

ПАО «ГАЗПРОМ»

ООО «Газпром добыча Ямбург»

А.Л. Агеев, М.М. Партилов, Ю.С. Ахметшин

Р.М. Мирзиянов, М.М. Фарахов (ООО «ИВЦ «Инжехим»)

**ОЧИСТКА ПРИРОДНОГО ГАЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ
СЕПАРАЦИОННЫХ АППАРАТОВ
В ООО «ГАЗПРОМ ДОБЫЧА ЯМБУРГ**



Ямбург

Новый Уренгой - 2019 г.



ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Характеристика существующих систем подготовки газа.....	5
1.1 Подготовка газа на УКПГ-1 Ямбургского НГКМ.	5
1.2 Подготовка газа на Заполярном НГКМ.	8
2. Модернизация сепарационных аппаратов на УКПГ-1 ЯНГКМ.....	13
2.1 Причины проведения модернизации сепарационных аппаратов на УКПГ-1 ЯНГКМ.....	13
2.2 Варианты модернизации сепарационных аппаратов	15
3. Модернизация сепарационных аппаратов на ЗНГКМ	34
3.1 Причины проведения модернизации сепарационных аппаратов на ЗНГКМ.....	34
3.2 Варианты модернизации сепарационных аппаратов	35
4. Математическая модель сепарации дисперсной фазы из потока газа в комбинированном газосепараторе.....	37
4.1 Модель турбулентной миграции	38
4.2 Результаты расчетов.....	44
5. Сепарационные аппараты для очистки природного газа на поздней стадии эксплуатации месторождений.....	46
5.1 Конструкции газосепараторов	48
5.2 Эффективность газосепарации	50
Выводы	54

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

ГСС	– газосборная сеть;
ГПА	– газоперекачивающий агрегат;
ДКС	– дожимная компрессорная станция;
ЗРУ	– закрытое распределительное устройство;
ИВЦ	- инженерно-внедренческий центр
КИП	– контрольно-измерительные приборы;
КИГ	– коэффициент извлечения газа;
КЛК	– концентрическая лифтовая колонна;
МКУ	– модульная компрессорная установка;
НКТ	– насосно-компрессорная труба;
НГКМ	– нефтегазоконденсатное месторождение;
ПВН	– погружной винтовой насос;
СП	- сепаратор-пробкоулавитель
ТЗ	- техническое задание
УВН	– установка винтового насоса;
УКПГ	– установка комплексной подготовки газа;
УОГ	- установка очистки газа
УППГ	– установка предварительной подготовки газа;
ФС	- фильтр-сепаратор

ВВЕДЕНИЕ

ООО «Газпром добыча Ямбург» осуществляет добычу газа на Ямбургском (с 1986 года) и Заполярном (с 2001 года) нефтегазоконденсатных месторождениях, расположенных в Ямало-Ненецком Автономном Округе. Сеноман Ямбура выходит на завершающую стадию эксплуатации, требующей применения специальных технологий и оборудования для эффективной добычи оставшегося газа, в частности, модульных компрессорных установок.

В конкурсной работе представлены результаты экспериментальных и теоретических работ, в том числе цифрового моделирования работы сепараторов. Они позволили провести модернизацию входных сепараторов установки очистки газа на Ямбургском месторождении и входных сепараторов 20С-1 на Заполярном месторождении, обеспечив качественную сепарацию пластового газа, гарантирующую предотвращение влияния капельной жидкости, мехпримесей и возможных жидкостных пробок на работу основного технологического оборудования. В результате проведенной работы по модернизации аппаратов на Ямбургском и Заполярном месторождениях удалось определить оптимальную конструкцию аппаратов отечественного производства, способных работать в условиях Крайнего Севера РФ.

Полученный в результате этой работы опыт позволил специалистам ООО «Газпром добыча Ямбург» и ООО «ИВЦ «Инжехим» разработать сепарационный блок, который был внедрен на кусте газовых скважин №611 УКПГ-6 ООО «Газпром добыча Ямбург» в составе отечественной инновационной модульной компрессорной установки. В процессе опытной эксплуатации подтверждены правильность проведенных расчетов и принятых технических решений. Содержание капельной жидкости в потоке газа после сепаратора СП-102 составила не более 1 мг/м^3 (по требованию ТЗ – не выше 5 мг/м^3). Эффективная конструкция внутренних устройств сепарационного блока позволила исключить их замену при ревизии сепарационного оборудования, существенно повысив надежность эксплуатации компрессорного оборудования.

1. Характеристика существующих систем подготовки газа

1.1. Подготовка газа на УКПГ-1 Ямбургского НГКМ

Подготовка сеноманского газа на Ямбургском месторождении ведется на семи установках абсорбционного типа (УКПГ 1-7). Кроме того, на Харвутинской площади осуществляется подготовка газа на УКПГ-9, а на двух УППГ (УППГ-8, 10) ведется предварительная подготовка газа. На Анерьяхской площади также производится лишь первичная подготовка газа на УППГ-4а.

На УКПГ-1 предусмотрена совместная подготовка газа её зоны и от УППГ-8. Сеноманский газ поступает по газосборному коллектору № 2 на УППГ-8, где происходит его предварительная очистка в двух горизонтальных сепараторах ФС-1 и ФС-2. Эскиз сепаратора ФС-1 ГП 835.01.00.00, модернизированного по ГПР 1025.00.0000 представлен на рисунке 1.1.1

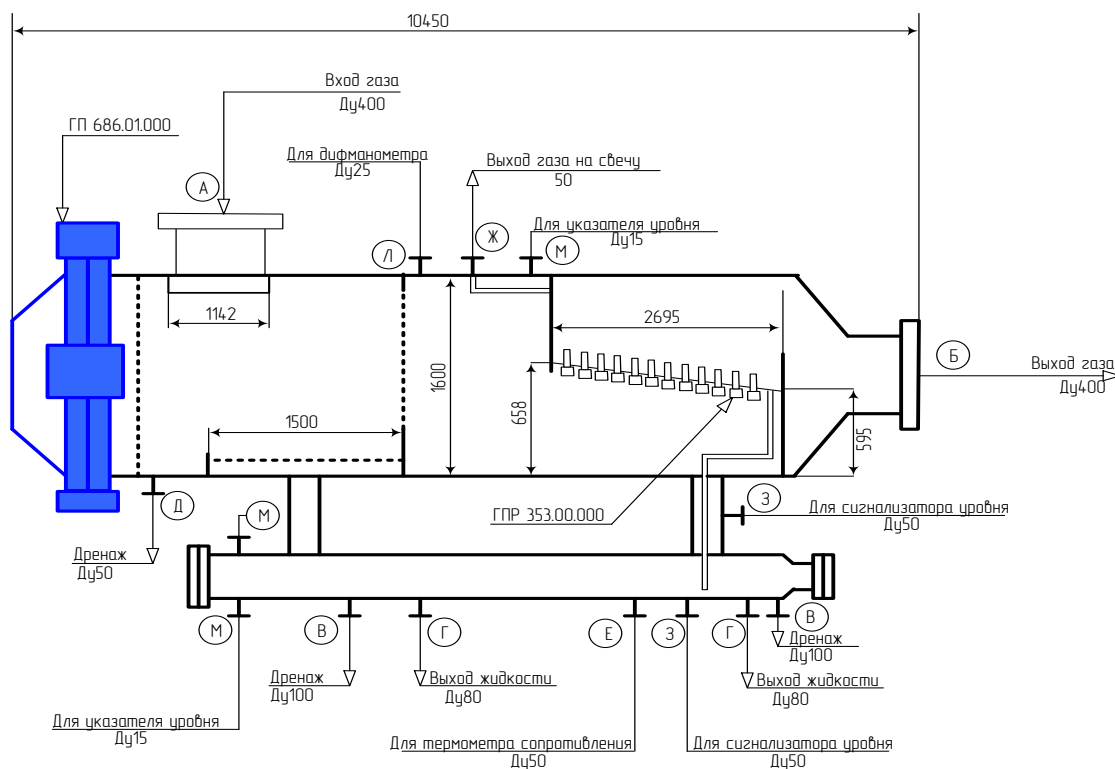


Рис. 1.1.1. Эскиз сепаратора ФС-1 УППГ-8

После очистки газ проходит узел замера газа и подается во внутрипромысловый трубопровод Ду700, по которому поступает в здание

замера газа ДКС-1, где установлена только отключающая арматура. После здания замера газа ДКС-1 газ поступает на сепараторы С-1 № 1-4 УКПГ-1.

Принципиальная технологическая схема установок подготовки газа абсорбционного типа представлена на рисунке 1.1.2.

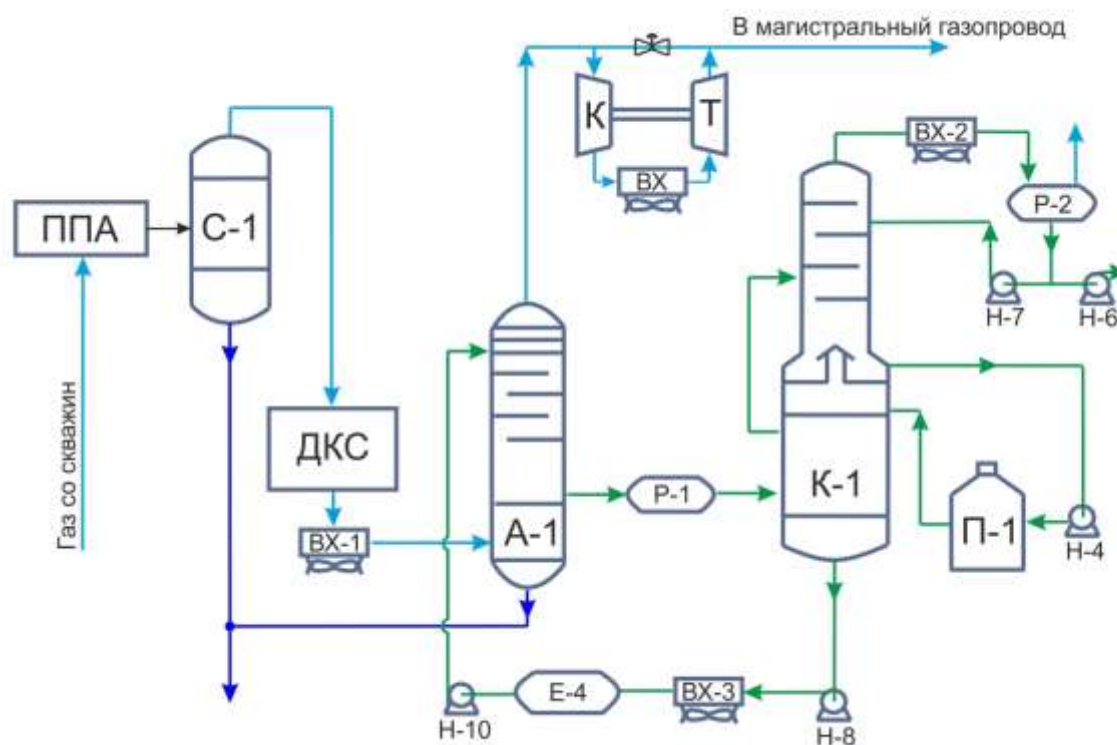


Рис. 1.1.2. Принципиальная технологическая схема установок подготовки газа абсорбционного типа

Далее газ поступает в установку очистки газа (УОГ) УКПГ-1, предназначенную для отделения из газа жидкости и мехпримесей перед его дальнейшей подготовкой. УОГ оборудована 16 сепараторами. Эскиз проектного сепаратора представлен на рисунке 1.1.3.

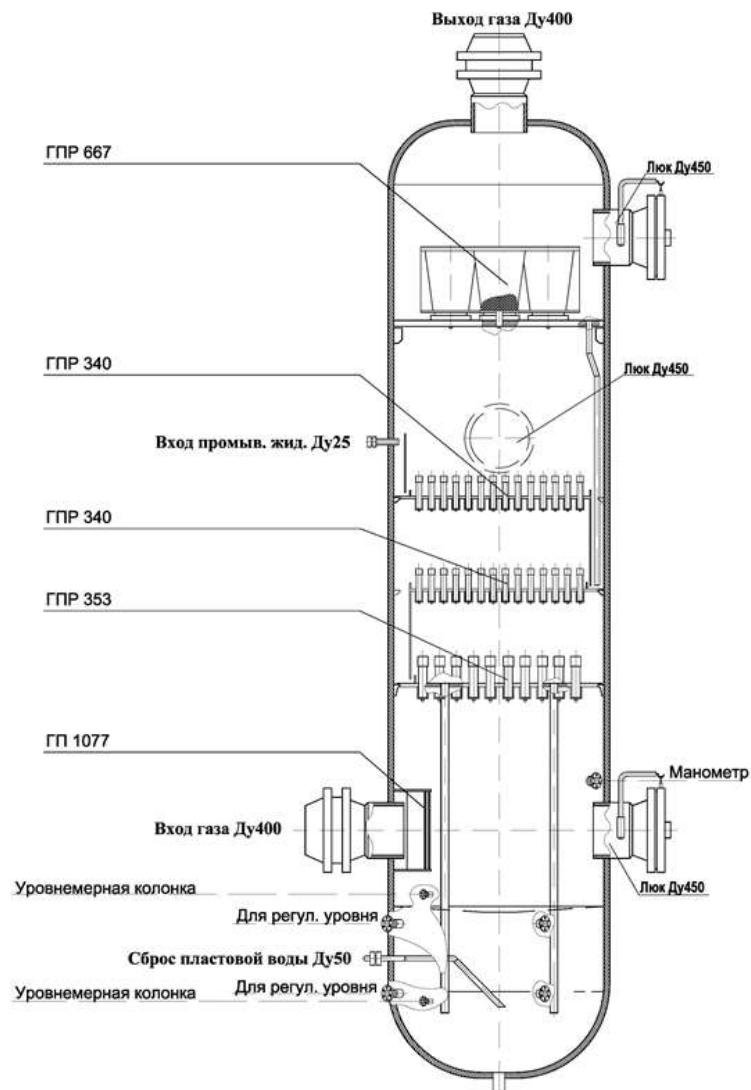


Рис. 1.1.3. Эскиз сепаратора с промывочной секцией

Предварительно отсепарированный газ, полученный с УППГ-8 Харвутинской площади, поступает на территорию УКПГ-1 в узел подключения газопроводов от УППГ-8 и направляется на очистку в УОГ. Очистка этого газа осуществляется в четырех сепараторах С-1 № 1-4. Очищенный в них газ поступает на ДКС, где компримируется вместе с газом, добытым из зоны УКПГ-1, и поступает на установку осушки газа.

Подготовка газа осуществляется методом гликолевой осушки в абсорберах с последующим его охлаждением. Осушка газа производится на девяти технологических линиях пропускной способностью 8,5 млн.м³/сут при давлении 5,5 МПа в каждой. Абсорбционная часть установки в настоящее время модернизирована по варианту "Зульцер-ЯГД-ВНИИГАЗ".

Абсорбер является многофункциональным колонным аппаратом, сепарационная секция которого состоит из сетчатого отбойника на входе газа и сепарационной тарелки с элементами ГПР 353.00.000, где из газа выделяется капельная жидкость и механические примеси. В нижней части находится сборник жидкости. Слив жидкости с сепарационной тарелки производится по сливной трубе под уровень жидкости сборника.

В массообменной секции установлена структурированная насадка “Mellapak 250Y” фирмы “Sulzer Chemtech” с толщиной слоя 3,7 м. В фильтр-секции установлены две тарелки с мультикассетными кольцевыми сетчатыми насадками МКН 360.200.6Д-170Н-14 в количестве 14 шт. на каждой.

1.2 Подготовка газа на Заполярном НГКМ.

На Заполярном НГКМ подготовка газа к дальнейшей транспортировке, в соответствии с проектом разработки, осуществляется на трех установках комплексной подготовки газа. УКПГ предназначена для сбора добытого флюида от кустов газовых скважин, подготовки (очистки от механических примесей, капельной жидкости и последующей осушки от влаги, с целью предотвращения гидратообразования) и подачи очищенного и осушенного газа в магистральные газопроводы для дальнейшего транспорта потребителям. Сырьем для УКПГ является пластовая смесь, поступающая по газосборной сети газопроводов-шлейфов от кустов газовых скважин. УКПГ-1С, УКПГ-2С и УКПГ-3С запущены в эксплуатацию в 2001, 2002 и 2003 гг. соответственно. На всех трех УКПГ принята хорошо зарекомендовавшая себя на газовых месторождениях Западной Сибири технология абсорбционной осушки газа гликолями. Осушка газа производится на двенадцати технологических линиях (10 рабочих+2 резервных). В основе технологической линии применена абсорбционная осушка газа высококонцентрированным раствором гликоля в многофункциональном аппарате - абсорбере. Восстановление свойств осушителя (абсорбента) происходит на установке регенерации гликоля до требуемой концентрации.

После осушки газ поступает по межпромысловому газопроводу на ГКС «Заполярная» для дальнейшего транспорта по магистральным газопроводам. В качестве абсорбента на УКПГ Заполярного НГКМ, в виду низких температур в системе осушки, используется ДЭГ.

Принципиальная технологическая схема установок подготовки сеноманского газа на Заполярном НГКМ однотипна для всех трех промыслов и представлена на рисунке 1.2.1.

Сырой газ с кустов скважин поступает в два пункта переключаящей арматуры ЗПА - 1,2. Поскольку максимальное рабочее давление в системе осушки принято равным 8,0 МПа, то в первые годы эксплуатации месторождения входное давление снижалось входными кранами-регуляторами до этой величины.

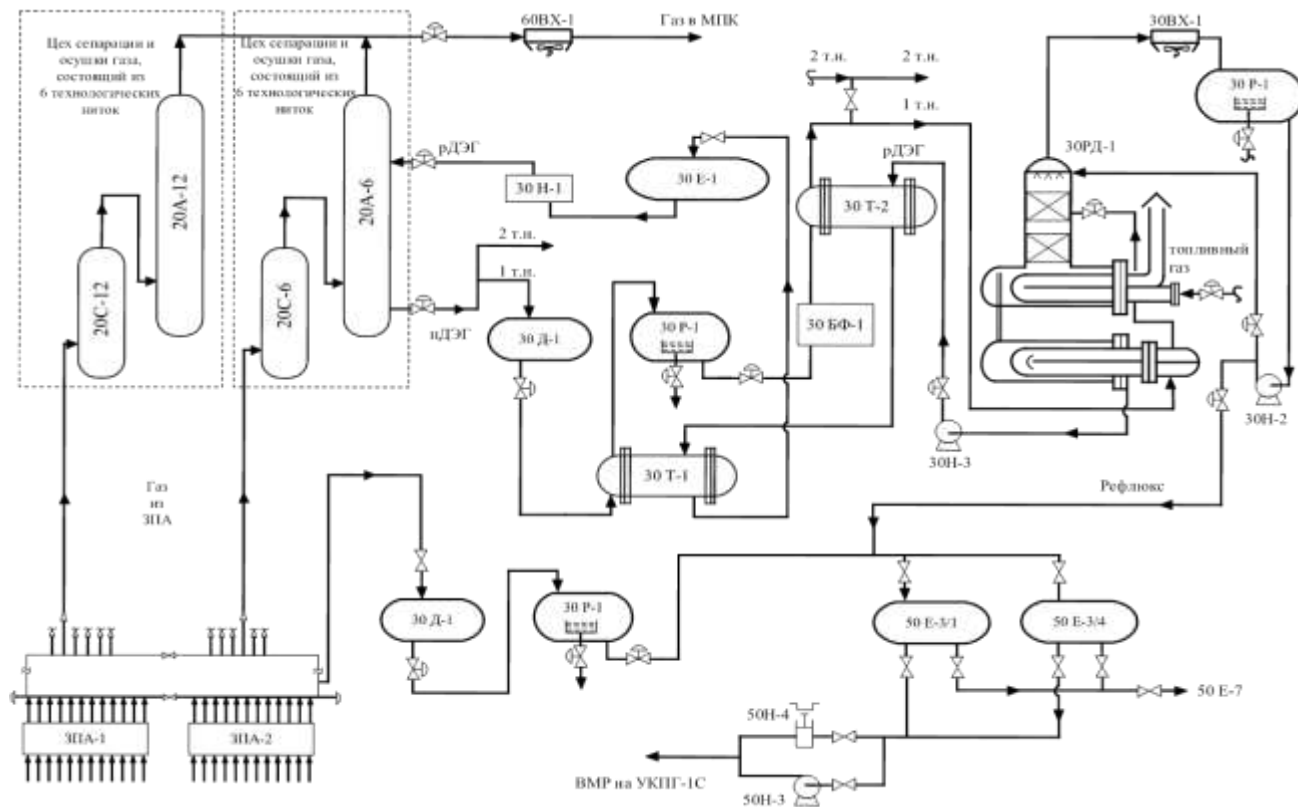


Рис. 1.2.1. Принципиальная технологическая схема установки подготовки газа на Заполярном НГКМ

Для предупреждения гидратообразования перед входными кранами-регуляторами предусмотрена подача метанола через панель распределения ингибитора. Газ после входных кранов-регуляторов поступает в коллектор

диаметром 1000 мм, по которому направляется в два цеха осушки. Перед каждым цехом осушки газ из коллектора через гребенку подается на шесть отдельных технологических ниток. Технологическая нитка на УКПГ состоит из входного сепаратора и абсорбера номинальной производительностью 10 млн. м³/сут.

Входные сепараторы 20С-1 сеноманских УКПГ Заполярного НГКМ имеют штатную конструкцию:

УКПГ – 1С – по чертежам ГП 1467.02.01 (рисунок 1.2.2);

УКПГ – 2С – по чертежам ГП 1924.01.01 (рисунок 1.2.3);

УКПГ – 3С – по чертежам ГП 2100.01.01 (рисунок 1.2.4).

Проектный унос жидкости из этих аппаратов до 20 г/тыс.м³.

В процессе эксплуатации установок часть входных сепараторов была модернизирована.

В сепараторах 20С-1 с промывочной секцией производится очистка пластового газа от мехпримесей, воды и конденсата. Блоки сепараторов ГП-1924.01.01 были разработаны ЦКБН специально для Заполярного НГКМ.

В качестве жидкости для промывки газа используется дистиллят колонны регенерации гликоля, которая из специальной сборной емкости подаётся как на третью тарелку промывочной секции сепаратора, так и на верхнюю (четвертую) тарелку, предназначенную, в том числе, и для улавливания уносимой промывочной жидкости. Жидкость, отделяемая в сепараторах, подаётся в систему утилизации на закачку в пласт или на сжигание в ГФУ.

Газ после сепараторов поступает для осушки в нижнюю часть абсорберов 20А-1.

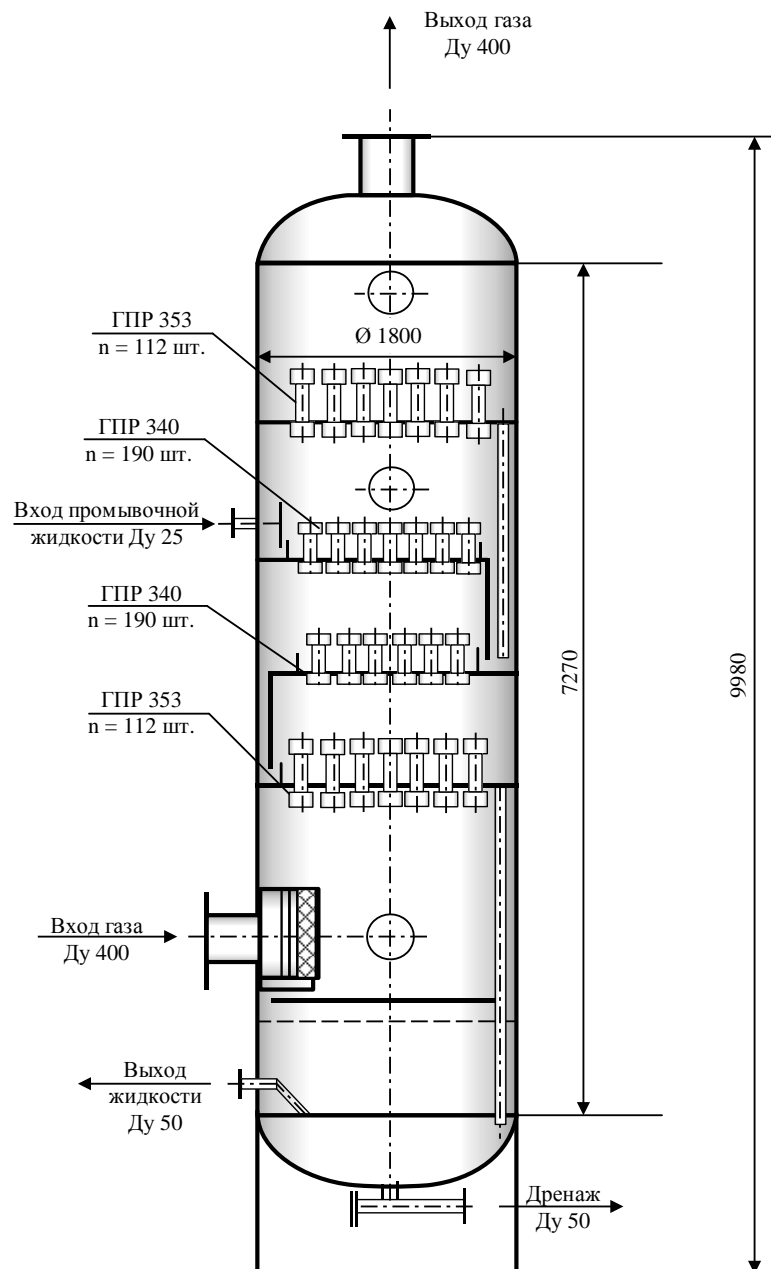


Рис. 1.2.2. Эскиз входного сепаратора штатной конструкции ГП 1467.02.01

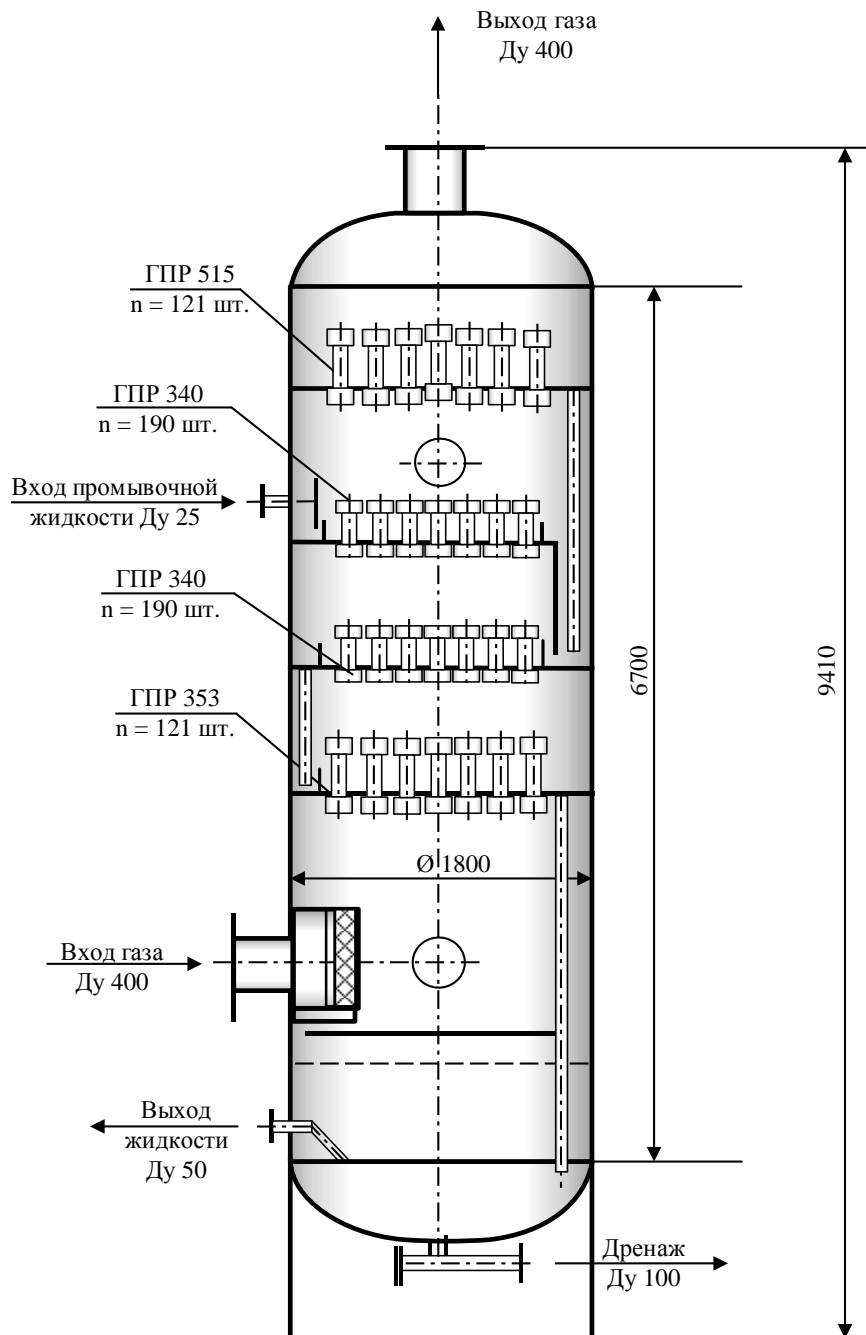


Рис. 1.2.3. Эскиз входного сепаратора штатной конструкции ГП 1924.01.01

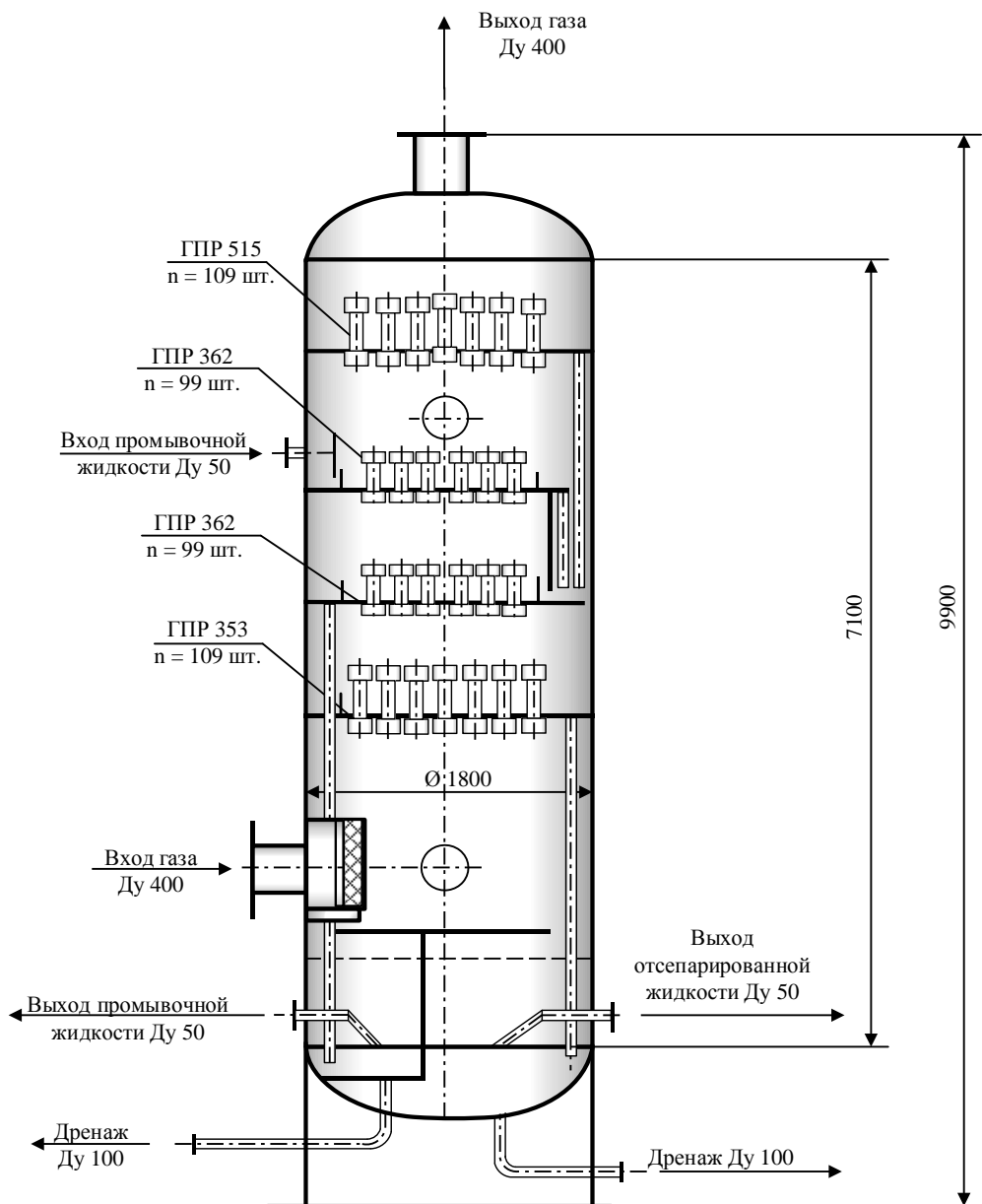


Рис. 1.2.4. Эскиз входного сепаратора штатной конструкции ГП 2100.01.01

2. Модернизация сепарационных аппаратов на УКПГ-1 ЯНГКМ

2.1 Причины проведения модернизации сепарационных аппаратов на УКПГ-1 ЯНГКМ.

После пуска новых скважин на кустах №120 (14.12.2007) и №119 (09.01.2008) произошел резкий вынос высокоминерализованной пластовой жидкости и жидкости освоения CaCl_2 .

Силами ф. ИТЦ ООО «Газпром добыча Ямбург» при комплексном обследовании сепараторов С-1 УОГ был выявлен массовый унос капельной жидкости (в отдельных случаях свыше 100 мг/м³) с газом из-за неудовлетворительной работы сепараторов.

Причиной уноса капельной жидкости являлось значительное превышение фактического расхода газа по каждому работающему сепаратору от 5 до 20 % от максимально допустимого расхода для данного типа сепараторов. Также причиной увеличенного уноса явилось превышение значений скоростей в трубопроводе «сырого» газа более чем в 2 раза над рекомендуемыми, из-за снижения пластового давления, что привело к турбулентности потока. При этом присутствующая в потоке капельная влага представляла собой взвесь мелких частиц воды, солей и механических примесей, что, затрудняет процесс сепарации и отмывки солей.

Выше изложенные причины привели к повышению минерализации ДЭГ на УКПГ-1 ЯНГКМ и снижению его осушающей способности, а это потребовало частичной замены гликоля. Появились побочные эффекты в виде образования твердых отложений на колесах нагнетателей ГПА, забивание мех. примесями и отложениями солей технологического оборудования, что, соответственно, привело к сокращению межревизионных периодов и увеличению трудозатрат на очистку.

Для решения данной проблемы было принято решение о привлечении трех производителей сепарационного оборудования для разработки технических решений по модернизации сепараторов.

Обязательным условием при выборе наилучшей конструкции внутренних элементов сепаратора являлось соблюдение технического задания:

- содержание механических примесей - не более 5 мг/м³;
- содержание капельной жидкости - не более 5 г/1000м³;
- разработка технических решений по увеличению производительности сепараторов ГП 1181.04.01 должна обеспечить оптимальный режим работы и необходимый резерв мощности оборудования;

- произвести расчеты производительности сепаратора в зависимости от давления на весь период эксплуатации, с предоставлением соответствующих графиков;
- определить показатель загрузки сепараторов по воде (жидкостная нагрузка);
- разработать технические решения по защите от засоления и закупоривания мех. примесями сепарационных элементов;
- разработать техническое решение для слива отсепарированной жидкости с верхней сепарационной тарелки в кубовую часть сепаратора С-1;
- разработать техническое решение для удаления больших объемов мехпримесей (песка) из кубовой части сепараторов;
- разработать техническое решение по обеспечению увеличения количества подаваемой промывочной жидкости;
- разработать и предоставить подробные чертежи и рабочие характеристики применяемых в процессе модернизации сепарационных элементов;
- предусмотреть точки представительного отбора газа после сепараторов для определения величины уноса жидкости и мех. примесей с учетом методик ООО «Газпром добыча Ямбург».

2.2 Варианты модернизации сепарационных аппаратов

Модернизация входных сепараторов С-1 ГП-1 осуществлена в период 2009 – 2010 год с привлечением ООО «ИВЦ «Инжехим», ООО «Зульцер-Хемтех» и ДООАО «ЦКБН»:

- сепаратор С-1/1 работающий на сепарацию газа от нового фонда скважин ЭУ-8 модернизирован в 2009 году по проекту КЦРФ 061363.015 ООО «ИВЦ «Инжехим»;
- сепаратор С-1/12 модернизирован в 2010 году по проекту КЦРФ 061363.074 ООО «ИВЦ «Инжехим»;
- сепаратор С-1/14 первоначально модернизирован в 2010 году по проекту 2132220 ООО «Зульцер-Хемтех»;
- сепаратор С-1/16 модернизирован в 2010 году по проекту ГПР 2527 ДООАО «ЦКБН».

По результатам проведенных сравнительных испытаний и эксплуатации в 2010-2011 годах модернизированных сепараторов, на основании замечаний специалистов Общества проведены следующие доработки модернизированных сепараторов С-1/12, С-1/14, С-1/16:

- доработка внутренних сепарационных устройств С-1/12: увеличено расстояние между сепарационными тарелками с целью обеспечения технического обслуживания аппарата и исключены фильтры-коалесцеры из состава внутренних устройств сепаратора (по инициативе разработчика конструкции из-за отсутствия отложений на 3-й сепарационной ступени). Последнее мероприятие также направлено на увеличение межремонтного периода работы аппарата;
- в связи с невыполнением технических требований по промывке от солей в С-1/14, решено реализовать в сепараторе С-1/14 совместную конструкцию ООО «Зульцер-Хемтех» и ДООАО «ЦКБН»;
- в С-1/16 демонтированы фильтрующие патроны ГПР 2331 в выходной секции ввиду быстрого забивания их механическими примесями и роста гидравлического сопротивления. Последующая эксплуатация сепаратора в период с августа 2011 года по май 2014 года осуществлялась без подачи промывочной жидкости.

В 2012 году с целью реализации совместного варианта конструкции ООО «Зульцер-Хемтех» и ДООАО «ЦКБН» в сепараторе С-1/14 демонтирована тарелка с мультикассетными сепарационными элементами МКС, смонтированы тарелка с минициклонами ГПР 2130.01-01 (72 шт.) и тарелка с центробежными массообменными элементами ГПР 2124 (99 шт.) по проекту ГПР 2594 ДООАО «ЦКБН». Верхняя фильтрующая секция и узел входа газа - первоначальной конструкции ООО «Зульцер-Хемтех».

В 2014 году проведена доработка сепаратора С-1/16 по проекту ГПР 2656 ДООАО «ЦКБН»: демонтирована тарелка выходной секции с патронами фильтрующими ГПР 2331, вместо нее установлены последовательно: коалесцирующая ступень со сборником жидкости, пакетом сетчатого

коалесцера и пакетом пластинчатого коалесцера, осадительная ступень со сборником жидкости и двумя пакетами пластинчатого осадителя. С сентября 2014 сепаратор запущен в работу с доработанной конструкцией.

В табл. 2.2.1 приведены основные реализованные технические решения модернизированных входных сепараторов С-1 УКПГ-1 на настоящий момент. Схемы проектного и модернизированных сепараторов после проведенных доработок конструкции изображены на рис. 2.1 – 2.5.

В 2011 году проводились сопоставительные испытания работы модернизированных сепараторов на различных режимах по расходу газа, подаче промывочной жидкости. В период с 2012 по 2014 годы проведены сопоставительные и эксплуатационные испытания сепараторов С-1/12, С-1/14, С-1/16 после доработок конструкции.

Таблица 2.2.1

Технические решения по вариантам модернизации сепараторов ГП-1 с учетом доработок

ГП 1181.01.04 проектная конструкция	ООО «ИВЦ «Инжехим» КЦРФ 061363.015	ООО «ИВЦ «Инжехим» КЦРФ 061363.074	ЦКБН (ГПР 2594) + Зульцер	ЦКБН ГПР 2656
	С-1/1	С-1/12	С-1/14	С-1/16
<ul style="list-style-type: none"> ▪ узел входа + сетчатый коагулятор и тарелка с сепарационными элементами ГПР 353; ▪ 2 массообменные тарелки с центробежными элементами ГПР 340; ▪ сепарационные элементы ГПР 667 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ распределитель газожидкостного потока с функцией промывки от твердых включений; ▪ каплеуловитель сетчатый с подачей промывочной жидкости; ▪ тарелка с прямоточными элементами; ▪ каплеуловитель 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ распределитель газожидкостного потока с функцией промывки от твердых включений; ▪ 2 тарелки с прямоточными элементами; ▪ тарелка с прямоточными циклонами. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ узел входа газа с завихрителем потока с трубой отсоса; ▪ бункер сбора мехпримесей; ▪ тарелка с минициклонами ГПР 2130.01-01; ▪ тарелка с центробежными массообменными элементами ГПР 2124; 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ узел входа газа с завихрителем потока с трубой отсоса; ▪ бункер сбора мехпримесей; ▪ группа минициклонов ГПР 2130.01-01; ▪ тарелка с центробежными массообменными элементами ГПР 2124;

ГП 1181.01.04 проектная конструкция	ООО «ИВЦ «Инжехим» КЦРФ 061363.015	ООО «ИВЦ «Инжехим» КЦРФ 061363.074	ЦКБН (ГПР 2594) + Зульцер	ЦКБН ГПР 2656
	С-1/1	С-1/12	С-1/14	С-1/16
	сетчатый; ▪ тарелка с прямоточными циклонами и фильтрами- коалесцерами.		▪ сетчатый каплеотбойник; ▪ узел фильтрации SULZER: тарелка с вихревыми элементами с вторичным сетчатым каплеотбойником.	▪ коалесцирующая ступень со сборником жидкости, пакетом сетчатого коалесцера и пакетом пластинчатого коалесцера; ▪ осадительная ступень со сборником жидкости и двумя пакетами пластинчатого осадителя.

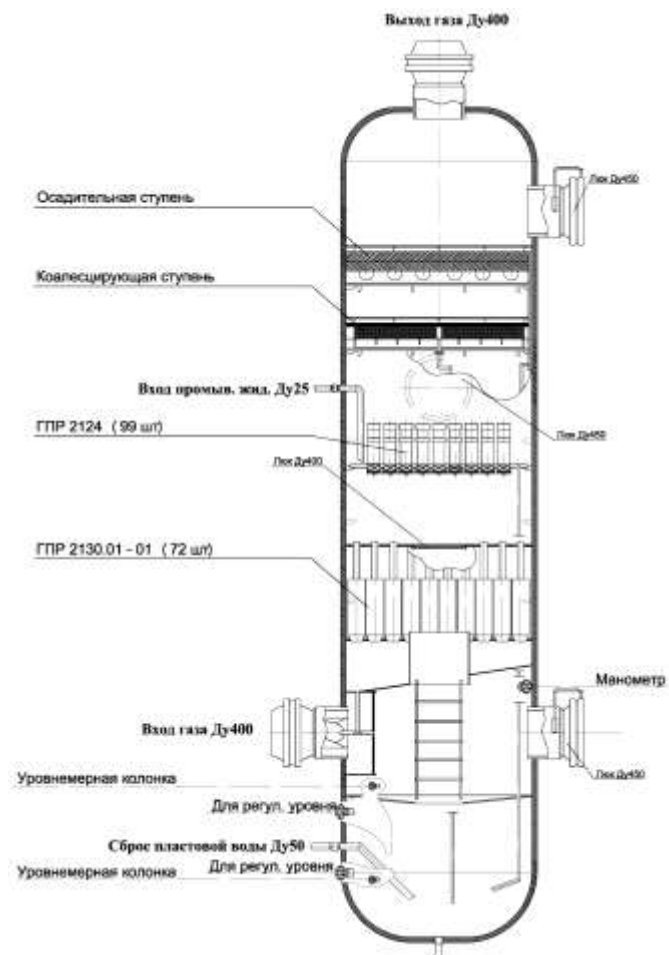


Рис. 2.2.1

Сепаратор С-1/16 ДООАО «ЦКБН»

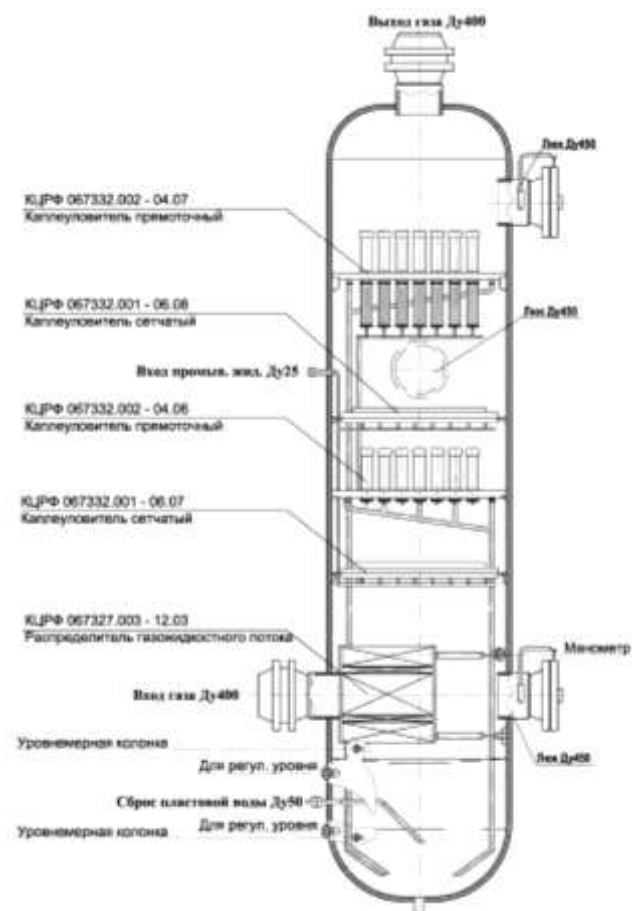


Рис. 2.2.2

Сепаратор С-1/1 ООО «ИВЦ «Инжехим»

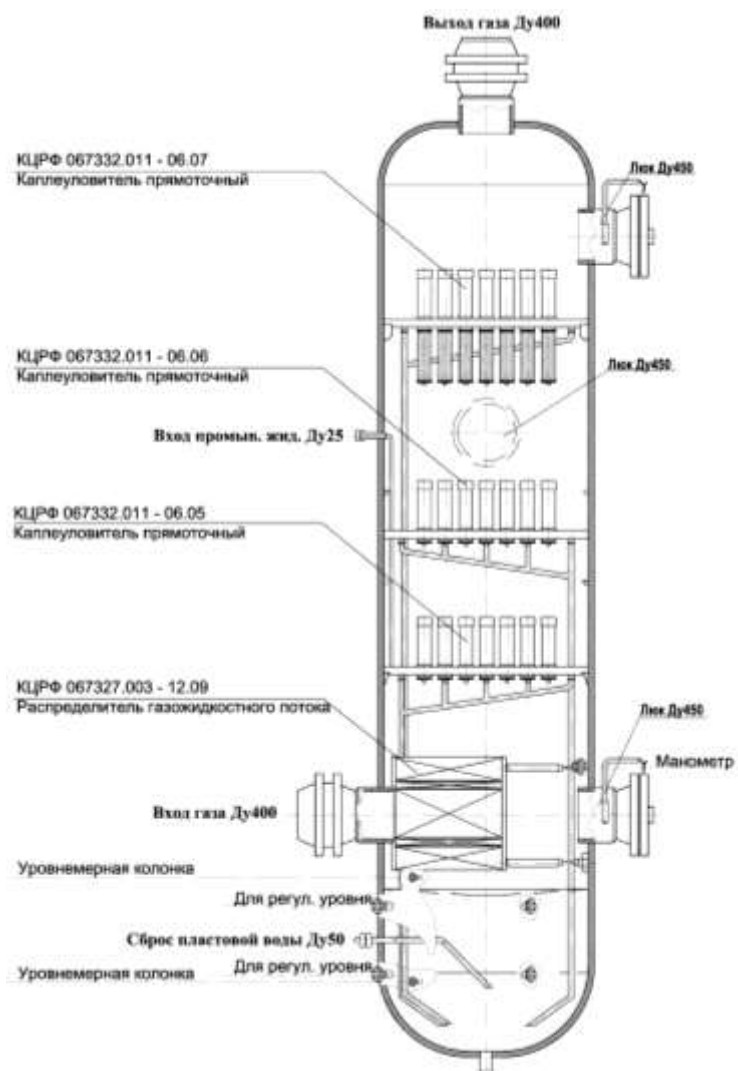


Рис. 2.2.3

Сепаратор С-1/12 ООО «ИВЦ «Инжехим»

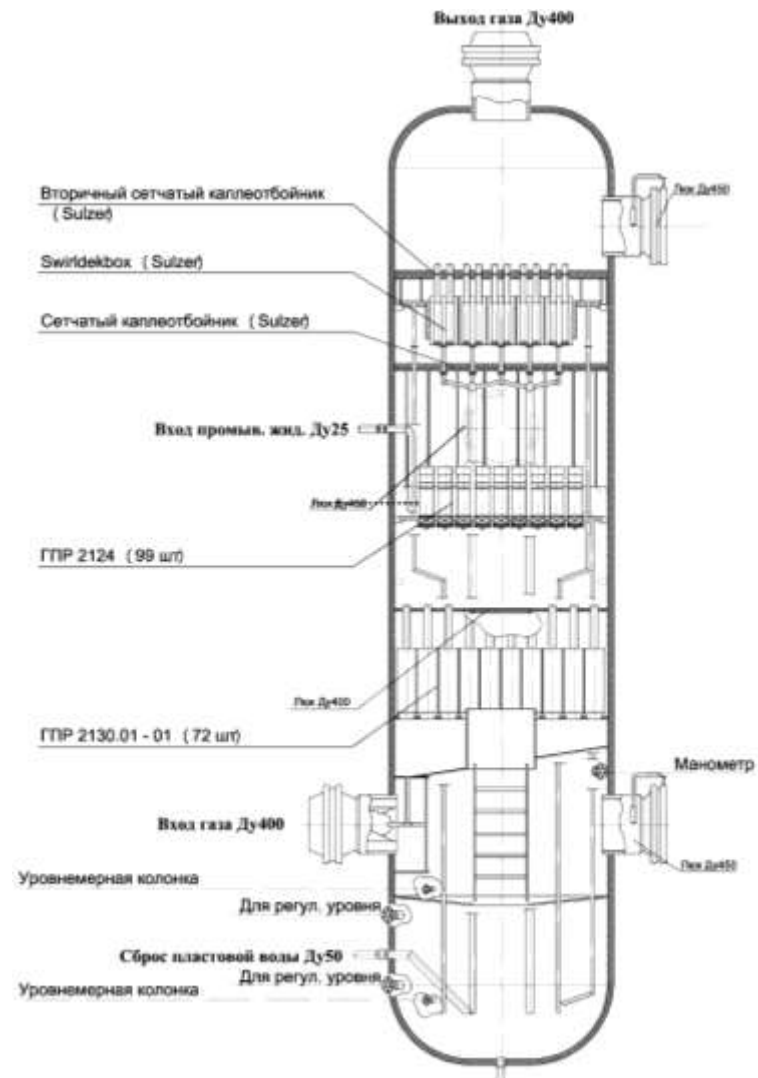


Рис. 2.2.4

Сепаратор С-1/14 «ООО Зульцер-Хемтех» и ДОО «ЦКБН»

По результатам обследования модернизированных сепараторов на различных технологических режимах, а также по данным обследований, проводимых Инженерно-технический центр (ИТЦ) ООО «Газпром добыча Ямбург» в процессе дальнейшей эксплуатации сепараторов зафиксировал их обобщённые данные, представленные в таблице 2.2.2. По ним можно сделать следующие выводы.

Сепаратор С-1/1 (вариант ООО «ИВЦ «Инжехим») в диапазоне расхода газа 100-200 тыс. м³/час при подаче промывочной жидкости до 0,3 м³/час – значение капельного уноса после С-1/1 соответствует ТТ. На других обследованных технологических режимах эффективность сепарации газа в С-1/1 подтверждена не в полной мере. Гидравлическое сопротивление по сепаратору в пределах нормы ТТ.

Работа сепаратора С-1/12 (вариант ООО «ИВЦ «Инжехим») в основном удовлетворяет ТТ по содержанию капельной жидкости в газе при расходах газа до и свыше 120 тыс. м³/час. Гидравлическое сопротивление по сепаратору в пределах нормы ТТ.

Работа С-1/14 в основном удовлетворяет требованиям ТТ на модернизацию С-1 по содержанию капельной жидкости в газе при расходах газа до и свыше 120 тыс. м³/час. Гидравлическое сопротивление по сепаратору в пределах нормы ТТ.

Работа С-1/16 после проведенных доработок конструкции аппарата, в основном удовлетворяет ТТ на модернизацию С-1 по показателю «содержание капельной жидкости в газе» в диапазоне расхода газа до 100 тыс. м³/час. Гидравлическое сопротивление по сепаратору в пределах нормы ТТ.

По всем модернизированным аппаратам выполнено требование по содержанию мехпримесей в газе сепарации.

По всем модернизированным аппаратам не выполнено требование об обеспечении удаления больших объемов мехпримесей из кубовой части сепараторов.

Помимо оценки основных режимных параметров модернизированных сепараторов необходимо также оценивать трудоемкость монтажных работ по

проведению модернизации сепараторов, трудоемкость проведения технического обслуживания и ремонтпригодность конструкций. Сравнительная оценка модернизированных сепараторов приведена в табл. 2.2.3.

С целью получения объективной картины и выявления наиболее удачной конструкции модернизированных сепараторов в ИТЦ ООО «Газпром добыча Ямбург» был предложен новый подход, заключающийся в комплексной оценке работы модернизированных аппаратов на основе разработанных критериев эффективности.

Для формализации критериев оценки эффективности проведенной модернизации и соответствия её техническим требованиям на модернизацию разработана шкала балльной экспертной оценки сопоставления показателей эффективности сепараторов, приведенная в табл. 2.2.4.

Таблица 2.2.2

Анализ соответствия модернизированных сепараторов основным техническим требованиям

Требование	С-1/1 ООО «ИВЦ «Инжехим»	С-1/12 ООО «ИВЦ «Инжехим»	ЦКБН (ГПР 2594) + Зульцер	ЦКБН ГПР 2656
<ul style="list-style-type: none"> - Увеличение производительности сепаратора - Увеличение количества подаваемой промывочной жидкости - Содержание капельной жидкости в газе сепарации не более 5 мг/м³ 	<p>В используемом диапазоне расхода газа 100-200 тыс. м³/час при подаче промывочной жидкости до 0,3 м³/час значение капельного уноса после С-1/1 соответствует требованиям.</p> <p>На других обследованных режимах эффективность сепарации газа в С-1/1 подтверждена не в полной мере.</p>	<p>Работа С-1/12, в основном, удовлетворяет требованиям на модернизацию по содержанию капельной жидкости в газе при расходах газа до и свыше 120 тыс. м³/час.</p>	<p>Работа С-1/14, в основном, удовлетворяет требованиям на модернизацию по содержанию капельной жидкости в газе при расходах газа до и свыше 120 тыс. м³/час.</p>	<p>Работа С-1/16, в основном, удовлетворяет требованиям на модернизацию по содержанию капельной жидкости в газе при расходах газа до 100 тыс. м³/час после проведенных доработок.</p>
Содержание мехпримесей в газе сепарации не более 5 мг/м ³	Соответствует	Соответствует	Соответствует	Соответствует
Возможность удаления больших объемов мехпримесей из кубовой части	Не реализовано	Не реализовано	Не реализовано	Не реализовано

Таблица 2.2.3

Оценка технико-экономических и конструктивных показателей модернизированных сепараторов

Характеристика	С-1/1 ООО «ИВЦ «Инжехим»	С-1/12 ООО «ИВЦ «Инжехим»	С-1/14 ЦКБН (ГПР 2594) + Зульцер	С-1/16 ЦКБН ГПР 2527
Срок выполнения работ по монтажу внутренних элементов при модернизации, дней	7	7	30	74
Способ крепления внутренних устройств	струбцины, метизы	струбцины, метизы	метизы, сварка	сварка
Доступ к внутренним элементам при обслуживании	труднодоступно	труднодоступно к тарелкам с прямоточными элементами	доступно	труднодоступно
Ремонтопригодность	Удовлетворительная, полностью разборная конструкция без проведения огневых работ	Удовлетворительная, полностью разборная конструкция без проведения огневых работ	Недостаточная, частично разборная конструкция	Недостаточная, ремонтпригоден при условии большого объема огневых работ
Начальная цена модернизации с НДС (в ценах 2010-2011 годов), тыс. руб.	4 489	4 513	4 920	6 508
Стоимость монтажных работ силами подрядной организации в ценах 2010 года, тыс. руб.	336	336	1 364	2 894

Таблица 2.2.4

Шкала балльной экспертной оценки сопоставления показателей эффективности модернизации сепараторов ГП-1

Показатель эффективности	Показатель сравнения	Балл макс.
Среднее значение после модернизации	норма Технических требований	1
	среднее до модернизации	1
	среднее по немодернизированным С-1	1
	среднее по модернизированным С-1	1
Максимальное значение после модернизации	норма Технических требований	1
	удвоенная норма Технических требований	0.25
Среднее значение эффективной работы после модернизации	среднее эффективное по модернизированным С-1	1
	среднее по немодернизированным С-1	1
	среднее до модернизации	0.5
	среднее после модернизации	0.5
Максимальное значение эффективной работы после модернизации	максимум эффективной работы до модернизации	0.5
Доля превышения нормы Технических требований в объеме замеров	средняя доля превышения нормы по модернизированным С-1	0.25

Оценка технологических и технико-экономических параметров эффективности модернизации сепараторов ГП-1 в условных баллах проведена на основе разработанной шкалы. Результаты в табл. 2.2.5 получены путём суммирования баллов по показателям, приведенным в балльной шкале. Так, например, для оценки выполнения требования ТТ по величине капельного уноса проведено суммирование баллов по следующим позициям:

- сравнение среднего значения после модернизации с нормой ТТ;
- сравнение среднего значения до и после модернизации;
- сравнение среднего значения в период после модернизации со средним значением по не модернизированным С-1 того же коллектора;
- сравнение среднего значения после модернизации со средним значением по всем модернизированным С-1;
- сравнение максимального значения после модернизации с нормой ТТ;

- сравнение максимального значения в период после модернизации с удвоенной нормой ТТ;

- сравнение доли превышения нормы со средним значением по модернизированным С-1.

Значение балла выставлялось от нуля до максимума по балльной шкале, в зависимости от фактического значения каждого параметра по оцениваемому сепаратору.

Таблица 2.2.5

Итоговые оценки эффективности модернизации сепараторов ГП-1 (в баллах).

Вид оценки	С-1/1 Инжехим	С-1/12 Инжехим	С-1/14 Зульцер+ЦКБН	С-1/16 ЦКБН
Оценка требования по величине капельного уноса	0.3	0.3	0.3	0.5
Оценка требования по содержанию мехпримесей в газе	1.0	1.0	1.0	1.0
Оценка требования по величине гидравлического сопротивления	0.8	0.8	0.8	0.6
Оценка требования по увеличению производительности сепараторов	0.7	0.7	0.7	0.4
Оценка требования по увеличению количества промывочной жидкости	0.3	0.4	0.4	0.1
Оценка требований к конструкции	0.5	0.8	0.5	0.6
Оценка технико-экономических показателей	0.5	0.6	0.1	0.0
Суммарная оценка	4.1	4.6	3.8	3.2

Относительные значения итоговых оценок эффективности модернизации определены как отношение оценок эффективности к максимальным оценкам в

ряду значений для модернизированных конструкций сепараторов. Полученные относительные характеристики эффективности приведены в табл. 2.2.6.

Таблица 2.2.6

Относительные значения итоговых оценок эффективности модернизации

Вид оценки	С-1/1 Инжехим	С-1/12 Инжехим	С-1/14 Зульцер +ЦКБН	С-1/16 ЦКБН
Оценка требования по величине капельного уноса	0.3	0.3	0.3	0.6
Оценка требования по содержанию мехпримесей в газе	1.0	1.0	1.0	1.0
Оценка требования по величине гидравлического сопротивления	1.0	1.0	1.0	0.7
Оценка требования по увеличению производительности сепараторов	0.7	0.7	0.7	0.4
Оценка требования по увеличению количества промывочной жидкости	0.7	1.0	1.0	0.3
Оценка требований к конструкции	0.5	0.8	0.5	0.6
Оценка технико-экономических показателей	0.8	1.0	0.2	0.0
Среднее значение	0.72	0.83	0.67	0.52

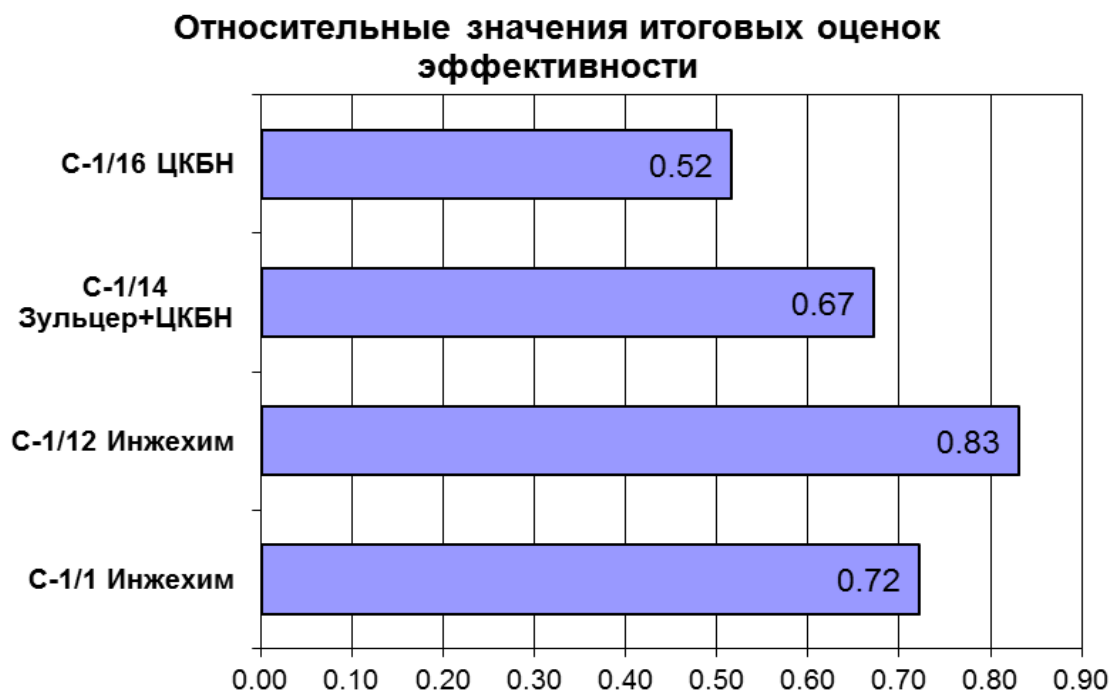


Рис. 2.2.5

Согласно полученным относительным характеристикам, наиболее эффективной конструкцией в ряду предложенных вариантов можно признать доработанный вариант модернизации сепаратора С-1/12 разработки ООО «ИВЦ «Инжехим».



Рис. 2.2.8. Унос капельной жидкости с газом в зависимости от расхода газа по сепаратору С-1/14



Рис. 2.2.9. Унос капельной жидкости с газом в зависимости от расхода газа по сепаратору С-1/16

Статистическая обработка результатов обследования сепараторов в период 2013-2018 гг. показала следующее (см. рис. 2.2.10, 2.2.11):

- зафиксировано влияние снижения расходов через сепаратор на величину капельного уноса;

- подобная картина наблюдается как по модернизированным, так и по не модернизированным аппаратам;

- среди модернизированных аппаратов наиболее высокие значения корреляции фактора производительности и капельного уноса после С-1 отмечаются по конструкции сепаратора С-1/1, причем в последние два года его работы влияние снижения расхода на рост величины уноса капельной жидкости значительно выросло;

- рост влияния снижения расхода газа через аппарат в последние 2 года отмечается по всем модернизированным конструкциям, за исключением сепаратора С-1/12;

- влияние снижения расхода газа через С-1/14 и С-1/16 на величину капельного уноса на протяжении периода 2013-2018гг. в целом незначительно, однако в последние 2 года существенно выросло.

Основные итоги работ по оценке эффективности модернизированных конструкций сепараторов ГП-1:

1. В полной мере требованиям технического задания на модернизацию сепараторов ГП-1 не отвечает ни один реализованный вариант.

2. Общим недостатком всех модернизированных конструкций является отсутствие реализации требования ТЗ о разработке технических решений, обеспечивающих удаление большого объема мехпримесей из кубовой части сепаратора.

3. Содержание мехпримесей в газе после модернизированных сепараторов соответствует техническим требованиям.

4. В большей степени требованиям технического задания на модернизацию отвечают модернизированные сепараторы С-1/12 по варианту ООО «ИВЦ «Инжехим» и С-1/14 по варианту совместной конструкции ООО «Зульцер-Хемтех» и ДООАО «ЦКБН».

5. Основным недостатком варианта модернизации сепаратора С-1/16 по проекту ДООАО «ЦКБН» согласно проведенной комплексной оценке эффективности является относительно высокая начальная стоимость

проведенной модернизации, в т.ч. стоимость монтажных работ ввиду их значительной трудоемкости.

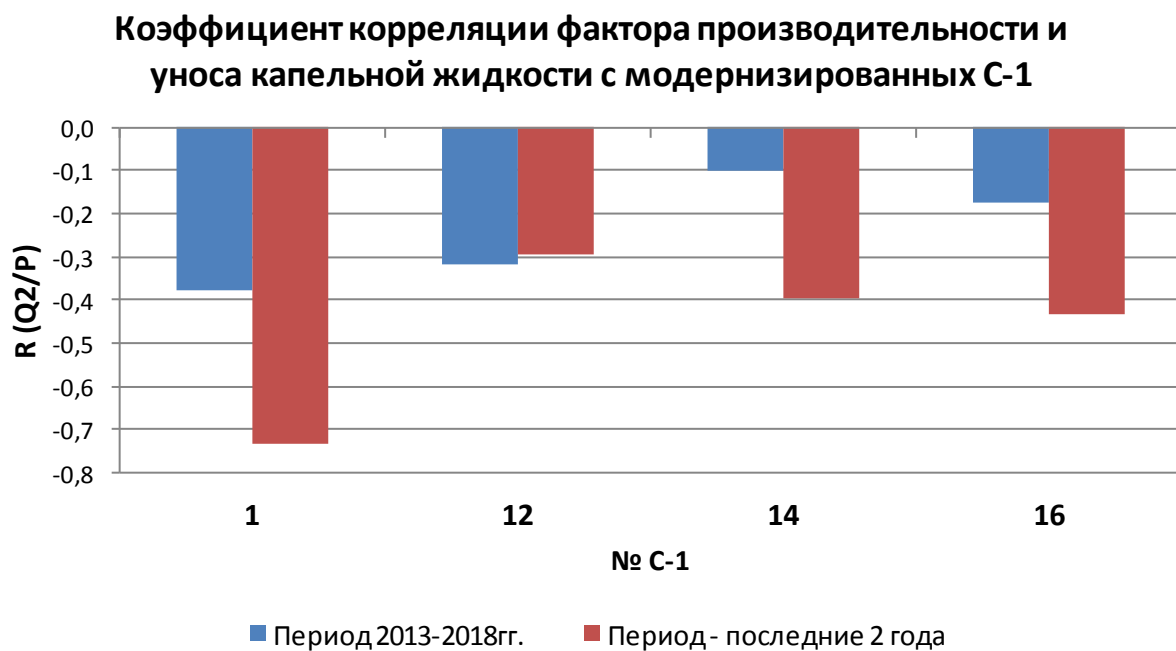


Рис. 2.2.10



Рис. 2.2.11

3. Модернизация сепарационных аппаратов на ЗНГКМ

3.1 Причины проведения модернизации сепарационных аппаратов на ЗНГКМ.

По проекту для очистки газа на сеноманских УКПГ ЗНГКМ используются сепараторы 20С-1 типа ГП 2100.01.01 разработки ДООАО «ЦКБН», которые оборудованы двумя сепарационными тарелками с вихревыми элементами ГПР по входу и выходу, а так же промывочной секцией с двумя массообменными тарелками. В числе предпосылок модернизации сепараторов 20С-1 являлось улучшение эффективности их работы, где одним из главных критериев было снижение уносов капельной жидкости до требований технических заданий. Модернизация касалась только внутренних устройств аппаратов.

По проекту сепараторы имеют одинаковую производительность (до 10 млн. м³/сут или 417 тыс. м³/ч) и одинаковую норму уноса капельной жидкости (не более 15 г/тыс. м³).

Анализируемые сепараторы до модернизации имели достаточно высокую эффективность в условиях ЗНГКМ (в среднем 93 – 97 %), но со значительным превышением нормы уноса капельной жидкости. Эффективность сепараторов в условиях ЗНГКМ, в первую очередь, определяется общей жидкостной нагрузкой на аппарат, причем, чем она выше, тем более эффективно работает аппарат. Жидкая фаза состоит из двух несмешивающихся жидкостей: водометанольного раствора низкой концентрации и в значительно меньшем количестве сеноманского углеводородного конденсата с плотностью 875 кг/м³, что ухудшает эффективность сепараторов.

Показатели работы сепараторов по очистке газа от механических примесей в данной работе не обсуждаются, т.к. этот вопрос не актуален в настоящее время для сеноманских УКПГ ЗНГКМ. С начала эксплуатации и по настоящее время ни на одной технологической линии УКПГ из 36 имеющихся не обнаружено заметное присутствие механических примесей, и требования

СТО Газпром 089-2010 выполняются по этому показателю со значительным запасом.

Необходимо отметить, что коллекторная схема распределения скважинной продукции на УКПГ-2С и УКПГ-3С ЗНГКМ не позволяет эксплуатировать сепараторы в равных условиях. Сепараторы 20С-1/7 работают в более жестких условиях по общей жидкостной нагрузке, чем другие сепараторы УКПГ-2С, УКПГ-3С.

3.2 Варианты модернизации сепарационных аппаратов

В сентябре 2006 года проведена модернизация сепаратора 20С-1/7 УКПГ - 3С ООО «Палл Евразия». В результате модернизации нижняя сепарационная тарелка с центробежными элементами оставлена без изменений, массообменные тарелки и верхняя сепарационная тарелка демонтированы, в этой зоне смонтирован инерционный каплеотбойник – демистер и тарелка с коалесцирующими элементами «Палл» (34 шт.). Вывод жидкости с тарелки коалесцирующих элементов, из-за значительного перепада на этой тарелке, предусмотрен через клапан-регулятор уровня в линию выхода водометанольного раствора из кубовой части сепаратора. В сентябре 2010 года и в июне 2015 года дважды все 34 фильтрующих элемента ООО «Палл Евразия» были заменены на новые элементы.

В июне 2016 года в рамках программы импортозамещения фильтрующие элементы ООО «Палл Евразия» в сепараторе 20С-1/7 заменены на элементы «УТфильтр-КГ» ФЭК-ГВК7 производства ЗАО «Уралтехфильтр-Инжиниринг», являющихся аналогом фильтрующему элементу SepraSol Plus Liquid/Gas Coalescer P/N CS604LGH13 компании «Pall» (США). Осенью 2017 года эти элементы заменены на такие же новые.

Сепаратор 20С-1/7 УКПГ-2С в июне 2008 года модернизирован ООО «ИВЦ «Инжехим». В нем установлены: распределитель газожидкостного потока, сетчатый горизонтальный каплеуловитель, две тарелки с прямоточными циклонами, из которых верхняя оснащена коалесцирующими элементами из нетканого термостойкого материала.

В результате модернизации сепараторов, требования технических заданий по уносу капельной жидкости для 20С-1/7 УКПГ-3С (не более 2 мг/м³), 20С-1/7 УКПГ-2С (не более 5 мг/м³) не были достигнуты.

Не было достигнуто и проектное требование для сепаратора 20С-1/7 УКПГ-2С (не более 15 мг/м³). Абсолютное снижение величины уноса капельной жидкости в результате модернизации сепаратора на УКПГ-2С оказалось незначительным (5 – 7 мг/м³). Основным положительным результатом модернизации сепаратора 20С-1/7 УКПГ-2С – это стабильность высоких показателей очистки газа (минимальные уносы капельной жидкости и самая высокая эффективность сепарации на УКПГ) в течение всего срока эксплуатации.

После замены в сепараторе 20С-1/7 УКПГ-3С фильтрующих элементов ООО «Палл Евразия» на фильтрующие элементы «УТфильтр-KG» ФЭК-ГКВ7 153/100/1000 производства ЗАО «Уралтехфильтр-Инжиниринг» снижение уноса капельной жидкости не наблюдалось.

В январе-феврале 2017 года отмечен резкий рост перепада давления с 20,9 кПа (20.01.2017) до 64,9 кПа (25.02.2017), что, возможно, было связано с плановой заменой измерителя перепада давления. В ходе дальнейших наблюдений за данным параметром 13.05.2017 был зафиксирован максимальный перепад давления при расходе газа 400 тыс. м³/ч, который составил 103,6 кПа (таблица 1). Данное значение превысило максимально-допустимый перепад давления – 80 кПа, при достижении которого рекомендовалась замена фильтрующего элемента согласно техническому паспорту фильтрующего элемента-коалесцера серии «УТфильтр-KG».

Осенью 2017 года фильтрующие элементы «УТфильтр-KG» ФЭК-ГКВ7 153/100/1000 заменены на такие же. В настоящее время сепаратор работает удовлетворительно со стабильным перепадом, унос капельной жидкости остался на прежнем уровне.

Задача создания сепаратора обеспечивающего очистку газа на входе нагнетателей ДКС с уносами капельной жидкости не более 5 мг/м³ в

конструкциях модернизированных сепараторов 20С-1/7 УКПГ-2С и 20С-1/7 УКПГ-3С не выполнена. Основной вывод по проведенным модернизациям состоит в том, что величину капельного уноса менее 15 мг/м^3 можно достигнуть, только, в аппарате, оборудованном дополнительной фильтрующей секцией.

В результате проведенных модернизаций решена лишь частная задача апробирования опытной конструкции высокопроизводительного сепаратора первичной очистки газа с фильтрующей секцией и капельным уносом в пределах $15 - 20 \text{ мг/м}^3$ (достаточное качество очистки газа перед гликолевой осушкой).

По оценке стоимости модернизации сепараторов видно, что затраты на модернизацию 20С-1/7 ООО «Палл Евразия», а также приобретение дополнительных комплектов коалесцирующих фильтроэлементов превосходят стоимость затрат на модернизацию сепаратора 20С-1/7 ООО «ИВЦ «Инжехим» примерно в 3 раза. В сепараторе 20С-1/7 ООО «ИВЦ «Инжехим» применяемые неметаллические материалы не меняют своей структуры и свойств при пропарке до температуры 250°C , что позволяет осуществлять их регенерацию, в то время как коалесционные фильтроэлементы в сепараторе 20С-1/7 ООО «Палл Евразия» являются расходными материалами и не подлежат регенерации, а пропарка данных фильтроэлементов возможна только перед их заменой.

4. Математическая модель сепарации дисперсной фазы из потока газа в комбинированном сепараторе газа

Разнообразие условий, в которых работают промышленные сепараторы газа, объясняют необходимость создания новых конструкций газоочистительной аппаратуры и совершенствования методов расчета их эффективности. К настоящему времени накоплен определенный опыт решений этих сложных задач. В многочисленных обзорах приводятся результаты наиболее интересных зарубежных и отечественных работ в этой области. За последние 10 - 15 лет опубликовано несколько монографий (Вараксина А.В.

Зиганшина, Е.В. Сугак, А.А.Колесника, Н.А. Николаева, М.И. Фарахова, Н.А. Войнова,) и справочной литературы (В.С. Швыдкий, Л.П. Холпанов, В.С. Галустов, М.Г. Ладыгичев, А.Г. Ветошкин и др.).

Газожидкостные сепараторы, применяемые в газопереработке, делят по принципу их действия на следующие основные типы: гравитационные; инерционные, жалюзийные, центробежные; сетчатые; фильтры сепараторы.

Чаще всего применяются комбинированные сепараторы, сочетающие две и более зон очистки. Эффективность осаждения частиц под действием гравитационных сил представляют в виде зависимости: $\eta = f(Re; Stk/ Fr)$; за счет центробежного улавливания: $\eta = f(Re; Stk; Fr)$ и при механизме зацепления: $\eta = f(Stk; Re)$, где Re , St_k , Fr - числа Рейнольдса, Стокса и Фруда. Коэффициенты пропорциональности и показатели степеней в полученных выражениях для каждого типа контактного устройства (конструкции аппарата) находятся в результате экспериментов.

При преобладающих механизмах турбулентного и градиентного переноса используются полуэмпирические подходы и модели: Дейча М.Е., Ужова В.Н., Соу С., Медникова Е.П., Идельчика И.Е., Lui Y.H., Фукса Н.А., Sehmel G.A., Montgomery T.L. и др. Однако, несмотря на значительные достижения в теории и практике газоочистки, остается ряд задач, требующих развития методов решения в связи с разработкой высокоэффективных импортозамещающих аппаратов для предприятий подготовки и переработки газового сырья.

4.1 Модель турбулентной миграции

В аппаратах газоочистки с интенсивными режимами поток газовой среды происходит в турбулентном режиме. Переход от ламинарного режима потока к турбулентному зависит от конструкции сепарирующих устройств и характеризуется числом Рейнольдса. Так, например, известно, что в газосепараторах с хаотичными насадками уже при $Re > 40$ начинает развиваться

турбулентность, а с регулярными насадками, в зависимости от их конструкции, турбулентный режим начинается при $Re > (500-2000)$.

Если пренебречь молекулярной диффузией за пределами пограничного слоя, то основными составляющими механизма переноса становятся: перемешивания за счет общих турбулентных вихрей сплошной фазы, за счет общих турбулентных вихрей малых масштабов (обусловленных стохастическим движением дисперсной фазы относительно сплошной) и продольного перемешивания за счет значительной циркуляции в сплошной фазе.

При небольших концентрациях частиц ($< 0,2$ кг/м³ или $< 2\%$, об.) преобладающим является первая составляющая переноса.

Многочисленные экспериментальные исследования турбулентной миграции частиц, начало которым положили К.Н. Шебалин и Ф.П. Заостровский в СССР, Александер и Колдрен в США (1951 г.), показали, что при турбулентном режиме течения газа скорость осаждения частиц на стенки труб и каналов на несколько порядков превосходит скорость диффузионного (броуновского) осаждения тех же частиц из ламинарного потока. При чем, при турбулентном режиме осаждение возрастает с повышением скорости газа. Это говорит об инерционной природе явления и характерно для турбулентных аэродисперсных потоков. Такая форма осаждения получила название турбулентно - инерционного или просто турбулентного осаждения аэрозолей.

Турбулентная миграция представляет собой форму поперечного движения частиц в сдвиговом турбулентном потоке. Эта форма, открытая Фортье, Флетчером и независимо от них Медниковым, имеет в механике аэрозолей фундаментальное значение.

В соответствии с принятой моделью турбулентного переноса тонкодисперсных частиц для плоскопараллельного канала записывают уравнение массопереноса частиц:

$$u(y) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left[D_d(y) \frac{\partial C}{\partial y} \right] - [Cu_t(y)] \right\}, \quad (4.1.1)$$

где u_t – скорость турбулентной миграции частиц, м/с; z, y – продольная и поперечная координаты, м; $u(y)$ – скорость газа, как функция координаты, м/с; C – концентрация частиц, кг/м³; D_d – коэффициент турбулентной диффузии частиц, м²/с.

Для цилиндрического осесимметричного канала уравнение массопереноса имеет вид:

$$u(r) \frac{\partial C}{\partial z} = \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D_d(r) \frac{\partial C}{\partial y} \right] - [C u_t(y)] \right\}, \quad (4.1.2)$$

где r – радиальная координата, м; $u(r)$ – скорость газа, как функция координаты по радиусу канала, м/с.

Как отмечено, отсутствие в правой части уравнений (4.1.1) и (4.1.2) члена $[C u_t(y)]$ приводит к равномерному распределению частиц по поперечному сечению канала, что не согласуется с экспериментальными данными.

Граничные условия к уравнению (4.1.1):

- при $z=0, u(y)=u_n$; при $z=N, \partial C / \partial z = 0$;
- при $y=0, u(y)=u_{гр}=0$; при $z=N, \partial C / \partial y = 0; C_{гр}=0$;
- при $y=h/2; \partial C / \partial y = 0$ (на оси симметрии, где h – ширина канала между пластинами, м);

u_n – скорость на входе в канал, м/с;

N – длина канала, м; $u_{гр}$ – скорость на стенке, м/с; $C_{гр}$ – концентрация осевших частиц на стенке. принимается равной нулю, так как частица удалена из газового потока.

Коэффициент турбулентной диффузии частиц является переменной величиной и зависит от многих факторов.

В работе [10] рекомендуется зависимость

$$D_d(y) = \frac{D_T(y)}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad D_T(r) = \frac{D_T(r)}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad (4.1.3)$$

где ω_E - это частота энергоемких пульсаций среды, c^{-1} ; τ_p - время релаксации частиц, с; D_T = коэффициент турбулентной диффузии потока, m^2/c . Обычно принимается $D_T \approx \nu_T$, где ν_T - коэффициент турбулентной вязкости среды, m^2/c .

Например, по модели Прандтля $D_T(y) = \chi u_* y$; где $\chi = 0,4$ - константа турбулентности; u_* - динамическая скорость, м/с (скорость касательного напряжения).

Граничные условия к уравнению (4.1.2) записываются аналогично.

Методика решения представленных уравнений переноса зависит от рода поверхности стенок, которые подразделяются на:

- 1) абсолютно непоглощающие стенки, т.е. где не удерживаются частицы;
- 2) абсолютно поглощающие стенки – т.е. смоченные какой либо жидкостью или самим аэрозолем, который при сепарации образует пленку. Далее рассматриваются стенки только второго вида.

Можно привести ряд эмпирических и полуэмпирических зависимостей для расчета приведенной скорости турбулентного осаждения частиц $u_t^+ = \frac{u_t}{u_*}$, связанных со временем релаксации скорости частиц [10]:

$$\tau_p = \frac{d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}{18 \rho_{\text{г}} \nu_{\text{г}}}, \quad (4.1.4)$$

где $d_{\text{ч}}$ - диаметр частиц, м; $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частиц kg/m^3 ; $\rho_{\text{г}}$ - плотность газа, kg/m^3 ; $\nu_{\text{г}}$ - коэффициент кинематической вязкости газа, m^2/c .

Безразмерное время релаксации записывается в виде:

$$\tau^+ = \frac{\tau_p u_*^2}{\nu_{\text{г}}}. \quad (4.1.5)$$

В работах [7, 9] приведена следующая формула для среднего значения u_t^+ ($u_t^+ = u_t / u_*$), обобщающая большое количество экспериментальных данных:

при $\mu_p^2 \tau^+ \leq 16,6$

$$u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\tau^+}{1 + \omega_E \tau_p} \right)^2, \quad (4.1.6)$$

при $\mu_p^2 \tau^+ > 16,6$

$$u_t^+ = 0,2, \quad (4.1.7)$$

где безразмерный параметр $\mu_p = 1 / (1 + \omega_E \tau_p)^{0,5}$; $\omega_E = u_* / (0,05d_3)$ - частота энергоемких пульсаций, d_3 - эквивалентный диаметр канала, м.

В приведенных выражениях не учитывается гравитационный и продольно – диффузионный механизмы переноса в виду их относительной малости.

Как следует из зависимостей, приведенных выше, скорость сепарации $u_t = u_t^+ u_*$ в значительной мере зависит от значения динамической скорости u_* или касательного напряжения на стенке: $\tau_{ст}(u_* = \sqrt{\tau_{ст} / \rho})$, $\tau_{ст} = f(\Delta p)$, Δp - перепад давления, Па.

Для прямых гладких каналов динамическая скорость находится из выражения, полученного из уравнения, баланса сил $u_* = u_{ср} \sqrt{\xi / 8}$, где $u_{ср}$ - средняя скорость среды, м/с; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления канала.

При обтекании различных тел с кривизной и шероховатой поверхностью поверхности находит применение подход определения средней динамической скорости с применением средней объемной или массовой скоростью диссипации энергии

$$u_* = \kappa \left(\frac{\varepsilon v_\Gamma}{\rho_\Gamma} \right)^{0,25}, \quad (4.1.8)$$

где ε - средняя скорость диссипации энергии, Вт/м³; κ - эмпирический коэффициент, значение которого для различных тел находится в пределах $\kappa = 1,7 \div 2,4$.

Например, из выражения (3.8), для канала с хаотичной насадкой или регулярной с интенсифицирующими элементами (гофрами, просечками, пуклями, лунками и т.д.), получено

$$u_* = 1,55u_{cp} (\xi / Re_3)^{0,25}, \quad (4.1.9)$$

где число Рейнольдса вычисляется через эквивалентный диаметр насадки d_3 и среднюю скорость газа в слое u_{cp} , по выражению $Re = u_{cp}d_3 / \nu_r$. Коэффициент гидравлического сопротивления ξ находится экспериментально для каждой насадки и дается в виде функции $\xi=f(Re)$.

Для канала с закруткой потока

$$u_* = u_{cp} \sqrt{\xi_3 / (8 \cos \theta)}, \quad (4.1.10)$$

где ξ_3 - коэффициент сопротивления канала с закруткой; θ - угол закрутки потока.

Следует отметить, что в закрученном потоке при $d_3 > (2-3)$ мкм необходимо учитывать и центробежную силу.

При известном значении модифицированного числа Пекле Pe (критерия Боденштейна) можно перейти к ячеечной модели ($n=f(Pe)$).

Баланс массы частиц для ячейки полного перемешивания

$$V_r (C_{i-1} - C_i) = u_t F_i C_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.1.11)$$

где V_r - объемный расход газа, м³/с; F_i - площадь сепарирующих элементов в ячейке, м²; n - число ячеек в канале.

Из уравнения (3.11) концентрация частиц в ячейке

$$C_i = \frac{V_r C_{i-1}}{V_r + u_t F_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.1.12)$$

где при $i=1$ имеем $C_0=C_n$ - начальная концентрация частиц в газе, кг/м³; при $i=n$ $C_n=C_k$ - конечная концентрация на выходе кг/м³.

Число ячеек связано с числом Пекле Pe известной зависимостью $n \approx Pe/2$, где число Пекле по формуле Тейлора для насадочного слоя

$$Pe = 0,52 \frac{H}{d_3} (Re_3 / \xi)^{0,25}, \quad (4.1.13)$$

где H - длина слоя насадки, м; $d_э$ - эквивалентный диаметр насадки, м.

Несмотря на свою простоту, выражение адекватно описывает профиль концентрации частиц в канале или в насадке при соответствующем определении параметров - u_t , ξ , $d_э$. За счет числа ячеек учитывается обратное перемешивание потока. Известно, что если $n=1$ - имеем идеальное смешение, а при $n \rightarrow \infty$ - идеальное вытеснение.

Эффективность сепарации в ячейке и в аппарате записывается в виде

$$\eta_i = \frac{C_{i-1} - C_i}{C_{i-1}}, \quad \eta = \frac{C_H - C_K}{C_H}. \quad (4.1.14)$$

Эффективность сепарации в i -той ячейке и во всем насадочном слое получено с применением уравнений (4.1.12) и (4.1.14) и выражения $\eta=1-(1-\eta_1)(1-\eta_2)\dots(1-\eta_i)\dots(1-\eta_n)$:

$$\eta_i = \frac{C_{i-1} - C_i}{C_{i-1}}, \quad \eta = \frac{C_H - C_K}{C_H} = 1 - \left[1 + \frac{\bar{u}_t a_v (H - 5d_э)}{u_{cp}^n} \right]^{-n}, \quad (4.1.15)$$

Значение - $5d_э$ в формуле (4.1.15) учитывает участок гидродинамической стабилизации и неоднородности потока на входе в слой. При переходе от модели идеального вытеснения ($Re_l \rightarrow \infty$) к модели идеального смешения ($Re_l \rightarrow 0$) эффективность (4.1.15) снижается на 20-35%.

4.2 Результаты расчетов

На рис. 4.2.1 представлены результаты расчета процесса осаждения на стенку аэрозольных частиц диаметром 9 мкм в вертикальной трубке и сравнение с экспериментальными данными [10].

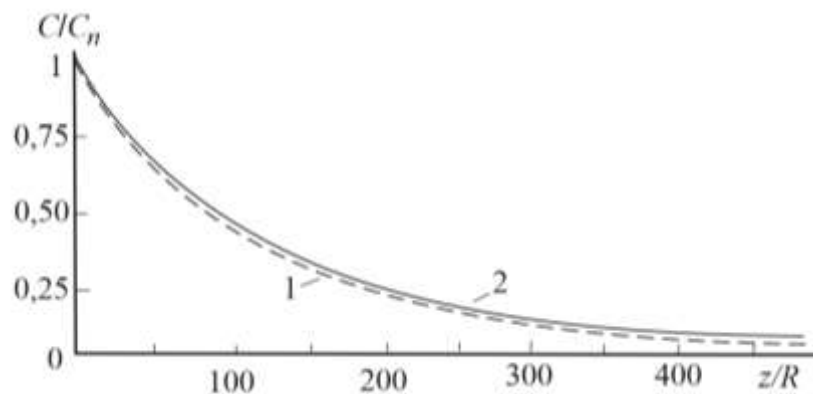


Рис. 4.2.1. Безразмерный профиль концентрации аэрозольных частиц диаметром 9 мкм, вдоль трубы диаметром 15,75 мм при скорости газа 18,1 м/с
 1 - экспериментальные данные;
 2 - расчет по математической модели (R - радиус канал).

На рис. 4.2.2 даны результаты расчетов в выражении эффективности сепарации капель воды диаметром 5 и 3 мкм из воздуха в регулярных насадках с различным коэффициентом гидравлического сопротивления и удельной поверхностью $a_v \approx 180 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Из рисунка видно, что при скорости газа 15 м/с и коэффициенте сопротивления $\xi > 0,6$ обеспечивается высокая эффективность разделения ($\eta > 90\%$) для частиц 5 мкм.

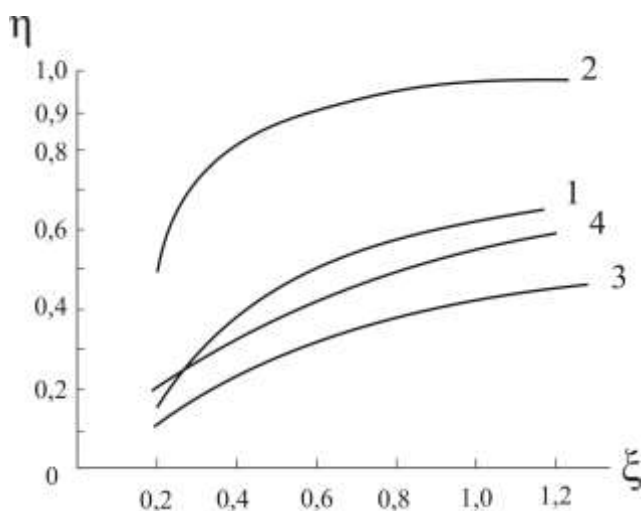


Рис. 4.2.2 Зависимость эффективности сепарации мелких капель воды от гидравлического сопротивления регулярной насадки
 1, 2 - диаметр капель 5 мкм; 3, 4 - 3 мкм; 1, 3 - скорость газа 10 м/с; 2, 4 - скорость газа 15 м/с.

По представленной математической модели выполнены расчеты и разработана конструкция комбинированного сепаратора тонкодисперсной фазы (< 20 мкм) из природного газа в местах добычи. Первая зона очистки состоит из распределителя - сепаратора с гофрированными пластинами, а вторая из контактных устройств с закруткой фаз.

5. Сепарационные аппараты для очистки природного газа на поздней стадии эксплуатации месторождений

На предприятиях нефтегазодобычи и нефтегазопереработки, работающих с уникальными по характеристикам добываемыми флюидами, которые изменяются в процессе жизненного цикла месторождения, все актуальней становится задача в разработке и внедрении импортозамещающих аппаратов очистки газов от различных примесей.

В настоящее время наиболее крупные газовые залежи ПАО «Газпром», находящиеся на стадии разработки, характеризуются падением давления газа и активным внедрением пластовой воды в залежь. Основными проблемами, связанными с эксплуатацией технологического оборудования, на этом этапе являются: снижение продуктивности и дебитов скважин, а также накопление жидкости на забоях скважин.

Ямбургское месторождение – одно из основных и крупнейших месторождений ПАО «Газпром», расположенное в пределах Тазовского полуострова на территории Надымского и Тазовского районов Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. Сенюманская залежь Ямбургского месторождения условно включает в себя собственно Ямбургскую площадь, которая находится в разработке с 1986 г., Харвутинскую площадь – в разработке с 1996 г. и Анерьяхинскую, введенную в разработку в 1 квартале 2004 г.

На Ямбургскую площадь приходится основная доля начальных геологических запасов газа, но на данный момент ее разработка осложнена множеством факторов.

Среднее значение пластового давления в эксплуатационной зоне снизилось с начала разработки более чем в 8 раз и составляет 1,32 МПа. На завершающей стадии разработки установленные мощности газоперекачивающих агрегатов (ГПА) являются одним из определяющих факторов. Кроме того, при падении отборов ниже 5 млн. м³/сут. Дожимные компрессорные станции (ДКС) оказываются неспособны компримировать газ и требуются объединения промыслов по межпромысловому коллектору (МПК). Учитывая неизбежность снижения уровней добычи по основной площади сеноманской залежи Ямбургского месторождения, в целях обеспечения плановых показателей по добыче газа, требуется обеспечить повышение эффективности и создания оптимальной системы разработки, а также выход на наибольший коэффициент конечной газоотдачи.

Первостепенными задачами сегодняшнего дня, требующими скорейшего решения, являются разработка и внедрение технических решений, обеспечивающих устойчивую работу фонда скважин в условиях низкого пластового давления и наличия повышенного водопритока.

Одним из рациональных способов решения такой задачи является внедрение на кустовых площадках модульных компрессорных установок (МКУ).

Внедрение МКУ на промыслах газовых залежей способствует поддержанию работоспособности скважин, шлейфов и самих промыслов, тем самым увеличивая накопленный отбор, уменьшая число выбывающих по причине остановки промыслов и низкого пластового давления скважин, а также обеспечивая более длительные сроки работы ДКС в бесперебойных режимах.

Учитывая опыт эксплуатации МКУ на Вынгапуровском промысле было необходимо решить проблему улова залповых поступлений воды и качественной очистки газа от капельной влаги и твердых частиц, так как их

попадание в маслозаполненный компрессор может привести к потере свойств масла, снизить надежность и рабочий ресурс компрессора.

5.1. Конструкции сепараторов газа

Задача очистки газа от дисперсной фазы была решена за счет использования в МКУ сепарационного блока, состоящего из двух последовательно работающих сепараторов СП-101 и СП-102.

Сепаратор СП-101 (рис. 5.1.1) выполняет одновременно и функцию уловителя жидкостных пробок, предотвращая их попадание на вход компрессора.

Корпус сепаратора-пробкоуловителя СП-101 выполнен в виде горизонтальной цилиндрической емкости диаметром 1,6 м. Внутренние устройства газосепаратора СП-101 включают три зоны очистки газа. В качестве первой зоны служит распределитель-сепаратор газожидкостного потока, установленный на входном патрубке, состоящий из цилиндрической несущей конструкции и закрепленных на ней блоков регулярной насадки.

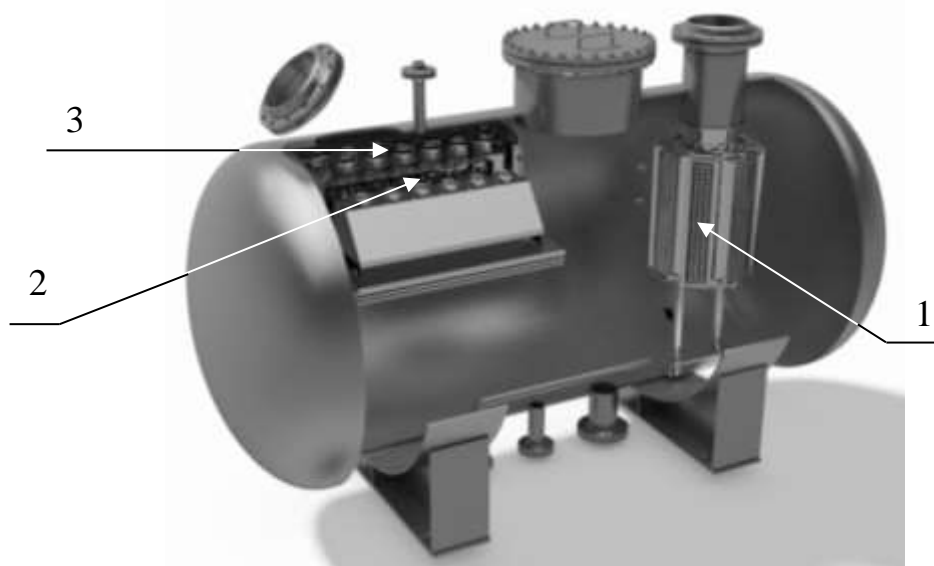


Рис. 5.1.1. Вид сепаратора-пробкоуловителя СП-101 в разрезе
1 – регулярная насадка; 2, 3 – тарелки с прямоточными центробежными сепарирующими элементами

В качестве второй и третьей зон служат установленные в верхней части аппарата последовательно проходимые газовым потоком тарелки с прямоточными центробежными сепарирующими элементами. В случае невысокого содержания дисперсной фазы в очищаемом газе может работать с использованием одной тарелки при организации байпаса относительно другой тарелки, что позволяет снизить его гидравлическое сопротивление.

Газовый поток после СП-101 поступает в вертикальный газосепаратор СП-102, диаметром 1,2 м (рис. 5.1.2). Его внутренние устройства включают две ступени очистки газового потока от оставшихся в нем после прохождения сепаратора-пробкоуловителя СП-101 дисперсных частиц.

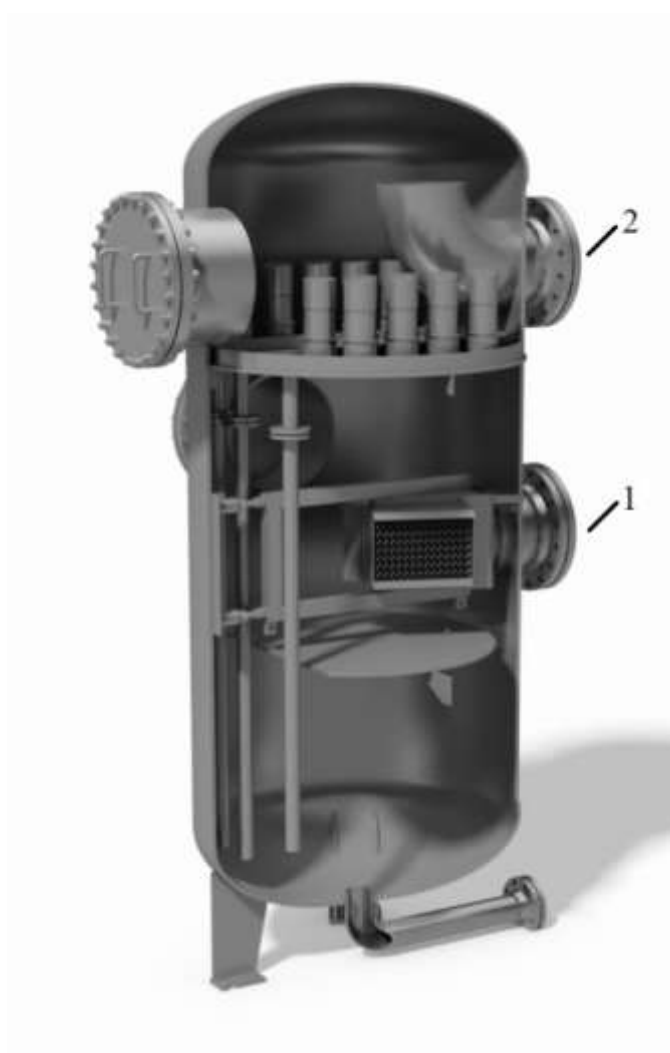


Рис. 5.1.2. Вид сепаратора СП-102

1 – вход газа; 2 – выход очищенного газа

Первой ступенью сепаратора служит установленный на входном патрубке распределитель-сепаратор газожидкостного потока, установленный на входном патрубке, состоящий из цилиндрической несущей конструкции и закрепленных на ней двух блоков регулярной насадки. После прохождения первой ступени газовый поток, освобожденный от крупной дисперсной фазы, поступает на горизонтальную тарелку с прямоточными центробежными сепарационными элементами, где происходит очистка от тонкодисперсной фазы за счет центробежной силы. Наличие в сепарационном блоке двух сепараторов СП-101 и СП-102 позволяет обеспечить требуемую степень удаления капельной жидкости различного размера даже при залповом поступлении в него жидкостных пробок из газосборной сети.

5.2. Эффективность сепарации газа

При конструировании внутренних распределительных и сепарирующих устройств использовались результаты численного моделирования полей скоростей газовой фазы в аппаратах, выполненные с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Это позволило при проектировании исключить застойные зоны и циркуляционные токи внутри корпусов аппарата, и в результате обеспечить равномерную загрузку сепарирующих элементов. Пример результатов такого численного моделирования приведен на рис. 5.2.1.

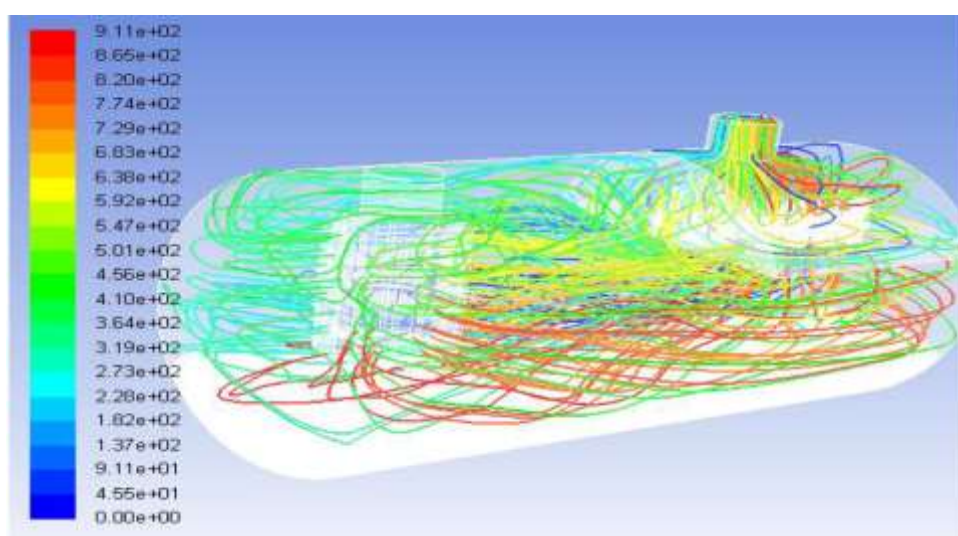


Рис. 5.2.1. Результат численного моделирования поля скоростей в аппарате СП-101.

Расчеты эффективности процесса сепарации дисперсной фазы, выбор количества и конструктивных характеристик сепарирующих элементов выполнялись с применением модели турбулентно-инерционной миграции частиц. Эта модель хорошо согласуется с многочисленными экспериментальными данными, и поэтому используется для моделирования газоочистки в аппаратах различных конструкций. Благодаря работе с этой моделью удалось выбрать оптимальную для наших условий конструкцию сепараторов. Также были выполнены расчеты по определению рабочего диапазона эксплуатации МКУ по производительности в зависимости от давления нагнетания. В графической интерпретации (см. рис. 5.2.2) он представляет область, заключённую между верхней и нижней линиями, соответствующими максимальной и минимальной производительности при различных рабочих давлениях.

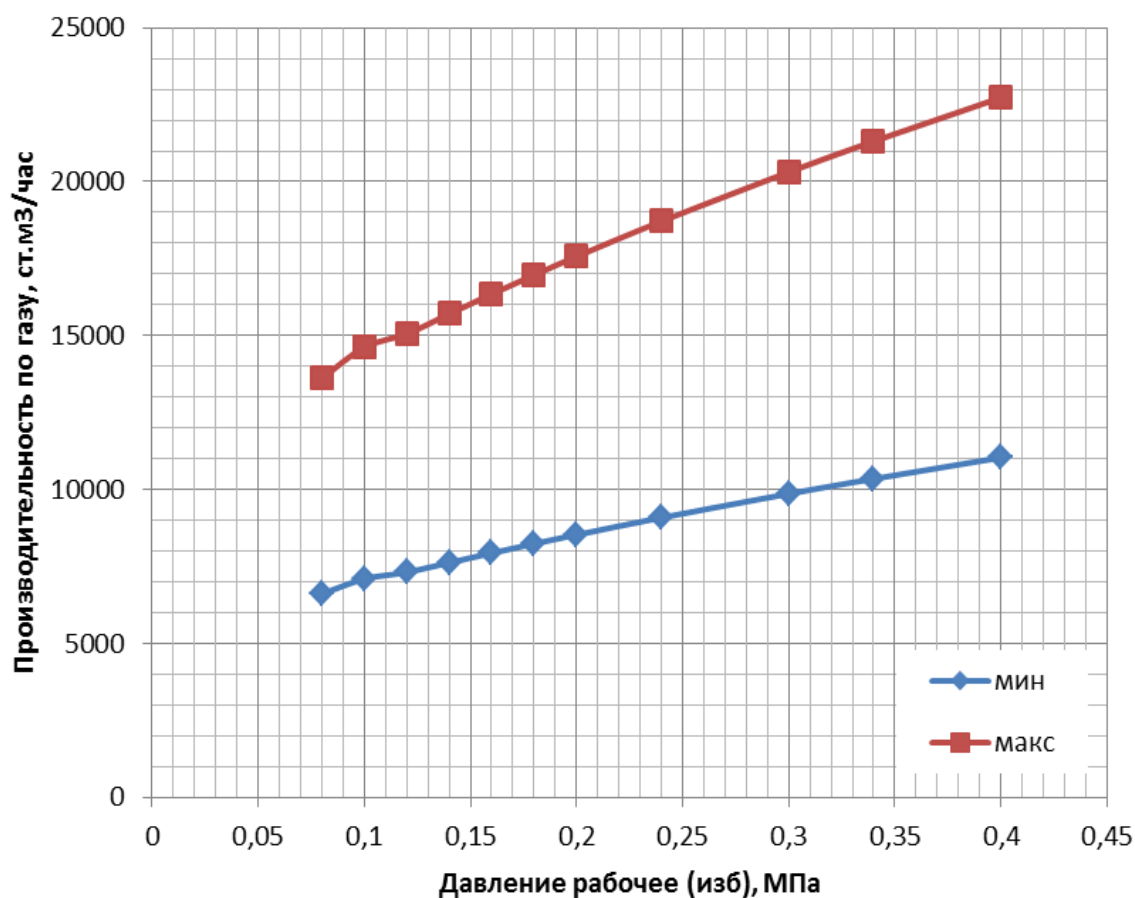


Рис. 5.2.2. Зависимость производительности установки от давления газа

В представленных конструкциях аппаратов (рис. 5.2.1 и 5.2.2) внедрены контактные устройства фирмы ООО «ИВЦ «Инжехим» (г. Казань), апробированные в десятках аналогичных массообменных и сепарационных аппаратах.

Эффективность сепарации мелких капель воды в первой зоне с регулярными пластинами составляет: для капель 5 мкм – 55%; для капель 3 мкм – 45%; при скорости газа в устройстве 10 м/с. Эффективность сепарации в центробежных элементах одной ступени при скорости газа 6 м/с для капель 5 мкм – 85%. В двух ступенях – 97%. Исходя из этих данных, общая эффективность одного газосепаратора легко рассчитывается по правилам теории вероятностей и составляет:

$$\sum \eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_{2,3}) = 1 - (1 - 0,55)(1 - 0,97) = 0,986 \text{ т.е. (98,6\%),}$$

где η_1 – эффективность первой зоны; $\eta_{2,3}$ – эффективность второй и третьей зон. Эффективность двух последовательно работающих газосепараторов улавливания частиц 5 мкм составляет – 99,9% и для частиц 3 мкм – 97,2%.

В таблице 5.1. Приведены результаты опытного пробега МКУ на объекте ООО «Газпром добыча Ямбург» УКПГ-6 (куст скважин 611), проведенного в период с 6 ноября 2018 года по 23 января 2019 г.

Представленные в таблице результаты работы сепарационного оборудования в период опытного пробега подтверждают правильность проведенных расчетов и принятых технических решений по сепарации природного газа. Во время опытного пробега МКУ средняя эффективность сепарации составила 99,55%. Содержание капельной жидкости в потоке газа после сепаратора СП-102, как правило, не превышает 1 мг/м³ (по требованию ТЗ – не выше 5 мг/м³). Средние потери давления на преодоление суммарного гидравлического сопротивления сепарационного блока составили 11 КПа, при допустимом, указанном в опросном листе значении, 30 КПа. В результате достижения такого снижения потерь давления в системе удалось снизить и затраты мощности электропривода компрессора примерно на 4%.

Таблица 5.2.1.

Результаты обследования технологического оборудования модульной компрессорной установки ТАКАТ 78.2-7 М3а ХЛ1 КГС 611 за последние три месяца работы.

№ п/п	Дата измерения	Расход газа, тыс.м ³ /час.	Давление газа на входе в сепарационный блок, МПа	Температура газа на входе в сепарационный блок, °С	Содержание капельной жидкости на входе в сепарационный блок, мг/ст. м ³ .	Содержание капельной жидкости на выходе из сепарационного блока, мг/ст. м ³ .	Потеря давления газа в сепарационном блоке, КПа.	Эффективность сепарации, %.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	06.11.2018	12,8	0,30	3,4	1734	1,0	10,0	99,94
2	09.11.2018	12,8	0,26	0,7	114	1,0	12,0	99,12
3	14.11.2018	13,3	0,28	4,3	316	8,0	13,0	99,68
4	21.11.2018	13,0	0,295	3,1	1836	1,0	11,0	97,46
5	27.11.2018	12,0	0,262	0,6	862	1,0	11,0	99,88
6	30.11.2018	11,0	0,271	0,2	1906	1,0	10,0	99,94
7	05.12.2018	11,7	0,270	0,6	3917	1,0	10,0	99,97
8	03.01.2019	11,0	0,265	1,6	1969	1,0	11,0	99,94
9	11.01.2019	9,9	0,270	- 0,9	4889	1,0	9,0	99,98
10	23.01.2019	11,3	0,264	1,5	854	1,0	14,0	99,58
11	Среднее значение	–	–	–	–	–	11,1	99,55

Выводы

В представленной на конкурс работе обобщен опыт ООО «Газпром добыча Ямбург» по модернизации сепарационного оборудования. Приведены результаты разработки, опытной доводки и практической реализации оборудования модульной компрессорной установки (МКУ), предназначенной для установки на кустах газодобывающих скважин с целью продления периода их эксплуатации на завершающей стадии жизненного цикла Ямбургского месторождения. Необходимость использования МКУ определяется низким пластовым давлением и повышенным водопритоком из газовых залежей. Закупка импортных установок для этих целей исключается в следствие санкционного давления Запада. В связи с этим остро стала необходимость разработки, опытной доводки в условиях реального месторождения и последующего серийного выпуска отечественных МКУ, не уступающих лучшим зарубежным аналогам.

При проектировании и создании таких установок, прежде всего, необходимо решить проблему улова залповых поступлений воды и качественной очистки газа от капельной влаги и твердых частиц для предотвращения попадания их в заполненный маслом компрессор. Для этого необходимы высокоэффективные, и в то же самое время, малогабаритные сепараторы газа, функционирующие в условиях Крайнего Севера России, а точнее, конкретно для уникальных условий и параметров месторождений ООО «Газпром добыча Ямбург».

Поставленную проблему удалось решить группе специалистов ООО «ИВЦ ИНЖЕХИМ» и ООО «Газпром добыча Ямбург», которые использовали для этого и методы математического моделирования, и экспериментальную доводку аппаратов в реальных условиях опытной апробации на кусте газовых скважин № 611, подключенного к УКПГ-6 ООО «Газпром добыча Ямбург». На основе этих работ создан сепарационный блок из двух компактных сепараторов, который устанавливается в экспериментальную МКУ, специально

разработанную ОАО «Казанькомпрессормаш» в рамках программы импортозамещения для газовой промышленности.

В процессе опытной эксплуатации разработанной МКУ были экспериментально подтверждены правильность проведенных расчетов и принятых технических решений. Содержание капельной жидкости в потоке газа после сепаратора СП-102 не превышало 1 мг/м³ (при требовании ТЗ – не выше 5 мг/м³).

Новизну и инновационность представленных в конкурсной работе найденных технических и технологических решений подтверждает патент на изобретение № 2666443 РФ «Сепаратор для очистки газа от примесей».

По результатам проведенной работы по доводке и опытной эксплуатации экспериментальной МКУ запланирована полномасштабная реализация проекта реконструкции Ямбургского НГКМ с изготовлением и установкой 50 единиц отечественных МКУ на других сеноманских кустах газодобывающих скважин. Благодаря этому ожидается продление жизненного цикла эксплуатации Ямбурга до 2054 года.

Список литературы.

1. Эдер Л.В., Филимонова И.В., Комарова А.В., Проворная И.В., Шумилова С.И. Особенности добычи и переработки газа в России на современном этапе // Газовая промышленность. 2018. 311 (777). С. 24-31.

2. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Башаров М.М. Импортзамещение по аппаратам очистки газов от дисперсной фазы в нефтегазохимическом комплексе // Химическое и нефтехимическое машиностроение. 2016. №5. С. 14-16.

3. Кубанов А.Н., Истомина В.А., Федулов Д.М., Исмагилов И.И. и т.д. Требования к сепарационному оборудованию УКПГ месторождений полуострова Ямал // Газовая промышленность. 2018. № 10 (775). С. 34-41.

4. Усачев А.П., Шурайц А.Л., Бирюков А.В., Хомутов А.О., Салин Д.В. Разработка принципов повышения эффективности газовых фильтрующих картриджей грубой и тонкой очистки большой пропускной способности // Газовая промышленность. 2018. № S2. С. 14-22.

5. «Дополнение к технологическому проекту разработки сеноманской газовой залежи Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения», выполнен ООО «ТюменНИИгипрогаз», 2017 год. 1183 с.

6. Патент №2394623 РФ. Газораспределительное устройство / В.З. Минликаев, М.И. Фарахов, Д.А. Яхонтов и др. Заявл. 29.01.2009, опубл. 20.07.2010. Патентообладатель – ООО «Газпром добыча Ямбург». [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.freepatent.ru/patents/2394623>

7. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов; под ред. А.Г. Лаптева. Казань: Отечество, 2013. 454 с.

8. Патент №2666443 ВО1D 45/22. РФ Сепаратор для очистки газа от примесей / Фарахов М.И., Николаев О.А., Агеев А.Л. и др. Заявл. 16.11.2011, опубл. 20.01.2013. Патентообладатель – ООО «Газпром добыча Ямбург». [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.freepatent.ru/patents/2472570>

9. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Сепарационная и энергетическая эффективность насадочных аппаратов очистки газов от аэрозолей // Теоретические основы химической технологии. 2017. № 5. С. 491–498.

10. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Е.А. Лаптева, Т.М. Фарахов Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Часть 1. Гидромеханические процессы. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. 392 с.

11. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Исхаков А.Р. Эффективность сепарирующих контактных устройств в демистерах // Газовая промышленность. 2015. № 11. С. 92–94.

12. Андреев О.П., Арабский А.К., Ахметшин Б.С., Ершов А.А., Зиязов Р.Н., Кудояр Ю.А., Сафронова Н.И. (б.д.). Новые технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи. Материалы XXII Международного конгресса. Сборник трудов. О комплексном подходе при выборе эффективного технологического оборудования очистки газа на поздней стадии разработки месторождений, 22. Калининград.

13. Кудояр Ю.А., Ершов А.А., Сафронова Н.И., Зиязов Р.Н. (2014). О комплексном подходе при выборе эффективного технологического оборудования очистки газа на поздней стадии разработки месторождений. Газовая промышленность(708).