить вредное воздействие на экологическую обстановку.

Опыт работы детандер-генераторных установок в Мосэнерго

Волна интереса к применению детандер-генераторных аппаратов в большой энергетике поднялась еще в 90-е годы XX века. Опыт эксплуатации таких установок в ПАО «Мосэнерго» ведет отсчет с 1994 года, когда на ТЭЦ-21 был смонтирован энергетический комплекс из двух ДГА мощностью 5 МВт каждый с проектной годовой выработкой 80 млн кВт·ч. В 2006 году был сооружен энергокомплекс аналогичной конструкции на ТЭЦ-23 Мосэнерго.

Вводились ДГА и на других ТЭС России. Однако в Мосэнерго, детандер-генераторная технология

не получила массового применения в дальнейшие годы. Более того, часть построенных установок была выведена из эксплуатации. Вероятно, это связано с существенным изменением режимов работы генерирующих предприятий и рядом сложностей применения технологии, которые были выявлены в процессе эксплуатации.

Во-первых, в связи с разрушением советской экономики значительно снизилось по сравнению с началом 90-х годов потребление электроэнергии и, соответственно, нагрузки ТЭС. КИУМ многих ТЭС снизился до 30—35 %. В этих



Детандер-генераторный агрегат № 1 на ТЭЦ-21

условиях проектная экономическая эффективность использования ДГА, которая рассчитывалась на проектные нагрузки, не могла быть достигнута.

Во-вторых, экономика работы ДГА также существенно зависит от разности давлений природного газа до и после установки. Однако режимы подачи природного газа на ТЭЦ характеризуются значительной неравномерностью как по расходу газа, так и по его давлению на ГРП в связи с сезонными колебаниями нагрузки. В результате графики электрической нагрузки ДГА становятся резко переменными с пониженным КПД на частичных нагрузках. А это ведет к существенному снижению годовой выработки электроэнергии на ДГА, что, в свою очередь, снижает экономичность и увеличивает сроки окупаемости инвестиций.

В-третьих, важную роль сыграло и то, что производитель турбодетандеров, применяе-

мых в России и на ТЭЦ Мосэнерго в частности, находился на Украине и вскоре прекратил свое существование. Это сделало невозможным как текущее снабжение запасными частями, так и устранение конструктивных недоработок оборудования, которые выявлялись в процессе эксплуатации.

Таким образом, несмотря на теоретическую эффективность выработки электроэнергии за счет сбрасывания избыточного давления газа и без его затрат, для инвестиционной эффективности внедрения ДГА требуются особые условия: постоянные нагрузки ТЭС, близкие к максимальным, относительно стабильное внешнее давление газа, доступные источники тепла для подогрева газа. При этом нужно учитывать, что стоимость строительства 1 МВт электрической мощности ДГА по экспертным оценкам находится на уровне стоимости 1 МВт установленной мощности ТЭС.



Научно-популярное издание

ЭКОЛОГИЯ, ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Под редакцией академика РАН Александра Викторовича Клименко

Выпуск 4

**АГАБАБОВ Владимир Сергеевич
ВИВЧАР Антон Николаевич
СЕРДЮКОВ Виталий Александрович
ПОПОВ Николай Витальевич**

**ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТЭС**

Оригинал-макет подготовлен АО «Издательский дом МЭИ»

Подписано в печать 22.12.2022. Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 4,0

Контакты издателя: Инженерное управление ПАО «Мосэнерго».

Тел.: +7 (495) 957-19-57, доб. 34-14.

Электронная почта: SigitovOY@mosenergo.ru

Управление по работе со СМИ и органами власти ПАО «Мосэнерго».

Тел.: 8 (495) 957-19-57, доб. 22-90, 37-17.

Электронная почта: press-centre@mosenergo.ru.

Адрес в Интернете: www.mosenergo.ru