

УДК 662.66.001.5

Влияние параметров процессов на показатели термодинамической эффективности детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа*

**А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова, С.Н. Петин,
А.В. Корягин**

Московский энергетический институт

E-mail: agababovvs@yandex.ru

Приводятся результаты исследования влияния параметров процессов на показатели термодинамической эффективности детандер-генераторных агрегатов, применяемых в качестве альтернативы дросселирующим устройствам для технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа на станциях технологического уменьшения давления системы газоснабжения — газораспределительных станциях и газорегуляторных пунктах. В качестве параметров процессов рассматриваются температура наружного воздуха, отношение давлений транспортируемого газа на выходе и входе газораспределительной станции и газорегуляторного пункта, температура подогрева газа перед детандером. Рассматриваются различные схемные решения детандер-генераторных агрегатов, позволяющие генерировать либо только электроэнергию, либо электроэнергию и холод. В качестве критерия оценки термодинамической эффективности принимается эксергетический КПД. Приводятся в графическом виде результаты расчетов изменения эксергий потоков, а также эксергетического КПД при изменении параметров процессов. Проводится сравнение термодинамических эффективностей дросселирующих устройств и детандер-генераторных агрегатов. Показано, что замена дросселирующего устройства на детандер-генераторный агрегат при всех рассмотренных параметрах процессов приводит к увеличению эксергетического КПД станций технологического уменьшения давления транспортируемого газа при всех рассмотренных схемах включения данного агрегата: без подогрева газа в детандер-генераторном агрегате, с подогревом газа после детандера, а также с подогревом до и после него.

Ключевые слова: транспортируемый газ, понижение давления, дросселирование, детандер-генераторные агрегаты, термодинамическая эффективность, эксергетический КПД, влияние параметров процессов.

Введение

Определенный интерес представляет история развития детандер-генераторной технологии. Детандеры были известны достаточно давно и применялись в промышленности для получения низких температур. При этом торможение вала детандера производилось за счет трения. Первая публикация, посвященная возможности использования детандер-генераторных агрегатов (ДГА) для генерации электроэнергии, появилась в нашей стране в 1939 году [1]. В дальнейшем внимание к использованию этой технологии возрастало

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по гос. заданию в рамках конкурсного отбора научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (№ заявки 13.3233.2017/ПЧ).

в связи с развитием системы газоснабжения в СССР, что привело к появлению большого количества публикаций в научной периодике. Часть из них, например, [2–11], была посвящена определению термодинамических преимуществ ДГА-технологии. С внедрением первых ДГА как за рубежом, так и в нашей стране появились многочисленные публикации, например, [12–16], в которых был описан положительный опыт эксплуатации таких агрегатов. Дальнейшие исследования, например, [17, 18], были посвящены использованию ДГА при создании мультигенерационных систем для одновременной генерации, наряду с электроэнергией, холода либо тепла и холода. Кроме того, в последние годы получило дальнейшее развитие еще одно направление в использовании ДГА — это создание бестопливных установок на базе детандер-генераторного агрегата и различного рода термотрансформаторов (см., например, [19, 20]).

Подробный анализ эффективности применения ДГА вместо дросселирующих устройств на станциях технологического уменьшения давления (СТУД) тепловых электрических станций был представлен в статье [21]. В ней рассматривались различные схемы детандер-генераторных агрегатов, позволяющие генерировать либо только электроэнергию, либо электроэнергию и холод. В качестве критерия оценки термодинамической эффективности был принят эксергетический КПД. Проведенные исследования показали, что применение ДГА вместо дросселирующего устройства приводит к увеличению эксергетического КПД СТУД транспортируемого газа при всех рассмотренных схемах включения данного агрегата: без подогрева газа в детандер-генераторном агрегате, с подогревом газа после или перед детандером, а также одновременно до и после детандера. Эти результаты были получены при одних из большого числа возможных на газорегуляторных пунктах (ГРП) промышленного потребителя условиях: давление газа на входе установки ($p_{вх}$) было принято равным 0,9 МПа, на выходе ($p_{вых}$) — 0,3 МПа, температура газа на входе ($t_{вх}$) принималась равной +10 °С, внутренний относительный КПД детандера составлял 0,8, температура подогрева газа перед детандером ($t_{пр}$) — +130 °С, температура поступающего от потребителя хладоносителя ($t_{1х}$) составляла +12 °С, температура хладоносителя, направляемого потребителю ($t_{2х}$), — +7 °С. Кроме того, при проведении расчетов было принято, что энтальпия потока газа на выходе из ГРП во всех случаях, кроме схемы ДГА без подогрева газа в детандер-генераторном агрегате, равнялась энтальпии газа на входе на станцию понижения давления. Предварительный анализ полученных в [21] результатов показал, что изменение параметров процесса должно оказывать определенное влияние и на термодинамическую эффективность дросселирования, и на электрическую и холодильную мощности ДГА и термодинамическую эффективность их использования на СТУД. К таким параметрам относятся температура газа на входе и отношение давлений транспортируемого газа на выходе и входе СТУД, температура подогрева газа в теплообменнике перед детандером. При этом, если абсолютные значения давлений и их отношения для каждой СТУД определяются режимами их работы, а температура газа на входе зависит, в первую очередь, от параметров окружающей среды, то температура подогрева газа перед детандером может регулироваться в определенных пределах за счет изменения тепла, подаваемого в соответствующий теплообменник перед детандером.

Постановка задачи исследования

Определяется влияние температуры газа на входе СТУД, температуры подогрева газа перед детандером и отношения давлений выхода и входа на термодинамическую эффективность работы дросселирующего устройства и детандер-генераторного агрегата. Рассматриваются представляющие наибольший практический интерес два варианта схем ДГА: первая — с подогревом газа только в теплообменнике после детандера за счет поступающего от потребителя хладоносителя, вторая — с подогревом газа в теплообменниках

до и после детандера за счет потока стороннего тепла высокого потенциала, направляемого в первый из них, и за счет поступающего от потребителя хладоносителя, направляемого во второй. Для схемы с подогревом газа только после детандера определяются влияние на термодинамическую эффективность работы ДГА отношения давлений выхода/входа и температуры газа на входе СТУД, а для схемы с подогревом газа перед детандером и после него (с получением направляемого потребителю холода в теплообменнике после детандера) — влияние температуры подогрева газа перед детандером и отношения давлений на выходе и входе детандера.

Станция технологического уменьшения давления транспортируемого газа с установленным на ней ДГА рассматривается как отдельный объект, генерирующий полностью востребованные потребителями электроэнергию и холод, в отсутствие иных источников генерации электроэнергии и холода на этом объекте.

Условия проведения расчетов

В качестве критерия оценки эффективности рассматриваемых вариантов схем ДГА, как и в [21], принимался эксергетический КПД η_e , рассчитанный для дросселирующего устройства и каждой из принятых к рассмотрению схем ДГА, определяемый выражением [22]

$$\eta_e = \sum E_{\text{вых}} / \sum E_{\text{вх}}, \quad (1)$$

где $\sum E_{\text{вх}}$ и $\sum E_{\text{вых}}$ — суммы эксергий на входе и на выходе станции уменьшения давления соответственно, кВт. В соответствии с рекомендациями, указанными в работе [22], эксергия химической энергии потока газа, как не претерпевающая изменений на СТУД, при этом не учитывалась. Исследование проводилось при параметрах процесса, приведенных в таблице.

Таблица

Параметры процессов,
при которых проводились исследования

Параметры	Ед. изм.	Газорегуляторные пункты	Газораспределительные станции
$p_{\text{вх}}$	МПа	0,7–1,5	4,0–11,0
$p_{\text{вых}}$	МПа	0,2–0,4	1,5
$t_{\text{пг}}$	°С	20–130	
t_{1x}	°С	12	
t_{2x}	°С	7	

Расчеты проводились с использованием таблиц термодинамических свойств метана [23] и следующих зависимостей для определения эксергии потока, тепла, электроэнергии и холода соответственно:

$$E_{\text{пот}} = G_{\text{пот}} [(h_{\text{пот}} - h_{\text{ос}}) - T_{\text{ос}}(s_{\text{пот}} - s_{\text{ос}})], \quad (2)$$

$$E_{\text{теп}} = Q_{\text{теп}} (1 - T_{\text{ос}}/T_{\text{теп}}), \quad (3)$$

$$E_{\text{э}} = N_{\text{э}}, \quad (4)$$

$$E_{\text{хол}} = Q_{\text{хол}} (T_{\text{ос}}/T_{\text{хол}} - 1), \quad (5)$$

где $G_{\text{пот}}$ — расход потока, $h_{\text{пот}}$, $s_{\text{пот}}$ — энтальпия и энтропия потока при заданных параметрах, $h_{\text{ос}}$, $s_{\text{ос}}$ — энтальпия и энтропия потока при параметрах окружающей среды, $T_{\text{ос}}$ — температура окружающей среды, $Q_{\text{теп}}$ — подводимое тепло, $T_{\text{теп}}$ — температура подводимого тепла, $N_{\text{э}}$ — электрическая мощность ДГА, $Q_{\text{хол}}$ — отводимый холод, $T_{\text{хол}}$ — температура отводимого холода.

Результаты исследований

Дросселирующее устройство

Схема дросселирующего устройства приведена на рис. 1. Эксергетический КПД дросселирующего устройства определяется выражением

$$\eta_{\text{едр}} = \frac{\sum E_{\text{ГВЫХ}}}{\sum E_{\text{ГВХ}}} \quad (6)$$

где $E_{\text{ГВЫХ}}$ и $E_{\text{ГВХ}}$ — эксергии потока газа на выходе и на входе станции понижения давления.

На рис. 2 в h - s диаграммах показаны процессы, происходящие в дросселирующем устройстве при изменении температуры газа на входе на станцию уменьшения давления (рис. 2а) и при изменении отношения давлений выхода/входа газа (рис. 2б). Качественный анализ изменений состояния газа с использованием приведенной на рис. 2а h - s диаграммы показывает, что при повышении температуры газа на входе на станцию понижения давления от $T_{\text{ВХ}}$ до $T'_{\text{ВХ}}$ и энтальпия и энтропия потока газа на входе и на выходе дросселирующего устройства увеличиваются: $0 < (h_{0'} - h_0)$, $0 < (s_{0'} - s_0)$, $0 < (h_{1'} - h_1)$, $0 < (s_{1'} - s_1)$. Записав выражения для эксергий потока газа на входе и выходе дросселирующего устройства в виде $E_{\text{ВХ}} = G_{\text{ПОТ}} [(h_{\text{ВХ}} - h_{\text{ОС}}) - T_{\text{ОС}} (s_{\text{ВХ}} - s_{\text{ОС}})]$ и $E_{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ПОТ}} [(h_{\text{ВЫХ}} - h_{\text{ОС}}) - T_{\text{ОС}} (s_{\text{ВЫХ}} - s_{\text{ОС}})]$ соответственно и определив разности эксергий на выходе и входе для температур $T_{\text{ВХ}}$ до $T'_{\text{ВХ}}$, после несложных преобразований с учетом равенства энтальпий потока до и после дросселирующего устройства при каждой температуре потока, учитывая, что $s_{\text{ВХ}} < s_{\text{ВЫХ}}$, получим выражение для определения изменения (или потери) эксергии потока при дросселировании:

$$E_{\text{ВХ}} - E_{\text{ВЫХ}} = G_{\text{ПОТ}} T_{\text{ОС}} (s_{\text{ВЫХ}} - s_{\text{ВХ}}). \quad (7)$$

Анализ процессов дросселирования, приведенных в h - s диаграмме на рис. 2а, и формулы (7) показывает, что при увеличении температуры потока на входе разность энтропий выхода и входа ($s_{\text{ВЫХ}} - s_{\text{ВХ}}$), определяющая потери эксергии при дросселировании, возрастает (изобары с увеличением энтропии расходятся). Следовательно, при повышении температуры потока газа на входе в дросселирующее устройство эксергетический КПД уменьшается.

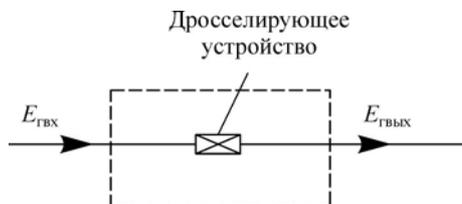


Рис. 1. Схема дросселирующего устройства.

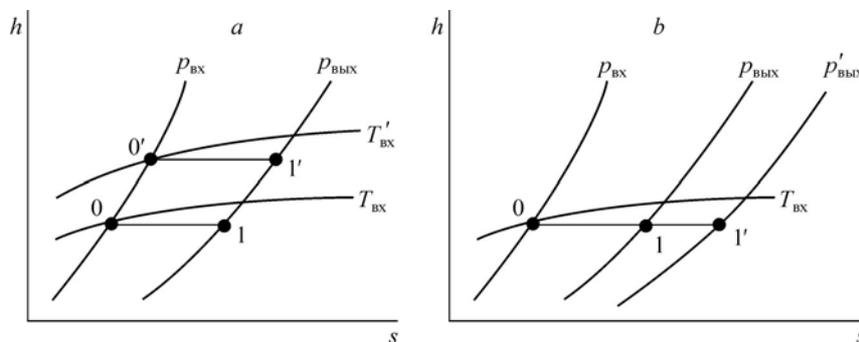


Рис. 2. Процессы в h - s диаграмме для схемы с дросселирующим устройством при изменении температуры газа на входе на станцию уменьшения давления (а) и при изменении давления газа на выходе из нее (б).

Для определения количественных изменений эксергетического КПД при дросселировании необходимо сравнить результаты расчетов при разных температурах потока газа на входе на станцию уменьшения давления. Выражения для эксергетического КПД при дросселировании до и после повышения температуры газа имеет вид

$$\eta_{\text{едр}} = \frac{(h_1 - h_{0c}) - T_{0c}(s_1 - s_{0c})}{(h_0 - h_{0c}) - T_{0c}(s_0 - s_{0c})} \quad (8)$$

с подстановкой в числителе и знаменателе формулы соответствующих значений энтальпии и энтропии.

Качественный анализ влияния отношения давлений газа на выходе и входе СТУД при использовании дросселирующего устройства может быть проведен с применением h - s -диаграммы процесса, приведенного на рис. 2*b*. Так, при увеличении разности между давлениями на входе и выходе СТУД при постоянной энтальпии потока газа увеличивается разность между энтропиями $(s_1 - s_0) < (s_1' - s_0')$, что приводит к росту потерь эксергии потока при большей разности давлений входа и выхода, а следовательно, и меньших отношениях давлений выхода и входа. При этом эксергетический КПД при меньших отношениях давлений газа на выходе и входе оказывается меньшим.

Для определения количественных характеристик влияния температуры газа на входе на станцию уменьшения давления газа и отношения давлений газа на выходе и входе были проведены расчеты эксергетического КПД при использовании дросселирующего устройства. Результаты расчетов в графическом виде приведены на рис. 3, где представлены зависимость эксергетического КПД дросселирующего устройства от температуры потока газа на входе на станцию уменьшения давления газа при различных отношениях давлений выхода и входа. Расчеты проводились в области давлений газа $p_{\text{вх}} = 1,1$ МПа, $p_{\text{вых}} = 0,2, 0,3, 0,4$ МПа, характерных для ГРП промышленного предприятия. Анализ приведенного на рис. 3 графика показывает, что изменение температуры потока газа на входе от -10 до $+15$ °С, т.е. во всем диапазоне характерных при эксплуатации температур, практически не влияет на значение эксергетического КПД при различных отношениях давления (снижение составляет лишь 1,0–1,5 %).

Гораздо более заметным является влияние на эксергетический КПД отношения давлений выхода и входа. На рис. 4 в графическом виде приведены результаты расчетов зависимости эксергетического КПД от отношения давлений на выходе и входе. Расчеты

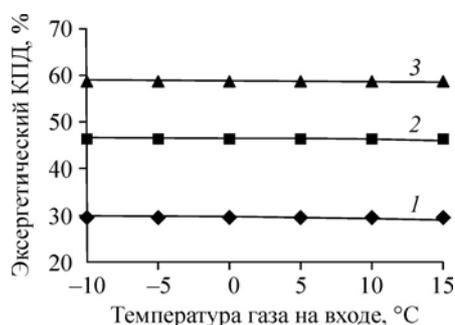


Рис. 3. Зависимость эксергетического КПД узла понижения давления газа с дросселирующим устройством на ГРП от температуры газа на входе.

$p_{\text{вых}}/p_{\text{вх}} = 0,18$ (1), 0,27 (2), 0,36 (3).

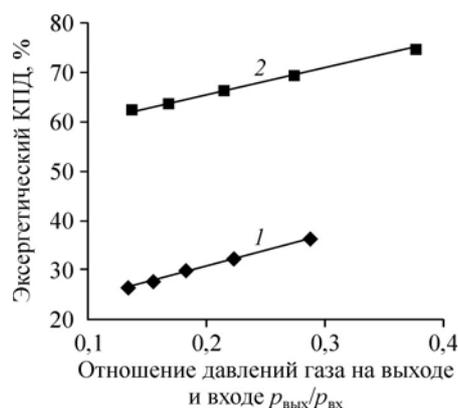


Рис. 4. Зависимости эксергетического КПД дросселирующего устройства от отношения давлений транспортируемого газа.

1 — ГРП, 2 — ГРС.

для условий, характерных для ГРП промышленного предприятия, проводились при $p_{\text{вх}} = 1,5, 1,3, 1,1, 0,9, 0,7$ МПа, $p_{\text{вых}} = 0,2$ МПа, для газораспределительных станций (ГРС) — $p_{\text{вх}} = 11,0, 9,0, 7,0, 5,5, 4,0$ МПа, $p_{\text{вых}} = 1,5$ МПа. Температура газа на входе принималась в обоих случаях равной 5°C . Из приведенного на рис. 4 графика следует, что при дросселировании при характерных для ГРС более высоких давлениях эксергетические КПД оказываются выше, чем на ГРП. Так, например, при увеличении отношений давлений с 0,133 до 0,286 эксергетический КПД для ГРП при дросселировании возрастает с 0,26 до 0,34 %.

ДГА с теплообменником подогрева газа после детандера

На рис. 5 представлена схема установки, в которой для технологического уменьшения давления газа используется ДГА с теплообменником, установленным после детандера. ДГА, используя энергию потока транспортируемого газа, генерирует электроэнергию. При этом температура газа уменьшается, что позволяет генерировать в теплообменнике после детандера холод. Поток газа при этом подогревается обратным потоком хладоносителя от потребителя холода, а охлажденный хладоноситель направляется потребителю холода. В этом случае эксергетический КПД СТУД равен отношению суммы эксергий потока газа на выходе из узла полученной электроэнергии и отведенного потребителю холода к сумме эксергий потока газа на входе в СТУД и эксергии обратного потока хладоносителя. Выражение для определения эксергетического КПД в этом случае имеет вид

$$\eta_e = \frac{E_{\text{ГВЫХ}} + E_3 + E_{\text{ТВЫХ1}}}{E_{\text{ГВХ}} + E_{\text{ТВХ1}}}, \quad (9)$$

где $E_{\text{ГВХ}}$ — эксергия потока газа на входе, $E_{\text{ГВЫХ}}$ — эксергия потока газа на выходе, E_3 — эксергия электроэнергии, выработанной ДГА, $E_{\text{ТВХ1}}$ — эксергия потока хладоносителя на входе в теплообменник подогрева потока газа после детандера, $E_{\text{ТВЫХ1}}$ — эксергия потока хладоносителя на выходе из теплообменника подогрева потока газа после детандера (из генератора холода).

На рис. 6 в h - s -диаграммах показаны процессы, происходящие в ДГА при изменении температуры газа на входе на станцию уменьшения давления (рис. 6а) и при изменении отношения давлений выхода/входа газа (рис. 6б). Заметим, что при анализе и расчетах принималось условие, согласно которому газ в теплообменнике после детандера подогревается обратным потоком хладоносителя до температуры, при которой энтальпия газа на выходе СТУД будет равна энтальпии газа на входе на станцию.

При увеличении температуры газа на входе (рис. 6а) произведенная электроэнергия и, соответственно, ее эксергия будут возрастать, т.к. $(h_0 - h_1) < (h_{0'} - h_{1'})$. При этом будет увеличиваться также и произведенный холод вследствие того, что будет расти разность энтальпий потока газа на выходе и входе теплообменника после детандера $(h_2 - h_1) < (h_{2'} - h_{1'})$ при постоянном расходе газа. Кроме того, при выполнении условия, согласно которому температуры хладоносителя, поступающего от потребителя и направляемого ему,

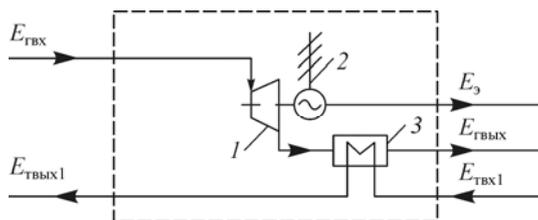


Рис. 5. Схема ДГА с теплообменником после детандера.
1 — детандер, 2 — генератор,
3 — теплообменник для подогрева потока газа после детандера.

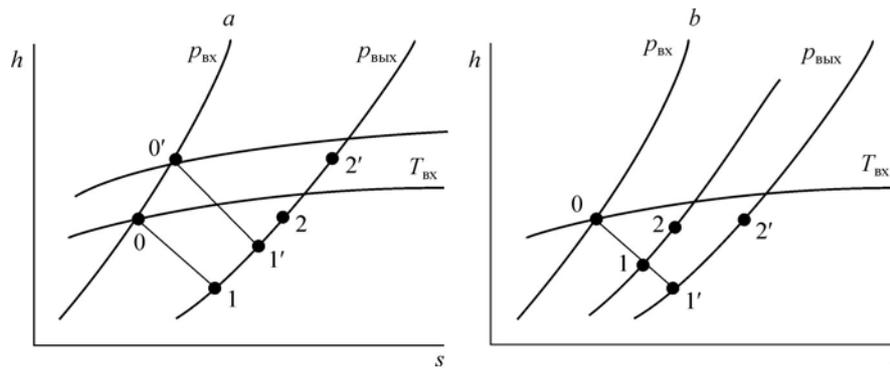


Рис. 6. Процессы в h - s диаграмме для схемы ДГА с теплообменником после детандера при изменении температуры газа на входе (а) и при изменении давления газа на выходе (б) СТУД.

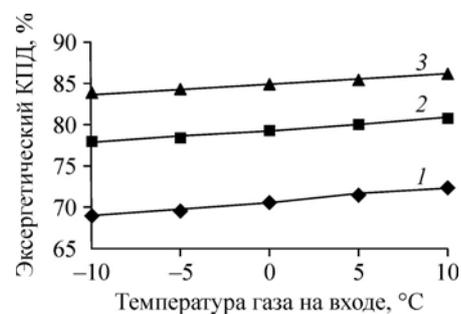
должны оставаться постоянными (12 и 7 °С), должен быть увеличен расход хладоносителя (обратим внимание на то, что без учета потерь в теплообменнике подведенное в нем к газу тепло равно холоду, отведенному потребителю). Это приведет к увеличению эксергии холода $E_{\text{ТВЫХ1}}$, поставляемого потребителю, а также эксергии хладоносителя $E_{\text{ТВХ1}}$, поступающего в теплообменник от потребителя. Удельные эксергии хладоносителя на входе и выходе теплообменника при этом останутся постоянными, т.к. его температуры на выходе из теплообменника не изменятся. При увеличении температуры газа на входе СТУД будут уменьшаться эксергии потока газа на входе ($E_{\text{ГВХ}}$) и на выходе ($E_{\text{ГВЫХ}}$) станции уменьшения давления, так как температуры входа и выхода потока газа будут приближаться к температуре окружающей среды ($T_2 < T_2'$), принятой при анализе и расчетах, как и в работе [23], равной 20 °С.

Таким образом, при увеличении температуры потока газа на входе СТУД в числителе выражения (9) эксергии E_3 и $E_{\text{ТВЫХ1}}$ будут увеличиваться, а эксергия $E_{\text{ГВЫХ}}$ будет уменьшаться, в знаменателе увеличиваться будет эксергия $E_{\text{ТВХ1}}$, уменьшаться — эксергия $E_{\text{ГВХ}}$, что не позволяет качественно определить характер изменения эксергетического КПД при изменении температуры газа на входе на станцию технологического уменьшения давления газа и требует проведения расчетов.

На рис. 7 представлена зависимость эксергетического КПД схемы с ДГА и подогревом потока газа после детандера от температуры газа на входе СТУД при различных отношениях давлений газа на выходе и входе. Как видно из графика, эксергетический КПД при увеличении температуры газа на входе СТУД для рассматриваемой схемы, в отличие от схемы с дросселированием, возрастает при всех отношениях давлений газа на выходе и входе. Характер влияния отношения давлений выхода и входа на эксергетический КПД для рассматриваемой схемы ДГА с одним теплообменником после детандера оказался таким же, как и в схеме с дросселированием. В то же время сравнение абсолютных значений эксергетических КПД на рис. 3 и 7 показывает термодинамическое преимущество схемы с ДГА с одним теплообменником после детандера.

Рис. 7. Зависимость эксергетического КПД узла понижения давления газа с ДГА и теплообменником подогрева газа после детандера на ГРП от температуры газа на входе СТУД.

$$p_{\text{ВЫХ}}/p_{\text{ВХ}} = 0,18 (1), 0,27 (2), 0,36 (3).$$



При понижении давления расширения газа отношение давлений выхода и входа уменьшается. При этом, как видно из диаграммы, приведенной на рис. 6*b*, вырабатываемая электроэнергия увеличивается (процессы 0–1 и 0–1'). Эксергия холода, получаемого в теплообменнике после детандера, также увеличивается, т.к. возрастает отдаваемый потребителю холод (процессы 2–1 и 2'–1') и уменьшается температура отведения холода, а следовательно, в этом случае, и его эксергия (температура отдаваемого холода меньше принятой температуры окружающей среды 20 °С).

Из графиков, приведенных на рис. 7, видно, что с уменьшением отношения давлений на выходе и входе СТУД эксергетический КПД ГРП при использовании ДГА с одним теплообменником после детандера уменьшается. Аналогичные результаты получены при расчетах для давлений, характерных для ГРС.

ДГА с теплообменниками подогрева газа до и после детандера

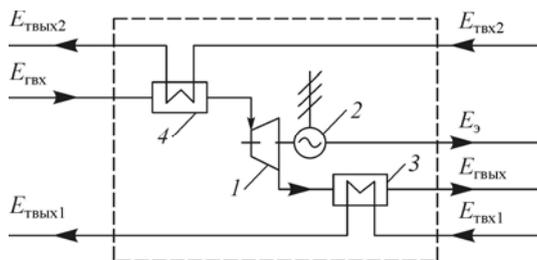
На рис. 8 приведена схема ДГА на СТУД природного газа с подогревом потока газа до и после детандера. Отличительной особенностью этой схемы от рассмотренной выше является наличие перед детандером теплообменника, в котором возможен подогрев газа за счет высокопотенциального тепла. Поток газа подогревается до поступления в детандер, при этом подведенное к газу тепло преобразуется в детандере в механическую работу, которая затем преобразуется в электрическую энергию в генераторе. После этого поток газа, как и в ранее рассмотренной схеме, подогревается в теплообменнике после детандера, при этом полученные низкие температуры потока газа на выходе из детандера, как и в предыдущей схеме, могут быть использованы в качестве источника холода для централизованных систем хладоснабжения. Отметим, что при нулевом подогреве газа перед детандером схема, приведенная на рис. 5, является предельным случаем схемы, приведенной на рис. 8.

Эксергетический КПД установки, схема которой приведена на рис. 8, определяется выражением

$$\eta_e = \frac{E_{\text{ГВЫХ}} + E_{\text{э}} + E_{\text{ТВЫХ1}} + E_{\text{ТВЫХ2}}}{E_{\text{ГВХ}} + E_{\text{ТВХ1}} + E_{\text{ТВХ2}}}, \quad (10)$$

здесь $E_{\text{ТВХ2}}$ — эксергия потока теплоносителя на входе в теплообменник при подогреве потока газа перед детандером, $E_{\text{ТВЫХ2}}$ — эксергия потока теплоносителя на выходе из теплообменника при подогреве потока газа перед детандером. Остальные обозначения такие же, как и для формулы (9).

На рис. 9 в h - s диаграмме показаны процессы, происходящие в ДГА при подогреве газа в теплообменнике перед детандером (процесс 0–1) при расширении газа в детандере с производством механической работы и последующей выработкой электроэнергии в генераторе (процесс 1–2) и при подогреве газа в теплообменнике после детандера или получении холода (процесс 2–3). Заметим, что, как и при рассмотрении предыдущей схемы было принято условие, согласно которому энтальпия газа на выходе со станции уменьшения давления (точка 3 на рис. 9) равнялась энтальпии газа на входе на станцию (точка 0), но в отличие от условий



уменьшения давления (точка 3 на рис. 9) равнялась энтальпии газа на входе на станцию (точка 0), но в отличие от условий

Рис. 8. Схема ДГА с теплообменниками подогрева потока газа до и после детандера. 1 — детандер, 2 — генератор, 3 — теплообменник для подогрева потока газа после детандера, 4 — теплообменник для подогрева потока газа перед детандером.

анализа предыдущей схемы начальная температура природного газа на входе на станцию уменьшения давления принималась постоянной.

Анализ процессов в приведенной на рис. 9 диаграмме показывает, что изменение температуры подогрева газа в теплообменнике перед детандером влияет на выработку электроэнергии и генерацию холода, например, при уменьшении температуры (процесс 0–1') выработка электроэнергии уменьшается, т.к. $(h_{1'} - h_{2'}) < (h_1 - h_2)$, а генерация холода увеличивается, т.к. $(h_3 - h_2) < (h_3 - h_{2'})$ (заметим, что это позволяет в случае необходимости регулировать производство электроэнергии и холода: при увеличении одной из них другая уменьшается). При этом эксергия электроэнергии E_3 уменьшается, эксергия холода $E_{\text{ТВЫХ1}}$ увеличивается, эксергии потока газа на входе $E_{\text{ГВХ}}$ и выходе $E_{\text{ГВЫХ}}$ СТУД остаются без изменений, эксергии потока теплоносителя на входе в теплообменник подогрева потока газа перед детандером $E_{\text{ТВЫХ2}}$ и на выходе $E_{\text{ТВЫХ2}}$ из этого теплообменника уменьшаются. Таким образом, зависимость эксергетического КПД от температуры подогрева газа в теплообменнике перед детандером имеет достаточно сложный вид и определяется соотношением взаимно противоположных изменений эксергий нескольких потоков. Так, если эксергия электроэнергии не зависит от температур потоков, то эксергии подводимых и отводимых потоков тепла и холода, наоборот, определяются их температурами. Это не позволяет однозначно качественно оценить влияние температуры подогрева потока газа в теплообменнике перед детандером на эксергетический КПД в рассматриваемой схеме и требует проведения расчетов.

В расчетах при выборе максимального значения температуры подогрева газа учитывалось, что температура газа на выходе из детандера должна быть достаточной для охлаждения хладонотителя в теплообменнике после детандера до температуры, определяемой энтальпией и давлением потока газа на выходе со станции уменьшения давления. Так, в случае хладоснабжения систем вентиляции и кондиционирования, максимальная допустимая температура на выходе из детандера принималась равной 2 °С.

На рис. 10 в графическом виде представлены результаты расчетов изменения эксергетического КПД станции уменьшения давления в зависимости от температуры подогрева потока газа перед детандером при различных характерных для ГРП отношениях давлений газа на выходе и входе СТУД.

Анализ графиков, приведенных на рис. 10, показывает, что, во-первых, характер влияния отношения давлений газа на выходе

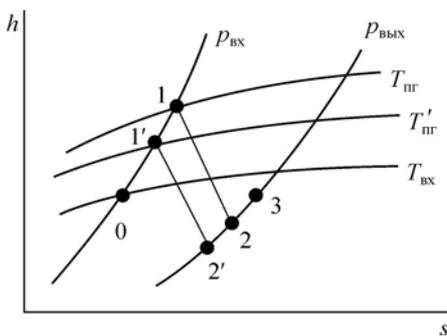


Рис. 9. Процессы в h - s диаграмме для схемы ДГА с теплообменником перед и после детандера при изменении температуры подогрева газа в теплообменнике перед детандером.

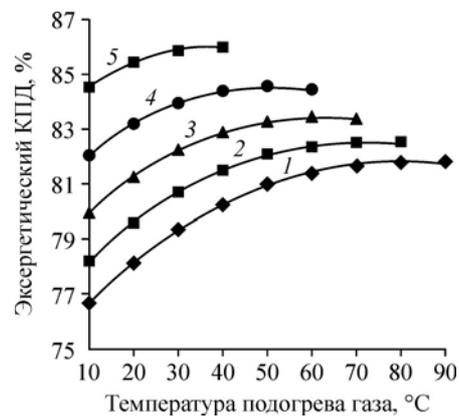


Рис. 10. Зависимости эксергетического КПД ДГА с теплообменниками подогрева потока газа до и после детандера от температуры подогрева потока газа перед детандером на ГРП при разных значениях отношения давлений газа на выходе и входе СТУД. $p_{\text{ввых}}/p_{\text{ввх}} = 0,2$ (1), 0,23 (2), 0,27 (3), 0,23 (4), 0,2 (5).

и входе станции уменьшения давления газа для схемы ДГА с подогревателями до и после детандера такой же, как и в выше рассмотренных схемах с дросселированием и ДГА с теплообменником после детандера. Во-вторых, зависимости эксергетического КПД от подогрева газа в теплообменнике перед детандером достигают максимальных значений, причем и сами максимальные значения КПД, и температуры подогрева газа, при которых они достигаются, зависят от отношения давлений на выходе и на входе СТUD.

Выводы

Температура и давления транспортируемого природного газа на входе и выходе станции технологического уменьшения давления оказывают влияние на ее энергетическую эффективность при использовании и дросселирующих устройств, и детандер-генераторных агрегатов. Как в схемах с дросселированием, так и с ДГА увеличение отношения давлений газа на выходе и входе СТUD приводит к увеличению эксергетического КПД. В схеме с дросселированием увеличение температуры потока газа на входе СТUD приводит к непрерывному уменьшению эксергетического КПД, в схеме ДГА с теплообменником подогрева газа, расположенном после детандера, — к его непрерывному увеличению.

Для схемы ДГА с теплообменниками подогрева газа, расположенными до и после детандера, зависимости эксергетического КПД от температуры потока газа в теплообменнике перед детандером имеют более сложный вид: эксергетический КПД с ростом температуры подогрева сначала увеличивается, затем, достигнув максимального значения, начинает уменьшаться. Температура, при которой достигается максимум КПД, зависит от отношения давлений на выходе и входе СТUD: при меньших отношениях давлений значение температуры больше.

Детандер-генераторные агрегаты, применяемые на станциях технологического уменьшения давления газа, термодинамически более эффективны, чем дросселирующие устройства, во всем диапазоне давлений и температур транспортируемого природного газа в системе газоснабжения для обоих типов СТUD (ГРП и ГРС). При отношении давлений на выходе и входе СТUD, составляющем около 0,2, эксергетический КПД при использовании ДГА превышает тот же показатель, чем при дросселировании потока, примерно в 2,5 раза, при отношениях давлений на выходе и входе, составляющем около 0,35, — в 1,5 раза.

Изменение температуры подогрева газа перед детандером ДГА в схеме с теплообменниками перед детандером и после него позволяет регулировать отношение электрической и холодильной мощностей установки.

Список литературы

1. Капица П.Л. Турбодетандер для получения низких температур и его применение для сжижения воздуха // Журн. техн. физики. 1939. Т. 9, вып. 2. С. 99–123.
2. Клименко А.П. Термодинамический анализ и опытное исследование расширительной машины в процессах обработки и переработки природного газа: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М., 1955. 20 с.
3. Язык А.В. Утилизация потенциальной энергии газа на газораспределительных станциях в детандерных установках // Обзорн. инф. Сер. Использование газа в народном хозяйстве. ВНИИЭГазпром, 1988. № 4. С. 12.
4. Alternative Energie aus der Erdgasentspannungsanlage // Gas Wärme Int. 1989. Vol. 38, No. 7. 439 s.
5. Аракелян Э.К., Борисов Г.М., Макарьян В.А., Голованов С.А., Третьяков С.И. Надстройка Сургутской ГРЭС газопроходными турбинами // Теплоэнергетика. 1988. № 8. С. 15–48.
6. Hagedorn G. Technische Moeglichkeiten und Anwendungspotentiale fuer den Einsatz von Entspannungsmaschinen in der Versorgungswirtschaft und Industrie // VDI Berichte 1141. Duesseldorf. VDI-Verlag GmbH. 1994. S. 1–15.
7. Агабабов В.С., Гуськов Ю.Л., Кудрявый В.В., Аракелян Э.К. Методика определения термодинамической эффективности включения детандер-генераторных агрегатов в тепловую схему ТЭЦ // Вестник МЭИ. 1996. № 2. С. 73–76.

- 8 Агабабов В.С. Определение экономии топлива на конденсационной электростанции при включении в тепловую схему детандер-генераторного агрегата // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 1999. № 12. С. 3–8.
- 9 Агабабов В.С., Корягин А.В., Аракелян Э.К. Влияние детандер-генераторного агрегата на удельный расход топлива на КЭС // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2000. № 7–8. С. 32–36.
- 10 Агабабов В.С. Влияние детандер-генераторных агрегатов на тепловую экономичность работы конденсационных электростанций // Теплоэнергетика. 2001. № 4. С. 51–55.
- 11 Джураева Е.В., Александров А.А. Эксергетический анализ процессов, происходящих в детандер-генераторном агрегате // Теплоэнергетика. 2005. № 2. С. 73–77.
- 12 Berge W., Zahner C. Erdgas-Entspannungsturbine Goeppingen // Gas-Erdgas gwf (BRD). 1991. Vol. 132, No. 7. S. 302–304.
- 13 Агабабов В.С., Корягин А.В., Аракелян Э.К., Гуськов Ю.Л. и др. Влияние детандер-генераторного агрегата на тепловую экономичность ТЭЦ // Электрические станции. 1997. Спец. выпуск. С. 77–82.
- 14 Кудрявый В.В., Гуськов Ю.Л., Агабабов В.С., Аракелян Э.К., Агабабов В.С. Испытания детандер-генераторного агрегата на ТЭЦ-21 АО «Мосэнерго» // Вестник МЭИ. 2001. № 2. С. 16–20.
- 15 Гуськов Ю.Л., Малянов В.В., Давыдов Ю.Я., Агабабов В.С., Корягин А.В. Опыт эксплуатации детандер-генераторного агрегата на ТЭЦ-21 Мосэнерго // Электрические станции. 2003. № 10. С. 15–17.
- 16 Меламед А.Д., Чесноковский В.З., Зорина С.С. и др. АСУ ТП газотурбинной расширительной станции Среднеуральской ГРЭС // Электрические станции. 2004. № 1. С. 68–71.
- 17 Клименко А.В., Агабабов В.С., Ильина И.П., Рожнатовский В.Д., Бурмакина А.В. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36–43.
- 18 Агабабов В.С., Борисова П.Н., Петин С.Н. Термодинамический анализ установки для одновременной генерации электроэнергии и холода двух температурных потенциалов // Новое в российской электроэнергетике. Ежемесячный электронный журнал. 2017. № 4. С. 37–47.
- 19 Пат. 2150641 Рос. Федерация, МПК⁷ F25 В 11/02, F 01 К 27/00. Способ работы детандерной установки и устройство для его осуществления / Агабабов В.С.; заявитель и патентообладатель МЭИ (ГУ) № 99113159/06; заявл. 15.06.1999; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. 3 с.:ил.
- 20 Агабабов В.С. Бестопливные установки для производства электроэнергии, теплоты и холода на базе детандер-генераторных агрегатов // Тр. четвертой междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение — теория и практика». М.: Изд-во МЭИ, 2008. С. 13–16.
- 21 Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н., Петин С.Н. Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 6. С. 961–968.
- 22 Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
- 23 Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 700 с.

*Статья поступила в редакцию 30 января 2018 г.,
после доработки — 12 марта 2018 г.*