УДК 621.565

В.Ш. Эрсмамбетов
ул. Блюхера, 22, кв. 196, г. Харьков, Украина, 61170
e-mail: ersm@w-expander.com

УСТАНОВКИ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ С ВОЛНОВЫМ ДЕТАНДЕРОМ-КОМПРЕССОРОМ

Конструирование установок с волновым детандером-компрессором (ВДК) требует особого подхода вследствие присущих ему условий работы и особенности реализуемых процессов. Рассматриваются базовые схемы и принципы построения установок с использованием ВДК. Приведены расчётные показатели и схемы установок переработки нефтяного газа при различном начальном давлении получения сжиженного природного газа, а также извлечения метана из углеводородных газов с пониженным его содержанием (шахтный газ, биогаз). Представлена схема установки для дополнительного извлечения пропана из природного газа на газораспределительных станциях.
Ключевые слова: *Волновой детандер-компрессор. Базовые схемы. Принцип построения схем. Схемы установок. Нефтяной газ. Природный газ. Сжиженный природный газ. Шахтный газ. Биогаз.*

V.Sh. Ersmambetov

PLANTS FOR PROCESSING OF HYDROCARBONIC GASES WITH THE WAVE EXPANDER-COMPRESSOR

Designing of plants with wave expander-compressor (WEC) demands the special approach owing to operating conditions inherent in him and feature of realizable processes. Base circuit and principles of plants construction with use of WEC are considered. The calculated parameters and circuits of plants for processing of oil gas are resulted at various initial pressure, receptions of liquefied natural gas, and also extraction of metane from hydrocarbonic gases with its lowered contents (mine gas, biogas). The plant circuit for additional extraction of propane from natural gas on gas-distributing stations is submitted.
Keywords: *Wave expander-compressor. Base circuits. Principle of circuits' construction. Plant circuits. Oil gas. Natural gas. Liquefied natural gas. Mine gas. Biogas.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Волновой детандер-компрессор (ВДК) по своему принципу действия изначально нуждается в использовании энергии расширения потока газа для сжатия другого потока. Такая особенность ВДК, как отмечалось в работе [1], обусловливает своеобразное построение низкотемпературных установок на его основе в отличие от обычного детандера, в котором энергия расширения газа может быть преобразована в механическую или электрическую энергию. В установке же с ВДК в связи с его особенностью должен присутствовать поток, которому передаётся энергия расширения газа.

Кроме этого, нужно учитывать, что давление сжатого газа должно быть примерно равно давлению газа перед детандером, а степень понижения давления в детандерной части ВДК равна степени повышения давления в его компрессорной части. В соответствии с этим массовые расходы детандируемого и компримируемого потоков различаются. Исходя из равенства работ расширения и сжатия, различие будет тем больше, чем ниже температура газа перед детандированием и чем выше температура перед компримированием. Это не позволяет реализовать традиционные схемы использования детандер-компрессорных агрегатов, когда, например, работа газа в детандерной ступени через общий вал передаётся компрессорной ступени для дополнительного сжатия газа перед его расширением. Степень понижения давления при этом оказывается существенно больше степени сжатия.

Вследствие этого создание установок на базе ВДК требует особого подхода и опирается на ряд типовых базовых схем.

2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УСТАНОВОК С ВДК

Детандерная часть ВДК выполняет функции расширительной машины с процессом близким к изоэнтро-

© *В.Ш. Эрсмамбетов*

пийному. Включение компрессорной части в технологическую схему установки может быть различным. Приведём основные базовые схемы (см. рис. 1), в которых с разной эффективностью используется компрессорная часть ВДК. Им свойственны следующие признаки:

1) компримирование части газа непосредственно после расширения до уровня давления перед детандированием (рис. 1,а);

2) создание замкнутого контура из последовательно соединенных аппарата воздушного (водяного) охлаждения и редукционного клапана с подачей газа на вход компрессорной части (рис. 1,б);

3) компримирование части газа после расширения и подвода тепла в теплообменнике до уровня давления перед детандированием (рис. 1,в);

4) компримирование части исходного потока газа на входе в установку в линии параллельной основному компрессору (рис. 1,г);

5) компримирование части газа, получаемого в качестве продукта, с рециркуляцией его на вход установки с целью дальнейшей обработки и обогащения его целевыми компонентами (рис. 1,д);

6) создание холодильного цикла на смешанном хладагенте в установках низкотемпературной конденсации (НТК) (рис. 1,е);

7) компримирование потока газа, задействованного в другом процессе.

В схемах 1 и 2 (рисунки 1,а и 1,б) компрессорная часть ВДК используется только как способ утилизации энергии расширения, не вызывающий роста КПД установки в целом. Эти схемы позволяют применять ВДК вместо редукционного клапана. Остальные способы способствуют росту КПД низкотемпературных установок за счёт уменьшения энергии, потребляемой компрессором, или снижения удельных затрат энергии на единицу получаемого продукта. В схеме 1 производится разделение потока, поэтому КПД такого ВДК не превышает эффективности аналогичной трубки Ранка вследствие уменьшения расхода холодного потока газа. В схеме 2 (рис. 1,б) расход холодного потока не уменьшается, однако энергия сжатого потока газа полезно не используется. Потери в ней равны величине энергии, затрачиваемой на отвод теплоты сжатого потока газа в окружающую среду. Замена процесса изоэнтальпийного расширения на изоэнтропийный даёт существенный выигрыш по уровню снижения температуры и получаемому количеству широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ).

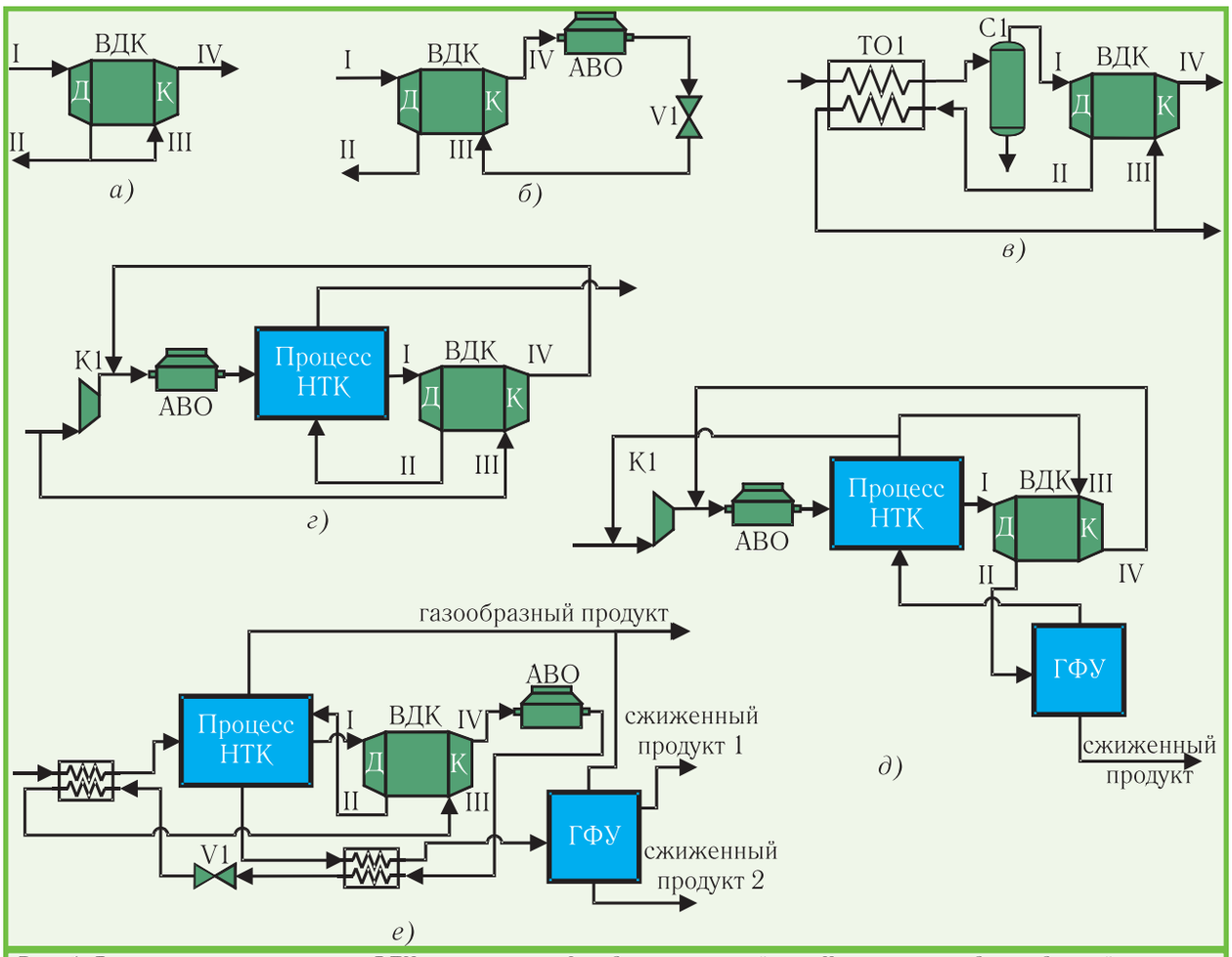

Рис. 1. *Базовые схемы включения ВДК в установки: I — детанируемый газ; II — газ после детандерной ступени; III — компримируемый газ; IV — газ после компрессорной ступени; Д, К — детандерная и компрессорная части ВДК; АВО — аппарат воздушного охлаждения; К1 — компрессор; V1 — дроссельный вентиль; НТК — блок процесса низкотемпературной конденсации; ГФУ — газофракционирующая установка*

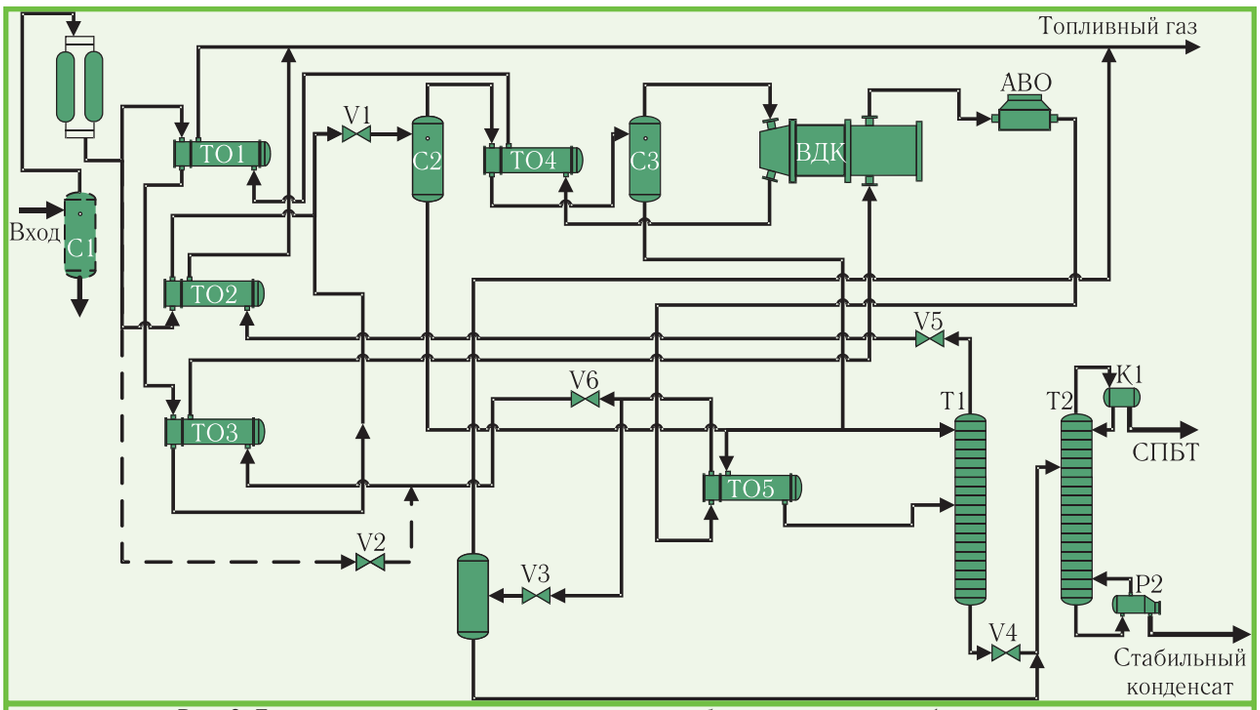

Рис. 2. *Технологическая схема установки переработки попутного нефтяного газа: ТО1, ... ТО5 — теплообменники; С1, С2, С3 — сепараторы; V1, ..., V6 — вентили; Т1, Т2 — ректификационные колонны; Р2 — рибойлер; К1 — конденсатор*

В схеме 3 (рис. 1,в) после детандирования холодный поток газа используется для охлаждения газа в теплообменнике перед детандером. Часть газа после детандера компримируется. На выходе из установки имеются два потока газа: с высоким и низким давлениями [2], а также поток ШФЛУ.

В схеме 4 (рис. 1,г) часть потока сырого газа сжимается в компрессорной ступени ВДК, что позволяет уменьшить затраты энергии на получение товарного целевого продукта в установках, где требуется предварительное компримирование газа для осуществления процесса НТК.

В установках, предназначенных для получения сжиженного природного газа из сырья, содержащего малое количество метана, возможна рециркуляция части газа после газофракционирующей установки (ГФУ) с целью более полного извлечения метана. В этом случае используется схема 5 (рис. 1,д).

Наиболее привлекательна схема 6 (рис. 1,е) с холодильным циклом на смешанном хладагенте, получаемом непосредственно в установке. Состав этого хлад-агента может регулироваться путём подпитки его смесью углеводородов, подаваемой из промежуточной точки процесса НТК. Данная схема позволяет обеспечить достижение более глубокого охлаждения.

Базовые схемы отражают общий характер использования компрессорной части ВДК и могут иметь вполне конкретные воплощения. Они иллюстрируются схемами разработанных установок, приведённых ниже.

3. УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

При разработке таких установок использование внешнего источника холода исключается. С целью более глубокого извлечения С3+высшие упор делался на двух- и трёхступенчатые схемы низкотемпературной конденсации.

Схема установки, предназначенной для получения товарной продукции в виде топливного газа, пригодного для использования в передвижных газотурбинных электростанциях, а также сжиженной пропан-бутановой смеси (СПБТ) и газового бензина (стабильного конденсата), показана на рис. 2 [3].

Установка состоит из следующих основных блоков:

1. Блока осушки газа и очистки его от CO_2 и H_2S.
2. Блока низкотемпературной конденсации (НТК) с тремя ступенями охлаждения.
3. Газофракционирующей установки, состоящей из 2-ух ректификационных колонн.

Сырой газ должен быть предварительно очищен от капельной влаги и твёрдых частиц в сепараторе С1. Затем он проходит через блок адсорбционной осушки, где осушается до точки росы −70 °С и очищается от кислых компонентов. Поскольку сырой газ имеет достаточный уровень давления (8 МПа), то осуществляется трёхступенчатый процесс НТК. В первом из них — охлаждение при расширении в дроссельном вентиле V1. Во второй ступени газ охлаждается за счёт расширения в волновом детандере-компрессоре. Охлаждение в третьей ступени производится в холодильном цикле на смешанном хладагенте, который сжимается в компрессорной ступени ВДК, охлаждается в воздухоохладителе и теплообменниках. В качестве хладагента используется исходный газ после осушки. Температура перед детандером составляет −52,6 °С, а после расширения −88,6 °С.

Окончательная переработка конденсата и получе-

ние товарных продуктов происходят в газофракционирующей установке, состоящей из двух ректификационных колонн: деэтанизации и стабилизации. Продуктами, как указано в табл. 1, являются топливный газ, соответствующий ГОСТ 5542-87, СПБТ и стабильный газовый конденсат (СГК).

Таблица 1. *Основные параметры установки переработки попутного нефтяного газа при высоком начальном давлении газа*

Компонентный состав сырого газа, об. доли	метан	0,7884
	этан	0,0936
	пропан	0,054
	i-бутан	0,0158
	n-бутан	0,0173
	i-пентан	0,0066
	n-пентан	0,0083
	азот	0,0148
	диоксид углерода	0,001
	сероводород	0,0002
Содержание С3+высшие, г/м^3		240
Производительность по сырому газу, м^3/ч		2625
Начальное давление сырого газа, МПа		8
Извлечение пропана, %		80
Количество конечного продукта	топливный газ, м^3/ч	2304
	СПБТ, кг/ч	590
	СГК, кг/ч	117

Нефтяной газ во многих случаях имеет невысокое давление. Поэтому для достаточного снижения температуры при детандировании необходимо обеспечить требуемый уровень начального давления. При этом нужно учитывать, что количество ступеней охлаждения с использованием давления газа может ограничиваться энергетическими затратами на компримирование газа. Для условий, когда начальное давление сырого газа оказывается невысоким, разработана схема установки, приведённая на рис. 3. Установка создаётся с использованием базовой схемы 4. Её параметры представлены в табл. 2. В ней часть выходящего потока газа компримируется в ВДК. Поэтому топливный газ производится в виде двух потоков с разными давлениями.

Таблица 2. *Основные параметры установки переработки попутного нефтяного газа при низком начальном давлении газа*

Компонентный состав сырого газа, % об.	метан	56,49
	этан	16,32
	пропан	12,84
	i-бутан	1,44
	n-бутан	4,38
	i-пентан	0,99
	n-пентан	1,21
	гексан	1,85
	азот	2,94
	диоксид углерода	1,53
Молекулярная масса, кг/кмоль		27,7
Содержание С3+высшие, г/м^3		490
Производительность по сырому газу, м^3/ч (кг/ч)		290 (320)
Давление сырого газа, МПа		1

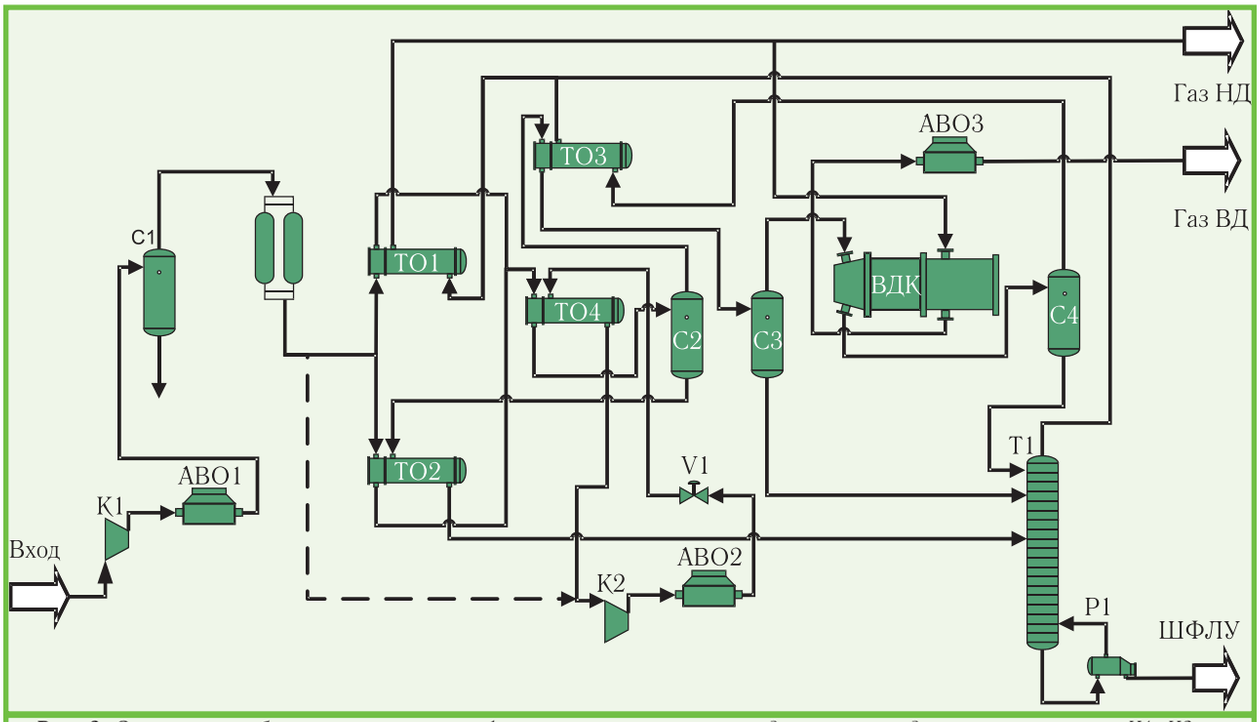

Рис. 3. *Схема переработки попутного нефтяного газа при низком давлении входа его в установку: К1, К2 — компрессоры; ТО1, ..., ТО4 — теплообменники; С1, ..., С4 — сепараторы; АВО1, АВО2, АВО3 — аппараты воздушного охлаждения; V1 — дроссельный вентиль; Р1 — рибойлер; Т1 — ректификационная колонна*

Таблица 3. Показатели различных вариантов работы установки переработки попутного нефтяного газа

Показатели	Варианты			
	1	2	3	4
Давление сырого газа, МПа	3,5	3,5	1	1
Температура сепарации перед ВДК, °С	−20	−10	−15	4
Температура на выходе из детандерной ступени, °С	−50	−41	−38	−19
Степень понижения давления газа в ВДК	2,73	2,73	2,3	2,3
Молекулярная масса товарного газа, кг/кмоль	19,93	20,22	22,61	22,85
Давление газа ВД, МПа	3,5	3,5	1	–
Давление газа НД, МПа	1,28	1,28	0,4	0,32
Производительность по газу ВД, кг/ч	42	47,2	66,4	–
Производительность по газу НД, кг/ч	153,9	157	180,5	255,3
Молекулярная масса ШФЛУ, кг/кмоль	51,3	51,6	58,31	59,36
Степень извлечения пропана, %	76	69	18,8	24,8
Производительность по ШФЛУ, кг/ч	123,7	115,3	96,2	75,8
Мощность, потребляемая компрессорами, кВт	82,6	82,6	31,7	3,3
Энергозатраты в рибойлере, кВт	28,5	33,9	9,1	3,13
Удельные энергозатраты на кг ШФЛУ, кВт·ч/кг	0,9	1,01	0,42	0,085

В установке осуществляется двухступенчатый процесс НТК с использованием холода от расширения в ВДК и производимого в парокомпрессорном цикле на смешанном хладагенте.

В установке (см. рис. 3) предусмотрена переработка сырого газа при его начальном давлении 1 МПа. Кроме этого, анализировался вариант работы установки со сжатием газа в компрессоре К1 до давления 3,5 МПа. В табл. 3 сопоставляются различные варианты работы установки по степени извлечения целевых компонентов и затратам энергии.

При работе установки по варианту 1 компримируется весь входящий в неё поток газа, что даёт возможность осуществить конденсацию в двух ступенях. Однако это приводит к большим затратам энергии. Вариант 2 отличается от варианта 1 использованием одно-ступенчатой конденсации. При реализации этих вариантов весь поток сырого газа компримируется до давления 3,5 МПа.

В установке при работе по варианту 3 компрессор К1 не применяется. Процесс НТК происходит при исходном давлении газа 1 МПа. Конденсат нагнетается насосом до давления 3,1 МПа перед подачей его в колонну. В этих вариантах компрессорная часть ВДК используется для сжатия части выходящего потока газа (газ ВД).

Наименьшие затраты энергии, как следует из табл. 3, достигаются при компримировании только части потока газа и использовании компримированного в ВДК газа в холодильном цикле (варианты 3 и 4). При этом падает производительность установки по ШФЛУ, но по сравнению с вариантом 1 в 18 раз снижается потребление энергии.

Компрессор К1, используемый в установках, может иметь привод как от электромотора, так и от двигателя, работающего на получаемом топливном газе.

4. УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Во многих случаях газ, поступающий на газорас-пределительную станцию (ГРС), содержит в себе

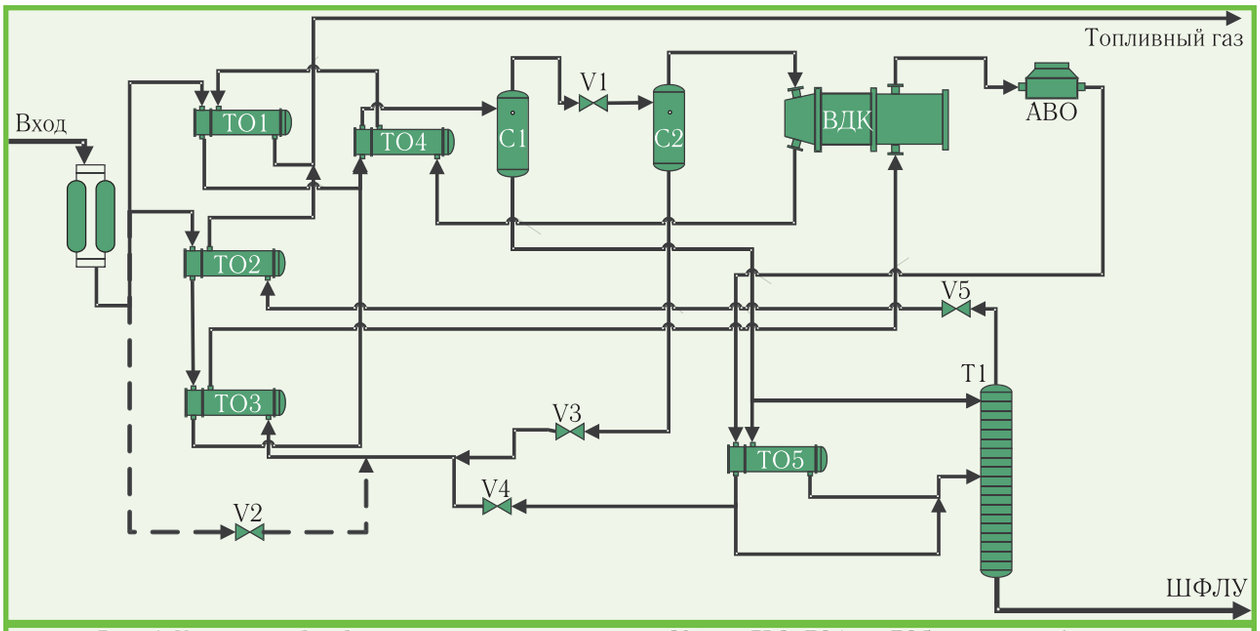

***Рис. 4.** Установка для дополнительного извлечения С3+ на ГРС: ТО1, ..., ТО5 — теплообменники; АВО — аппарат воздушного охлаждения; V1, ..., V5 — дроссельные вентили; С1, С2 — сепараторы; Т1 — ректификационная колонна*

определённое количество пропана, который уходит вместе с газом к потребителю и теряется как продукт. Поэтому актуальной задачей является извлечение пропана с применением для этого потенциальной энергии газа, которую нельзя использовать в процессе дросселирования. Содержание С3+высшие в этом газе невелико. Поэтому для обеспечения приемлемого экономического эффекта первостепенное значение имеет стоимость установки. Применение в ней ВДК, характеризуемого невысокой стоимостью, позволяет создавать такие установки. Схема одной из установок изображена на рис. 4.

Схема построена на базе трехступенчатого процесса НТК с холодильным циклом на смешанном хладагенте. В качестве хладагента используется исходный газ после осушки с подпиткой его конденсатом после второй ступени конденсации. Поскольку на ГРС подаётся тощий газ, то требуется более низкий уровень температуры для его переработки, чем в случае нефтяного газа. Температура перед детандерной ступенью ВДК составляет −88 °С, а после расширения −112 °С.

Окончательная переработка конденсата и получение товарных продуктов происходят в колонне деэтанизации. Продуктами являются топливный газ, соответствующий ГОСТ 5542-87, и широкая фракция углеводородов (ШФЛУ). Основные параметры установки приведены в табл. 4.

Таблица 4. *Показатели установки для извлечения С3+ из природного газа, поступающего на ГРС*

Компонентный состав газа на входе в ГРС, % об.	метан	90
	этан	4,427
	пропан	1,66
	i-бутан	0,2775
	n-бутан	0,3205
	i-пентан	0,0965
	n-пентан	0,0678
	азот	1,69
	диоксид углерода	0,69
Содержание С3+высшие, г/м³		50
Номинальная производительность по исходному газу, м³/ч		20830
Начальное давление газа, МПа		3,5
Давление товарного газа, МПа		0,55
Компонентный состав товарного газа, об. %	метан	93,3
	этан	3,85
	пропан	0,35
	азот	1,75
Извлечение смеси пропан-бутан, %		85
Производительность по ШФЛУ, т/ч		1
Потребляемая мощность, кВт		130

Используя данные табл. 3, можно приближённо оценить экономическую эффективность установки (см. рис. 4). Если учесть разницу в стоимости продукта и затрачиваемой электроэнергии без учёта других расходов при цене ШФЛУ 1850 грн./т, то она составит 43 тыс. грн. в сутки.

5. УСТАНОВКИ СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

На основе ВДК можно создавать эффективные установки для производства сжиженного природного газа (СПГ). Рассмотрим показатели СПГ-установки, использующей газ, имеющий высокое содержание метана. Такая установка может быть размещена на ГРС [4]. В ней потенциальная энергия сжатого газа будет расходоваться для получения помимо газа, подаваемого потребителю, второго товарного продукта — СПГ. Схема установки иллюстрируется рис. 5. Показатели установки приведены в табл. 5.

Таблица 5. *Показатели СПГ-установки, размещённой на ГРС*

Компонентный состав исходного газа, % об.	метан	0,93489
	этан	0,03067
	пропан	0,00612
	i-бутан	0,00065
	n-бутан	0,00105
	i-пентан	0,00027
	n-пентан	0,00029
	гексан	0,00006
	азот	0,01846
	диоксид углерода	0,00746
Расход газа, м³/ч (кг/ч)		40000 (28573)
Давление газа на входе в установку, МПа		5,0...5,5
Производительность по СПГ, кг/ч		3400
Давление СПГ, МПа		0,2
Температура СПГ, °С		−151,9
Давление газа на выходе из установки, МПа		0,6
Содержание метана в исходном газе, об. %		93,5
Содержание метана в СПГ		93,1
Степень ожижения, %		12

Важной задачей в настоящее время является переработка газов, содержащих пониженное количество метана. К ним относятся шахтные газы, биогазы, синтез-газы и др. Схема предназначенной для решения этой задачи установки приведена на рис. 6. Назначение её — получение сжиженного метана из шахтного газа. Газ содержит 30 % (об.) метана, 2 % этана, 0,1 % пропана; остальное — воздух.

Газ в установке (см. рис. 6) сжимается до давления 5,9 МПа в нескольких ступенях компрессора. Степень расширения в детандерной ступени ВДК составляет 2,4. Разделение компонентов происходит в блоке ректификации, который может состоять из одной или двух ректификационных колонн. В последнем случае обеспечивается более полная очистка метана и этана от воздуха. Сжиженный продукт, отбираемый снизу колонны, представляет собой смесь углеводородов. Отбросный газ — почти чистый воздух, уходящий из верхней части колонны, выбрасывается в атмосферу. Компрессорная ступень ВДК построена по базовой схеме 5 (рис. 1,д).

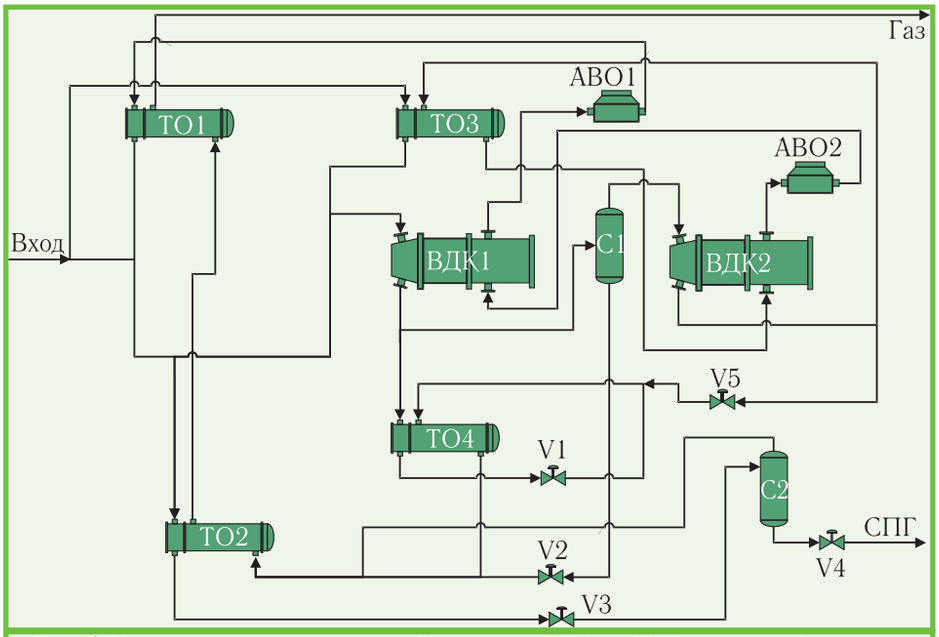

Рис. 5. *Установка сжижения природного газа: ТО1, ..., ТО4 — теплообменники; V1, ..., V5 — дроссельные вентили; С1, С2 — сепараторы; АВО1, АВО2 — аппараты воздушного охлаждения; ВДК1, ВДК2 — волновые детандеры-компрессоры*

Поскольку в составе шахтного газа содержится воздух, то в процессе его разделения нужно пройти зону взрывоопасной концентрации. В данной схеме область взрывоопасных концентраций приходится на процессы, реализуемые внутри колонны. Безопасность обеспечивается тем, что на процессы в колонне исключается воздействие пламени. Кроме этого, следует учитывать, что температура смеси в колонне существенно меньше температуры самовоспламенения.

В табл. 6 приводятся данные об основных параметрах установки.

Для привода компрессора используется двигатель, работающий на газе, добываемом из шахты.

Аналогичные установки разработаны для производства сжиженного метана из биогаза, получаемого путём переработки органических отходов сельскохозяйственного производства, а также утилизации газа хранилищ твёрдых бытовых отходов (свалок). Биогаз содержит примерно такое же количество метана, как и шахтный газ, однако вместо воздуха в нём присутствует диоксид углерода. Прямая утилизация свалочного газа в когенерационных установках затруднена, поскольку газ содержит в своем составе кремнийорганические соединения (силоксаны), которые при сжигании в поршневых или турбомашинах образуют твердые отложения на стен-

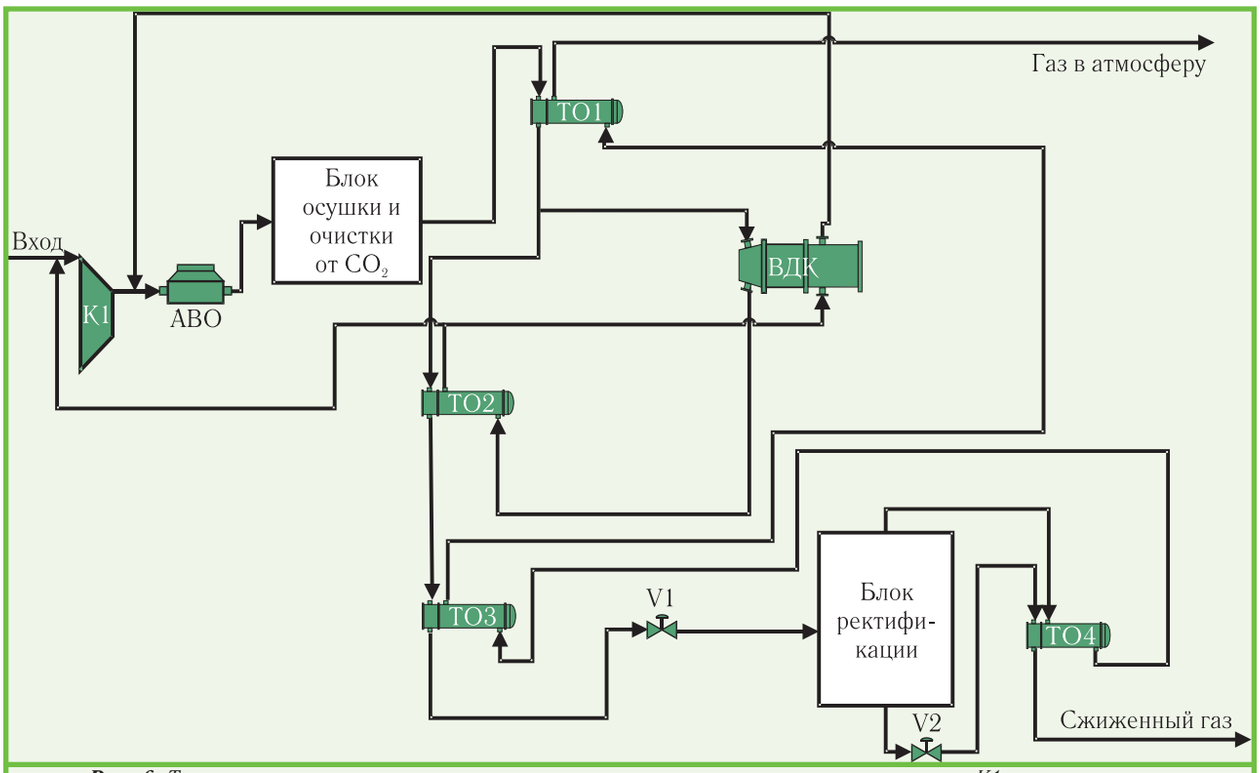

Рис. 6. *Технологическая схема получения сжиженного метана из шахтного газа: К1 — компрессор; ТО1, ..., ТО4 — теплообменники; АВО — аппарат воздушного охлаждения; V1, V2 — дроссельные вентили*

ках цилиндра или лопатках. Для предотвращения этого разработана установка, позволяющая удалять силоксаны из газа путём низкотемпературной его обработки.

Таблица 6. *Показатели установки для извлечения метана и др. углеводородов из шахтного газа*

Показатели		Значения
Расход исходного газа, м³/ч		426
Расход газа через компрессор, м³/ч		540
Расход сжиженного газа, кг/ч		93,6
Мощность, потребляемая компрессором, кВт		116,3
Удельные затраты энергии на получение продукта, кВт·ч/кг		1,23
Состав сжиженного газа, об. %	метан	93,3
	этан	6,3
	пропан	0,3
	воздух	0,1

Использование ВДК в установках улавливания лёгких фракций углеводородов для снижения потерь паров нефтепродуктов в нефте- и бензохранилищах позволяет обеспечить высокую степень чистоты воздуха при меньших затратах энергии [5]. В отличие от обычных компрессорных систем улавливания лёгких фракций углеводородов, основанных на сжатии паров, здесь применяется охлаждение за счёт холода, получаемого в результате расширения газа в ВДК. Установка работает с меньшей степенью повышения давления в компрессоре, что даёт возможность снизить число ступеней с трёх до двух. При этом значительно уменьшается степень загрязнения воздуха, снижаясь до требований европейских норм (30 г/м³).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приведённых схемах установок обработки нефтяного и природного газов, другого углеводородного сырья достаточно эффективно используются волновые детандеры-компрессоры. Многие из таких установок ранее не имели экономической привлекательности из-за высокой стоимости оборудования. В качестве примера можно сослаться на установки для дополнительного извлечения пропана на ГРС, обработки нефтяного газа при малых давлениях входящих газов с получением ШФЛУ. Относительно невысокая стоимость ВДК по сравнению с турбодетандерами делает возможным и экономически оправданным применение таких установок даже при малых количествах получаемых продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Эрсмамбетов В.Ш.** Волновой детандер-компрессор и перспективы его использования в низкотемпературных установках// Технические газы. — 2005. — № 5. — С. 14-20.

2. Патент РФ № 2092750. Способ низкотемпературной обработки природного газа/ **Д.М. Бобров, Ю.А. Лаухин, Ю.А. Сиротин, В.Ш. Эрсмамбетов**// Бюллетень изобретений. — 1997. — № 28.

3. Патент Украины № 21081. Процес низькотемпературної конденсації вуглеводнів/ **В.Ш. Эрсмамбетов**// Бюллетень изобретений. — 2007. — № 2.

4. Патент Украины № 63211. Спосіб зрідження природного газу/ **В.Ш. Эрсмамбетов**// Бюллетень изобретений. — 2006. — № 7.

5. Патент Украины № 17374. Процес уловлювання легких фракцій вуглеводнів/ **В.Ш. Эрсмамбетов**// Бюллетень изобретений. — 2006. — № 9.

ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ, ВЫПУСКНИКОВ ТЕХНИКУМОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ КОЛЛЕДЖЕЙ!

– получение высшего образования без отрыва от производства за 4 года;
– зачисление без экзаменов сразу на 3-й курс Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»;
– специальность — 7.090507 «Криогенная техника и технология»;
– форма обучения — заочная контрактная;
– завершение учебы — защитой дипломного проекта;
– диплом Министерства образования и науки Украины признается в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87

УДК 621.59 (075.8); 621.515

Г.К. Лавренченко, С.Г. Швец
Украинская ассоциация производителей технических газов «УА-СИГМА», а/я 271, г. Одесса, Украина, 65026
e-mail: uasigma@paco.net

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СОСТАВЕ ДЕТАНДЕР-КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА

Актуальным является разработка методики расчёта детандер-компрессорных агрегатов (ДКА) криогенных воздухоразделительных установок (ВРУ). Отмечаются отличительные особенности проектирования одноступенчатой центробежной компрессорной ступени, входящей в состав ДКА. Рассматривается формирование системы исходных данных для расчёта компрессорной ступени (КС) ДКА. Приведены результаты сравнительного анализа влияния эффективности компрессорной и детандерной ступеней на аналогичный показатель ДКА. Даются рекомендации относительно создания методики расчёта КС.
Ключевые слова: *Воздухоразделительная установка. Детандер-компрессорный агрегат. Компрессорная ступень. Детандерная ступень. Оптимизация.*

G.K. Lavrenchenko, S.G. Shvets

FEATURES OF DESIGNING OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STEP WORKING IN STRUCTURE OF THE EXPANDER-COMPRESSOR UNIT

Development of design procedure of expander-compressor units (ECU) of cryogenic air separation plants (ASP) is actual. Distinctive features of designing of the one-stage centrifugal compressor step included in ECU are marked. Formation of system of the initial data for calculation of compressor step (CS) of ECU is considered. Results of the comparative analysis of influence of compressor and expander steps efficiency on similar parameter of ECU are resulted. Recommendations concerning creation of design procedure of CS are given.
Keywords: *Air separation plant. Expander-compressor unit. Compressor step. Expander step. Optimization.*

ОБОЗНАЧЕНИЯ

D — доля детандерного потока;
d — диаметр, м;
$\overline{d}$ — приведённый диаметр;
G — массовый расход, кг/с;
h — теплоперепад, кДж/кг;
k — показатель адиабаты воздуха;
l — удельная работа, кДж;
N — мощность, кВт;
n — частота вращения, мин$^{-1}$;
p — давление, МПа;
T — температура, К;
u — окружная скорость, м/с;
z — коэффициент сжимаемости;
$\alpha_{ут}$ — коэффициент утечки воздуха;
$\alpha_{отб}$ — коэффициент отбора воздуха;
β — угол наклона лопаток рабочего колеса, град;
η — КПД;
$\eta_{мех}$, $\eta_{ут}$, $\eta_{р}$ — механический, объёмный и гидравлический КПД ДКА, соответственно;
π_K — степень повышения давления в КС;
θ — коэффициент расхода;
τ — коэффициент стеснения потока;
ρ — плотность, кг/м^3;
$\xi_{вт}$ — втулочное отношение.

СОКРАЩЕНИЯ

ВРУ — воздухоразделительная установка;
ДС — детандерная ступень;
ДКА — детандер-компрессорный агрегат;
КС — компрессорная ступень;
РК — рабочее колесо.

ИНДЕКСЫ

Надстрочные:
расч — расчётная величина.

Подстрочные:
Д — детандерная ступень ДКА;
К — компрессорная ступень ДКА;
н, *к* — начальные или конечные параметры процессов сжатия и расширения воздуха;
D, *d* — параметры ступеней ДКА, соответствующие наружному или внутреннему диаметрам рабочего колеса;
s — параметры и величины, характерные для изоэнтропных процессов.

© *Г.К. Лавренченко, С.Г. Швец*

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование энергии расширения газа в турбодетандерах, эксплуатирующихся в составе криогенных установок, в том числе и воздухоразделительных, реализующих различные циклы и выдающие конечные продукты в газообразном и жидком виде, позволяет повысить их эффективность. С этой целью в таких установках предлагается применять детандер-компрессорные агрегаты (ДКА), компрессорная ступень (КС) в которых используется для повышения давления воздуха перед детандерной ступенью (ДС) [1-3].

Достаточно успешно ДКА используются в схемах современных крупнотоннажных криогенных ВРУ, в которых мощность, развиваемая ДС, достигает нескольких сотен кВт и более. В малотоннажных ВРУ, где аналогичный показатель, как правило, не превышает 200 кВт, применение ДКА до недавнего времени считалось нецелесообразным. Такая позиция производителей малотоннажных ВРУ объяснялась несколькими факторами: хорошая сбалансированность известных схем малотоннажных ВРУ; сложность изготовления и, соответственно, высокая стоимость таких агрегатов; недостаточная эффективность относительно малорасходных ДКА. Первые два фактора будут постепенно уходить на второй план по мере стремления к снижению энергозатрат при производстве криогенных продуктов, и этот процесс будет тем интенсивнее, чем быстрее будут расти конкуренция и цены на энергоносители. Однако невысокий КПД, которым задаются при разработке малотоннажных ВРУ, будет сдерживать применение ДКА в таких установках.

Заниженная величина эффективности ДКА на этапе его проектирования вызвана отсутствием обоснованной и достаточно точной методики расчёта такого агрегата. Причем, основные сложности возникают не при прямом расчёте геометрических или режимных параметров ступеней ДКА, — соответствующие методики хорошо развиты, например, в работах [4,5], — а при учёте взаимного влияния параметров и особенно в процессе решения обратных задач. Такие задачи возникают при расчёте КС, а также при оптимизации параметров ДС агрегата.

Рассмотрим общую структуру формирования системы исходных данных, необходимых для расчёта одноступенчатого центробежного компрессора, работающего в составе ДКА.

2. ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Исходными данными для расчёта центробежного компрессора, использующего собственный привод, служат его объёмная V_K или массовая G_K производительности, давление $p_{нК}$ и температура $T_{нК}$ газа на всасывании, давление нагнетания $p_{кК}$ или степень повышения давления π_K. Указанный набор задаваемых параметров позволяет реализовывать прямую последовательность расчётов основных параметров компрессора, упрощённо представленную на рис. 1.

Рис. 1. *Схема прямого расчёта центробежного компрессора с собственным приводом*

Задачей прямого расчёта компрессора, как следует из рис. 1, является определение основных его размеров, а также числа оборотов n_K и мощности N_K машины. При этом нет необходимости налагать дополнительные ограничения на принимаемые и расчётные величины, что позволяет сформировать оптимальную геометрию проточной части компрессора с учётом заданных начальных условий.

В случае же расчёта компрессорной ступени, работающей в составе ДКА, система исходных данных несколько изменяется. На рис. 2 показана упрощённая схема формирования исходных данных, необходимых для расчёта КС ДКА, отражающая последовательность основных процедур. Отметим, что здесь рассматривается случай, когда КС ДКА используется для повышения давления газа перед ДС агрегата. При других вариантах включения ДКА в состав криогенных установок схема формирования исходных данных будет изменяться в зависимости от конкретных особенностей технологических схем установок.

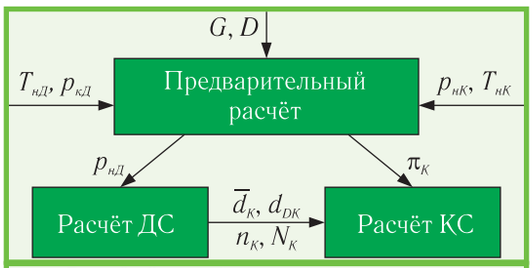

Рис. 2. *Схема формирования системы исходных данных при расчёте КС ДКА*

Из приведённой на рис. 2 схемы видно, что на первом этапе проводится предварительный расчёт, целью которого является оценка степени повышения давления газа в КС π_K при отношении давлений $p_{нК}\pi_K/p_{кД}$ и доле детандерного потока D. При формировании системы исходных данных для предварительного расчёта используются результаты расчёта схемы ВРУ: расход перерабатываемого воздуха G, давление нагнетания основного компрессора $p_{нК}$, температуры перед КС $T_{нК}$ и ДС $T_{нД}$, давление после ДС $p_{кД}$.

После этого выбирается значение приведённого диаметра рабочего колеса детандерной ступени $\bar{d}_Д$ и проводится её расчёт по известным методикам.

Дальнейшие расчёты строятся на основе следующей системы балансовых уравнений, устанавливающих связи между основными параметрами ДС и КС

(мощность, частота вращения, расход, давление):

$$\begin{cases} N_Д \eta_{мех.} = N_К; \\ \dfrac{d_{DK}}{d_{DД}} = \dfrac{u_{DK}}{u_{DД}}; \\ G_Д = G_К[1-(\alpha_{ут.К} + \alpha_{отб.})]; \\ p_{нД} = p_{кК}(1-\Delta\overline{p}), \end{cases} \quad (1)$$

где $\eta_{мех}$ — механический КПД ДКА, учитывающий потерю мощности на трение в подшипниках агрегата; $\alpha_{ут.К}$, $\alpha_{отб}$ — коэффициенты утечки воздуха в КС и отбора воздуха перед ДС; $\Delta\overline{p} = (p_{кК} - p_{нД})/p_{кК}$ — приведённые потери давления в коммуникациях и теплообменных аппаратах, находящихся между КС и ДС.

Балансовые уравнения (1) в приведённом виде не удаётся использовать в расчётах. Нужны дополнительные условия и соотношения. Так, в работе [6] на основе одного из балансовых уравнений, в которое входит частота вращения вала ДКА, было выведено выражение, устанавливающее связь между наружными диаметрами рабочих колёс ступеней ДКА:

$$\frac{d_{DK}}{d_{DД}} = \sqrt{\frac{\overline{l}_{sД}}{\overline{l}_{sK}} \frac{T_{нК}\left(\pi_K^{\frac{k-1}{k}} - 1\right)}{z_{нД} T_{нД}\left[1 - \left(\dfrac{p_{кД}}{p_{нК}\pi_K(1-\Delta\overline{p})}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}}, \quad (2)$$

где $\overline{l}_{sД}, \overline{l}_{sK}$ — безразмерные коэффициенты изоэнтропных работ детандерной и компрессорной ступеней; $z_{нД}$ — коэффициент сжимаемости.

Кроме этого, в публикации [6] приводилось выражение для связи между приведёнными диаметрами ступеней ДКА:

$$\frac{\overline{d}_Д}{\overline{d}_K} = \frac{d_{DK}}{d_{DД}} \sqrt[3]{\frac{\tau_{dД} \dfrac{1-\xi^2_{втД}}{1+\xi^2_{втД}} \mathrm{tg}\beta_{dД} \rho_{dД}}{\tau_{dK} \dfrac{1-\xi^2_{втK}}{1+\xi^2_{втK}} \mathrm{tg}\beta_{dK} D \rho_{dK}}}, \quad (3)$$

где $\tau_{dД}$, τ_{dK}; $\beta_{dД}$, β_{dK} и $\rho_{dД}$, ρ_{dK} — коэффициенты стеснения потока, углы лопаток и плотности воздуха на внутренних диаметрах рабочих колёс ДС и КС, соответственно; $\xi_{втД}$, $\xi_{втK}$ — втулочные отношения.

По значению $\overline{d}_Д$ и рассчитанному диаметру рабочего колеса ДС $d_{DД}$ с использованием уравнений (2) и (3) можно определить наружный d_{DK} и приведённый $\overline{d}_K$ диаметры рабочего колеса КС. Величины n_K и N_K находятся из соответствующих балансовых уравнений (1).

Это позволяет расширить набор исходных данных для расчёта КС: d_{DK}, $\overline{d}_K$, n_K, N_K, а также G_K, $T_{нК}$, $p_{нК}$ и π_K (см. рис. 2). Сравнивая такой набор исходных данных с обычно используемым при расчёте отдельных центробежных компрессоров (см. рис. 1), можно заключить следующее. Помимо стандартного набора исходных данных (G_K, $T_{нК}$, $p_{нК}$ и π_K), характеризующих начальное и конечное состояния сжимаемой среды, должны быть заданы d_{DK} и $\overline{d}_K$, определяющие практически все основные геометрические размеры компрессорной ступени.

Как показывает анализ, наличие в наборе исходных данных таких параметров, как n_K и N_K не является обязательным. Лучше частотой вращения и мощностью на валу КС не задаваться, а определять их и затем сравнивать с соответствующими параметрами ДС. Естественно, что при этом необходимо добиваться соблюдения балансовых соотношений (1).

Несколько отличный от традиционного набор исходных данных для расчёта КС ДКА предполагает использование и нестандартной методики расчёта. Основное её отличие состоит в необходимости решать обратные задачи, заключающиеся не только в обратной последовательности определения параметров КС, но и в выборе некоторых конструктивных и режимных характеристик ступени из диапазонов значений, не совпадающих с оптимальными.

Рассмотрим предлагаемый нами алгоритм расчёта ДКА, в котором учитываются особенности разработки КС как неотъемлемой части агрегата.

3. АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ДКА

На рис. 3 приведена блок-схема реализации алгоритма расчёта КС ДКА, включающая процедуры формирования системы исходных данных и процедуры предварительной оптимизации параметров агрегата.

Последовательность основных процедур расчёта ДКА иллюстрируется рис. 3 и соответствует в своей начальной части рассмотренной ранее схеме формирования системы исходных данных, необходимых для расчёта КС ДКА (см. рис. 2). Процедуры предварительного расчёта 1 и расчёта ДС 2 подробно рассмотрены в работах [6,7]. Их реализация не вызывает особых трудностей. Разработанный алгоритм предусматривает выполнение внешней 4 и внутренней 5 процедур оптимизации.

Внутренняя процедура оптимизации состоит в максимизации целевой функции

$$\eta_{ДКА} = f(\overline{d}_Д)_{D=const}, \quad (4)$$

в качестве которой выбирается КПД ДКА.

Функция (4) является универсальной. Она может быть использована также и при оптимизации параметров криогенной воздухоразделительной установки, в которой предполагается применять проектируемый ДКА. При этом варьируемыми параметрами будут $p_{нК}$, $T_{нД}$ и D, а в качестве ограничения — заданная величина холодопроизводительности ДС и температура конца процесса расширения, т.е. h и $T_{кД}$. В этом случае необходимо в качестве целевой функции использовать удельный расход энергии на производство криопродуктов. Максимум этой функции будет достигаться при максимуме функции (4).

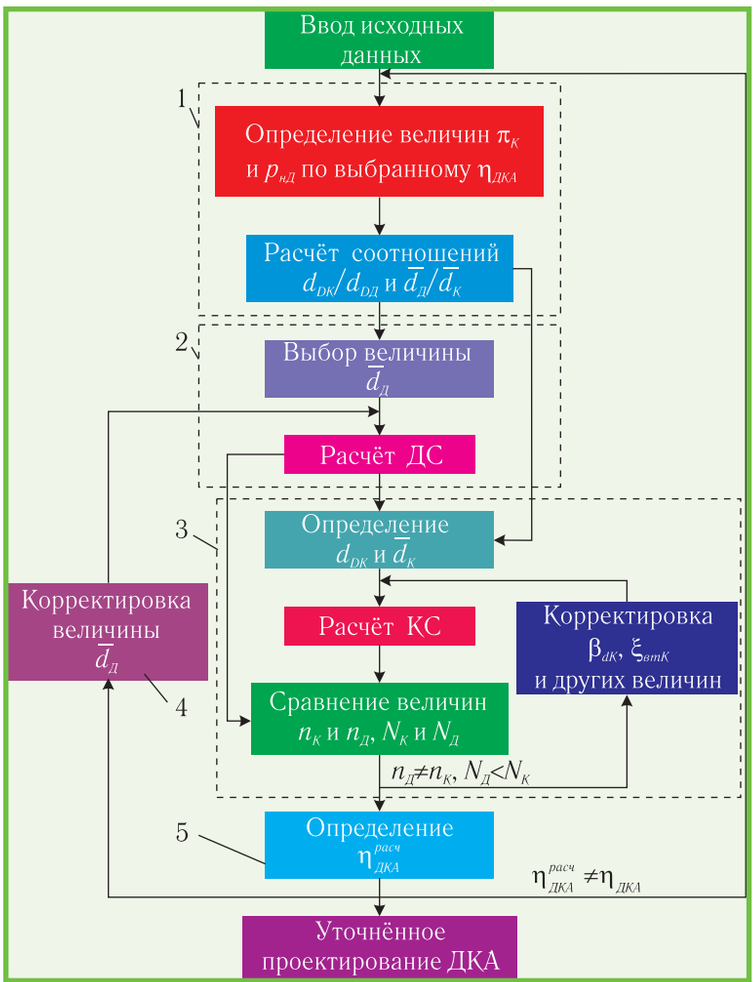

Рис. 3. *Блок-схема реализации алгоритма расчёта ДКА: 1 — предварительный расчёт; 2 — расчёт ДС; 3 — расчёт КС; 4, 5 — процедуры оптимизации*

При выполнении внутренней процедуры оптимизации нужно принимать во внимание, что такой параметр, как $\bar{d}_Д$ является в свою очередь сложной функцией ряда переменных. Поэтому в общем виде решение оптимизационной задачи сводится к определению

$$opt\{x\} \rightarrow \max \eta_{ДКА}(x),\ x \in \bar{X} \qquad (5)$$

при условии $D=const$ и ограничениях типа равенств и неравенств, где x — компоненты вектора независимых переменных. При реализации данной процедуры проводится уточнение величины π_K, определяемой на этапе предварительного расчёта.

С целью конкретизации величин, которые оказывают влияние на КПД ДКА, приведём общее его выражение:

$$\eta_{ДКА}=\eta_{sД}\eta_{sK}\eta_{ут}\eta_{мех}\eta_p D, \qquad (6)$$

где η_{sK}, $\eta_{sД}$ — изоэнтропные КПД КС и ДС, соответственно; $\eta_{ут}=[1-(\alpha_{утК}+\alpha_{утД})]$ — объёмный КПД ДКА, учитывающий утечки воздуха в обеих ступенях; $\eta_p=(1-\Delta\bar{p})$ — гидравлический КПД ДКА.

Величины $\eta_{мех}$, $\eta_{ут}$ и η_p, входящие в уравнение (6), оказывают значительно меньшее влияние на ДКА, чем η_{sK} и $\eta_{sД}$. Последние равнозначны по вкладу в величину ДКА. Более того, в первом приближении, можно предположить, что существуют такие x, которые одновременно отвечают максимальным значениям и $\eta_{sД}$, и η_{sK}. Тогда, с достаточной степенью точности, можно утверждать, что эти переменные будут одновременно стационарными точками и для функции $\eta_{ДКА}$. С учётом сделанных допущений задача максимизации $\eta_{ДКА}$ сводится к решению задач максимизации КПД отдельных ступеней $\eta_{sД}$ и η_{sK} при строгом учёте выражений (1). Такой подход к оптимизации параметров ДКА предложен в работе [8].

На основе анализа описанного выше алгоритма расчёта ДКА можно сделать следующий вывод. Расчёт и оптимизация параметров КС является неотъемлемой частью предлагаемой методики расчёта ДКА, а показатели КС, наравне с ДС, определяют его эффективность. Методика расчёта КС агрегата должна удовлетворять, во-первых, имеющейся системе исходных данных и, во-вторых, балансовым соотношениям (1).

Применение двух последовательных оптимизационных процедур и соблюдение балансовых соотношений (1) обусловливает ряд сложностей при расчёте ДКА. Это в первую очередь приводит к необходимости большого количества циклов расчёта и учёта нелинейности ряда соотношений, используемых при расчёте КС. Первая из них может быть с успехом решена путём создания взаимосвязанных математических моделей ступеней ДКА. Для решения же второй проблемы необходимо модифицировать методику расчёта одноступенчатого центробежного компрессора с учётом характерных особенностей расчёта КС в составе ДКА, когда приходится решать ряд обратных задач.

4. МЕТОДИКА РАСЧЁТА КС ДКА

Исходными данными для расчёта КС служат: расход воздуха G_K; начальные давление $p_{нК}$ и температура $T_{нК}$; степень повышения давления π_K; приведённый диаметр рабочего колеса $\bar{d}_K$; диаметр рабочего колеса d_{DK}. Параметры воздуха (G_K, $p_{нК}$ и $T_{нК}$), поступающего на сжатие в КС, определяются из расчёта установки, π_K — из предварительных расчётов с последующим его уточнением. Величины d_{DK} и $\bar{d}_K$ находятся из соотношений (2) и (3) с использованием известных из расчёта ДС $d_{DД}$ и $\bar{d}_Д$.

Но, так как КС находится на одном валу с ДС ДКА, то при её расчёте необходимо соблюдать баланс по частоте вращения, т.е. учитывать, что $n_K=n_Д$. Это обстоятельство вносит некоторые изменения в изве-

стную методику расчёта одноступенчатых центробежных компрессоров.

Остановимся только на одном из ключевых параметров КС — коэффициенте расхода θ. Для рабочих колёс осерадиального типа выражение для коэффициента расхода имеет следующий вид:

$$\theta = \frac{\pi}{2}\tau_{dK}\frac{1-\xi_{втК}^2}{1+\xi_{втК}^2}\bar{d}_K^3 \mathrm{tg}\beta_{dK}. \qquad (7)$$

Так как в состав исходных данных для расчёта КС входит d_{DK}, то для определения коэффициента расхода необходимо пользоваться формулой:

$$\theta = \frac{G_K}{u_{DK}d_{DK}^2\rho_{DK}}. \qquad (8)$$

Приравняв уравнения (7) и (8), можно получить выражение для расчёта втулочного отношения $\xi_{втК}$. Но воспользоваться им сложно, так как величины β_{dK} и τ_{dK}, входящие в уравнение (7), неизвестны и подлежат выбору из некоего рекомендуемого диапазона с последующим уточнением. Такой подход значительно усложняет методику расчёта КС и не позволяет учитывать сложное влияния друг на друга коэффициентов и конструктивных соотношений, принимаемых на первом этапе расчётов.

Для корректного расчёта КС нужно одновременно применять уравнения (7) и (8). Причём, уравнение (7) будет использоваться непосредственно для определения величины θ, а (8) — только для её контроля. Равенство величин коэффициентов расхода, рассчитанных по уравнениям (7) и (8), будет означать, что обеспечено соблюдение баланса по частоте вращения. Такой подход к определению коэффициента расхода КС позволяет избежать неточностей, связанных с выбором различных конструктивных соотношений и коэффициентов, а также даёт возможность значительно упростить расчёты.

Пропускная способность рабочего колеса КС, характеризуемая величиной θ, даже при заданных d_{DK} и $\bar{d}_K$ может быть откорректирована изменением β_{dK}, $\xi_{втК}$ и коэффициента закрутки потока на входе в рабочее колесо КС. При выборе втулочного отношения нужно помнить, что его величина, совместно с заданным приведённым диаметром рабочего колеса, сильно отражается на его геометрии, а, следовательно, и его эффективности.

Дальнейшие расчёты геометрических и режимных параметров КС проводятся согласно известным методикам. Особое внимание при этом необходимо обращать на определение потерь, обусловленных отклонением рабочих характеристик КС от величин, рекомендованных для одноступенчатых центробежных компрессоров (геометрия, скорости движения потока газа и др.).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика расчёта КС ДКА криогенных ВРУ, включающая стадии формирования исходных данных, непосредственно расчёта характеристик КС и их оптимизации, является важной и неотъемлемой частью методики расчёта ДКА. Эффективность КС во многом определяет эффективность ДКА и, как следствие, перспективность его применения в составе криогенных установок.

Ошибочно считать, что КС является второстепенным элементом ДКА и должна проектироваться таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное КПД ДС агрегата в ущерб аналогичному показателю КС. При расчётах ДКА необходимо учитывать, что ДС и КС вносят одинаковый вклад в эффективность объединяющего их агрегата. Решение проблемы нахождения оптимального соотношения эффективности ступеней ДКА является отдельной довольно сложной задачей, которая будет рассмотрена в следующих работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Характеристики воздухоразделительных установок низкого давления для производства 250 кг/ч жидких кислорода или азота/ **И.В. Горенштейн, В.А. Власюк, Г.К. Лавренченко и др.**// Технические газы. — 2003. — № 1. — С. 31-36.

2. **Лавренченко Г.К., Швец С.Г.** Разработка детандер-компрессорных агрегатов воздухоразделительных установок средней производительности, реализующих циклы низкого давления// Технические газы. — 2006. — № 5. — С. 18-23.

3. **Бумагин Г.И., Меркель Н.Д.** Создание воздухоразделительных установок низкого давления малой и средней производительности// Холодильная техника. — 1999. — № 10. — С. 10-14.

4. **Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н.** Расчёт и конструирование турбодетандеров. — М.: Машиностроение, 1987. — 231 с.

5. **Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б.** Центробежные компрессоры. — Л.: Машиностроение, 1982. — 271 с.

6. **Лавренченко Г.К., Швец С.Г.** Разработка детандер-компрессорных агрегатов воздухоразделительных установок средней производительности, реализующих циклы низкого давления// Технические газы. — 2006. — №5. — С. 18-23.

7. **Лавренченко Г.К., Швец С.Г.** Методика расчета детандер-компрессорных агрегатов криогенных воздухоразделительных установок// Технические газы. —2007. — №4. — С. 22-28.

8. **Лавренченко Г.К., Швец С.Г.** Оптимизация криогенных воздухоразделительных установок с одновременной разработкой эффективных детандер-компрессорных агрега-