

## Раздел седьмой ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

### 7.2. Применение детандер-генераторных агрегатов при использовании технологического перепада давлений транспортируемого природного газа

#### 7.2.1. Физические основы и оценка эффективности работы ДГА

Агабабов В.С., Корягин А.В.; МЭИ(ТУ)

Как известно, подземный пласт природного газа обладает высоким давлением. Высокое давление пласта частично используется для транспортировки природного газа по магистральным трубопроводам на значительные расстояния к месту потребления. При сжигании газа в промышленности или в быту его давление должно быть значительно снижено по сравнению с давлением в магистральных трубопроводах. Это снижение осуществляют обычно за счет дросселирования.

Детандер-генераторный агрегат представляет собой устройство, в котором энергия потока транспортируемого природного газа преобразуется сначала (с потерей давления и температуры) в механическую энергию в детандере, а затем в электрическую энергию в генераторе. Существует также принципиальная возможность полезного использования холода, образующегося в результате расширения потока газа в детандере, а также получения теплоты.

Рассмотрим систему газоснабжения потребителя, который использует природный газ в качестве топлива (рис. 7.6).

Природный газ из пласта 1 поступает на поверхность в «головку» скважины 2. Давление газа на выходе из скважины имеет величину до 16, МПа, температура до +35 °С. Пройдя очистку в механическом фильтре 3 и осушившись от транспортируемой им влаги в осушителе 4, природный газ через дросселирующее устройство 5 поступает в магистральный трубопровод 6. В дросселирующем устройстве 5 происходит снижение давления потока газа до давления в магистральном трубопроводе, которое на территории России составляет либо 5,5, либо 7,5 МПа в зависимости от типа трубопровода. При транспортировке на большие расстояния происходит снижение давления газа из-за трения в трубопроводе, а также снижение его температуры (и внутренней энергии) в результате теплообмена с окружающей средой. Потери давления газа компенсируются по мере необходимости на компрессорных станциях 7.

Технология дальнейшего использования газа как топлива при существующей системе газопотребления требует снижения его давления до 0,1...0,3 МПа. Снижение давления газа осуществляется обычно в двух ступенях: 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 1...3 МПа (рис. 7.6). Давление потока газа на ГРС и ГРП снижается, как правило, путем дросселирования. После ГРП природный газ направляется на сжигание в топливоиспользующие устройства 10 (например, схематично изображенный на рис. 7.6 энергетический котел электростанции). Использование ДГА вместо дросселирующих устройств возможно как в первой ступени снижения давления (ГРС), так и во второй (ГРП).

Условия использования газового потока после станций понижения давления обычно существенно различаются между собой. Так, после ГРС, располагающейся обычно вдали от газопотребляющего оборудования, газ направляется на ГРП, находящиеся в непосредственной близости

от предприятий — потребителей газа. Расстояния от ГРС до ГРП составляют обычно от нескольких единиц до нескольких десятков километров. Энтальпия транспортируемого после ГРС на большие расстояния по трубопроводам газа может изменяться (что обычно и происходит) за счет теплообмена с окружающей средой. После же ГРП газ чаще всего используется как топливо в различного рода технологических печах, энергетических котлах и т.п. Энтальпия газового потока в этом случае оказывает влияние на тепловую экономичность работы газопотребляющего оборудования, так как полная энергия, которую поток газа отдает в топке котла или печи, определяется не только теплотой его сгорания, но и физической теплотой (энтальпией) самого потока.

Рассмотрим приведенные в  $h,S$ -диаграмме на рис. 7.7 графики процессов, происходящих при дросселировании газового потока и при снижении давления за счет применения ДГА.

При дросселировании (процесс 0—1) энтальпия потока газа не меняется. При снижении давления газа с помощью ДГА энтальпия газового потока уменьшается за счет преобразования в детандере части энергии потока газа в механическую работу. При этом возможны различные варианты организации процесса:

1. *Расширение в детандере без подогрева газа перед ним.*

График процесса изображается линией 0—2 на рис. 7.7.

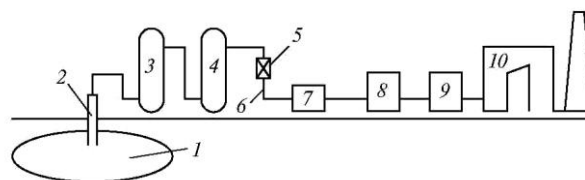


Рис. 7.6. Схема газоснабжения потребителей:

1 — газовый пласт; 2 — «головка» скважины; 3 — механический фильтр; 4 — осушающее устройство; 5 — дросселирующее устройство; 6 — магистральный трубопровод; 7 — компрессорная станция; 8 — газораспределительная станция; 9 — газорегуляторный пункт; 10 — потребитель газа (котел)

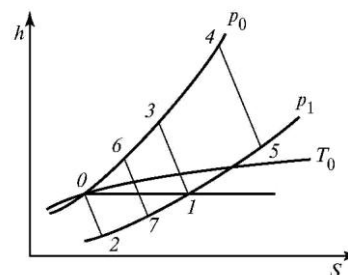


Рис. 7.7. Процессы, происходящие в детандере, в  $h,S$ -диаграмме

При этом происходит также снижение температуры газа. Если ДГА установлен на ГРС, то при дальнейшей транспортировке до ГРП, как правило, энтальпия газовой

го потока со временем восстанавливается до первоначальной за счет теплообмена с окружающей средой (процесс 2—1). Если же ДГА установлен на ГРП и транспортируемый на небольшие расстояния газ не успевает нагреться в трубопроводе за счет теплообмена с окружающей средой, то без организации подогрева газа после детандера физическая теплота топлива, вносимая в топку, окажется меньше, чем при дросселировании, на разность энтальпий  $\Delta h_{02} = h_0 - h_2$ , эквивалентную механической работе детандера. Теплота, необходимая для повышения энтальпии потока газа до первоначального состояния в этом случае (процесс 2—1), должна быть подведена либо в топке газоиспользующего оборудования за счет сжигания дополнительного топлива, либо в теплообменнике без применения каких-либо дополнительных устройств за счет низкопотенциального источника теплоты (теплоты окружающей среды либо теплоты вторичных энергетических ресурсов). Последняя возможность обусловлена тем, что при существующих в реальных условиях параметрах транспортируемого газа температура газового потока на выходе из детандера при отсутствии подогрева газа перед детандером была бы значительно ниже температуры окружающей среды.

Следует отметить, что существующие технологические ограничения по отрицательной температуре газа делают этот вариант использования практически неприемлемым.

## 2. Расширение в детандере с подогревом газа перед ним.

а) В одном из возможных случаев газ подогревается перед детандером за счет теплоты высокого потенциала таким образом (линия 0—3 на рис. 7.7), что энтальпия газового потока после детандера оказывается равной энтальпии газового потока после дросселирования. При этом вся подведенная к газу теплота (она пропорциональна разности энтальпий  $h_3 - h_0$ ) преобразуется в детандере в механическую работу. Полученная в детандере механическая работа переходит в электрическую энергию в генераторе (за исключением механических и электрических потерь в генераторе).

б) Газ перед детандером может быть подогрет и так (линия 0—4 на рис. 7.7), что его энтальпия (точка 5 на рис. 7.7) на выходе из детандера будет выше, чем при дросселировании. В этом случае лишь часть подведенной к газу теплоты, пропорциональной  $h_4 - h_0$ , будет израсходована на выработку механической работы (эта часть пропорциональна разности энтальпий  $h_4 - h_5$ ). Вторая часть подведенной к газовому потоку теплоты, она пропорциональна разности энтальпий  $h_5 - h_0$ , при использовании ДГА на ГРП также будет полезно использована — затрачена на увеличение физической теплоты газового потока, поступающего в топку. Увеличение поступающей в топку физической теплоты газового потока приведет к снижению расхода топлива в котле на величину, пропорциональную  $h_5 - h_0$ . При использовании ДГА на ГРС энергия, пропорциональная разности энтальпий  $h_5 - h_0$ , теряется за счет теплообмена с окружающей средой при дальнейшей транспортировке газа.

в) Возможны также и другие способы подогрева газа в ДГА. Так, газ может быть частично подогрет перед детандером, частично — после него (процесс 0—6 на рис. 7.7). Существуют также схемы с подогревом газа перед детандером с последующим промежуточным подогревом газа после прохождения им части ступеней детандера. Однако все они являются различными комбинациями

рассмотренных выше способов подогрева газа.

Для определения эффективности применения ДГА может быть использован рекомендованный в [1] эффективный КПД, представляющий собой отношение полезной работы  $A_{\text{пол}}$  к подведенной энергии  $\mathcal{E}_{\text{подв}}$ :

$$\eta_e = A_{\text{пол}} / \mathcal{E}_{\text{подв}} \quad (7.1)$$

Например, в том случае, когда энтальпия потока газа после детандера при его дальнейшей транспортировке в результате теплообмена с окружающей средой принимает то же значение, каким оно было бы при дросселировании потока, в качестве удельной полезной работы может рассматриваться только выработанная ДГА электроэнергия. На диаграмме в процессе 0—3—1 для единицы массы газа она равна разности  $h_3 - h_1$ , в процессе 0—4—5 — разности  $h_4 - h_5$ . Подведенная к газу удельная энергия в процессе 0—3—1 равна разности  $h_3 - h_0$ , в процессе 0—4—5 — разности  $h_4 - h_0$ . Сравнение эффективных КПД для обоих рассмотренных случаев показывает, что в процессе 0—3—1 он будет больше, чем в процессе 0—4—5, так как во втором процессе энергия, равная разности энтальпий  $h_5 - h_1$  и полученная газом при подогреве, безвозвратно теряется за счет диссипации в окружающую среду. Если же энергия  $h_5 - h_1$  может быть частично или полностью использована для увеличения физической теплоты поступающего в топку потока газа, необходимо учитывать возникающее при этом снижение расхода топлива в газопотребляющем оборудовании.

Для процесса 0—4—5 выражение (7.1) в том случае, когда влияния ДГА на работу энергосберегающего оборудования учитывать не следует, имеет вид:

$$\eta_e = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_0}, \quad (7.2)$$

а когда влияние ДГА на работу энергосберегающего оборудования должно быть учтено

$$\eta_e = \frac{h_4 - h_5 + (1 + \gamma)(h_5 - h_1)}{h_4 - h_0}, \quad (7.3)$$

где  $\gamma$  — доля энергии потока газа, теряемая при транспортировке от ДГА до газопотребляющего оборудования.

Очевидно, что для процесса 0—3—1 в обоих случаях выражение для эффективного КПД будет иметь вид:

$$\eta_e = \frac{h_3 - h_1}{h_3 - h_0}. \quad (7.4)$$

Обратим внимание на то, что энтальпии  $h_0$  и  $h_1$  (рис. 7.7) равны между собой, и эффективный КПД детандера (без учета потерь в окружающую среду) в этом случае равен 1. В этом смысле детандер может рассматриваться как агрегат, аналогичный турбине, работающей с противодавлением.

Для процесса 0—6—7—1 эффективный КПД детандера может быть определен из выражения

$$\eta_e = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_0 + h_7 - h_1}. \quad (7.5)$$

Если подогрев газа организован так, что для подвода теплоты  $h_6 - h_0$  сжигается топливо, а для подвода теплоты  $h_7 - h_1$  напрямую используется теплота окружающей среды, или сбросная теплота, то этот случай будет отличаться от случая, когда топливо для подвода теплоты сжигается и на участке 0—6, и на участке 7—1, с точки зрения затрат на подвод теплоты. Для оценки эффективности использования для подогрева газа сбросной тепло-

ты или теплоты окружающей среды предлагается ввести показатель, называемый коэффициентом ценности используемой теплоты (ЦИТ)  $K_{ЦИТ}$ , определяемый из выражения

$$K_{ЦИТ} = 1 - \frac{Q_{НИТ}}{Q_{подв}} \quad (7.6)$$

где  $Q_{подв}$  — вся теплота, подведенная к газу, кДж;  $Q_{НИТ}$  — теплота, подведенная к газу в низкопотенциальном источнике теплоты (НИТ) со сбросной теплотой или теплотой окружающей среды, кДж.

При  $Q_{НИТ} = 0$  коэффициент  $K_{ЦИТ} = 1$ , при  $Q_{НИТ} = Q_{подв}$  коэффициент  $K_{ЦИТ} = 0$ , т.е. чем меньше коэффициент ценности используемой теплоты  $K_{ЦИТ}$ , тем меньше затрат на топливо при организации подогрева газа.

Очевидно, что такие же рассуждения могут быть применены и к случаю, когда подогрев газа перед детандером не производится.

Таким образом, если газ после ДГА сразу направляется на сжигание, эффективность использования ДГА для получения электроэнергии необходимо определять с учетом того, как он повлияет на технико-экономические показатели, в частности на расход топлива всей установки в целом, включая газоиспользующее оборудование, по сравнению с тем случаем, когда снижение давления газа происходило за счет дросселирования потока.

При определении эффективности работы ДГА, когда нельзя не учитывать его влияние на показатели работы основного оборудования, также выделим два варианта его использования:

- 1) на предприятии, производящем электроэнергию;
- 2) на предприятии, не производящем электроэнергию.

К первым относятся все тепловые электрические станции (КЭС и ТЭС), топливом для которых является газ. Ко вторым — все остальные потребители газа как топлива, имеющие свои ГРП: отопительные и промышленные котельные, заводы цветной и черной металлургии, заводы химической промышленности и т.п.

Использование ДГА на электростанциях позволяет либо увеличить располагаемую мощность, а следовательно, и производство электроэнергии на ТЭС, либо, оставляя общую выработку ТЭС постоянной, производить часть электроэнергии с более высокой, чем на паротурбинных установках, эффективностью на ДГА, снижая производство электроэнергии на паротурбинном оборудовании. Первый из рассмотренных вариантов характерен для дефицитных энергосистем [2, 3], второй — для избыточных [4].

И в том, и в другом случаях эффективность использования ДГА на ТЭС может быть определена по изменению либо КПД электростанции по производству электроэнергии, либо удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии, либо удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии после включения ДГА. При этом показатели должны относиться к работе всей ТЭС в целом.

Так, если удельный расход теплоты на выработку электроэнергии на ТЭС с турбинами конденсационного типа до включения ДГА в ее тепловую схему может быть определен из выражения

$$q_{э0} = Q_{КА} / N_{э0} \quad (7.7)$$

то после включения ДГА удельный расход теплоты на выработку электроэнергии определяется по формуле

$$q_{э1} = \frac{Q_{КА0} + Q_{ДГА} + \Delta Q_{КА}}{N_{э1} + N_{ДГА}} \quad (7.8)$$

В формулах (7.7) и (7.8)  $Q_{КА}$  — теплота, затраченная на выработку электроэнергии, кДж;  $N_{э}$  — мощность, выработанная электростанцией, МВт;  $Q_{ДГА}$  — дополнительная теплота, затраченная для обеспечения работы ДГА, кДж;  $\Delta Q_{КА}$  — изменение количества теплоты, связанное с изменением энтальпии газового потока при изменении параметров газа по сравнению с его параметрами при дросселировании, МВт;  $N_{ДГА}$  — электрическая мощность, выработанная ДГА, МВт.

Индекс «0» в формулах (7.7) и (7.8) относится к режиму работы электростанции без ДГА, т.е. при дросселировании потока газа на ГРП перед подачей его в котлы, индекс «1» — к режиму работы с ДГА.

Величина  $Q_{ДГА}$  зависит от выбора способа подогрева газа (за счет теплоты отборного пара, за счет использования теплоты окружающей среды или вторичных энергетических ресурсов и т.п.), от режима работы электростанции (с максимальной или не максимальной электрической нагрузкой, в дефицитной или избыточной энергосистеме и т.п.). Величина  $\Delta Q_{КА}$  зависит от энтальпии газа на выходе из детандера, влияющей, как было показано выше, на изменение расхода топлива в котле (расход топлива в котле по сравнению с его расходом до включения ДГА, может быть как увеличен — при энтальпии газового потока меньшей, чем до включения ДГА, так и уменьшен — при энтальпии потока большей, чем до включения ДГА).

При использовании ДГА на предприятиях, не производящих электроэнергию, в условиях, когда его работа влияет на эксплуатационные показатели основного оборудования, эффективность работы ДГА может быть оценена по выражению (7.1).

При выборе критериев оценки эффективности работы ДГА необходимо также учитывать, для какой системы решается задача, т.е. какие объекты входят в рассматриваемую систему, а какие являются для системы внешними, а также связана ли система перетоками электроэнергии с внешними элементами. Поясним это на примере. Так, при включении ДГА в тепловую схему ТЭС можно оценивать эффективность использования ДГА как для изолированной ТЭС, так и для энергосистемы, в которую эта ТЭС входит. При сложившихся в последнее время экономических отношениях между ТЭС и энергетической системой, а также между энергосистемами, оба подхода являются правомочными. В первом случае при заданном графике диспетчерской нагрузки ТЭС ДГА может использоваться для выработки электроэнергии с меньшими по сравнению с аналогичными показателями основного оборудования ТЭС удельными затратами. Во втором случае существует также возможность увеличения выработки мощности на той ТЭС, на которой установлен ДГА, со снижением выработки электроэнергии одной из ТЭС энергосистемы с наихудшими технико-экономическими показателями работы основного оборудования. Кроме того, возможен также вариант увеличения мощности всей энергосистемы за счет использования ДГА, если вырабатываемая дополнительная электроэнергия может быть потреблена в рамках энергосистемы (при работе ДГА в дефицитной энергосистеме) или передана в другую, дефицитную энергосистему, при работе ДГА в избыточной.