
СБОР, ТРАНСПОРТ И ПОДГОТОВКА НЕФТИ, ГАЗА И ВОДЫ

УДК 622.276

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СЕПАРАЦИИ НА УСТАНОВКЕ НТС УПМТ УКГП-1С ЗАПОЛЯРНОГО НГКМ

Р.В. Корытников, Д.А. Яхонтов
(ООО "Газпром добыча Ямбург"),
Л.А. Багиров, Л.М. Дмитриев, С.З. Имаев
(Центр "ЭНГО")

1. Введение

Одной из ключевых задач при освоении северных газоконденсатных месторождений России является создание высокоэффективных малогабаритных установок комплексной подготовки природного газа к

транспорту (УКПГ). Существующие УКПГ, базирующиеся на процессе НТС (низкотемпературной сепарации), основанном на охлаждении газа за счет падения его давления в клапане Джоуля—Томсона или турбодетандере, не отвечают современным требованиям по снижению капитальных и эксплуатационных

затрат при обустройстве и эксплуатации месторождений с удаленной инфраструктурой.

В статье приводятся результаты промышленных испытаний технологии сверхзвуковой сепарации (3S-технологии), проведенных на одном из объектов ООО "Газпром добыча Ямбург". В ходе этих испытаний было показано, что данная технология может быть эффективно использована для решения задач, связанных с подготовкой газа к транспорту и обеспечению углубленного извлечения конденсата. Установки, базирующиеся на 3S-технологии, имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими системами, поэтому могут рассматриваться как один из возможных вариантов УКПГ для северных месторождений России, а также для использования на морских платформах и при подводной подготовке газа.

2. 3S-технология

Технология сверхзвуковой сепарации газа (Supersonic Separation, 3S-технология) базируется на использовании охлаждения газа в сверхзвуковом закрученном потоке природного газа. Технология развивается российской компанией Центр "ЭНГО". Первые патенты по 3S-технологии были получены в 1998 г.

Основным элементом технологии является 3S-сепаратор, в котором реализуются ускорение закрученного потока природного газа до сверхзвуковых скоростей, конденсация и сепарация целевых фракций природного газа и дальнейшее торможение потока. Схема 3S-сепаратора показана на рис. 1.

В 3S-сепараторе входной поток газа закручивается в лопатках неподвижного завихрителя 1, далее закру-

ченный поток ускоряется до сверхзвуковой скорости в сверхзвуковом сопле Лавала 2. В сверхзвуковом потоке, за счет преобразования потенциальной энергии газа в кинетическую, происходит сильное охлаждение газа. Охлажденный поток направляется в рабочую часть 3, в которой происходит конденсация целевых фракций природного газа и воды. Образующиеся капли за счет центробежных сил, обусловленных закруткой потока, двигаются к стенкам рабочей части. На выходе из рабочей части формируются центральное ядро потока, очищенное от целевых фракций, и пристеночный двухфазный пограничный слой, состоящий из жидкости (углеводородов и воды) и газа. Посредством шелевого отбора двухфазный пристеночный слой отделяется от ядра потока и направляется в диффузор 4, в котором происходит торможение потока. Очищенный газ из ядра потока поступает в диффузор 5 и также затормаживается.

В сверхзвуковом потоке газа можно реализовать температуры $\sim (-50 \dots -100)^\circ\text{C}$, поэтому 3S-сепаратор позволяет обеспечить глубокое извлечение целевых компонент из природного газа.

Процесс НТС, использующий 3S-технологию, находит применение в установках подготовки природного газа к транспорту (извлечение компонентов тяжелее пентана C_{5+} и воды), а также в системах, используемых для извлечения углеводородов тяжелее метана (этан, пропан, бутан и т. д.).

Принципиальная технологическая схема НТС с 3S-сепаратором приведена на рис. 2. Ее отличие от классических технологических схем, использующих клапан Джоуля—Томсона или турбодетандер, состоит в том, что в сепаратор С-2 попадает не весь охлажденный поток газа, а только его часть — двухфазный поток из 3S-сепаратора. Это происходит потому, что в 3S-сепараторе наряду с охлаждением потока газа осуществляется его дальнейшее разделение на две части, где одна из них — двухфазный поток, в который входят образовавшиеся капли целевого компонента, а вторая — газ, очищенный от целевого компонента. Это дает возможность уменьшить как

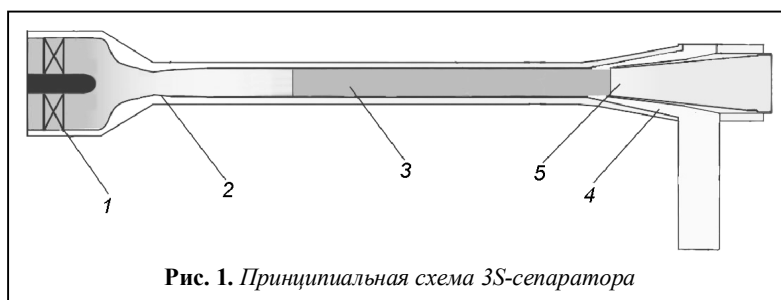


Рис. 1. Принципиальная схема 3S-сепаратора

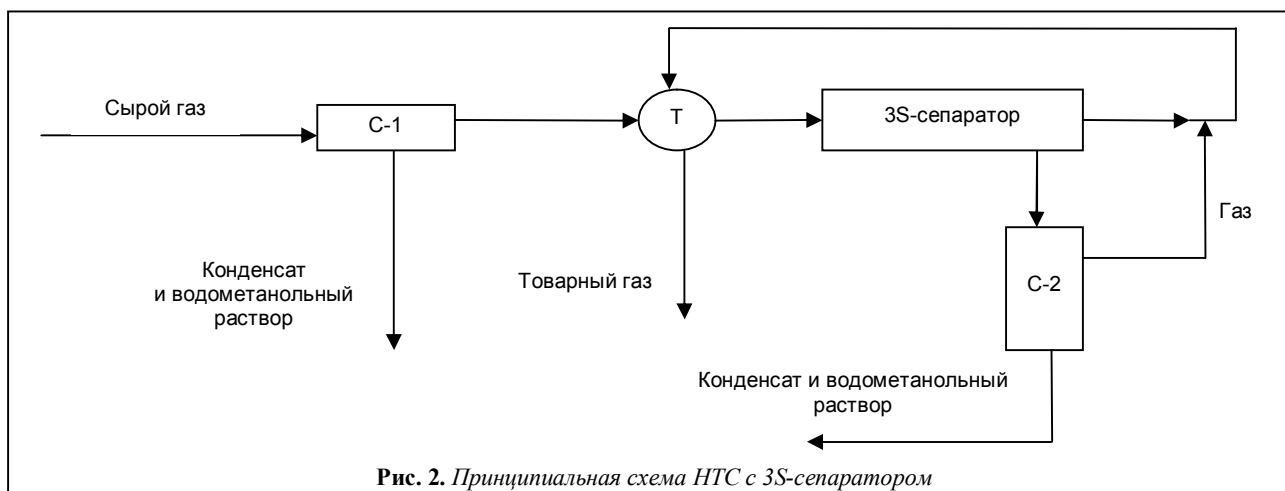


Рис. 2. Принципиальная схема НТС с 3S-сепаратором

минимум вдвое размеры сепаратора С-2, а так как сам 3S-сепаратор имеет малые размеры, то все оборудование НТС становится существенно менее металлоемким по сравнению с традиционными вариантами.

Другим важным преимуществом 3S-сепарации по сравнению с традиционными технологиями, базирующимися, например, на охлаждении газа при его расширении в дроссельном клапане, является возможность обеспечения более низких температур газа в сверхзвуковом потоке при одном и том же перепаде давлений на входе-выходе устройств. Термодинамические принципы работы 3S-сепаратора обуславливают близость его показателей к характеристикам работы турбодетандера, объединяя функции расширения, типовой циклонной сепарации газ/жидкости и повторного сжатия в одном компактном, стационарном, трубном устройстве. При этом, в отличие от турбодетандера, 3S-сепаратор может эффективно работать в условиях поступления на его вход большого количества жидкости. Отметим также, что в 3S-сепараторе отсутствуют какие-либо движущиеся части, и как следствие — нет необходимости в трудоемком и высококвалифицированном обслуживании аппарата.

3S-технология прошла все стадии от лабораторных и опытных установок до промышленных агрегатов. В настоящее время в отрасли эксплуатируются четыре установки, пять установок находятся в стадии проектирования и изготовления.

3. Испытания 3S-сепаратора на установке НТС УПМТ УКПГ-1С Заполярного НГКМ

В период 2009—2010 гг. на установке низкотемпературной сепарации УПМТ-15С УКПГ-1С Заполярного НГКМ проводились испытания сверхзвукового 3S-сепаратора AP-3S.2008.41. Испытания проводились при участии специалистов ООО "Газпром добыча Ямбург" и Центра "ЭНГО".

Установка переработки моторных топлив (УПМТ) предназначена для получения СПБТ (смесь пропан-бутановая техническая) и стабильного газового бензина из конденсата, выделенного из газоконденсатной смеси валанжинской залежи, добываемой из одной скважины Заполярного месторождения. В состав УПМТ входят блок низкотемпературной сепарации (НТС) и блок фракционирования газа.

Газоконденсатная смесь из скважины поступает в блок НТС, где за счет охлаждения газа в рекуперативном теплообменнике и последующего дросселирования газа в клапане Джоуля—Томсона происходит конденсация тяжелых углеводородов и воды. Сконденсировавшаяся жидкость отделяется от газа в низкотемпературном сепараторе. Выделившийся в блоке НТС углеводородный конденсат служит сырьем для установки фракционирования, в которой получают товарный стабильный бензин и СПБТ. Принципиальная схема блока НТС УПМТ представлена на рис. 3.

Блок НТС УПМТ работает на перепаде давления в

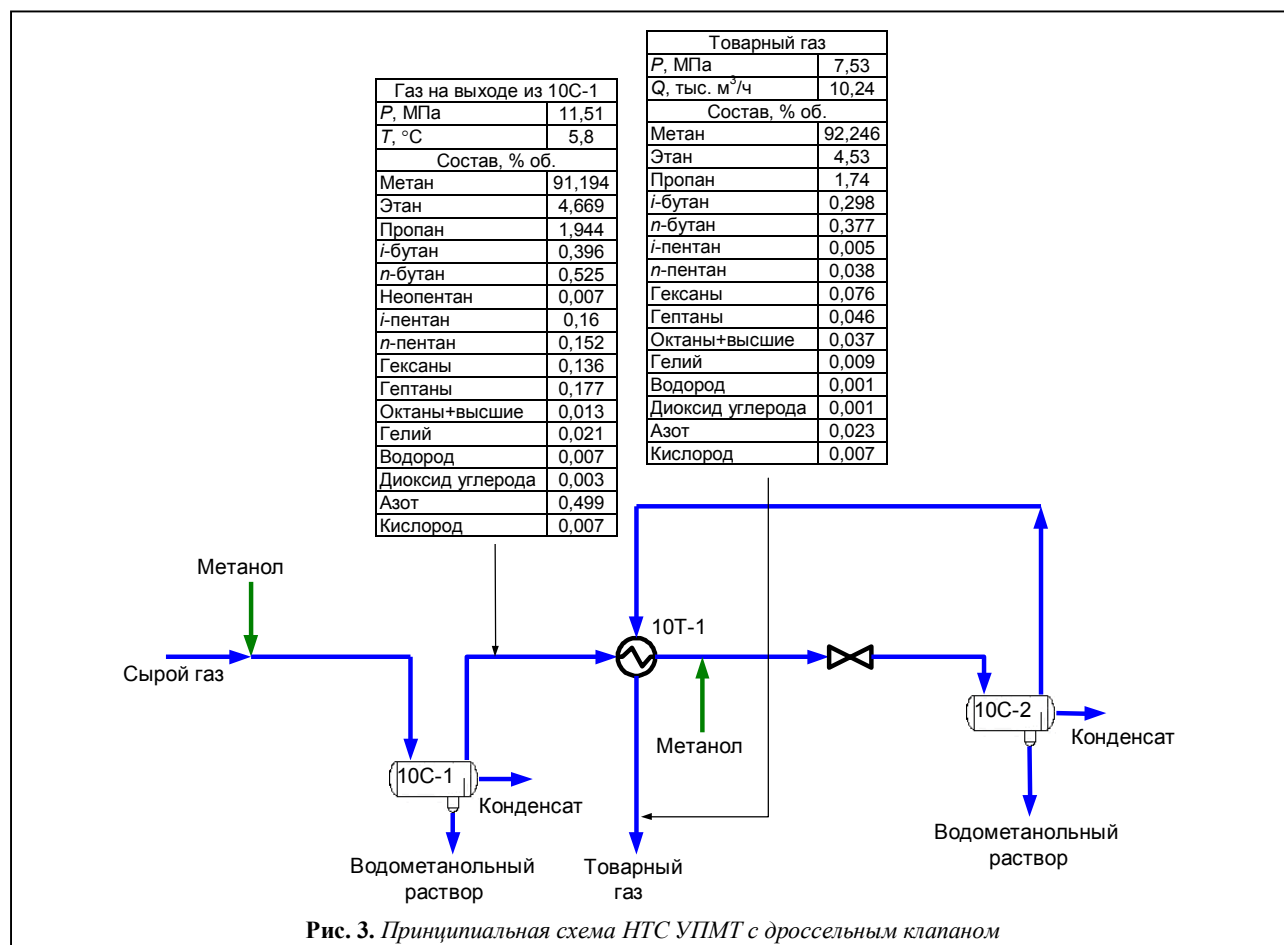


Рис. 3. Принципиальная схема НТС УПМТ с дроссельным клапаном

40...50 атм, при этом давление на входе в блок составляет 120...125 атм, давление на выходе из блока — 75...77 атм. Расход газа варьируется в диапазоне 10000...12000 $\text{м}^3/\text{ч}$. Точка росы товарного газа по воде и углеводородам на выходе из блока НТС соответствует ОСТ 51.40-93. Для предотвращения гидратообразования в элементах установки используется метанол. На рис. 3 также приведены типичные параметры газа на входе и выходе блока НТС при дросселировании газа в клапане Джоуля—Томсона.

В конце 2009 г. в блоке НТС в байпасе клапана Джоуля—Томсона был установлен сверхзвуковой 3S-сепаратор АР-3S.2008.41. Общий вид 3S-сепаратора с элементами обвязки и принципиальная схема его подключения приведены соответственно на рис. 4 и 5. На рис. 6 приводится фотография 3S-сепаратора. Газ на вход 3S-сепаратора подавался сразу после охлаждения в рекуперативном теплообменнике 10Т-1 "газ-газ", двухфазный поток из 3S-сепаратора направлялся в существующий низкотемпературный сепаратор 10С-2, очищенный газ из 3S-сепаратора смешивался с газовой фазой из сепаратора 10С-2 и поступал на нагрев в рекуперативный теплообменник 10Т-1. Для обеспечения измерения основных параметров работы 3S-сепаратора блок НТС был доукомплектован необходимым измерительным оборудованием, позволяющим определять все основные параметры потоков на входе и выходе 3S-сепаратора.

Испытания блока НТС с работающим 3S-сепаратором проводились на различных режимах, отличающихся давлением входного газа, поступающего на вход блока НТС.

В ходе испытаний осуществлялся замер давлений, температур и расходов газа в основных элементах установки. Для возможности измерения составов газа в потоках установки было смонтировано специальное оборудование, позволяющее отбирать пробы в следующих точках:

- на выходе из сепаратора 10С-1,
- на выходе из 3S-сепаратора (очищенный газ),
- на выходе из блока НТС (товарный газ).

По измеренным составам газов определялась расчетная точка росы по углеводородам очищенного и товарного газов. Расчеты точек росы по углеводородам проводились в соответствии с СТО Газпром 5.4-2007 "Газ горючий природный. Методика расчета температуры точки росы по углеводородам".

Испытания 3S-сепаратора были проведены при различных давлениях сырого газа на входе в сепаратор 10С-1:

режим 1 $P = 11,8$ МПа;

режим 2 $P = 11,5$ МПа;

режим 3 $P = 11,0$ МПа.

Давление товарного газа на выходе из УПМТ во время испытаний находилось в пределах 7,5...7,6 МПа.

В табл. 1 приведен перечень основных параметров, регистрировавшихся при испытаниях 3S-сепаратора. Там же представлены расчетные содержания компонентов C_{5+} и расчетные значения точек росы по углеводородам в газовых потоках, составы которых анализировались в ходе испытаний.

В табл. 2 и 3 приводятся результаты хроматографического анализа проб газов, отобранных в трубопроводах очищенного газа на выходе из 3S-сепаратора.

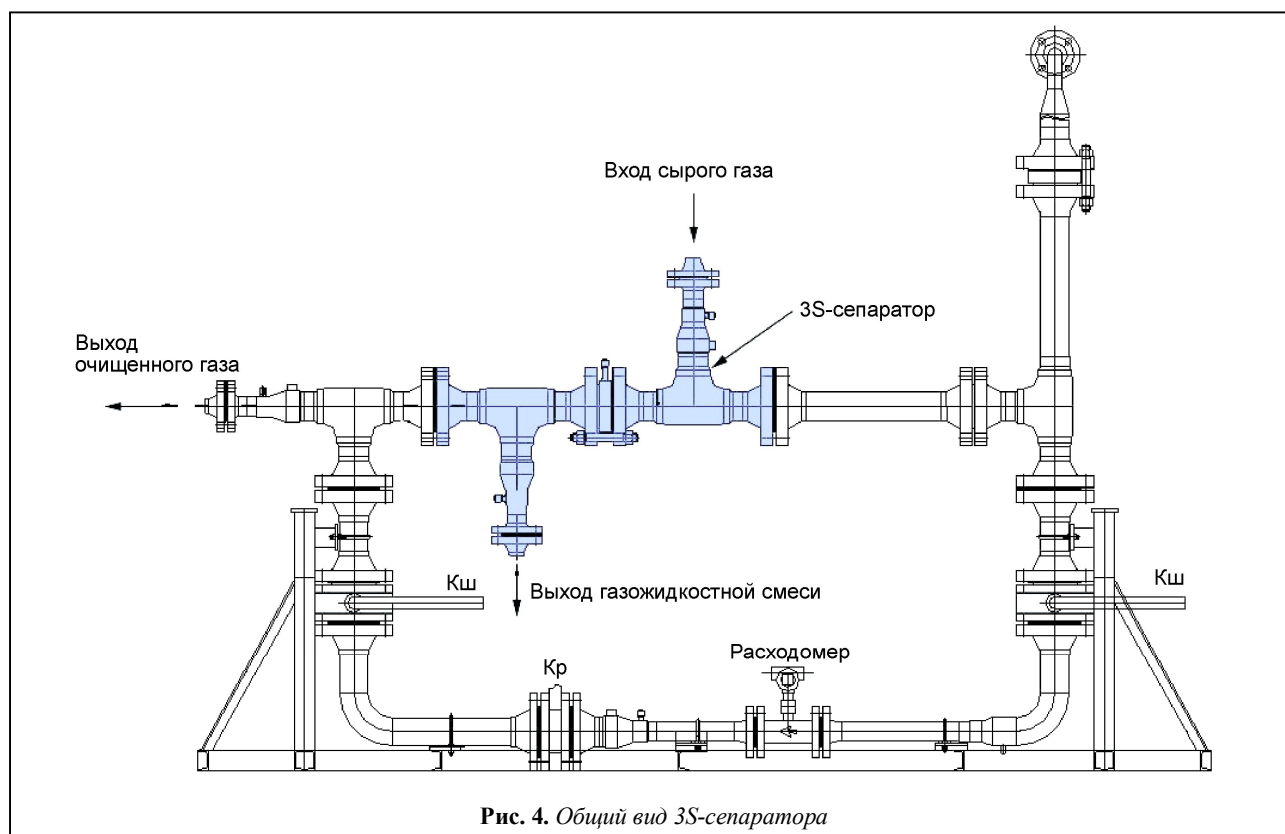


Рис. 4. Общий вид 3S-сепаратора

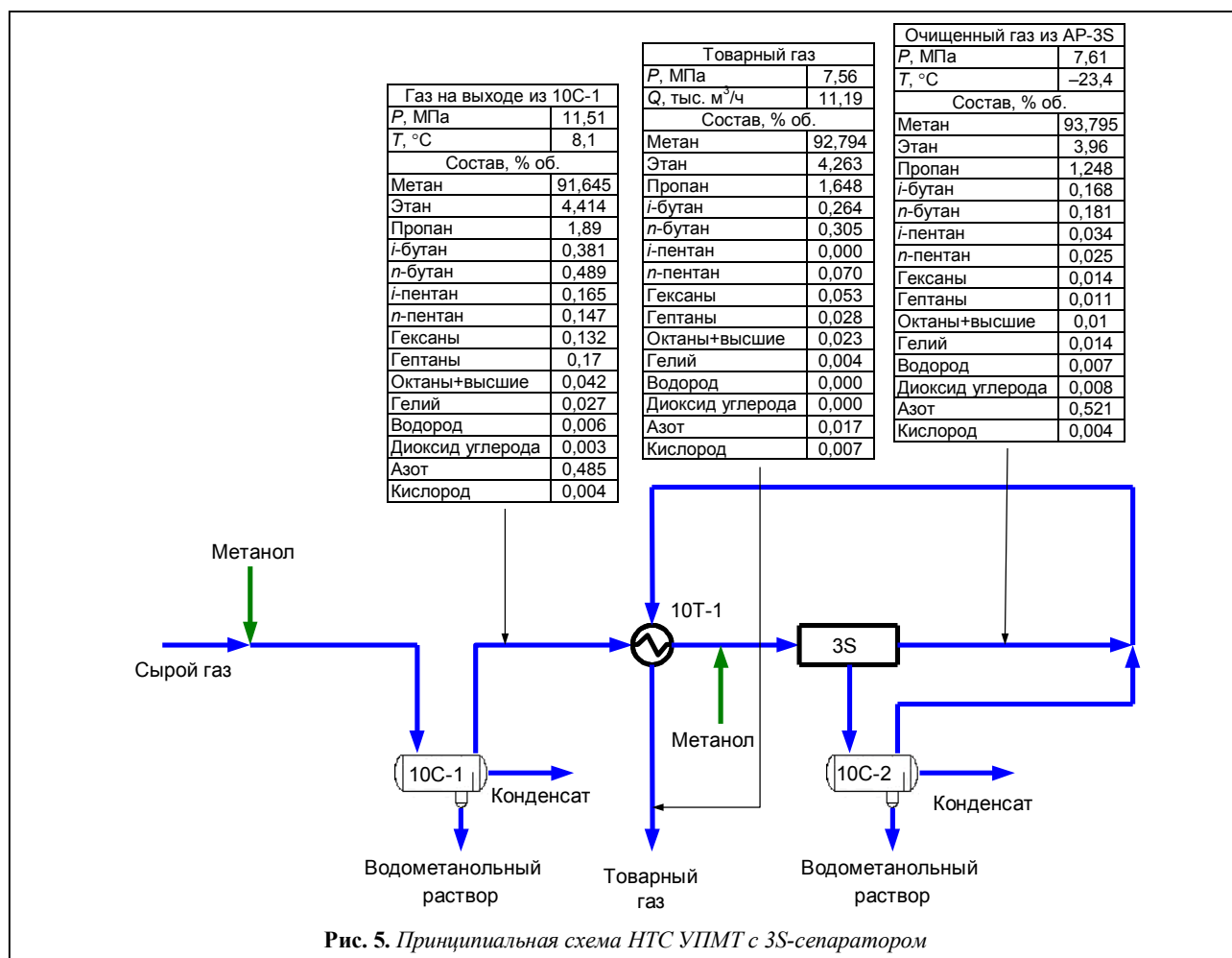


Рис. 5. Принципиальная схема НТС УПМТ с 3S-сепаратором

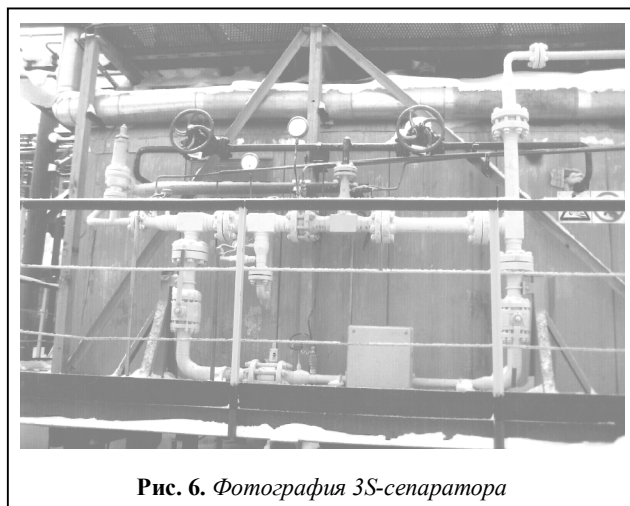


Рис. 6. Фотография 3S-сепаратора

ратора, и товарного газа на выходе из УПМТ соответственно на всех трех режимах испытаний.

На рис. 3 и 5 на принципиальной технологической схеме УПМТ для испытанного режима 2 нанесены основные показатели работы УПМТ с работающим и отключенным арматурным узлом 3S-сепарации.

Очищенный газ на выходе из 3S-сепаратора на режимах 1 и 2, а также товарный газ на режиме 2 находятся при измеренных давлениях в сверхкритическом

состоянии (т. е. не конденсируются ни при каких температурах газа). Для этих потоков в табл. 4 внесены расчетные точки росы по углеводородам для различных давлений газа.

Для сравнения параметров работы УПМТ с дроссельным клапаном и параметров работы УПМТ с 3S-сепаратором были проведены испытания блока НТС при работе с дроссельным клапаном на следующих режимах:

режим 2 $P = 11,5$ МПа;

режим 3 $P = 11,0$ МПа.

Результаты испытаний УПМТ при работе с дроссельным клапаном также внесены в табл. 1—4.

Сверхзвуковой 3S-сепаратор при испытаниях продемонстрировал стабильную работу во всем диапазоне испытанных давлений входного газа. Давление на выходе 3S-сепаратора поддерживалось на уровне 7,5...7,6 МПа и определялось давлением в магистральном газопроводе. Измеренный уровень статических давлений в сверхзвуковом канале 3S-сепаратора соответствовал расчетному числу Маха (M), который для испытанной конструкции был на уровне $M = 1,2$.

Для предотвращения гидратообразования в шлейф скважины на УПМТ подается ингибитор гидратообразования — метанол, перевод установки с работы на клапане Джоуля—Томсона на 3S-сепаратор не потребовал

Таблица 1

Сравнительные характеристики работы блока НТС УПМТ с 3S-сепаратором и с дроссельным клапаном

Параметры	С работающим сверхзвуковым сепаратором			С дроссельным клапаном	
	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 2	Режим 3
Давление газа на входе в сепаратор 10С-1, МПа	11,78	11,50	11,03	11,51	11,00
Температура газа на входе в сепаратор 10С-1, °С	9,7	8,1	6,0	5,8	4,0
Давление газа в сепараторе 10С-2, МПа	7,60	7,64	7,60	7,66	7,66
Температура газа в сепараторе 10С-2, °С	-23,9	-24,9	-24,2	-28,5	-27,0
Давление товарного газа с УПМТ, МПа	7,49	7,56	7,53	7,53	7,53
Расход товарного газа с УПМТ, тыс. нм ³ /ч	11,430	11,190	10,650	10,240	10,170
Давление газа на входе в 3S, МПа	10,94	10,70	10,21	—	—
Температура газа на входе в 3S, °С	-9,6	-11,0	-12,1	—	—
Давление газожидкостной смеси на выходе из 3S, МПа	7,56	7,64	7,61	—	—
Давление очищенного газа на выходе из 3S, МПа	7,57	7,61	7,57	—	—
Температура очищенного газа на выходе из 3S, °С	-22,2	-23,4	-23,0	—	—
Точка росы по углеводородам очищенного газа на выходе из 3S, °С	Ниже -40*	Ниже -40*	-31	—	—
Точка росы по углеводородам товарного газа, °С	-29	Ниже -40*	-34	-20	-22
Содержание компонентов C ₅₊ в очищенном газе на выходе из 3S-сепаратора, г/нм ³	4,31	3,86	5,11	—	—
Содержание компонентов C ₅₊ в товарном газе, г/нм ³	5,79	5,86	6,34	9,19	8,49

*Газ с измеренным составом не конденсируется ни при каких температурах при измеренном давлении газа. Это означает, что при этом давлении газ находится в сверхкритическом состоянии.

Таблица 2

Таблица 3

Состав очищенного газа на выходе из 3S-сепаратора

Компоненты газа	Состав очищенного газа на выходе из 3S-сепаратора (% об.)		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Метан	93,882	93,795	93,609
Этан	3,956	3,960	4,130
Пропан	1,212	1,248	1,363
<i>i</i> -бутан	0,181	0,168	0,181
<i>n</i> -бутан	0,163	0,181	0,199
<i>i</i> -пентан	0,032	0,034	0,041
<i>n</i> -пентан	0,024	0,025	0,032
Гексаны	0,016	0,014	0,023
Гептаны	0,019	0,011	0,033
Октаны + высшие	0,009	0,010	0,014
Гелий	0,021	0,014	0,016
Водород	0,007	0,007	0,007
Диоксид углерода	0,006	0,008	0,003
Азот	0,471	0,521	0,340
Кислород	0,001	0,004	0,010

Состав товарного газа на выходе из УПМТ

Компоненты газа	Состав, % об.				
	Режим 1 (11,8 МПа)		Режим 2 (11,5 МПа)		Режим 3 (11,0 МПа)
	3S	3S	ЖТ	3S	ЖТ
Метан	92,882	92,794	92,246	92,702	92,188
Этан	4,267	4,263	4,530	4,322	4,550
Пропан	1,535	1,648	1,740	1,646	1,770
<i>i</i> -бутан	0,240	0,264	0,298	0,273	0,305
<i>n</i> -бутан	0,270	0,305	0,377	0,323	0,386
Неопентан	0,000	0,000	0,005	0,000	0,006
<i>i</i> -пентан	0,059	0,070	0,088	0,075	0,091
<i>n</i> -пентан	0,044	0,053	0,076	0,056	0,078
Гексаны	0,025	0,028	0,046	0,031	0,046
Гептаны	0,028	0,023	0,037	0,025	0,034
Октаны + высшие	0,012	0,004	0,009	0,005	0,006
Бензол	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
Толуол	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
Гелий	0,017	0,017	0,023	0,016	0,015
Водород	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Диоксид углерода	0,004	0,003	0,003	0,003	0,005
Азот	0,601	0,514	0,503	0,514	0,507
Кислород	0,009	0,007	0,009	0,003	0,005

Таблица 4

Расчетные значения точек росы по углеводородам после 3S-сепаратора и в товарном газе для режима 2

Давление, МПа изб.		6,9	7,0	7,02	7,09	7,4	7,436	7,5	7,51	7,53*	7,538	7,54	7,56 и выше*
Режим 2 (с 3S)	Товарный газ	-27,3	-28,3	-28,5	-29,4	-34,4	-35,3	-37,4	-37,9	-39,1	-40,0	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С*
	Газ после 3S	-36,2	-38,7	-39,3	-43,6	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С	Ниже -40 °С*
Режим 2 (с дроссельным клапаном)	Товарный газ	-14,7	-15,4	-15,5	-16,1	-18,8	-19,1	-19,8	-19,9	-20,1*	-20,2	-20,2	-20,4 и ниже

* Давление, соответствующее реальным измеренным условиям,

□ — газ находится в сверхкритических условиях

дополнительной подачи метанола. Это объясняется тем, что хотя в сверхзвуковом канале и реализуются довольно низкие температуры газа (ниже $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), время нахождения потока в сверхзвуковом сопле чрезвычайно мало и составляет порядка 10^{-4} с. За столь короткое время внутри сопла не успевают образовываться кристаллы гидратов, рост которых, как известно, требует гораздо большего времени. В потоках на входе и выходе 3S-сепаратора проблем с гидратообразованием также нет, так как при работающем 3S-сепараторе температура газа в этих потоках выше, чем при работе с клапаном Джоуля—Томсона.

В ходе проведенных испытаний показано, что включение 3S-сепаратора в схему НТС позволяет существенно улучшить показатели работы НТС.

Так, работа 3S-сепаратора в составе УПМТ позволяет понизить температуру точки росы товарного газа

по углеводородам по сравнению с использованной ранее схемой с дроссельным клапаном. Точка росы при включенном 3S-сепараторе понижается на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более в сравнении с соответствующим значением при работе УПМТ с дроссельным клапаном.

Включение 3S-сепаратора в состав УПМТ позволяет также сократить содержание целевых компонентов C_{5+} в товарном газе на 56 % (режим 2) и 33 % (режим 3). На выходе из 3S-сепаратора содержание компонентов C_{5+} достигает значений $3,51 \dots 5,11\text{ г/м}^3$, что в $1,6 \dots 2,6$ раза меньше, чем содержание компонентов C_{5+} в очищенном газе при работе с дроссельным клапаном.

По результатам испытаний рекомендовано разработать и испытать промышленную установку 3S-сепарации с расходом $5\text{ млн нм}^3/\text{сут}$.