

С.П. Горбачёв

ООО «ВНИИГАЗ», пос. Развилка, Ленинский район Московской области, РФ, 142717

e-mail: sgorb@infoline.su

А.А. Логинов

Московский энергетический институт (Технический университет), ул. Красноказарменная, 14, г. Москва, РФ, 111250

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СПГ НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ДАВЛЕНИИ В МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ

Сжиженный природный газ (СПГ) выгодно производить на газораспределительных станциях. Для этого используется перепад давлений между газопроводами высокого (магистральный) и низкого давлений. Для создания криогенной СПГ-установки выбран дроссельно-детандерный цикл среднего давления. Целью исследования является определение изменений производительности установки при повышении (снижении) давления в магистральном газопроводе без использования регулирования или с учётом его возможностей. Рассматриваются также способы снижения и увеличения производительности установки, вызванные несогласованностью производства и потребления СПГ. Математическое моделирование различных режимов работы СПГ-установки проводилось с использованием программы, предназначенной для расчёта реализуемых технологических процессов. На её основе определены характеристики СПГ-установки в нерасчётных режимах.

Ключевые слова: Сжиженный природный газ (СПГ). Газораспределительная станция. Детандер. Дроссель. Теплообменник. Ожижение. Холодопроизводительность. Регулирование. СПГ-установка.

S.P. Gorbachyov, A.A. Loginov

FEATURES OF LNG' MANUFACTURE ON GAS-DISTRIBUTING STATIONS AT VARIABLE PRESSURE IN THE GAS MAIN

Liquefied natural gas (LNG) it is advantageous to making on gas-distributing stations. For this purpose a difference of pressure between gas mains of high (main) and low pressure is used. For creation of cryogenic LNG-plant is chosen a throttle-expander cycle of average pressure. The purpose of research is definition of changes the productivity of plant at increase (reduction) of pressure in the gas main without use of regulation or in view of its opportunities. Ways of decrease and increase of productivity on plant caused by inconsistency of manufacture and consumption of LNG are also considered. Mathematical modelling of various operating modes of LNG-plant was carried out with use of the program intended for calculation of sold technological processes. On its basis characteristics of LNG-plant in not settlement modes are determined.

Keywords: Liquefied natural gas (LNG). Gas-distributing station. Expander. Throttle. Heat-exchanger. Liquefaction. Cold-productivity. Regulation. LNG-plant.

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство сжиженного природного газа (СПГ) на газораспределительных станциях (ГРС) осуществляется, как правило, за счёт внутреннего охлаждения газа при его расширении от давления магистрального газопровода (2-7 МПа) до давления распределительного газопровода (0,3-0,6 МПа) [1,2].

В этих условиях наиболее эффективным является

цикл Клода с использованием в качестве расширительной машины турбодетандера [3-5]. Расчётная схема такой установки представлена на рис. 1. Сжижение газа по этой схеме осуществляется следующим образом. Газ из магистрального газопровода высокого давления 1 поступает в теплообменник предварительного охлаждения 4 и после охлаждения в нём разделяется на две части. Часть газа расширяется в турбодетандере 5 и направляется в обратный поток. Оставшаяся часть

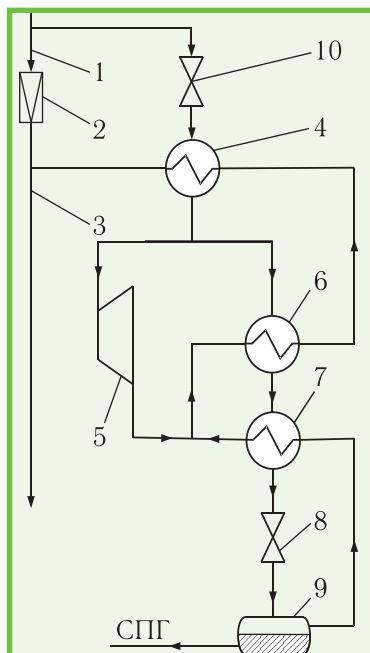


Рис. 1. Расчётная схема установки сжижения природного газа на ГРС: 1 — газопровод высокого давления; 2 — редуктор ГРС; 3 — газопровод низкого давления; 4 — теплообменник предварительного охлаждения ТО1; 5 — турбодетандер; 6 — детандерный теплообменник ТО2; 7 — дроссельный теплообменник ТО3; 8 — дроссельный вентиль; 9 — сборник-сепаратор; 10 — регулятор давления

газа подаётся в детандерный теплообменник 6, в котором происходит конденсация прямого потока с его последующим переохлаждением. После детандерного теплообменника поток направляется в дроссельный теплообменник 7, а затем через дроссельный вентиль 8 в сепаратор 9. Из сепаратора жидкость выводится за пределы установки, а обратный поток через дроссельный, детандерный теплообменник и теплообменник предварительного охлаждения возвращается в газопровод низкого давления 3.

Особенности этой установки в отличие от традиционных ожижительных установок заключаются в следующем:

- в магистральном газопроводе, а, следовательно, на

входе в установку, имеются как суточные, так и сезонные колебания давления в широком диапазоне значений, что приводит к изменению производительности установки;

- из-за несогласованности производства и потребления СПГ возникает необходимость в регулировании (в частности — снижении) холодопроизводительности установки;

- при низкой температуре газа за детандером возможна кристаллизация паров диоксида углерода и компрессорного масла, содержащихся в исходном газе.

Цель данной работы состоит в определении изменений производительности установки при повышении (снижении) давления в магистральном газопроводе без организации регулирования или с использованием системы регулирования; разработке простого и достаточно эффективного способа снижения производительности установки, если её производительность превышает потребление СПГ.

2. ПОКАЗАТЕЛИ СПГ-УСТАНОВКИ ПРИ НЕРАСЧЁТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Работа проводилась с применением математического моделирования различных режимов работы

установки. Исходные данные для расчёта приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчёта цикла сжижения природного газа на ГРС в номинальном режиме

Параметры	Значения
Давление газа в магистральном газопроводе, МПа	3,5
Давление детандерного потока, МПа	3,5
Давление обратного потока, МПа	0,6
Температура газа в магистральном газопроводе, К	290
Изоэнтروпный КПД детандера	0,8
Производительность установки, кг/ч	1000

Математическое моделирование проводилось на основе программы, предназначенной для проектного (прямого) расчёта технологических процессов. Погрешность расчётов составляла менее 5 % при их удовлетворительной сходимости. Чтобы использовать эту программу для нахождения показателей цикла при изменении давления газа на входе без регулирования, т.е. при работе установки в нерасчётных режимах, были приняты следующие допущения:

1. При изменении давления газа на входе в установку объёмные расходы газа через детандер и дроссельный вентиль остаются постоянными. При этом, естественно, массовые расходы изменяются пропорционально абсолютному давлению газа.

2. Поскольку отношения массовых расходов при изменении давления не меняются, то температура газа перед детандером (после теплообменника предварительного охлаждения) принимается неизменной и равной её значению в номинальном режиме.

3. При отклонении массового расхода газа от номинального значения изоэнтропный КПД детандера изменяется в соответствии с рис. 2.

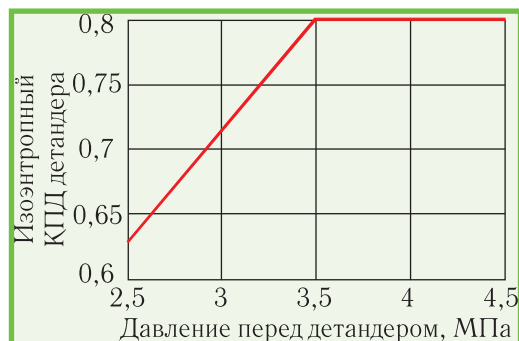


Рис. 2. Изменения КПД детандера в зависимости от давления газа перед СПГ-установкой

При проведении термодинамического расчёта цикла необходимо было учитывать специфику детандерного теплообменника, в котором происходит охлаждение и конденсация прямого потока за счёт холода обратного потока. При снижении давления прямого

потока будет нарушаться работоспособность этого теплообменника в его холодной части согласно положению II-го начала термодинамики, так как количество теплоты, подводимое к обратному потоку может быть меньше теплоты фазового перехода. В этом случае прямой поток будет выходить из детандерного теплообменника в двухфазном состоянии.

Результаты численного моделирования при изменении давления в магистральном трубопроводе с 3,5 до 2,5 МПа и с 3,5 до 4,0 МПа представлены на рисунках 3, 4 и в табл. 2.



Рис. 3. Зависимость коэффициента ожижения от давления на входе в установку: 1 — с учётом изменения КПД детандера; 2 — без использования регулирования

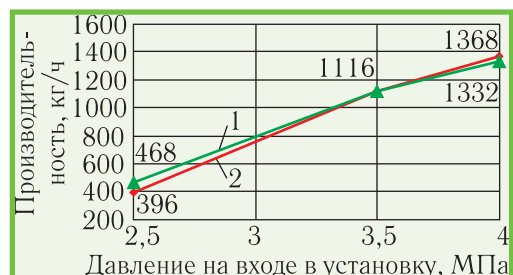


Рис. 4. Изменения производительности в зависимости от давления на входе в СПГ-установку: 1 — с учётом изменения КПД детандера; 2 — без использования регулирования

Из рис. 3 видно, что при снижении давления на входе в установку с 3,5 до 2,5 МПа (режим работы Б в табл. 2) коэффициент ожижения уменьшается с 0,13 до 0,07 без учёта изменения КПД детандера, а производительность установки — с 1116 до 396 кг/ч. Падение производительности установки объясняется как уменьшением коэффициента ожижения, так и снижением массового расхода газа, поступающего в установку. При росте давления с 3,5 до 4,0 МПа (режим работы Д) коэффициент ожижения увеличивается до 0,14, а производительность установки возрастает до 1368 кг/ч.

Регулирование работы установки при изменении давления на входе предусмотрено для обеспечения её максимально возможной производительности при новом значении входных параметров. При пассивном регулировании (режимы работы В и Е) предполагается, что объёмный расход газа через детандер может оставаться постоянным, а расход газа через дроссельный вентиль (производственный поток) меняться. При этом

устанавливаются новые оптимальные соотношения между детандерным и производственным потоками и значения температур перед детандером (см. табл. 2).

Из результатов расчётов, представленных на рис. 3, видно, что при пассивном регулировании параметров установки коэффициент ожижения уменьшается до 0,08, а производительность снижается до 468 кг/ч по сравнению с номинальным режимом (при снижении давления газа на входе в установку с 3,5 до 2,5 МПа). При этом температура газа перед детандером снижается с 215 до 200 К, как указывается в табл. 2. При изменении соотношения расходов детандерного и производственного потоков несколько меняется соотношение между тепловыми нагрузками на теплообменники (табл. 2), но при описании указанных нерасчётных режимов это не учитывалось.

При повышении давления на входе в установку с 3,5 до 4,0 МПа коэффициент ожижения увеличивается до 0,15, а производительность — до 1332 кг/ч.

Одним из методов повышения производительности установки при снижении давления на входе является увеличение массового расхода газа через турбодетандер, в частности, путём замены его проточной части. При этом мощность детандера и поверхности теплообменников будут соответствовать номинальному режиму.

Нами было проведено описание характеристик установки при использовании этого метода регулирования при снижении давления на входе в установку с 3,5 до 2,5 МПа. Как показали расчёты (см. режим работы Г), замена проточной части детандера позволяет увеличить выход СПГ до 795 против 468 кг/ч в установке с пассивным регулированием, несмотря на то, что из-за недостаточной поверхности теплообменников недорекуперация на выходе из установки возрастает с 6 до 15 К. Таким образом, замена проточной части турбодетандера даёт возможность обеспечить производительность установки на уровне 70 % от номинального значения при снижении давления газа на входе в установку с 3,5 до 2,5 МПа.

Как указывалось выше, при производстве СПГ на газораспределительной станции иногда необходимо снижать производительность установки при уменьшении его потребления. Из результатов моделирования режимов работы установки следует, что весьма эффективным методом снижения производительности является дросселирование газа на входе в установку (см. рис. 1) с последующим пассивным регулированием. При этом не требуется никаких дополнительных аппаратов. Газ возвращается в газопровод при относительно высокой температуре, а процесс регулирования заключается в поддержании давления на входе в установку и обеспечении достаточно высокой температуры газа на выходе из установки за счёт изменения расхода производственного потока. Высокая эффективность такого способа регулирования объясняется тем, что в цикле не затрачивается энергия на ожижение газа и необратимость процесса дросселирования проявляется только в относительном увеличении расхода газа через установку (снижении коэф-

Таблица 2. Основные параметры СПГ-установки при её работе в нерасчётных режимах (номинальный режим — производительность 1000 кг/ч при давлении газа на входе 3,5 МПа)

Давление на входе в установку, МПа		3,5	2,5		4,0		
Режим работы		А	Б	В	Г	Д	Е
Объёмный расход газа на входе в установку, м ³ /ч (физич.)		11554	8090	8090	13064	13335	12169
Массовый расход газа на входе в установку, кг/ч		8280	5760	5760	9360	9720	8640
Доля детандерного потока		0,84	0,84	0,9	0,91	0,84	0,83
Расход продукционного (дроссельного) потока, кг/ч		1325	921	576	842	1555	1469
Температура газа, К	перед детандером	215	215 ¹⁾	200	200	215	230
	после детандера	142,5	156	155	143,5	138,8 ²⁾	148
	на выходе из установки	282	266	284	275	285,5	283
Тепловая нагрузка на теплообменник, кВт ³⁾	ТО1	446	293	356	574	533	379
	ТО2	177	73	73,6	122	214	225
	ТО3	0,2	0,1	0,4	0,16	0,76	0,8
Коэффициент ожигения		0,13	0,07	0,08	0,085	0,14	0,15
Производительность установки по СПГ, кг/ч		1116	396	468	795	1368	1332

Примечания: А — номинальный режим, на который рассчитана СПГ-установка; Б, Д — режимы без регулирования (КПД детандера — 0,8); В, Е — режимы с пассивным регулированием (КПД детандера изменяется согласно рис. 2); Г — режим с увеличенным расходом газа через детандер при сохранении его мощности (КПД детандера — 0,8); ¹⁾ паросодержание прямого потока после детандерного теплообменника равно 0,49 (нарушение работоспособности теплообменника в его холодной части); ²⁾ возможна кристаллизация диоксида углерода при его концентрации в исходном газе равной 0,05 %; ³⁾ обозначения рекуперативных теплообменников соответствуют рис. 1.

фициента ожигения).

Работа установки с переменным давлением газа на входе имеет ещё одну особенность. Она обусловлена тем, что в природном газе, отбираемом из газопровода, содержатся высококипящие компоненты (в первую очередь, диоксид углерода), которые могут кристаллизоваться в процессе охлаждения, в том числе в потоке газа на выходе из детандера. При концентрации диоксида углерода в исходном газе 0,05 % (мольн.) кристаллизация его при давлении 0,6 МПа происходит при температуре 138 К. Таким образом, при расширении газа в детандере с давления 4,0 МПа и температуры 215 К на выходе из детандера начинается кристаллизация диоксида углерода. С таким явлением необходимо считаться в случаях работы ожигительной установки при повышенных давлениях газа на входе в неё.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что снижение производительности установки сжижения природного газа при уменьшении давления газа на входе слабо компенсируется использованием пассивного регулирования (путём изменения соотношения продукционного и детандерного потоков газа). Для повышения эффективности работы установки в этих условиях необходимо увеличивать массовую производительность турбодетандера за счёт замены проточной части. В то же время, искусственное снижение давления газа на входе в установку путём дросселирования позволяет эффективно уменьшать производительность установки, если её значение превышает потребление СПГ.

При работе установки с переменным давлением газа на входе необходимо контролировать температуру газа за детандером, чтобы избежать кристаллизации высококипящих примесей (диоксида углерода).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сердюков С.Г., Ходорков И.Л. Типовой мини-завод по производству сжиженного природного газа на газоредуцирующих станциях (ГРС) магистральных трубопроводов// Материалы научно-технического совета ОАО «Газпром» по теме «Перспективы и опыт применения сжиженного природного газа на объектах ОАО «Газпром». — М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2002. — С. 28-34.
2. Решение проблем энергоснабжения промышленных, социальных объектов и населенных пунктов с использованием СПГ/ Б. Скородумов, Р. Дарбинян, В. Передельский и др.// Автогазозаправочный комплекс. — 2002. — № 6. — С. 44-47.
3. Natural gas liquefier/ B.D. Krakovskiy, V.A. Marty-nov, O.M. Popov et al// Proc. of Int. Inst. of Refrigeration Conf. «The Eighth Cryogenics 2004». — Praha: IIR, 2004. — P. 203-209.
4. Машканцев М.А. Детандерно-компрессорные схемы производства сжиженного природного газа для газораспределительных станций с низким давлением входящего газа// Материалы научно-технического совета ОАО «Газпром» по теме «Перспективы и опыт применения сжиженного природного газа на объектах ОАО «Газпром». — М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2002. — С. 16-20.
5. Горбачёв С.П. Оценка эффективности производства СПГ на газораспределительных станциях// Технические газы. — 2005. — № 5. — С. 35-40.