

УДК 662.66.001.5

Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа*

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

Московский энергетический институт

E-mail: agababovvs@yandex.ru

Проводится сравнение термодинамической эффективности дросселирующих устройств и детандер-генераторных агрегатов, применяемых для технологического понижения давления транспортируемого газа на газораспределительных станциях и газорегуляторных пунктах системы газоснабжения. 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. Показано, что замена дросселирующего устройства на детандер-генераторный агрегат при принятых для расчета условиях приводит к увеличению эксергетического КПД станции технологического понижения давления транспортируемого газа при всех рассмотренных схемах включения данного агрегата: без подогрева газа в детандер-генераторном агрегате, с подогревом газа после детандера, перед детандером, а также до и после детандера.

Ключевые слова: понижение давления транспортируемого газа, дросселирование, детандер-генераторные агрегаты, термодинамическая эффективность.

Существующее состояние использования ДГА-технологий

Одним из возможных и, несомненно, перспективных путей повышения эффективности энергетического производства является использование для генерации энергии различных видов вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), получаемых в виде побочных продуктов основного производства. Как известно, наряду с горючими и тепловыми существуют также ВЭР избыточного давления. В частности, к ним относится энергия транспортируемых потоков природного газа в системе газоснабжения. Напомним, что газ транспортируется в магистральных газопроводах с давлениями от 4 до 11 МПа, однако его давление у потребителя должно составлять всего 0,2–0,4 МПа. Снижение давления газа при подаче его потребителю производится на станциях технологического понижения давления, как правило, в двух ступенях. Первая ступень — это газораспределительная станция (ГРС), где давление газа снижается от значения в магистральном газопроводе до 1,5 МПа. Вторая ступень — газорегуляторный пункт (ГРП). На ГРП происходит

* 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).

снижение давления до значения, необходимого потребителю. Обычно для понижения давления и на ГРС и на ГРП используются дросселирующие устройства.

В последней четверти прошлого века в научных кругах и в промышленной отрасли с целью получения возможности понижения давления в системах газоснабжения, базирующихся на ГРС и ГРП, начал изучаться вопрос об эффективности альтернативной дросселированию детандер-генераторной технологии как в США, Германии и некоторых других странах [1, 2], так и в России [3, 4]. В последующие годы это направление получило развитие. Появились сообщения о внедрении и успешной эксплуатации детандер-генераторных агрегатов (ДГА) (см. например, [5–8]). Всего же, по оценкам авторов, в системах газоснабжения экономически развитых стран эксплуатируется несколько сотен ДГА.

Детандер-генераторный агрегат представляет собой устройство, в котором тепло-содержание потока транспортируемого природного газа преобразуется сначала в механическую энергию в детандере, а затем в электрическую энергию в генераторе [1, 4]. Снижение давления газа при использовании ДГА на ГРС и ГРП происходит за счет его расширения в детандере. Существует также принципиальная возможность одновременного с выработкой электроэнергии производства и полезного использования тепла и холода [9, 10].

На рисунке приведена принципиальная схема включения ДГА. Детандер включается параллельно дросселирующему устройству, частично или полностью заменяя его. При расширении газа в детандере температура потока снижается гораздо больше, чем при дросселировании. Без подогрева газа перед детандером она может оказаться ниже температуры, меньше которой эксплуатация газопроводов невозможна. По этой причине в состав ДГА кроме детандера и соединенного с ним электрогенератора может входить теплообменник подогрева газа перед детандером. Тепло стороннего источника, подведенное в этом теплообменнике, преобразуется в детандере и генераторе в электроэнергию. Кроме того, низкая температура потока после детандера может быть использована для получения холода. В этом случае в схеме ДГА предусматривается теплообменник после детандера. Оба теплообменника, как показано на рисунке, могут присутствовать в схеме одновременно.

Исторически сложилось так, что промышленные ДГА в России появились сначала на ГРП тепловых электростанций (ТЭС). По этой причине первые проведенные в нашей стране исследования, направленные на определение термодинамической эффективности ДГА, были посвящены изменению показателей тепловой экономичности электростанций при использовании ДГА (например, комплекс исследований, обобщенных в работе [11]). Эти исследования позволили определить, что термодинамическая эффективность использования ДГА достаточно высока и объясняется двумя основными факторами. Во-первых, поскольку ДГА не является тепловой машиной, то практически все подведенное

в теплообменнике перед детандером тепло может быть преобразовано в механическую и затем в электрическую энергию. Во-вторых, установка ДГА оказывает положительное влияние на работу основного оборудования ТЭС. В качестве критерия термодинамической эффективности при использовании ДГА на ГРП электростанций рассматривалось изменение удельного расхода

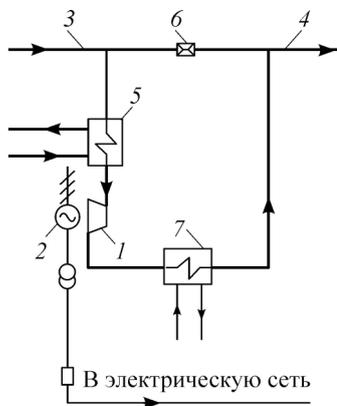


Рис. 1. Принципиальная схема включения ДГА.

1 — детандер, 2 — электрогенератор, 3 и 4 — газопроводы высокого и низкого давления соответственно, 5 — теплообменник подогрева газа перед детандером, 6 — дросселирующее устройство, 7 — теплообменник подогрева газа после детандера и передачи холода потребителю.

топлива на выработку электроэнергии всей ТЭС. Опыт эксплуатации ДГА на электростанциях подтвердил результаты теоретических исследований [12, 13].

Особо среди публикаций, посвященных исследованиям термодинамической эффективности ДГА, следует выделить работу [14], в которой впервые был проведен эксергетический анализ [15] установки, включающей в себя паротурбинную установку (ПТУ) конденсационного типа и ДГА. Исследования [14] были проведены при использовании различных источников тепла для подогрева газа в теплообменнике перед детандером: уходящих газов (газотурбинной установки (ГТУ) или парового котла ПТУ), теплового насоса, автономного водогрейного котла, отборного пара турбоустановки. Анализ показал, что использование ДГА в тепловой схеме ПТУ конденсационного типа позволяет увеличить эксергетический КПД и уменьшить удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии при подогреве газа перед детандером ДГА уходящими газами ГТУ либо котла ПТУ, а также паром отбора турбины.

Разумеется, термодинамическое преимущество ДГА-технологии не является основанием для ее повсеместного использования. В каждом конкретном случае целесообразность применения должна быть подкреплена технико-экономическими оценками. Однако в последнее время именно термодинамическая эффективность использования ДГА неожиданно для большинства специалистов, занимающихся этой проблемой, была подвергнута сомнению. Так, в работах [16, 17], несмотря на данную ранее одним из авторов положительную, экспериментально подтвержденную его же публикациями оценку ДГА-технологии (см. например, работу [6] и др. публикации), было высказано абсолютно отрицательное мнение об использовании этой технологии на ТЭС. Вероятно, более детальное знакомство с результатами исследований, приведенных в работах [11, 14], позволило бы авторам публикаций [16, 17] избежать заблуждений и быть более последовательными и справедливыми в оценках перспективности ДГА-технологии. Методика оценки термодинамической эффективности ДГА по сравнению с дроссельными устройствами при их использовании на ГРС, а также на ГРП объектов, не генерирующих энергию, отличается от методики, которая используется при анализе ДГА, устанавливаемых на ТЭС. В этом случае нет необходимости учитывать влияние ДГА на показатели термодинамической эффективности энергогенерирующего оборудования. При таком подходе ГРС или ГРП рассматривается как объект, в котором при дросселировании происходит лишь изменение энергии потока транспортируемого газа, а при использовании ДГА — и изменение энергии потока газа, и генерация электроэнергии. Кроме того, при использовании ДГА возможна также генерация наряду с электроэнергией и полезно используемого холода, что также должно быть учтено при проведении анализа. Очевидно, что при анализе в этих случаях необходимо использование эксергетического метода термодинамического анализа [15].

Постановка задачи исследования

Проводится сравнение термодинамической эффективности ДГА и дросселирующих устройств на ГРС или ГРП. В качестве критериев оценки эффективности рассмотренных вариантов принимаются эксергетические КПД, рассчитанные для каждой из предлагаемых схем ДГА, которые сравниваются с эксергетическим КПД для схемы с дросселированием, а также между собой. Станция технологического понижения давления транспортируемого газа с установленным на ней ДГА рассматривается как отдельный объект, генерирующий в зависимости от схемы ДГА и применяемых потоков для подогрева газа либо электроэнергию, либо электроэнергию и холод.

Для сравнения эффективности замены дросселирования “детандированием” потока транспортируемого газа применяется известный метод “черного ящика”, при котором функциональные модели отражают только внешне воспринимаемое поведение объекта и взаимодействия отдельных составных частей внутри объекта не рассматриваются [15].

В связи с тем, что эксергии химической энергии входящих и выходящих потоков газа и при дросселировании, и при использовании ДГА одинаковы и неизменны, при составлении эксергетического баланса эксергия химической энергии газа не учитывалась [15].

Эксергетические КПД определялись из выражения [15]

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

где $\sum E_{\text{вх}}$ и $\sum E_{\text{вых}}$ — суммы эксергий потоков на входе и на выходе установки соответственно, кВт. В соответствии с рекомендациями, данными в работе [15], входящими потоками эксергии на входе ГРС или ГРП при анализе являлись эксергия потока газа $E_{\text{гвх}}$, эксергия потока нагретого хладоносителя от потребителя холода для подогрева газа в теплообменнике после детандера $E_{\text{твх1}}$, эксергия потока теплоносителя для подогрева газа в теплообменнике перед детандером $E_{\text{твх2}}$. К выходящим потокам на выходе ГРС или ГРП относятся: эксергия электроэнергии E_e , выработанной в ДГА, эксергия потока газа на выходе $E_{\text{гвых}}$, эксергия потока направляемого потребителю хладоносителя на выходе теплообменника после детандера $E_{\text{твых1}}$, эксергия потока теплоносителя на выходе из теплообменника перед детандером $E_{\text{твых2}}$.

Результаты исследования

В таблице 1 приводятся все рассмотренные схемы включения ДГА (строки под номерами 2–5), заменяющие схему уменьшения давления транспортируемого газа с использованием дроссельной установки (строка 1). В схемах приняты следующие обозначения: Др — дросселирующее устройство, 1 — детандер, 2 — электрический генератор, 3 — теплообменник подогрева газа после детандера и охлаждения хладоносителя от потребителя, 4 — теплообменник подогрева газа перед детандером. Для каждой из рассматриваемых схем в табл. 1 на h - s -диаграмме (энтальпия-энтропия) показаны происходящие с газом изменения, касающиеся давления и температуры в характерных точках, и приведены выражения для расчета эксергетических КПД.

Для рассматриваемых схем были выполнены расчеты эксергетических КПД, которые проводились при следующих условиях. Были приняты характерные для ГРП крупного промышленного потребителя параметры газа на входе и выходе установки: давление газа на входе составляло 0,9 МПа, на выходе — 0,3 МПа; температура газа на входе равнялась +10 °С, расход газа — 46 кг/с. Энтальпия потока газа на выходе из ГРП (точка 1 в h - s -диаграммах в табл. 1) в схемах с подогревом газа (строки 3–5) равнялась энтальпии газа на входе на станцию понижения давления (точка 0). В качестве теплоносителя для подогрева газа в теплообменнике перед детандером рассматривались уходящие газы оборудования, использующего поступающий газ как топливо. Плотность газа $\rho = 0,72 \text{ кг/м}^3$, внутренний относительный КПД детандера равнялся 0,8, температура продуктов сгорания, поступающих на нагрев газа перед детандером, составляла +130 °С, температура хладоносителя, поступающего от потребителя, — +12 °С, температура хладоносителя, поступающего потребителю, — +7 °С. Тепло потока продуктов сгорания для подогрева газа перед детандером поступало от парового либо водогрейного котла и после теплообменника полезно не использовалось.

В схемах в строках 3–5 (табл. 1) были учтены потери давления газа в теплообменниках перед детандером и после него, принятые равными 0,02 МПа (столбец 6 табл. 1).

Таблица 1

Схемы станций технологического понижения давления с использованием дросселя и ДГА

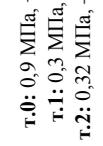
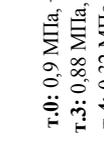
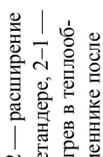
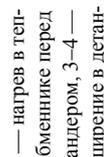
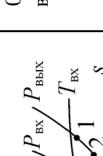
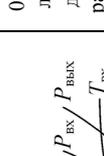
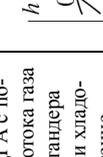
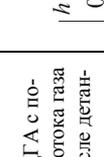
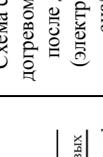
№.№ п/п	Схема	Описание схемы	Процессы в h-s-диаграмме	Описание процессов в h-s-диаграмме	Параметры в точках	Выражение для эксергетического КПД
1		Схема с дросселирующим устройством.		0-1 — дросселирование.	т.0: 0,9 МПа, +10 °С; т.1: 0,3 МПа, +7 °С.	$\eta_e = \frac{E_{ГВЫХ}}{E_{ГВХ}}$
2		Схема с ДГА без подогрева потока газа (электропитание потребителя).		0-2 — расширение в детандере.	т.0: 0,9 МПа, +10 °С; т.2: 0,3 МПа, -44,1 °С.	$\eta_e = \frac{E_{ГВЫХ} + E_3}{E_{ГВХ}}$
3		Схема с ДГА с подогревом потока газа после детандера (электро- и хладоснабжение потребителя).		0-2 — расширение в детандере, 2-1 — нагрев в теплообменнике после детандера.	т.0: 0,9 МПа, +10 °С; т.1: 0,3 МПа, +7 °С; т.2: 0,32 МПа, -41,3 °С.	$\eta_e = \frac{E_{ГВЫХ} + E_3 + E_{ГВЫХ1}}{E_{ГВХ} + E_{ГВЫХ1}}$
4		Схема с ДГА с подогревом потока газа перед детандером (электропитание потребителя).		0-3 — нагрев в теплообменнике перед детандером, 3-1 — расширение в детандере.	т.0: 0,9 МПа, 10 °С; т.1: 0,3 МПа, +7 °С; т.3: 0,88 МПа, +69 °С.	$\eta_e = \frac{E_{ГВЫХ} + E_3 + E_{ГВЫХ2}}{E_{ГВХ} + E_{ГВЫХ2}}$
5		Схема с ДГА с подогревом потока газа перед и после детандера (электро- и хладоснабжение потребителя).		0-3 — нагрев в теплообменнике перед детандером, 3-4 — расширение в детандере, 4-1 — нагрев в теплообменнике после детандера.	т.0: 0,9 МПа, +10 °С; т.3: 0,88 МПа, +50 °С; т.4: 0,32 МПа, 6,5 °С; т.1: 0,3 МПа, +7 °С	$\eta_e = \frac{E_{ГВЫХ} + E_3 + E_{ГВЫХ1} + E_{ГВЫХ2}}{E_{ГВХ} + E_{ГВЫХ1} + E_{ГВЫХ2}}$

Таблица 2

Результаты расчетов

№№ п/п	Схемы	Эксергия на входе				Эксергия на выходе				Эксергетический КПД, η_3 , %
		Эксергия потока газа, $E_{гвх}$, кВт	Эксергия подведенного тепла $E_{тепвх}$, кВт	Эксергия хладоносителя $E_{хлвх}$, кВт	Эксергия потока газа $E_{гвых}$, кВт	Эксергия потока хладоносителя, $E_{хлвых}$, кВт	Эксергия электро-энергии $E_{э}$, кВт	Эксергия потока хладоносителя, $E_{хлвых}$, кВт		
1	Схема с дроселированием.	15270	–	–	7683	–	–	–	–	50,31
2	Схема без подогрева потока газа.	15270	–	–	8473	–	–	5115	–	88,99
3	Схема подогрева потока газа после детандера потоком хладоносителя от потребителя.	15270	–	120	7683	341,5	–	4851	–	83,66
4	Схема подогрева газа перед детандером теплом дымовых газов.	15270	1803	–	7683	–	–	6280	–	81,78
5	Схема подогрева потока газа до детандера теплом дымовых газов и после детандера потоком хладоносителя от потребителя.	15270	1212	34,08	7683	96,97	–	5598	–	80,99

КПД механический и КПД генератора ДГА при проведении расчетов были приняты равными единице. Расчеты проводились с использованием таблиц термодинамических свойств метана [18]. При проведении расчетов использовались известные зависимости [15] для определения:

$$\text{эксергии потоков — } E_{\text{пот}} = G_{\text{пот}} [(h_{\text{пот}} - h_0) - T_0 (s_{\text{пот}} - s_0)], \quad (2)$$

$$\text{тепла — } E_{\text{теп}} = Q_{\text{теп}} (1 - T_0/T_{\text{теп}}), \quad (3)$$

$$\text{электроэнергии — } E_э = N_э, \quad (4)$$

$$\text{топлива — } E_{\text{топл}} = 1,04 Q_{\text{топл}}, \quad (5)$$

$$\text{холода — } E_{\text{хол}} = Q_{\text{хол}} (T_0/T_{\text{хол}} - 1). \quad (6)$$

где $G_{\text{пот}}$ — расход потока, $h_{\text{пот}}$, $s_{\text{пот}}$ — энтальпия и энтропия потока при заданных параметрах, h_0 , s_0 — энтальпия и энтропия потока при параметрах окружающей среды, T_0 — температура окружающей среды, $Q_{\text{теп}}$ — подводимое тепло, $T_{\text{теп}}$ — температура подводимого потока тепла, $Q_{\text{топл}}$ — тепло, выделяющееся при сжигании топлива, $Q_{\text{хол}}$ — отводимый холод, $T_{\text{хол}}$ — температура отводимого потока холода. Также при расчетах применялись известные уравнения теплового баланса. Значения эксергий и результаты расчета эксергетических КПД приведены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показывает, что использование ДГА на станции технологического понижения давления транспортируемого газа вместо традиционно применяемого дросселирующего устройства оказывается термодинамически более эффективным при всех рассмотренных схемах ДГА. Объясняется это, в основном, большей необратимостью процесса дросселирования по сравнению с процессом расширения потока в детандере [15].

Как и следовало ожидать, наименьшее значение эксергетического КПД (50,31 %) имеет процесс дросселирования, относящийся к категории полностью необратимых процессов. Наибольшее значение КПД из рассмотренных схем включения ДГА (88,99 %) соответствует варианту 2. Для более сложных схем 3–5 использования ДГА, включающих теплообменники, эксергетический КПД уменьшается из-за необратимости процессов потерь давления потока газа в этих теплообменниках, однако полученные значения по-прежнему заметно превосходят его значение при дросселировании.

Выводы

Использование технологических перепадов давления транспортируемого природного газа как вторичного энергоресурса избыточного давления с заменой дросселирующего устройства на детандер-генераторный агрегат в принятых для расчета условиях приводит к увеличению эксергетического КПД работы станции технологического понижения давления транспортируемого природного газа более чем в полтора раза при всех рассмотренных схемах ДГА: без подогрева газа в ДГА, с подогревом газа после детандера, перед детандером, а также до и после детандера.

Полученные результаты могут рассматриваться как доказательство термодинамического преимущества использования детандер-генераторной технологии в качестве дополнительного либо альтернативного источника электроэнергии и холода на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа взамен традиционных дросселирующих установок на объектах, изначально не относящихся к объектам генерации электроэнергии и холода (например, металлургические комбинаты, газораспределительные станции и т.п.), а получающих такую возможность после внедрения на этих предприятиях ДГА.

Список литературы

1. **Alternative** Energie aus der Erdgasentspannungsanlage. Gas Wärme Int. 1989. Vol. 38, No. 7. 439 s.
2. **Berge W., Zahner C.** Erdgas-Entspannungsturbine Goeppingen // Gas-Erdgas gwf (BRD). 1991. Vol. 132, No. 7. S. 302–304.
3. **Мальханов В.П., Степанец А.А., Шпак В.Н.** Детандер-генераторные агрегаты, разрабатываемые АО «Криокор» для утилизации избыточного давления природного газа // Химическое и нефтяное машиностроение. 1977. № 4. С. 32.
4. **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.
5. **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.
6. **Куличихин В.В., Кудрявый В.В., Чижов В.В., Лазарев Л.Я.** Об использовании потенциальной энергии природного газа на тепловых электростанциях // Электрические станции. 1997. № 3. С. 8–11.
7. **Кудрявый В.В., Гуськов Ю.Л., Агабабов С.Г., Аракелян Э.К., Агабабов В.С.** Испытания детандер-генераторного агрегата на ТЭЦ-21 АО «Мосэнерго» // Вестник МЭИ. 2001. № 2. С. 16–20.
8. **Агабабов В.С.** О применении детандер-генераторных агрегатов в газовой промышленности // Сб. Материалы НТС ОАО «Газпром», Энергосбережение и энергосберегающие технологии в энергетике газовой промышленности. М., 2001. Т. 2. С. 50–53.
9. **Агабабов В.С., Корягин А.В.** Производство электроэнергии в детандер-генераторных агрегатах с одновременным отпуском теплоты различных температурных уровней (теплоты или холода) // Промышленная энергетика. 2004. № 8. С. 46–48.
10. **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.
11. **Агабабов В.С.** Влияние детандер-генераторных агрегатов на тепловую экономичность тепловых электрических станций: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.14 / Агабабов Владимир Сергеевич. М., 2003. 40 с.
12. **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.
13. **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.
14. **Джураева Е.В., Александров А.А.** Эксергетический анализ процессов, происходящих в детандер-генераторном агрегате // Теплоэнергетика. 2005. № 2. С. 73–77.
15. **Бродянский В.М.** Эксергетический метод термодинамического анализа. М.: Энергия, 1973. 296 с.
16. **Куличихин В.В., Тюняев М.В.** Проблемы использования детандерной технологии в российской энергетике // Сб. тезисов докладов научн. конф. в Бранденбургском техн. ун-те, Котбус-Зенфтенберг, Германия. 2016. С. 8–9.
17. **Куличихин В.В., Тюняев М.В.** Детандер-генераторные агрегаты в энергетике. Мифы и реальность // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 4(35). С. 62–69.
18. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 700 с.

*Статья поступила в редакцию 12 апреля 2017 г.,
после доработки — 5 июня 2017 г.*