

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет Инженерно-физический
Кафедра Химии и химической технологии
Направление подготовки 18.03.01 – Химическая технология
Направленность (профиль) образовательной программы Химическая техноло-
гия природных энергоносителей и углеродных материалов

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
_____ Ю.А. Гужель
«___»____20__ г

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбцион-
ной осушки природного газа Амурском ГПЗ

Исполнитель студент группы 818 об	_____	Е.Ю. Шубина
	(подпись, дата)	
Научный руководитель доцент, канд.техн.наук,	_____	Ю.А. Гужель
	(подпись, дата)	
Консультант по безопасности жизнедеятельности доцент, канд. техн.наук	_____	А.В. Козырь
	(подпись, дата)	
Нормоконтроль проф., док.хим.наук,	_____	Т.А. Родина
	(подпись, дата)	

Благовещенск 2022

задание

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 60 с., 9 рисунков, 5 таблиц, 49 формул, 25 литературных источников.

ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, ОСУШКА ГАЗА, АДСОРБЦИЯ, ТОЧКА РОСЫ, ГИДРАТЫ, УСТАНОВКА АДСОРБЦИОННОЙ ОСУШКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

На основании научных статей и литературных источников по тематике работы, была изучена технология адсорбционной осушки природного газа. Рассмотрены методы адсорбционной осушки, современные методы глубокой осушки природного газа, рассмотрены требования к осушаемому газу.

Представлено описание технологической схемы установки адсорбционной осушки газа с блоком регенерации действующей на Амурском ГПЗ, выполнен технологический расчёт основного и вспомогательного оборудования, предложены методы повышения эффективности осушки природного газа.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Шубина Е.Ю.</i>			<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>				<i>У</i>	<i>3</i>	<i>60</i>
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>			<i>АмГУ, 818-об гр.</i>			
<i>Утверд.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Литературный обзор	6
1.1 Необходимость осушки газа	6
1.2 Методы осушки газа	9
1.2.1 Осушка прямым охлаждением	10
1.2.2 Абсорбционный метод	11
1.2.3 Мембранный метод	15
1.3 Адсорбционный метод	18
1.3.1 Характеристика адсорбентов	19
1.3.2 Установка адсорбционной осушки	24
1.4 Способы повышения депрессии точки росы	29
2 Технологическая часть	33
2.1 Характеристика сырья и готовой продукции	33
2.2 Описание технологической схемы блока адсорбционной осушки	34
2.3 Технологический расчет процесса осушки природного газа	38
2.4 Расчёт стадии регенерации адсорбента	45
3 Безопасность и экологичность производства	50
3.1 Основные требования безопасности при эксплуатации установки адсорбционной осушки газа	50
3.2 Характеристика опасностей производства	51
3.3 Должностные инструкции оператора установки адсорбционной осушки	54
3.3.1 Защита технологических процессов и оборудования от аварий и работающих от травмирования	56
Заключение	57
Библиографический список	58

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ					
<i>Разраб.</i>	<i>Шубина Е.Ю.</i>							<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Гужель Ю.А.</i>							У	4	60
<i>Н. контр.</i>	<i>Родина Т.А.</i>							<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Утверд.</i>	<i>Гужель Ю.А.</i>									

ВВЕДЕНИЕ

Использование природных ресурсов всегда имело большое значение для человека. На сегодняшний день возрос интерес к «голубому топливу», как к самому экологичному и безопасному топливу. Природный газ широко используется в качестве недорогого топлива с высокой теплотворной способностью для бытовых и промышленных нужд.

Для переработки и использования природного газа в качестве товарного продукта, необходимо миновать ряд промысловых и технологических процессов. Одним из таких процессов является осушка природного газа (ПГ).

Актуальным вопросом является глубина осушки природного газа, ведь даже незначительное количество паров воды в газе усиливает коррозию оборудования, отравляет катализаторы (особенно при содержании в сырье кислых компонентов), также снижает калорийность горючих газов, и что немаловажно вызывает опасность образования газовых гидратов, которые способны забивать трубы, вентили и другое оборудование, это приводит к авариям, нарушению штатной работы установки, как следствие, понижению экономической эффективности производства.

Целью выпускной квалификационной работы является изучение процесса осушки природного газа и методов повышения депрессии температуры точки росы (ТТР) на установке адсорбционной осушки Амурского газоперерабатывающего завода (АмГПЗ).

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Расширить имеющиеся знания о процессе адсорбционной осушки.
2. Проанализировать и систематизировать имеющиеся методы осушки газа.
3. Составить и описать технологическую схему установки осушки газа на АмГПЗ, предложить методы повышения депрессии ТТР.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Шубина Е.Ю.</i>				<i>У</i>	<i>5</i>	<i>60</i>
<i>Провер.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>				<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>						
<i>Утверд.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Необходимость осушки газа

Добываемый на месторождениях природный газ содержит механические примеси в твёрдом, жидком и газообразном состоянии. К твёрдым примесям относятся оксиды алюминия, соединения кремния, железа, кальция, магния, серы и другие; к жидким и газообразным – вода, её пары, образующиеся при высоком давлении, и тяжёлые углеводороды. Примеси, содержащиеся в газе, способствуют развитию коррозии, износу газопроводов и оборудования компрессорных станций (КС), засоряют контрольно-измерительные приборы и увеличивают вероятность аварийных ситуаций на КС, газораспределительных станциях и газопроводах [1].

Присутствие паров воды в углеводородных газах объясняется контактом газа и воды в пластовых условиях, а также условиями их последующей обработки (сепарации, очистки от примесей и др.). Обычно тяжелые углеводородные газы при тех же условиях содержат паров воды меньше, чем легкие.

Наличие в природных газах избыточного количества водного компонента вызывает ряд серьезных проблем при их транспортировке и переработке. Избыточная влага снижает пропускную способность газопроводов и увеличивает мощность, необходимую для транспортировки. При обработке газа за счет снижения температуры в системе происходит конденсация водяных паров и, следовательно, образование в ней водного конденсата, который с компонентами природного газа образует кристаллогидраты (гидраты).

Гидраты формируются включением молекул газа в полости льдоподобного каркаса воды. Образованию газовых гидратов благоприятствуют: наличие влаги в газе, снижение температуры и давления газа, все эти условия выполняются на магистральном газопроводе, и на технологических трубопроводах ком-

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Шубина Е.Ю.</i>			<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>				<i>У</i>	<i>6</i>	<i>60</i>
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

прессорных станции. Для предотвращения образования нежелательных отложений необходимо, чтобы точка росы газа была на 5 °С – 6 °С ниже минимальной температуры газа при транспортировке его по газопроводу.

Гидраты, отлагаясь в газопроводах и технологических аппаратах, увеличивают их гидравлическое сопротивление и снижают пропускную способность вплоть до их полного закупоривания, а иногда приводят к аварийным остановкам. Поэтому прогнозирование образования гидратов является актуальной задачей. Наличие воды в системе усиливает коррозию газопроводов и оборудования КС, особенно при содержании в газе кислых компонентов.

В связи с этим природные, как и нефтяные газы перед подачей в магистральные газопроводы и в цикле переработки подвергаются осушке. При этом осушка газа остается наиболее распространенной технологией подготовки газа, необходимой практически на любом месторождении газа и газоперерабатывающем заводе.

Надёжная работа магистрального газопровода и компрессорных станций напрямую зависит от качества транспортируемого газа. Без осушки газ не может быть подан в систему магистральных газопроводов и потребителям [2].

Требования к газу, поступающему в газопровод, по содержанию воды достаточно жесткие. Его качество регламентируется стандартом «ИТС 50-2017. Переработка природного и попутного газа», в соответствии с которым газ должен удовлетворять требованиям, указанным в таблице 1 [3].

Таблица 1 – Показатели температуры точки росы магистрального газа

Наименование показателя	Значение для макроклиматических районов	
	умеренный	холодный
1	2	3
Температура точки росы по воде при абсолютном давлении 3,92 МПа (40,0 кгс/см ²), °С, не выше:		
- зимний период	-10,0	-20,0
- летний период	-10,0	-14,0

1	2	3
Температура точки росы по углеводородам при абсолютном давлении от 2,5 до 7,5 МПа, °С, не выше:		
- зимний период	-2,0	-10,0
- летний период	-2,0	-5,0

Содержание паров воды в природном газе является определяющим фактором, влияющим на образование гидратов в природном газе. Характеристикой их образования является температура точки росы по влаге и углеводородам.

Температура точки росы (ТТР) – наивысшая температур, при которой при данных давлениях и составе газа могут конденсироваться капли влаги. Чем глубже осушка, тем ниже точка росы, которая обычно составляет, в зависимости от последующего назначения газа, от минус 20 °С до минус 70 °С. Достижимая точка росы газа зависит от способов его осушки – прямым охлаждением, абсорбцией, адсорбцией или комбинированием этих способов.

Глубина осушки газа (депрессия точки росы) – это разность точек росы влажного и сухого газа. Задается в зависимости от того, куда предполагается направлять газ – потребителю или на дальнейшую переработку. Если газ направляют потребителю, то выбор точки росы осушенного газа осуществляют исходя из того, чтобы точка росы газа по влаге была на несколько градусов ниже минимальной температуры, до которой газ может охлаждаться в процессе транспортировки, во избежание конденсации влаги и образования гидратов в трубопроводе. Газ, который подается непосредственно коммунально-бытовым потребителям регламентируется «ГОСТ 5542-2014 Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения» [4].

Если же газ предполагается направлять на дальнейшую переработку, например, на разделение методом низкотемпературной конденсации или ректификации, то точка росы осушенного газа задается исходя из предполагаемой рабочей температуры последующих стадий переработки [5].

Вследствие этого все газы, подаваемые в магистральные газопроводы, подвергаются обязательной сушке от влаги. Глубина осушки, как один из показателей качества природного газа, устанавливается требованиями отраслевых стандартов и технологией процессов дальнейшей переработки газов.

Поэтому, для поддержания штатной работы установки, вода, присутствующая в углеводородных газах в виде паров, удаляется из газа в процессе осушки.

1.2 Методы осушки газа

Осушка обеспечивает непрерывную эксплуатацию оборудования и газопроводов, предотвращая гидратообразование и возникновение ледяных пробок в системах.

Осушка ПГ обычно предшествует транспортировке природного газа по трубопроводам или низкотемпературному разделению газовых смесей на компоненты.

Большинство сырых газов, не прошедших газоподготовку являются влагонасыщенными т.е. содержат максимум воды при фиксированных давлениях и температуре. При этом речь идет не о воде в свободной форме, которая может каплями лететь с газом и удаляется с помощью сепараторов, а о парах воды, для удаления которой требуются другие технологии и соответствующее оборудование [6].

Существует множество методов осушения газа, однако их практическая значимость различна, и не все они применимы для производственных целей. Кроме того, при их выборе необходимо учитывать условия конкретной местности (от этого зависит, например, значение «точки росы»), а также экономическую целесообразность.

Наиболее важные методы осушки газа основаны на абсорбции или адсорбции влаги, а также на ее конденсации при охлаждении газа или комбинирование этих способов. Для проводимого осушительного процесса характерен такой показатель, как ТТР. Выбор способа осушки зависит от состава сырья, требуемом ТТР и дальнейшего использования.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		9

Химические методы – основаны на химической реакции между водой и гигроскопическими солями, обычно хлоридов металлов (CaCl_2 и др.) Химическая реакция между водой и химическими веществами может быть столь полной, что образующиеся при ней продукты гидратации будут иметь чрезвычайно низкую упругость водяных паров. Имеются химические реагенты, обеспечивающие практически полную осушку газа. Однако эти реагенты очень трудно или вообще невозможно регенерировать, что делает их непригодными для использования в качестве промышленных осушителей [7]. Они широко применяются при лабораторном определении влажности газов.

Физические методы:

- осушка охлаждением;
- абсорбционный – осушка газа происходит при помощи жидких погло-
тителей;
- адсорбционный – осушка газа происходит при помощи твердых погло-
тителей;
- мембранный – на основе эластомеров или стеклообразных полимеров.

1.2.1 Осушка прямым охлаждением

При охлаждении газа при постоянном давлении избыточная влага конденсируется, а точка его росы соответственно снижается. На этом явлении основана осушка газа охлаждением, причем нижний предел охлаждения газа ограничивается условиями образования гидратов.

Количество влаги в насыщенном природном газе уменьшается при увеличении давления или снижении температуры. Таким образом, теплый или горячий газ, насыщенный водяным паром, можно частично осушить путем прямого охлаждения. Газ после сжатия обычно охлаждают, вследствие чего из него удаляется вода. Если при охлаждении не достигается минимум температуры, которую газ будет иметь при дальнейшем движении по системе при данном давлении, конденсация влаги газа в дальнейшем не будет исключена.

Газ охлаждают путем расширения, когда необходимо снижать его давление, а также пропуская через холодильные установки. Процесс расширения с

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		10

целью понижения температуры осуществляется двумя способами: дросселированием (изоэнтальпийный процесс) и детандированием (изоэнтропийный процесс) [8]. Самостоятельного применения для осушки газа такой метод не нашел и применяется обычно в комбинации с другими методами (для предварительного удаления основного количества влаги).

На данный момент, в промышленности, для удаления влаги из газа, как нежелательного компонента, существует два основных метода осушки газа: адсорбция и абсорбция.

1.2.2 Абсорбционный метод

В основе данного метода лежит использование жидких абсорбентов – специальных влагопоглощающих реагентов, которые поглощают влагу из газа при непосредственном контакте внутри аппарата.

В качестве абсорбентов чаще всего используют растворы диэтиленгликоля (ДЭГ), триэтиленгликоля (ТЭГ). В ходе процесса осушаемый газ на тарелках абсорбера контактирует в противотоке с подаваемым сверху гликолем. В процессе абсорбционной осушки газа происходит переход вещества или группы веществ из газовой или паровой фазы в жидкую.

Глубина осушки газа очень сильно зависит от концентрации гликоля, с которым газ контактирует в абсорбере. Абсорбция гликолем с концентрацией гликоля 96 % – 97 % позволяет достичь депрессии точки росы осушаемого газа равную 30 °С. Метод широко применяю для осушки на головных сооружениях магистральных газопроводов и газоперерабатывающих заводах.

Жидкий абсорбент, пригодный для осушки природного газа, должен удовлетворять ряду требований, важнейшими из которых являются: низкая стоимость; некоррозийность; устойчивость к компонентам газа; устойчивость во время регенерации; простота регенерации; низкая или средняя вязкость; низкая упругость паров при температуре контакта; низкая растворяющая способность по отношению к природному газу и углеводородным жидкостям и низкая растворимость в них; низкая склонность к образованию пены или эмульсий. Всем этим требованиям в той или иной степени удовлетворяют два органических со-

единения – ДЭГ и ТЭГ.

Классификация установок осушки газа с использованием жидких поглотителей представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Классификация абсорбционных установок осушки газа

Технологическая схема установки абсорбционной осушки в барботажном аппарате представлена на рисунке 2.

В установках осушки первого типа влажный газ, очищенный в пылеуловителе от механических примесей, поступает в низ абсорбера 3. Сверху в колонну подается осушенный поглотитель. После выхода с глухой тарелки низа колонны насыщенный абсорбент проходит последовательно теплообменник 5, выветриватель 7, теплообменник 6 и поступает в отпарную колонну (десорбер) 10. Десорбер обычно имеет от 10 до 16 тарелок колпачкового или клапанного типа и одну глухую тарелку внизу колонны. Стекающий на глухую тарелку абсорбент самотеком поступает в низ выносного испарителя 11, где нагревается за счет тепла водяного пара. Вышедший из испарителя абсорбент подается в колонну 10, а также через систему теплообменников 5 и 6 и холодильников 4 поступает в промежуточную емкость 8, откуда насосом направляется на орошение абсорбера 3. Пары воды и газы сверху колонны 10 проходят холодильник-конденсатор 13. Часть сконденсировавшейся влаги используется для орошения колонны, а избыток сбрасывается в канализацию. Несконденсировавшиеся пары и газы стравливаются в атмосферу. Абсорбер работает при давлении, до которого сжат газ, а десорбер обычно при атмосферном давлении или под ваку-

умом. Для уменьшения уноса гликоля с осушенным газом часто в верхнюю часть абсорбера добавляют секцию отмывки газа пентаном, устанавливают отбойники, для коагуляции пены добавляют в гликоль ингибиторы пенообразования.

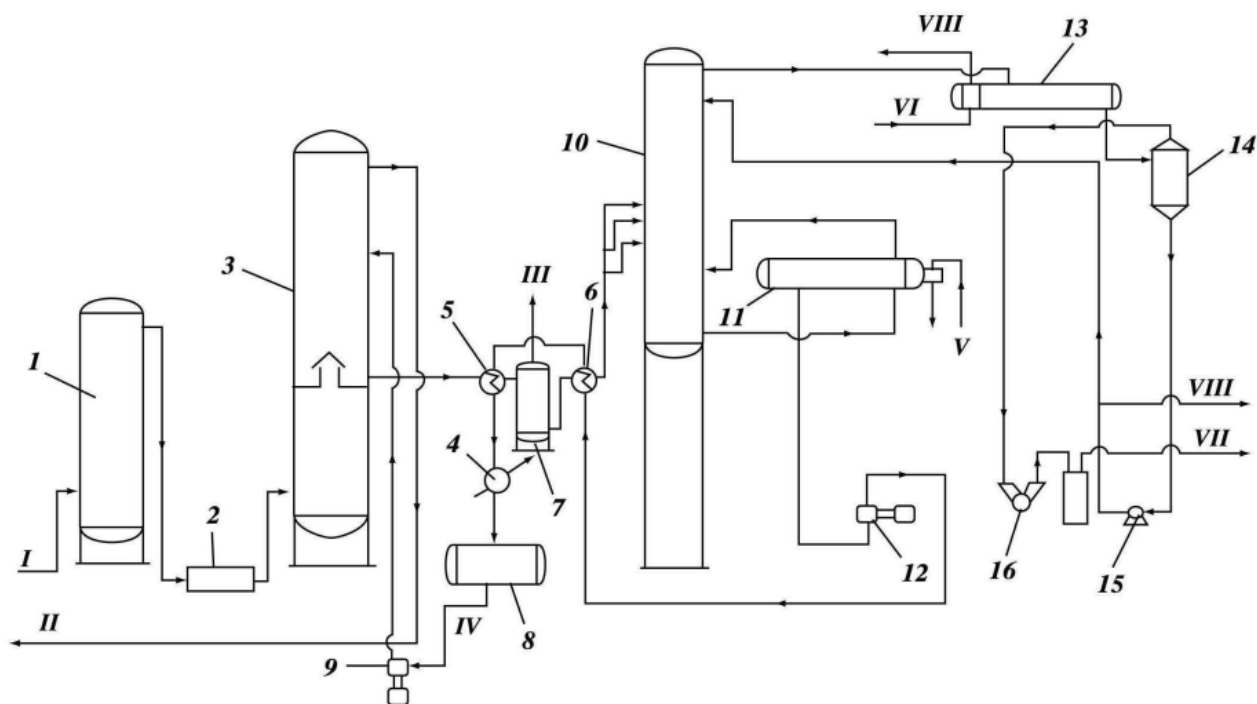


Рисунок 2 – Технологическая схема промышленной установки абсорбционной осушки газа:

1 – пылеуловитель; 2 – замерный пункт; 3 – абсорбер; 4 – холодильник; 5, 6 – соответственно первая и вторая секции теплообменников; 7 – выветриватель; 8 – промежуточная емкость ДЭГ; 9, 12 и 15 – насосы; 10 – десорбер; 11 – испаритель; 13 – конденсатор; 14 – емкость конденсата; 16 – вакуум-насос. Поток: I – сырой газ с промысла; II – осушенный газ; III – газы выветривания; IV – регенерированный ДЭГ; V – водяной пар; VI – охлаждающая вода; VII – выброс паров в атмосферу; VIII – выброс конденсата в канализацию

Широкое распространение получили распыливающие абсорберы. Эффективность процесса определяется степенью распыления раствора, осуществляемого специальными форсунками. Распыленная жидкость создает большую поверхность контакта фаз, а большие скорости газа обеспечивают интенсивный

массаобмен и хорошее распределение частиц в потоке. Наилучший массаобмен происходит при высоких относительных скоростях газа и капель, что достигается путем впрыска гликоля навстречу газовому потоку. Пределом дробления частиц жидкости является образование тумана, выделение частиц которого лимитируется существующими конструкциями сепараторов.

В состав установки осушки газа с впрыском гликоля входят три основных узла: впрыск гликоля, трехфазный разделитель и регенерация гликоля. Эффективность осушки зависит от площади контакта газ/гликоль, т.е. от степени распыления осушителя. Для тонкого распыления гликоля применяют специальные распылительные сопла. По мере движения газа внутри труб происходит укрупнение капель жидкости, что облегчает разделение осушенного газа и насыщенного осушителя, а также сконденсированных углеводородов. Десорбцию воды проводят в регенераторе гликоля. Принципиальная схема промышленной установки представлена на рисунке 3.

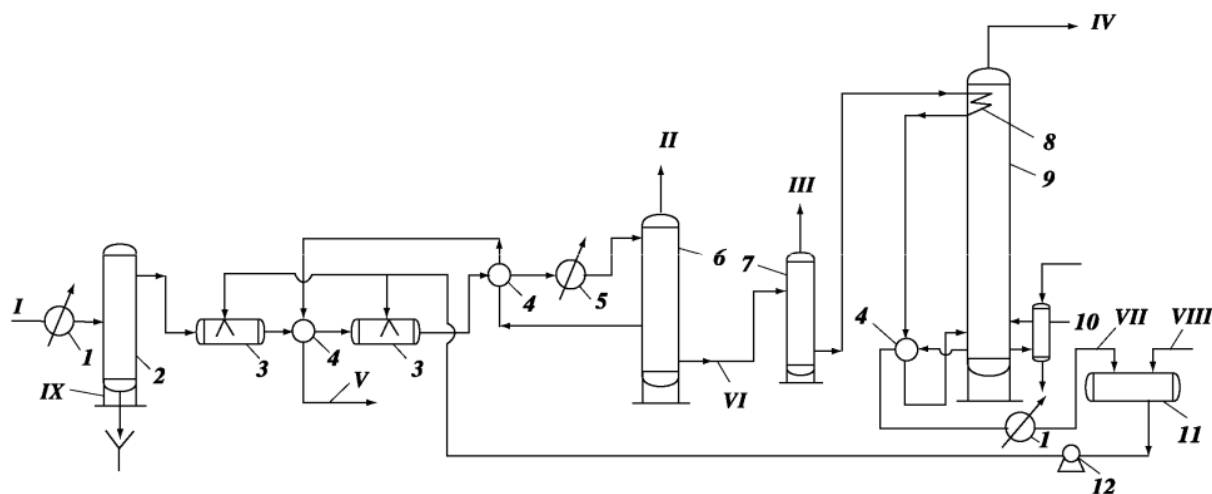


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки осушки газа с впрыском гликоля:

1 – водяной холодильник; 2 – водоотделитель; 3 – узел впрыска гликоля; 4 – теплообменник; 5 – пропановый холодильник; 6 – трехфазный разделитель; 7 – выветриватель; 8 – змеевик; 9 – отпарная колонна; 10 – кипятыльник; 11 – емкость для гликоля; 12 – насос. Поток: I – сырой газ; II – осушенный газ; III – газы выветривания; IV – пары воды; V – углеводородный конденсат; VI – насыщенный гликоль; VII – регенерированный гликоль; VIII – свежий гликоль; IX – вода

Сжатый сырой газ проходит водяной холодильник 1, водоотделитель 2, узел впрыска гликоля 3 и теплообменник 4. Затем газ поступает в пропановый холодильник 5 и далее в трехфазный разделитель 6. Осушенный газ и углеводородный конденсат из трехфазного разделителя направляются на дальнейшую переработку, а насыщенный гликоль на регенерацию. После прохождения выветривателя 7 насыщенный водой гликоль поступает в змеевик 8, смонтированный в верхней части отпарной колонны 9. В змеевике охлаждаются и частично конденсируются пары воды в колонне, что обеспечивает ее орошение. Затем насыщенный гликоль через теплообменник поступает в куб отпарной колонны. Отпаренные пары воды сбрасываются в атмосферу, а регенерированный гликоль через регулятор уровня поступает в теплообменник и далее через водяной холодильник 1 стекает в емкость 11. Из емкости регенерированный гликоль насосом 12 прокачивается через фильтр и направляется на узел впрыска.

Метод впрыска в сочетании с охлаждением газа позволяет значительно понижать точку росы, одновременно осушать его и образующий газовый конденсат, а также использовать в качестве осушителя гликоли с концентрацией от 70 до 80 %.

Недостаток метода осушки впрыском гликоля заключается в больших потерях осушителя с газовым конденсатом. Осушка газа методом абсорбции сводит к минимуму потери гликоля, однако требует более высокой степени его регенерации (до 95-99 %) [8]. На данный момент широко применяется метод абсорбционной осушки газа, так как адсорбция сложнее поддается автоматизации, поэтому является более затратной. Также жидкие поглотители имеют хорошую растворимость в воде, низкую стоимость, хорошую антикоррозионность, простоту регенерации.

1.2.3 Мембранная осушка

Мембранный метод разделения основывается на различной проницаемости того или иного компонента газообразной или не жидкой среды, как представлено на рисунке 4. Поток, который проходит через мембрану, называется фильтратом или пермеатом, а задержанный – концентратом или ретентатом.

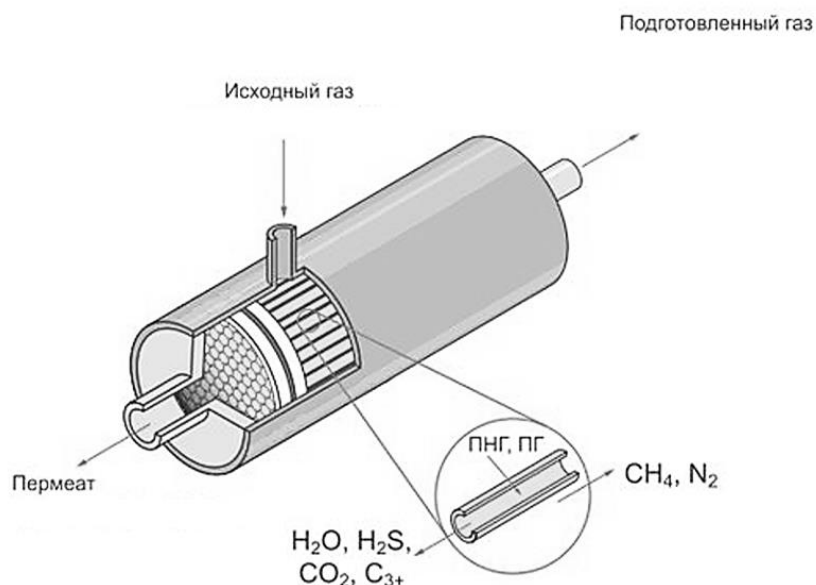


Рисунок 4 – Схема мембранного разделения газа

Отличительными особенностями мембран являются полуволоконная конфигурация, разная последовательность скоростей проникновения компонентов газа, высокая химическая устойчивость практически ко всем компонентам углеводородных смесей и высокая селективность. При подготовке попутного нефтяного и природного газа все нежелательные примеси концентрируются в потоке низкого давления, а подготовленный газ выходит практически: без потери давления [9].

Процесс мембранного разделения включает в себя несколько последовательных стадий:

1. Перенос компонентов исходного потока к мембране;
2. Сорбция этих компонентов в мембране;
3. Транспорт их через мембрану;
4. Десорбция из мембраны;
5. Отвод продуктов разделения с противоположной стороны мембраны.

На каждой стадии процесса перенос вещества встречает определенное сопротивление. В случае газофазного проникания стадии 1 и 5 исключаются, а сопротивление на стадиях 2 и 4 довольно незначительно. Транспорт вещества через полимерную мембрану связан с диффузированием и растворением его в мембране, т.е. является результатом сложных молекулярных взаимодействий.

Мембранный процесс имеет ряд особенностей, требующих специальных условий для его применения:

1. Один из продуктов разделения имеет пониженное давление;
2. Организация многостадийного/противоточного процесса связана со значительными затратами энергии для компрессии потоков проникшего низконапорного газа;
3. Ограниченная пропускная способность мембранных аппаратов при больших расходах требует секционирования установки, что снижает ее надежность и требует использования специальных систем контроля;
4. Наличие в природных газах примесей, ухудшающих работу мембран (ингибиторы коррозии и гидратообразования, влага, тяжелые углеводороды), требует дополнительной очистки газа перед подачей на мембраны и использования мембранных материалов повышенной химической стойкости.

Мембранные технологии чаще всего используются при подготовке природных и попутных нефтяных газов для удаления из них сероводорода, тяжелых углеводородов, влаги, гелия. Следует отметить, что опыт применения мембранного разделения газов для подготовки природного и нефтяного газа мал из-за низкой энергоэффективности.

В настоящее время за рубежом (главным образом в США) широкое внедрение мембранных процессов разделения большой производительности в промышленности обусловлено, развитием в технологии добычи нефти и газа с закачкой в нефтяные пласты CO_2 для поддержания пластового давления и повышения нефтеотдачи. В России нечасто используют закачку CO_2 для увеличения нефте- и конденсатоотдачи. В связи с этим мембранные процессы в российской газовой и нефтяной промышленности пока не нашли широкого применения [10].

По сравнению с используемыми технологиями мембранный метод единственный позволяет одновременно в рамках одного технологического аппарата добиться снижения ТТР как по воде, так и по углеводородам.

Применение мембранных установок осушки газа позволяет минимизировать эксплуатационные и капитальные затраты на осушку, однако сама по себе мембрана является очень дорогостоящей [9].

1.3 Адсорбционный метод

Наряду с осушкой газов абсорбционным методом широкое распространение на промыслах, газо- и нефтеперерабатывающих заводах нашел адсорбционный метод на основе твердых осушителей (адсорбентов) газов и жидкостей. Адсорбенты предпочтительны, когда необходимо получить низкие ТТР природного газа, подвергаемого затем низкотемпературной переработке.

Адсорбционная осушка газа – технологический процесс, заключающийся в избирательном поглощении порами поверхности твердого адсорбента молекул воды из газа, с последующим извлечением их из пор посредством применения внешних воздействий. Процесс адсорбционной осушки газа позволяет достигать депрессия точки росы в 100 °С (минимальная точка росы, достигаемая адсорбцией до минус 90 °С).

Установки осушки адсорбционным методом обладают рядом отличительных особенностей по сравнению с абсорбционным методом, а именно:

- достигается весьма высокая степень осушки газа вне зависимости от его параметров – ТТР до минус 90 °С и ниже;
- повышение давления в системе мало влияет на процесс адсорбции,
- компактность установки, аппаратура несложна в изготовлении и практически нет потерь химических веществ;
- малые капитальные затраты для установок малой мощности.

Недостатками метода являются большие расходы на адсорбент, высокое сопротивление потоку газа и затраты на строительство установок большой мощности [8].

Адсорбция – это массообменный, диффузионный процесс поглощения компонентов из газовой или жидкой фазы поверхностью твердого тела. Твердое тело, которое поглощает вещество, называется адсорбентом. Процесс адсорб-

ции (как и другие процессы массопередачи) избирательный и обычно обратимый. Благодаря обратимости процесса становится возможным выделение поглощенных веществ из адсорбента, или проведение процесса десорбции.

Механизм адсорбции отличается от механизма абсорбции, вследствие того, что извлечение веществ осуществляется твердым, а не жидким поглотителем. Каждый из этих сорбционных процессов имеет свои области применения, где его использование дает больший технико-экономический эффект.

Адсорбция применяется главным образом при небольших концентрациях поглощаемого вещества в исходной смеси, когда требуется достичь практически полного извлечения адсорбтива. В тех случаях, когда концентрация поглощаемого вещества в исходной смеси велика, обычно выгоднее использовать абсорбцию.

Различают физическую и химическую адсорбцию. Физическая адсорбция обусловлена взаимным притяжением молекул адсорбата и адсорбента под действием сил Ван-дер-Ваальса (силами молекулярного взаимодействия) и не сопровождается химическим взаимодействием адсорбированного вещества с поглотителем. При химической адсорбции, или хемосорбции, в результате химической реакции между молекулами поглощенного вещества и поверхностными молекулами поглотителя возникает химическая связь [11].

1.3.1 Характеристика адсорбентов

Адсорбенты – твердые тела с высокоразвитой пористой структурой и значительной удельной поверхностью. Радиус пор в адсорбентах может достигать нескольких ангстрем, удельная поверхность может составлять от 50 м² /г до 2000 м² /г и более.

Наиболее важной характеристикой адсорбентов является их активность (поглотительная способность) – емкость адсорбента (а) – величина, показывающая количество адсорбированного вещества по отношению к количеству адсорбента при данной температуре, давлении и концентрации извлекаемого компонента в исходной газовой или жидкой фазе:

$$a = G_A/g_A, \quad (1)$$

где G_A – количество поглощенных компонентов;

g_A – количество адсорбента.

Активность (емкость) адсорбентов выражают в г/г, $\text{см}^3/\text{г}$, $\text{см}^3/\text{см}^3$, моль/г, моль/ см^3 . Адсорбционная активность может быть статической и динамической.

Статическая адсорбционная активность показывает количество адсорбированного вещества по отношению к количеству адсорбента в условиях равновесия при данной температуре, давлении и концентрации извлекаемого компонента в исходной газовой или жидкой фазе.

Динамическая адсорбционная активность показывает отношение адсорбированного вещества к количеству адсорбента в условиях движения потока газа или жидкости через стационарный слой адсорбента при данной температуре, давлении и концентрации извлекаемого компонента в исходной газовой или жидкой фазе до проскока сорбируемого вещества, т.е. до момента, когда концентрации сорбируемого компонента на выходе и входе потока будут равны.

Другой важной характеристикой адсорбентов является пористость. Одной из важных характеристик пористости адсорбентов является величина удельной поверхности площадь поверхности, отнесенная к единице массы твердого тела.

Не менее важной характеристикой является объем пор – свободное пространство внутри твердого тела, приходящееся на единицу его массы. Пористость адсорбентов непосредственно связана с другой характеристикой – размером пор. Поры могут значительно различаться как по размерам, так и по форме внутри одного адсорбента, а еще более существенно – от пор другого адсорбента. По форме поры могут быть цилиндрическими (открытыми, закрытыми), щелеобразными, бутылкообразными, сфероидальными [12].

Важными эксплуатационными характеристиками адсорбентов является их насыпная масса – количество адсорбента в единице объема ($\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{г}/\text{см}^3$) и механическая прочность гранул на раздавливание ($\text{кг}/\text{гранула}$) и износ в динамическом режиме (%).

Сущность адсорбции заключается в том, что на большой удельной поверхности адсорбента удерживаются (конденсируются) молекулы воды. Чем больше

удельная поверхность (т. е. выше пористость) адсорбента, тем больше влаги он может поглощать. При повышении температуры увеличивается энергия адсорбированных молекул и они могут освобождаться из адсорбента. На этом основан принцип регенерации адсорбентов.

Твердые осушители, применяемые в промышленных установках, должны обладать такими свойствами как:

- достаточная поглотительная способность, зависящая от величины поверхности и объёма пор;
- глубина поглощения влаги, зависящая от размера пор;
- полнота и простота регенерации;
- высокая механическая прочность (не разрушаться под действием массы собственного слоя, устойчивость против дробления и распыления);
- прочность от истираемости (не измельчаться от движения газа в слое адсорбента);
- химическую инертность (т. е. отсутствие способности вступать в химические реакции с компонентами газа и водой),
- устойчивость при температурных изменениях;
- стабильность упомянутых выше показателей при большом количестве рабочих циклов [13]. По химическому составу все адсорбенты можно разделить на углеродные (активированные угли) и минеральные (цеолиты, оксиды алюминия, алюмосиликаты, силикагели).

Для осушки углеводородных газов в промышленных установках чаще всего применяют силикагели и цеолиты (молекулярные сита).

Силикагели – продукты обезвоживания геля кремниевой кислоты, промытые от примесей, высушенные и прокаленные при определенных температурах. В зависимости от использованного для производства сырья промышленные силикагели содержат некоторое количество окислов алюминия, железа, кальция и других металлов. Технический силикагель содержит около 99,5 % SiO_2 . В зависимости от формы зерен технический силикагель выпускают гранулированным и кусковым, а в зависимости от пористости структуры (радиуса пор, удельного

объема и удельной поверхности пор) – мелкопористым и крупнопористым.

Гранулированный мелкопористый силикагель выпускают двух марок: КСМГ (крупный), ШСМГ (шихта).

Гранулированный крупнопористый силикагель выпускают четырех марок: КСКГ (крупный), ШСКГ (шихта), МСКГ (мелкий), АСКГ (активированный).

Кусковой мелкопористый силикагель выпускают четырех марок: КСМК (крупный), ШСМК (шихта), МСМК (мелкий), АСМК (активированный) [14].

Основные преимущества силикагелей:

– низкая температура, требуемая для регенерации (110 °С – 200 °С) и, как следствие, более низкие энергозатраты, чем при регенерации других промышленных минеральных сорбентов (окись алюминия, цеолиты);

– высокая прочность по отношению к истиранию и относительно низкая себестоимость.

Необходимо отметить, что на динамическую активность силикагеля сильно влияет скорость потока газа: при повышении скорости газа динамическая активность сорбента падает.

В эксплуатационных условиях, когда возможно превышение номинальной производительности по газу, это свойство силикагеля отрицательно сказывается на глубине осушки. Кроме того, при осушке силикагелем происходит постоянное увеличение содержания влаги в осушенном газе в течение цикла адсорбции, вследствие чего не удается получить стабильную глубину осушки потока газа. Для тонкой очистки гелиевого концентрата от азота, водорода и инертных газов адсорбционный процесс ведут при низких температурах и высоких давлениях.

В качестве адсорбента также находят применение активированные угли. Они представляют собой мелкопористые вещества в виде зерен, состоящие в основном из аморфного углерода с примесями золы и ряда смолистых веществ. Активированные угли отличаются высокой механической прочностью, получают удалением из угля смолистых веществ.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		22

Другим типом неорганических адсорбентов, широко применяемых в технике для осушки различных сред и для других целей, являются активный оксид алюминия в модификации $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Достоинствами оксида алюминия являются: термическая стабильность, относительная легкость получения, а также доступность сырья и др. Высокая активность оксида алюминия при взаимодействии с полярными адсорбтивами (прежде всего, парами воды) обеспечивает глубокую осушку газов до точки росы минус $60\text{ }^\circ\text{C}$ и ниже. Важной положительной способностью оксида алюминия является его водостойкость. Именно этот показатель часто определяет выбор оксида алюминия в качестве адсорбента для осушки и переработки сред, в которых присутствует капельная влага. Недостатком этого адсорбента является невысокая адсорбционная способность.

Цеолиты – алюмосиликаты, содержащие в своем составе оксиды щелочных и щелочноземельных металлов, отличаются строго регулярной структурой пор.

Общая химическая формула цеолитов: $\text{Me}_{2/n}\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{SiO}_2\cdot y\text{H}_2\text{O}$, где Me – катион щелочного металла, а n – его валентность. В природе в качестве катионов обычно в состав цеолитов входят натрий, калий, кальций, реже барий, стронций и магний.

Синтетические цеолиты – адсорбенты, размеры пор которых соизмеримы с размерами молекул. Такие поглотители являются самым дорогим видом адсорбентов. Они обеспечивают очень низкую точку росы при высокой адсорбционной способности, прочны при контакте с капельной влагой. Эксплуатационные расходы при их использовании наиболее низкие.

Наиболее широкое распространение получили синтетические молекулярные сита, полученные на основе щелочноземельных алюмосиликатов. За счет катионного обмена обеспечиваются однородные размеры пор в адсорбенте. Эти свойства обеспечивают так называемое «молекулярное просеивание» отдельных молекул.

Очень важным показателем, влияющим на адсорбционную способность

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		23

большинства адсорбентов, является относительное насыщение осушаемого газа. Чем выше влажность газа, тем выше поглотительная способность адсорбентов. Но цеолит составляет исключение и практически имеет постоянную адсорбционную способность при любой относительной влажности газа. Благодаря этому цеолиты проявляют высокую активность при низких парциальных давлениях паров воды; следовательно, эти адсорбенты могут применяться для осушки газов с низким содержанием воды. Кроме того, молекулярные сита сохраняют высокую активность в широком интервале температур.

Скорость адсорбции на цеолитах велика, что обуславливает малую длину рабочей зоны слоя сорбента, поэтому цеолиты способны работать при более высоких скоростях газа (до 0,3 м/с) без заметного изменения динамической активности и качества обработки газа [11].

При осушке газов, наиболее надежными в работе являются цеолиты, силикагели.

1.3.2 Установка адсорбционной осушки

Процесс адсорбции газов проводится на установках периодического действия в адсорберах разной конструкции. Адсорбционные процессы можно проводить периодически в аппаратах с неподвижным слоем и непрерывно в аппаратах с движущимся слоем адсорбента [15].

Основным аппаратом процесса остаётся установка периодического действия, в которой адсорбер с неподвижным слоем адсорбента после окончания стадии осушки, определяемой исчерпыванием емкости адсорбента, переключается на стадию десорбции. В рабочий цикл периодического процесса обычно включают ряд таких дополнительных стадий как: охлаждение адсорбента, повышение и сброс давления и т.д. Широкое применение автоматизации на адсорбционных установках позволило исключить ручной труд при управлении процессом.

Адсорберы с неподвижным слоем адсорбента представляют собой вертикальные аппараты, заполненные гранулированным адсорбентом. Установка адсорбционной осушки состоит, как минимум, из двух адсорбционных аппаратов.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		24

Осушка газов от воды осуществляется в адсорберах периодического действия следующим образом: вначале влажный газ пропускают через адсорбер, где происходит процесс улавливания водного компонента адсорбентом и насыщение последнего. Затем подачу газа в этот адсорбер прекращают и подают его в другой адсорбер. А первый адсорбер ставят на регенерацию. Затем цикл повторяют. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 5.

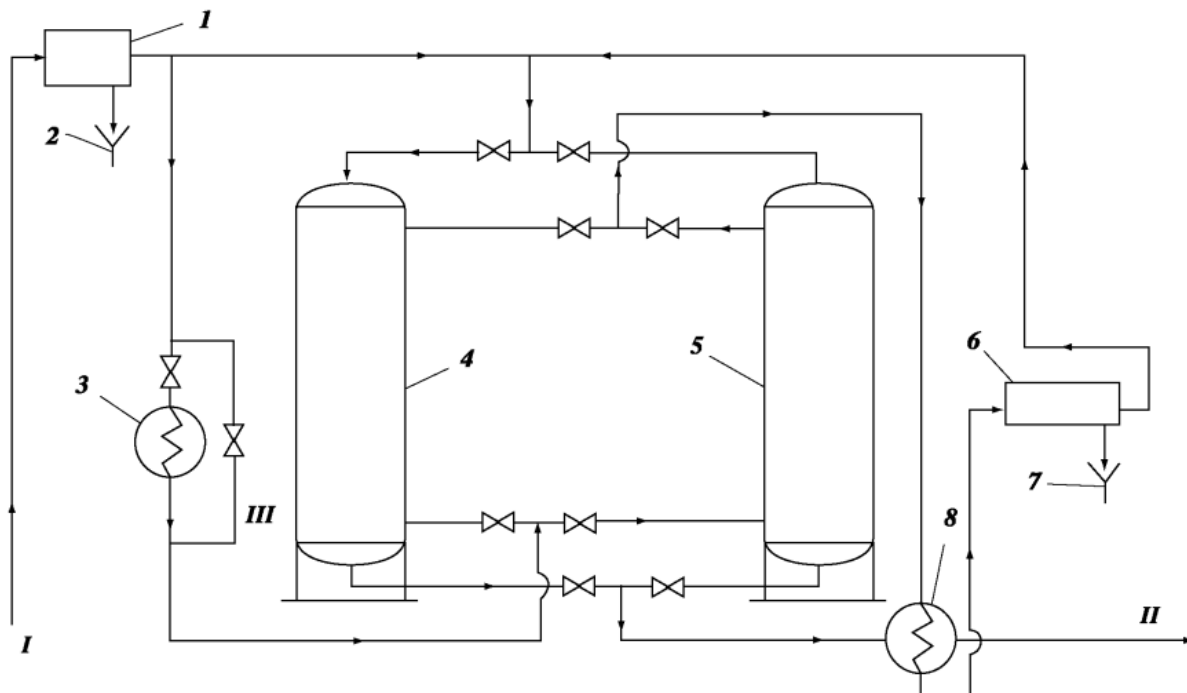


Рисунок 5 – Технологическая схема осушки газа твердыми поглотителями: 1 – каплеотбойник; 2, 7 – сбор стоков; 3 – трубчатый нагреватель; 4, 5 – адсорберы; 6 – сепаратор; 8 – теплообменник. Поток: I – влажный газ; II – осушенный газ; III – обводная линия

Влажный газ, пройдя через каплеотбойник 1, поступает сверху в один из адсорберов и проходит его. Другой адсорбер в это время находится на стадии регенерации или охлаждения. Осушенный газ поступает на дальнейшую переработку или в газопровод. Часть исходного газа, пройдя через трубчатый нагреватель 3, направляется в низ другого адсорбера для регенерации осушителя. Газ с регенерации проходит теплообменник 8 для охлаждения, сепаратор 6 для отделения воды и смешивается с основным потоком влажного газа.

На стандартной установке адсорбционной осушки технологический про-

цесс представляет собой последовательное выполнение следующих этапов в рамках одного полного цикла работы:

1. Адсорбция при температуре от 35 °С до 50 °С, давлении 8 – 12 МПа, длительности контакта газа с адсорбентом не менее 10 с (скорость газа в аппарате 0,15 – 0,30 м/с). Длительность адсорбции выбирают, исходя из адсорбционной емкости поглотителя, начальной и конечной влажности газа, загрузки адсорбента в аппарате.

2. Нагрев адсорбента, который производится после переключения аппарата с режима адсорбции на десорбцию. Нагрев ведется горячим газом из трубчатого нагревателя со скоростью не более 60 °С в час. Время, затрачиваемое на нагрев, составляет 60 % – 0,65 % от времени периода адсорбции.

3. Десорбция – вытеснение из пор адсорбента поглощенной воды и восстановление его адсорбционной активности. Она начинается, когда температура адсорбента достигает 160 °С – 180 °С (для силикагелей) или 280 °С – 290 °С (для цеолитов). Горячий газ в периоды нагрева и десорбции проходит слой адсорбента в направлении, противоположном направлению осушаемого газа в периоде адсорбции (т.е. снизу-вверх);

4. Охлаждение адсорбента начинают после завершения десорбции и переключения аппарата на режим адсорбции (осушки). Охлаждение ведут исходным холодным газом. Период охлаждения занимает 35 % – 40 % от времени, затрачиваемого на адсорбцию.

5. Далее, цикл повторяется.

Эффективность осушки зависит от нескольких факторов:

1. Качества адсорбента.
2. Термодинамических параметров адсорбции.
3. Равномерности распределения газового потока по сечению адсорбера.
4. Термодинамические параметры регенерации адсорбента.
5. Состава, влажности и наличия примесей в осушаемом газе [8].

Параметры процесса, учитываемые при расчете установок осушки газа твердым поглотителем, определяются рассмотренными выше свойствами по-

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		26

глотителей и технико-экономическими показателями процесса.

В большинстве адсорбционных осушающих установок насыщенный водой адсорбент регенерируют горячим газом. Если правильно установлена температура слоя адсорбента в конце регенерации, термический метод обеспечивает высокую степень десорбции. Для регенерации применяют либо часть осушаемого (или осушенного) газа, либо инертный газ со стороны.

В соответствии с системой регенерации установки осушки газа подразделяют на установки с открытым и закрытым циклом. В установках с открытым циклом газ на стадии регенерации однократно проходит через охлаждаемый и (или) нагреваемый адсорбер, после чего удаляется из системы или примешивается к исходному газу. В установках другого типа – с закрытым циклом – десорбцию влаги проводят при пропускании через адсорбент горячего газа, циркулирующего в замкнутом контуре с помощью газодувки. В технологической нитке циркуляции газ охлаждают, при этом из него выделяется влага, затем его снова нагревают и возвращают в адсорбер, находящийся на стадии регенерации.

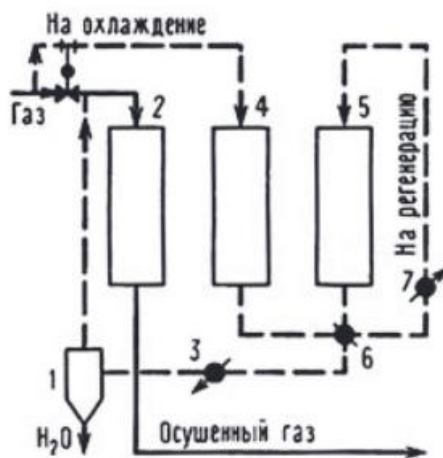


Рисунок 6 – Схема установки осушки газа с открытым циклом при последовательности стадии охлаждение – нагрев:

1 – сепаратор; 2 – адсорбер на стадии осушки; 3 – холодильник; 4 – адсорбер на стадии охлаждения; 5 – адсорбер на стадии регенерации; 6 – теплообменники; 7 – нагреватель

В схеме с открытым циклом (рисунок 6) осушку газа ведут в адсорбере 2,

часть исходного газа отбирают и пропускают последовательно через адсорбер 4, находящийся на стадии охлаждения, а затем после нагрева – через адсорбер 5, в котором производится десорбция влаги.

После охлаждения газа регенерации и выделения из него в сепараторе 1 влаги поток примешивают к исходному газу.

В другой схеме (рисунок 7) охлаждение адсорбера 2 ведут частью осушенного газа. Выходящий из адсорбера 4 поток соединяют с основным потоком осушенного газа. Схема потоков и оборудования на стадии нагрева адсорбера 5 не отличается от описанных выше. Для установок с открытым циклом характерны сравнительно высокие степени осушки.

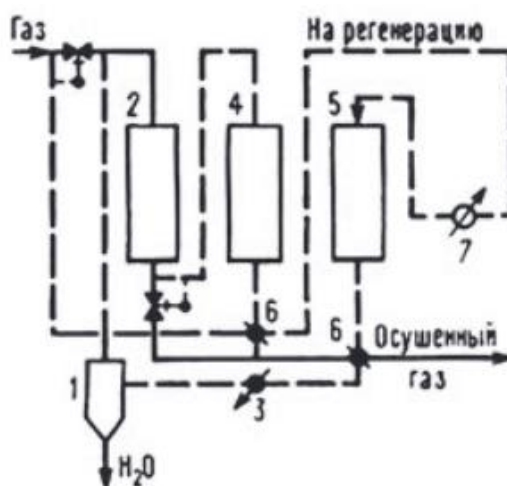


Рисунок 7 – Схема установки осушки газа с открытым циклом при охлаждении осушенным газом:

1 – сепаратор; 2 – адсорбер на стадии осушки; 3 – холодильник; 4 – адсорбер на стадии охлаждения; 5 – адсорбер на стадии регенерации; 6 – теплообменники; 7 – нагреватель

На рисунке 8 представлена схема с закрытым циклом на стадии регенерации (адсорбер 4). Часть осушенного газа используют для охлаждения адсорбера 2. Капиталовложения и эксплуатационные расходы в схемах с закрытым циклом выше, но работают они очень стабильно. Обычно система переключения клапанов на осушающих установках автоматизирована и

использование ручного труда сведено к минимуму.

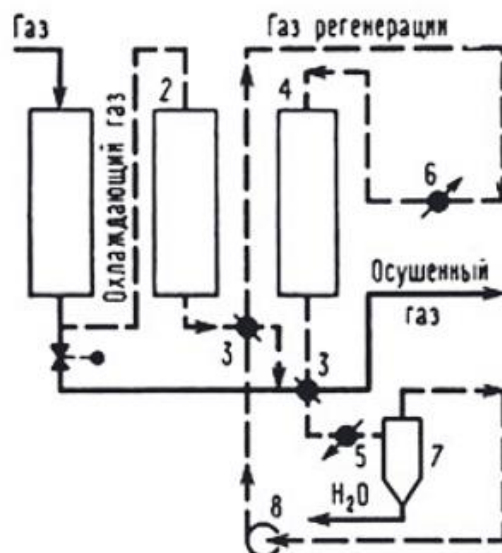


Рисунок 8 – Схема установки осушки газа с закрытым циклом греющего газа: 1 – адсорбер на стадии осушки; 2 – адсорбер на стадии охлаждения; 3 – теплообменники; 4 – адсорбер на стадии регенерации; 5 – холодильник; 6 – нагреватель; 7 – сепаратор; 8 – компрессор

Продолжительность рабочего цикла определяет число адсорберов, которые должны быть включены в схему, чтобы обеспечить непрерывность работы осушающей установки. Если продолжительность стадии осушки 6 и более часов, число адсорберов ограничивается двумя. Для более коротких циклов необходимо включать три адсорбера: один на стадии осушки, второй на стадии нагрева, третий на стадии охлаждения [11].

1.4 Способы повышения депрессии точки росы

Наиболее эффективными процессами осушки газа сложного химического состава являются адсорбционные процессы. Им присущи высокие экологические показатели, отсутствие жидкой фазы и коррозионно-активных примесей в товарном газе, низкий удельный расход адсорбента, высокая степень автоматизации процесса. Несмотря на многолетнюю эксплуатацию адсорбционных установок, и притом, что они обеспечивают все регламентированные требования к показателям качества в осушаемом газе, следует отметить их недостатки – небольшой срок службы адсорбента (в частности цеолита), чувствительность к

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

примесям. Постепенное снижение адсорбционной ёмкости вызвано неравномерной загрузкой по газу стационарного слоя адсорбента и образованием в нем нерегенерируемых отложений, образующихся за счет закоксовывания и деградации различных примесей осушаемого газа.

Эффективность осушки газа зависит от нескольких факторов: качества адсорбента, равномерности распределения газового потока по сечению адсорбера, технологических параметров адсорбции, от состава, влажности газа, наличия примесей, степени регенерации адсорбента.

Для улучшения равномерности распределения газового потока по сечению адсорбера возможно изменение конструкции аппарата.

В работе [16] исследовано усовершенствование распределительного устройства для ввода газа в адсорбер путем его модификации и применения постоянного магнитного поля.

Применение этой технологии основывается на том, что молекулы воды и диэтанолamina являются полярными молекулами (диполями), что делает эти вещества «чувствительными» к действию магнитного поля при его пересечении.

Эксперимент проводился на установке с усовершенствованным кольцевым распределительным устройством. Установлено, что решающее значение в равномерности распределения потока газа имеет применение кольцевого устройства, а дополнение конструкции устройства постоянными магнитами позволяет ещё больше увеличить эффективность устройства. Отмечено, что применение разработанного кольцевого устройства, снабжённого постоянными магнитами, позволяет практически исключить «мёртвые зоны» в слое цеолита и тем самым повысить эффективность процесса адсорбции и увеличить межрегенерационный период адсорбента на блоке осушки.

В работе [17] были выявлены причины недостаточной глубины осушки на предприятии ООО «Пермтрансгаз» на установке подготовки топливного, пускового и импульсного газа (УПТПиИГ).

Причиной низкой эффективности работы системы осушки газа выявилось несовершенство заводской конструкции адсорбера импульсного газа. Проект-

ная конструкция внутреннего устройства адсорберов и схемы циркуляции осушаемого газа обеспечивает полноценную работу только нижней части загрузки адсорбента и, следовательно, не эффективную эксплуатацию всей массы силикагеля.

Предложены следующие пути решения проблемы – усовершенствование технологии осушки газа на установках подготовки газа путем замены существующего силикагеля КСМГ на новой композиции адсорбента и предложены оптимальные соотношения адсорбентов, для получения низкой температуры точки росы получаемого осушенного газа, также его регенерации, изменения схемы засыпки адсорбента в адсорберах путем преобразования адсорбера кольцевого типа во фронтальный.

Проведена сравнительная оценка поведения различных адсорбентов в идентичных условиях, испытывались 6 типов индивидуальных адсорбентов. В результате, были предложены новые оптимальные соотношения композиций, исследованных материалов КСМГ+МСМК (50:50), ШСМГ+КСКГ (40:60) и (80:20), ШСМГ+КСКГ+NaA (55:30:15) % мас. для осушки природного газа на установках подготовки газа. Установлено, что при определённых соотношениях силикагелей наблюдается более значительная адсорбционная емкость по воде и тяжелым углеводородам, вследствие большого объема их мезопор.

Применение данных композиций позволит осуществить глубокую осушку (точка росы снижается до минус 60 °С) природного газа.

Предложены новые схемы засыпки адсорбента в адсорберах, преобразование адсорбера кольцевого типа во фронтальный, что позволит увеличить массу засыпаемого адсорбента в два раза, тем самым увеличить время адсорбции и устранить недостатки заводской конструкции. Также для увеличения срока службы адсорбента на установках осушки газа предприятия разработана схема регенерации адсорбента, что решает такую экологическую проблему как утилизация отработанного силикагеля.

Еще одним примером повышения эффективности работы адсорбционной установки путем внедрения распределительного устройства и замены цеолита

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		31

является работа [18]. В работе также упоминается возникновение «мертвых зон» в слое адсорбента из-за неравномерного распределения газового потока. Установлено, что в слое имеются как зоны минимальных и максимальных значений показателей качества цеолитов, так и зоны с неповрежденным цеолитом, что ведет к снижению эффективности осушки природного газа и нерациональному использованию адсорбента, а также повышению риска внеплановой остановке всей установки.

Таким образом, мероприятия позволяют усовершенствовать технологию глубокой осушки природного газа, эффективнее и рациональнее управлять процессом при снижении ТТР и энергетических затрат.

В итоге, на основе изучения литературных источников, патентного поиска и сведений из научных статей можно судить, о том, что оптимизация процесса осушки газа сводится к совершенствованию сорбирующего материала. В то же время есть и другие способы оптимизации технологического процесса, например, путём совершенствования конструкции адсорберов.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Характеристика сырья и готовой продукции

Амурский газоперерабатывающий завод предназначен для выделения целевых компонентов из природного газа и обеспечения качества товарного газа стран-импортеров. На Амурском ГПЗ происходит получение товарного газа, гелия, бутана, пропан-бутановой фракции, пентан-гексановой фракции и этановой фракции.

Сырьем Амурского ГПЗ для переработки является углеводородный газ, подготовленный по требованиям СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам», поступающий с Якутского центра газодобычи и Иркутского центра газодобычи по магистральному газопроводу Сила Сибири.

В таблице 2 рассмотрена характеристика природного газа, который направляется на установку осушки и удаления ртути и осушенного газа.

Таблица 2 – Характеристика сырьевого и осушенного газа

Компонентный состав	Показатель качества	Значение
1	2	3
Сырьевой газ	Давление, МПа	7,2
	Температура, °С	от минус 5 до 25
	Содержание водорода, % мол.	0,07
	Содержание гелия, % мол.	0,40
	Содержание кислорода, % мол.	0,02
	Содержание азота, % мол.	7,30
	Содержание двуокиси углерода, % мол.	0,14
	Содержание метана, % мол.	85,14

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>					
<i>Разраб.</i>	<i>Шубина Е.Ю.</i>							<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Гужель Ю.А.</i>							<i>У</i>	33	60
<i>Н. контр.</i>	<i>Родина Т.А.</i>							<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Утверд.</i>	<i>Гужель Ю.А.</i>									

1	2	3
	Содержание этана, % мол.	4,6
	Содержание пропана, % мол.	1,56
	Содержание бутана, % мол.	0,59
	Содержание пентана и выше, % мол.	0,17
	Содержание ртутных соединений, ppb мол.	2
Осушенный и очищенный природный газ	Давление, МПа	6,95
	Содержание водорода, % мол.	0,03 – 0,07
	Содержание гелия, % мол.	0,16 – 0,40
	Содержание азота, % мол.	6,58 – 7,3
	Содержание двуокиси углерода, % мол.	0,11 – 0,29
	Содержание метана, % мол.	85 – 86,2
	Содержание этана, % мол.	4,6 – 4,68
	Содержание пропана, % мол.	1,5 – 1,56
	Точка росы по влаге, °С	минус 110

2.2 Описание технологической схемы блока адсорбционной осушки

Технологическая схема установки адсорбционной осушки газа представлена на рисунке 1.

Установка предназначена для подготовки газа к низкотемпературному газоразделению, осушке сырьевого газа, поступающего из магистрального газопровода, от содержащихся в нем метанола, воды и последующему удалению ртути из газа.

Блок адсорбционной осушки газа входит в состав установки и осушки и удаления ртути из природного газа.

В состав установки входят следующие технологические блоки:

1. Осушки сырьевого газа;
2. Удаления ртути;
3. Подогрева, рекуперации тепла и охлаждения регенерирующего газа;

4. Вспомогательных систем.

Блок осушки включает четыре адсорбера осушки, в которых водометанольная смесь, содержащаяся в природном газе, поглощается из влажного сырьевого газа с помощью трех слоев основного адсорбента.

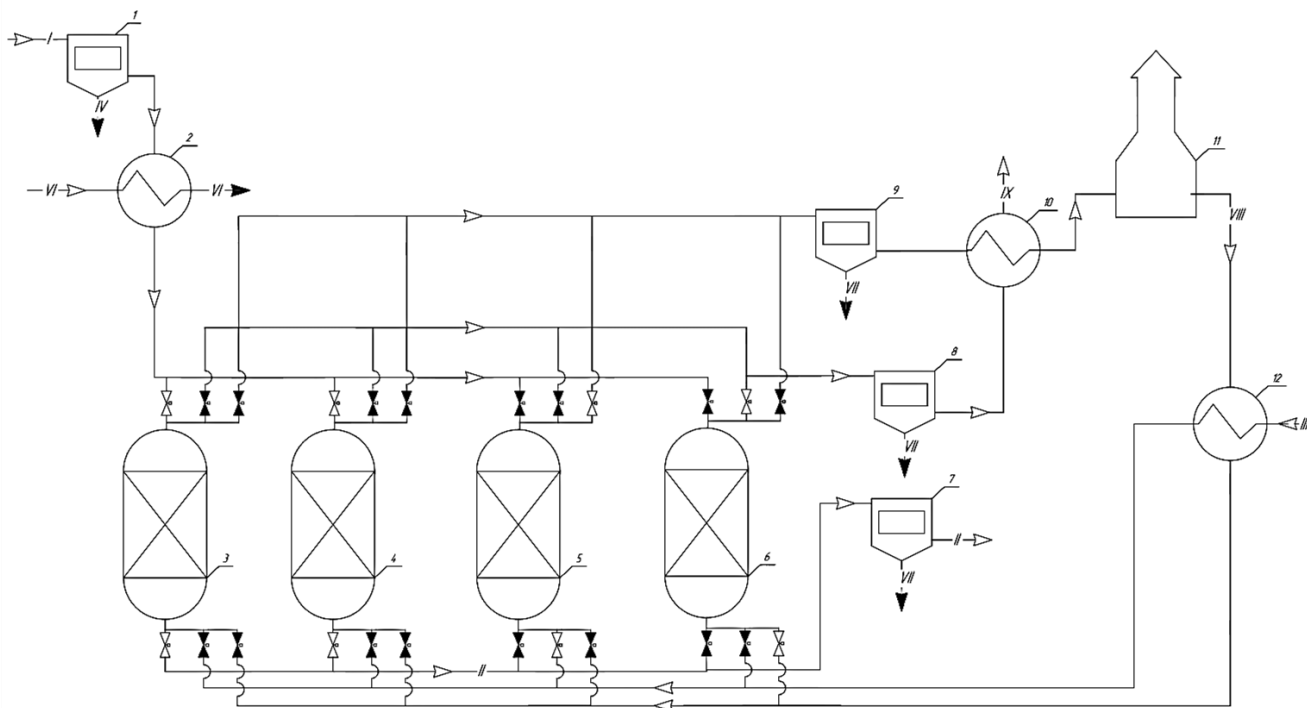


Рисунок 9 – Схема блока адсорбционной осушки природного газа Амурского ГПЗ:

1, 7, 8, 9 – фильтры-сепараторы; 2, 10, 12 – теплообменники; 3, 4, 5, 6 – адсорберы; 11 – печь. Поток: I – сырьевой газ; II осушенный газ; III – прямой газ регенерации; IV – механические примеси; V – пар низкого давления; VI – цеолитовая пыль; VII – обратный газ регенерации

Поступающий на установку сырьевой газ I поступает на границу установки от коллектора природного газа под давлением $7,1 \div 7,5$ МПа и с температурой от минус 5 °С до 35 °С. Пройдя через узел учета, сырьевой газ приходит предварительную очистку от механических примесей IV (преимущественно продуктов коррозии трубопроводов) в фильтре-сепараторе 1, избытка воды, метанола и жидких углеводородов на фильтрах-сепараторах. После фильтров-сепараторов подготовленный сырьевой газ поступает в подогреватель сырьевого

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

газа 2 (рекуперативный теплообменник), где нагревается до температуры не менее 15 °С паром низкого давления V.

После подогрева до заданной температуры, предварительно подготовленный газ поступает в адсорберы осушки сырьевого газа 3 и 4 через распределительное устройство и распределяется по всему сечению аппарата. Окончательное удаление воды и ментола происходит при последовательном прохождении сырьевого газа вертикально вниз через слой комбинированного адсорбента.

Комбинированный адсорбент представляет собой три слоя твердого поглотителя, и включает в себя активированный глинозем и два вида молекулярных сит с разными размерами пор.

Удаление воднометанольного раствора происходит путем физической адсорбции, конденсации этих компонентов на поверхности и в порах молекулярных сит. Когда слой адсорбента перенасыщается его регенерируют, удаляя из него воду и метанол путем обратной продувки (снизу-вверх) горячим газом.

Далее осушенный в адсорберах газ II подается на фильтры осушенного газа, для фильтрации от цеолитовой пыли VI, унесенной из адсорберов.

Удаление ртути из осушенного сырьевого газа осуществляется в адсорбере, где ртуть поглощается из потока газа при прохождении через слой адсорбента, активированного серой. В осушенном и очищенном сырьевом газе на выходе из установки должно содержаться не более 0,1 ppm (по объему) воды, не более 10 ppm (по объему) метанола и не более 0,01 мг/м³ ртути. Температура точки росы осушенного сырьевого газа составляет минус 110 °С при рабочем давлении 6,95 МПа.

Осушенный и очищенный от ртути сырьевой газ поступает на установку выделения этана и широкой фракции легких углеводородов, удаления азота и получения азотно-гелиевой смеси.

Водометанольная смесь, выделенная из сырьевого газа на установке, собирается в емкости для сбора углеводородного конденсата, откуда подается на утилизацию насосом для откачки конденсата в огневой нагреватель (печь) 11 газа регенерации или, как альтернатива, подмешивается в товарный газ.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		36

В нормальном режиме эксплуатации установки осушка газа осуществляется в двух из четырех адсорберов, подключенных параллельно и работающих в режиме адсорбции. Третий адсорбер в это время работает в режиме регенерации адсорбента, а четвертый – в режиме охлаждения.

В течение 24 часов адсорбент в адсорберах проходит три стадии:

– Адсорбция – положительность цикла составляет 12 часов. Цикл адсорбции каждого адсорбера, по отношению к другим аппаратам, смещен на 6 часов.

- Горячая регенерация;
- Охлаждение.

Регенерация адсорбента.

Регенерация насыщенного водой и метанолом адсорбента в адсорбере производится горячим газом регенерации VII. Обратный газ регенерации подогревается до температуры 320 °С в змеевиках огневого нагревателя 11, проходит через рекуперативный подогреватель газа охлаждения 12, поступает в нижнюю часть адсорбера б, включенного в режим регенерации. Обратный газ регенерации поступает в адсорбер снизу-вверх с температурой 320 °С. Продолжительность режима регенерации составляет 6 часов, до достижения температуры цеолита порядка 300 °С.

Обратный газ регенерации, выходящий из верхней части адсорберов, насыщенный метанолом и водой, под давлением 5,6 МПа поступает в фильтр 8 газа регенерации для очистки от цеолитовой пыли и выводится с установки.

Охлаждение адсорбента после горячей регенерации производится прямым газом регенерации (он же газ охлаждения), который поступает на установку из коллектор прямого газа регенерации дожимной компрессорной станции.

Из коллектора прямой газ регенерации III поступает на установку в рекуперативный подогреватель газа регенерации 12. В рекуперативном подогревателе газ охлаждения нагревается до 230 °С (начальная температура режима охлаждения) за счет обмена теплом с газом регенерации, подаваемым на реге-

нерацию после огневого подогревателя, и далее поступает в охлаждаемый адсорбер 5. После охлаждения адсорбент, охлаждающий газ поступает в 9, поочередно нагревается в теплообменнике и печи, далее становится обратным газом регенерации.

В адсорбер, включенный в режим охлаждения, подается газ охлаждения с начальной температурой 230 °С, затем температура газа охлаждения постепенно снижается до температуры около 45 °С – 65 °С. Длительность режима охлаждения составляет 6 часов.

Горячая регенерация и охлаждение осуществляются в цикле последовательного повышения и снижения температуры для предотвращения температурного шока для адсорбента и термического разложения метанола, приводящих, соответственно, к сокращению срока эксплуатации адсорбента и коксованию.

2.3 Технологический расчет процесса осушки природного газа

Основным цеолитом в адсорбер является молекулярное сито Sylobead MS 654С типа 3А со средним диаметром гранулы 2,5 мм. У того же производителя цеолитов представлен другой цеолит MS 564 ЕТ, который отличится, по заявлению производителя, повышенной скоростью поглощения водного компонента газа, с типом молекулярного сита 4А. Как известно, молекулярные сита такого типа, помимо воды, поглощают еще и метанол.

Также выбранный адсорбент отличается средним диаметром гранул адсорбента равным 2,0 мм, и не уступает в адсорбционной активности, используемому на установке осушки, адсорбенту. Предполагается за счет уменьшения диаметра основного адсорбента, достижение уменьшения минимальной высоты слоя адсорбента, без изменения конструкции адсорбера, тем самым увеличивая время контакта природного газа с адсорбентом.

Также при проведении модернизации конструкции аппарата, например, как в упомянутых работах, заменить используемое распределительное устройство на распределительное устройство в виде горизонтальной кольцевой перфорированной перегородки с направляющим коническим стаканом в адсорбере,

возможно добиться большей эффективности осушки газа за счет более равномерного распределения газового потока по сечению адсорбера, исключая появление «мёртвых зон» в слое цеолита, тем самым повысить эффективность процесса адсорбции при увеличении степени осушки природного газа, возможном, увеличении периода замены адсорбента на блоке осушки.

Проведем расчёт процессов адсорбции и десорбции учитывая характеристики предлагаемого адсорбента. Для расчёта примем исходные данные представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчёта процесса адсорбции

Показатель	Значение
Производительность установки, млрд. м ³ /год	7
Расход осушаемого газа, м ³ /час	375000
Температура осушаемого газа, °С	25
Давление осушаемого газа, МПа	7,3
Средняя плотность адсорбента, кг/м ³	727
Средний диаметр гранул адсорбента, мм	2,5

Проведем расчет процесса адсорбции по следующей методике [19]:

1. Определяем плотность газа при рабочих условиях, кг/м³:

По данным из регламента, принимаем плотность газа ρ_r , входящего на установку, при нормальных условиях равным 0,762 кг/м³ [20].

$$\rho_{p.y} = \rho_r \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T}, \quad (2)$$

где P – давление очищаемого газа, МПа; 7,3

P_0 – нормальное атмосферное давление ($P_0 = 0,1$ МПа);

T – температура газа поступающего на осушку, К; 298

T_0 – температура при нормальных условиях ($T = 273$ К).

$$\rho_{p.y} = 0,762 \cdot \frac{7,3 \cdot 273}{0,1 \cdot 298} = 51,00 \text{ кг/м}^3,$$

2. Определяем максимальную допустимую линейную скорость в адсорбере. Для этого используем уравнение Леду.

$$U_{\Gamma} = \sqrt{78 \cdot C \cdot \rho_{\text{ад}} \cdot d_{\text{ад}} \cdot \frac{g}{\rho_{\text{р.у}}}} \quad (3)$$

где U_{Γ} – линейная скорость газа, м/с;

C – константа ($C = 0,025 - 0,033$);

$\rho_{\text{р.у}}$ – плотность газа при рабочих условиях, кг/м³;

$\rho_{\text{ад}}$ – средняя плотность адсорбента, кг/м³;

$d_{\text{ад}}$ – средний диаметр гранул адсорбента, мм;

g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с².

$$U_{\Gamma} = \sqrt{78 \cdot 0,03 \cdot 727 \cdot 2,0 \cdot \frac{9,81}{51,00}} = 2,860 \text{ м/с} = 171,6 \text{ м/мин}$$

Принимаем рабочую линейную скорость $U_{\Gamma} = 172$ м/мин.

3. Пологая, что вся влага, поступающая в адсорбер с сырым газом, поглощается адсорбентом, рассчитывают массу воды, извлекаемую из газа на протяжении цикла адсорбции:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = G_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma} \cdot \tau_{\text{ад}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса воды, кг;

G_{Γ} – объем поступающего в адсорбер газа, м³/ч;

W_{Γ} – влагосодержание сырого газа, кг/м³ (по графику равновесного влагосодержания при температуре и давлении адсорбции процесса адсорбции найдём значение $W_{\Gamma} = 1,860 \cdot 10^{-3}$ кг/м³;

$\tau_{\text{ад}}$ – время адсорбции, ч.

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = G_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma} \cdot \tau_{\text{ад}} = 375000 \cdot 1,860 \cdot 10^{-3} \cdot 12 = 8370,0 \text{ кг.}$$

4. По исходным данным рассчитываем внутренний диаметр адсорбера D , м:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{\text{р}}}{\pi \cdot U_{\Gamma}}}, \quad (5)$$

где V_P – объем газа, поступающего в адсорбер при рабочих условиях, м³/мин.;

$$\pi = 3,14.$$

$$V_P = V_{\Gamma} \cdot \frac{T \cdot P_0}{T_0 \cdot P} \cdot \frac{1}{60}, \quad (6)$$

где V_{Γ} – объем газа, поступающего в адсорбер (м³/ч), измеренный при нормальных условиях;

T – температура адсорбции;

T_0 – температура при нормальных условиях ($T = 273$ К);

P – давление в адсорбере, МПа;

P_0 – нормальное атмосферное давление ($P_0 = 0,1$ МПа);

$$V_P = 375000 \cdot \frac{0,1 \cdot 298}{7,3 \cdot 273} \cdot \frac{1}{60} = 93,46 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 93,46}{3,14 \cdot 172}} = 1,48 \text{ м}.$$

Диаметр принимают ближайший больший, равный 1,6 м [14].

5. Рассчитываем линейную скорость газа в свободном сечении адсорбера при рабочих условиях, если $U_1 > U_{\Gamma}$, следует увеличить диаметр аппарата до выполнения условия $U_1 \leq U_{\Gamma}$.

$$U_1 = \frac{4 \cdot V_P}{\pi \cdot D^2}, \quad (7)$$

$$U_1 = \frac{4 \cdot 93,46}{3,14 \cdot 1,6^2} = 46,51 \text{ м/мин}.$$

Так как условие $U_1 < U_{\Gamma}$ ($U_{\Gamma} = 172$ м/мин) выполняется, оставляем прежний диаметр аппарата.

6. Определяем удельную нагрузку слоя по воде, кг/(ч·м²):

$$g_{\text{в}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{0,785 \cdot \tau_{\text{ад}} \cdot D^2}, \quad (8)$$

где $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса воды, кг;

$\tau_{\text{ад}}$ – продолжительность стадии адсорбции, ч;

D – внутренний диаметр адсорбера, м;

$$g_B = \frac{8370,0}{0,785 \cdot 12 \cdot 1,6^2} = 347,08 \text{ кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2) = 5,78 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2).$$

7. Рассчитываем высоту адсорбционной зоны, м:

$$h = 31,3 \cdot \frac{g_B^{0,7895}}{U_1^{0,5506} \cdot p/p_s^{0,2647}}, \quad (9)$$

где g_B – удельная нагрузка слоя по воде, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$;

p/p_s – относительная влажность осушаемого газа, % ($p/p_s = 80$ %);

$$h = 31,3 \cdot \frac{5,78^{0,7895}}{46,51^{0,5506} \cdot 80^{0,2647}} = 31,3 \cdot \frac{3,995}{8,28 \cdot 3,19} = 4,73 \text{ м.}$$

8. Рассчитывают высоту слоя адсорбента, м:

$$H = 5 \cdot D, \quad (10)$$

$$H = 5 \cdot 1,6 = 8 \text{ м.}$$

9. Рассчитываем динамическую равновесную влагоемкость слоя, %:

$$A_d = \frac{A_p \cdot (H - 0,45 \cdot h)}{H}, \quad (11)$$

где A_p – равновесная влагоемкость слоя, определяется по графику [13],

$$A_p = 14 \text{ \%}.$$

$$A_d = \frac{14 \cdot (8 - 0,45 \cdot 4,73)}{8} = 10,69 \text{ \%}.$$

10. Определяем минимально необходимую высоту слоя адсорбента, м:

$$h_{\text{сл}} = \frac{127,4 \cdot (G_{H_2O})}{\rho_{\text{ад}} \cdot D^2 \cdot A_d}, \quad (12)$$

где $\rho_{\text{ад}}$ – средняя плотность адсорбента, $\text{кг}/\text{м}^3$;

D – внутренний диаметр адсорбера, м.

$$h_{\text{сл}} = \frac{127,4 \cdot 8370,0}{727 \cdot 1,6^2 \cdot 10,69} = 54,0 \text{ м.}$$

Получившееся значение $h_{\text{сл}}$ больше H , необходимо принять новое значение диаметра адсорбера и повторить расчет с 5 - го пункта. Принимаем диаметр адсорбера 3,2 м.

$$U_1 = \frac{4 \cdot 93,46}{3,14 \cdot 3,2^2} = 11,63 \text{ м/мин.}$$

$$g_B = \frac{8370,0}{0,785 \cdot 12 \cdot 3,2^2} = 89,95 \text{ кг/(ч} \cdot \text{м}^2) = 1,50 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2).$$

$$h = 31,3 \cdot \frac{1,50^{0,7895}}{11,63^{0,5506} \cdot 80^{0,2647}} = 31,3 \cdot \frac{1,38}{3,86 \cdot 3,19} = 3,51 \text{ м.}$$

$$H = 5 \cdot 3,2 = 16 \text{ м.} \quad (10)$$

$$A_d = \frac{14 \cdot (16 - 0,45 \cdot 3,51)}{16} = 12,61 \text{ \%}.$$

$$h_{\text{сл}} = \frac{127,4 \cdot 8370,0}{727 \cdot 3,2^2 \cdot 12,61} = 11,36 \text{ м.}$$

По конструктивным соображениям соотношение $H : D$ должно быть $3 \div 6$.
Наше соотношение $16 : 3,2 = 5$, прекращаем расчет.

11. Рассчитываем продолжительность работы слоя до проскока влаги, ч:

$$\tau_1 = \frac{0,01 \cdot A_d \cdot \rho_{\text{ад}} \cdot h_{\text{сл}}}{g_B}, \quad (13)$$

где g_B – удельная нагрузка слоя по воде, кг/(ч·м²);

$$\tau_1 = \frac{0,01 \cdot 12,61 \cdot 727 \cdot 11,36}{89,95} = 12 \text{ ч.}$$

Продолжительность работы слоя до проскока равна продолжительности цикла адсорбции.

12. Определим гидравлическое сопротивление слоя адсорбента на стадии очистки:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot f \cdot \rho_{\text{г}} \cdot H \cdot U_1^2}{g \cdot d_3 \cdot \varepsilon^2}, \quad (14)$$

где f – коэффициент трения газа о слой адсорбента, определяется как функция от числа Рейнольдса [21];

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³;

H – высота слоя адсорбента, м;

U_1 – линейная скорость газа в свободном сечении адсорбера, м/с²;

d_3 – эквивалентный диаметр частиц, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

ε – порозность, м³/м³, адсорбента при допущении упорядоченного расположения частиц адсорбента.

Порозность слоя определяют по формуле:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ш}}}{V_{\text{к}}}, \quad (15)$$

где $V_{\text{ш}}$ – объем шара, эквивалентный объему частицы адсорбента цилиндрической формы, м³;

где $V_{\text{к}}$ – объем куба, описанного вокруг шара, м³;

$$V_{\text{ш}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4}, \quad (16)$$

где $\pi = 3,14$;

d – диаметр частиц (по ставочным данным – 0,0033 м);

L – длина частиц адсорбента цилиндрической формы (по справочным данным – 0,004 м), м;

$$V_{\text{ш}} = \frac{3,14 \cdot 0,0033^2 \cdot 0,004}{4} = 3,42 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

Эквивалентный диаметр частиц:

$$d_{\text{э}} = \left(\frac{6 \cdot V_{\text{ш}}}{\pi} \right)^{1/3}, \quad (17)$$

$$d_{\text{э}} = \left(\frac{6 \cdot 3,42 \cdot 10^{-8}}{3,14} \right)^{1/3} = 0,00403 \text{ м}.$$

$$V_{\text{к}} = 0,00403^3 = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

$$\varepsilon = \frac{3,42 \cdot 10^{-8}}{6,50 \cdot 10^{-8}} = 0,526.$$

Определяем критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{U_1 \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu \cdot \varepsilon}, \quad (18)$$

где U_1 – линейная скорость газа в свободном сечении адсорбера, м/мин;

μ – динамическая вязкость газа, определяемая по формуле Фроста, Па·с;

$$\mu = T \cdot (6,6 - 2,25 \cdot \lg M) \cdot 10^{-8}, \quad (19)$$

где T – температура адсорбции, К;

M – средняя молекулярная масса газа, кг/кмоль;

$$\rho_{г(н.у)} = \frac{M}{22,4}, \quad (20)$$

$$M = 22,4 \cdot 0,762 = 17,07 \text{ кг/кмоль}$$

$$\mu = 298 \cdot (6,6 - 2,25 \cdot \lg 17,07) = 1,12 \cdot 10^{-5}$$

$$Re = \frac{11,63 \cdot 0,004 \cdot 51,00}{1,12 \cdot 10^{-5} \cdot 0,526} = 402\,722,7$$

Коэффициент трения газа о слой адсорбента $f = 3$.

Число, определяемое суммой перепадов давления в слое и произведения высоты слоя адсорбента на его насыпную плотность, должно быть меньше предела прочности гранул на раздавливание.

$$\Delta P = \frac{2 \cdot 3 \cdot 51,00 \cdot 16 \cdot 11,63^2}{9,81 \cdot 0,00403 \cdot 0,526^2} = 18213,$$

$$\Delta P + H \cdot \rho_{ад}, \quad (21)$$

$$18213 + 16 \cdot 727 = 29845 \text{ кг/м}^2 = 0,29845 \text{ кг/мм}^2.$$

Механическая прочность на раздавливание – не менее 1,8 кг/мм². В результате расчётов получившееся значение меньше предела прочности гранул на раздавливание, значит, за время осушки газа предложенный адсорбент не разрушится. Для предложенного адсорбента, продолжительность процесса осушки газа до проскока влаги, составила 12 часов, что соответствует действительному времени адсорбционного процесса на установке.

2.4 Расчёт стадии регенерации адсорбента

Как упоминалось ранее, эффективность осушки газа зависит от степени регенерации адсорбента. В статье [20] выявлена связь между температурой регенерации цеолита и достигаемой температурой точки росы. При повышении температуры регенерации цеолита наблюдается повышение депрессии точки росы. Для установки осушки действующей на Амурском ГПЗ, использование такого метода повышения депрессии температуры точки росы является нераци-

ональным, так как может привести к потере активности цеолита, преждевременной его замене, поэтому проведём расчёт стадии регенерации, приняв исходные данные из регламента установки [21]. Данные для расчёта представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для расчёта процесса адсорбции

Показатель	Значение
Удельная теплоемкость цеолита, кДж/(кг·°С);	0,837
Теплота десорбции воды, кДж/кг;	3256
Плотность газа регенерации, кг/м ³ ;	0,759
Удельная теплоемкость газа регенерации при давлении и температуре процесса регенерации, кДж/(кг·°С);	2,61
Начальная температура адсорбента, °С;	40
Масса адсорбера, тонн;	102
Масса слоя цеолита тонн.	72

Температура кипения воды при давлении 57 кг/см² – 270 °С, удельная теплоемкость воды – 4,187 кДж/(кг·°С).

Рассчитываем общее количество тепла, необходимое на регенерацию цеолита, Q_p , кДж [22]:

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{\text{п}} \quad (22)$$

где Q_1 – количество тепла, необходимое на нагрев адсорбера;

Q_2 – количество тепла, необходимое на нагрев цеолита;

Q_3 – количество тепла, необходимое на нагревание адсорбированных компонентов;

Q_4 – количество тепла, необходимое на десорбцию компонентов;

$Q_{\text{п}}$ – потери тепла.

1. Затраты тепла на нагревание адсорбера равны, кДж:

$$Q_1 = m_a \cdot C_m \cdot (t_n - t), \quad (23)$$

где m_a – масса адсорбера, кг;

C_m – удельная теплоемкость металла (для стали – 0,5 кДж/кг °С);

t_H – начальная температура регенерации, °С

t – температура адсорбера перед началом регенерации, °С.

$$Q_1 = 223850 \cdot 0,5 \cdot (320 - 40) = 31\,339\,000 \text{ кДж},$$

2. Тепло затраченное на нагревание цеолита, кДж:

$$Q_2 = m_{ц} \cdot C_{ц} \cdot (t_H - t), \quad (24)$$

где $m_{ц}$ – масса цеолита, кг;

$C_{ц}$ – удельная теплоемкость цеолита, кДж/(кг·°С);

$$Q_2 = 52700 \cdot 0,840 \cdot (300 - 40) = 11\,509\,680 \text{ кДж}.$$

3. Затраты тепла на нагревание адсорбированного компонента, кДж:

$$Q_3 = \sum (m_i \cdot C_i \cdot (t_K - t_H)), \quad (25)$$

где m_i – масса i -го компонента (воды), содержащегося в порах цеолита, кг;

C_i – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);

t_K – температура кипения воды, при давлении регенерации, °С;

t_H – начальная температура регенерации, °С;

Массу, поглощенной адсорбентом воды, найдем по формуле:

$$m_B = \frac{G_0 \cdot A_B}{\rho_{ад}} \quad (26)$$

где G_0 – весовая загрузка адсорбента в аппарат, кг;

A_B – динамическая емкость адсорбента по влаге, кг/м³;

$A_B = 108 \text{ кг/м}^3$;

$\rho_{ад}$ – средняя плотность адсорбента, кг/м³;

$$m_B = \frac{52700 \cdot 108}{727} = 7829 \text{ кг}.$$

$$Q_3 = 7829 \cdot 4,187 \cdot (270 - 40) = 7\,539\,405 \text{ кДж}.$$

4. Определим затраты тепла на десорбцию воды, кДж:

$$Q_4 = \sum (m_i \cdot H_i), \quad (27)$$

где H_i – теплота десорбции воды, $H_i = 3256 \text{ кДж/кг}$;

$$Q_4 = 7829 \cdot 3256 = 25\,491\,224 \text{ кДж.}$$

5. Обычно значение потерь тепла принимают равными десяти процентам от общей суммы затрат тепла:

$$Q_{\text{п}} = \sum Q_{1-4} \cdot 0,1, \quad (28)$$

$$Q_{\text{п}} = 0,1 \cdot (31\,339\,000 + 11\,509\,680 + 7\,539\,405 + 25\,491\,224) \\ = 7\,587\,931 \text{ кДж.}$$

Теплоты регенерации находим следующим образом:

$$Q_{\text{р}} = \sum Q_{1-4} \cdot 0,9, \quad (29)$$

$$Q_{\text{р}} = 0,9 \cdot (31\,339\,000 + 11\,509\,680 + 7\,539\,405 + 25\,491\,224) \\ = 68\,291\,378 \text{ кДж.}$$

6. Количество теплоты, которая поступает с газом регенерации в адсорбер, всегда равно расходу теплоты на регенерацию:

$$Q_{\text{г}} = Q_{\text{р}} \quad (30)$$

$$Q_{\text{г}} = V_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot C_{\text{г}} \cdot t_{\text{ср}}, \quad (31)$$

где $Q_{\text{г}}$ – количество тепла, поступающего с газом регенерации, кДж;

$V_{\text{г}}$ – объем газа регенерации, м³;

$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³;

$C_{\text{г}}$ – удельная теплоемкость газа, кДж/(кг·°С);

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{нг}} - \frac{t_{\text{к1}} + t_{\text{к2}}}{2}, \quad (32)$$

где $t_{\text{нг}}$ – начальная температура регенерации;

$t_{\text{к1}}$, $t_{\text{к2}}$ – температура газа, покидающего слой цеолита в начале и в конце нагревания, °С; соответственно $t_{\text{к1}} = 40$ °С;

$$t_{\text{к2}} = 2 \cdot t_{\text{min}} - t_{\text{нг}} + 10, \quad (33)$$

$$t_{\text{к2}} = 2 \cdot 300 - 320 + 10 = 290 \text{ °С}$$

$$t_{\text{ср}} = 320 - \frac{40 + 290}{2} = 155,$$

7. Определим объем газа регенерации, м³:

$$V_r = \frac{Q_{cp}}{\rho_r \cdot C_r \cdot t_{cp}}, \quad (34)$$

$$V_r = \frac{68\,291\,378}{0,759 \cdot 2,61 \cdot 155} = 222\,409 \text{ м}^3.$$

Продолжительность регенерации адсорбента составляет 6 часов. Определим расход газа регенерации:

$$G_r = \frac{V_r}{6} \quad (35)$$

$$G_r = \frac{222\,409}{6} = 37\,068 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Для предложенного адсорбента продолжительность процесса регенерации составила 6 часов, что не нарушает режимы адсорбция – десорбция – охлаждение, и соответствует значению, представленному в регламенте для действующей установки.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		49

3 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

В связи с необходимостью охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов ряд процессов, в том числе и осушка углеводородных газов, являются источниками вредных выбросов, загрязняющих атмосферу и сточные воды. В процессе осушки газа на газоперерабатывающих заводах, газовых промыслах из газа извлекаются влага, тяжелые углеводороды, сероводород, метанол, меркаптан и другие вещества, которые после десорбций поступают в атмосферу, безусловно, загрязняя окружающую среду не только на территории установки. В тех случаях, когда утилизация не целесообразна, их сжигают на факеле или смешивают с топливным газом, поступающим на собственные нужды установки.

Техника безопасности на производстве является важнейшим вопросом, связанным с жизнью людей и государственной собственностью. Операторы должны получить базовые знания по технике безопасности на производстве. Они должны осознанно соблюдать соответствующие правила и политику в области техники безопасности для обеспечения безопасного и цивилизованного производства.

3.1 Основные требования безопасности при эксплуатации установки адсорбционной осушки газа

Согласно Федеральному закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ [23] установка абсорбционной осушки газа относится к категории опасных производственных объектов. Находящиеся в установке сырьевой газ, осушенный газ и газ регенерации, содержат горючие и взрывоопасные компоненты метана и т.д. Все части установки соединены технологическими трубопроводами, и образуют единый объем.

					<i>ВКР.269416.181138.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Шубина Е.Ю.</i>				<i>У</i>	<i>50</i>	<i>60</i>
<i>Провер.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>				<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>						
<i>Утверд.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

Любые работы, которые могут привести к разгерметизации, являются нарушением правил, нарушением системы безопасности, могут привести к взрыву производственного оборудования, сырья и продукции, инцидентам возгорания и отравления сотрудников. Таким образом, операторы и обслуживающий персонал должны соблюдать руководство по эксплуатации и технику безопасности.

В технологическом регламенте установки осушки и удаления ртути № 1 ООО «Газпром переработка Благовещенск» сказано, что целью обеспечения минимального уровня опасности производства и оптимальных санитарно-гигиенических условий труда работающих предусмотрен следующий комплекс технических, технологических и организационных мероприятий.

По физико-химическим и взрывопожароопасным характеристикам сырья, готовой продукции, отходов производства и выбросам в атмосферу установка осушки сырьевого газа и удаления содержащейся в нем ртути, относится к взрывопожароопасным производственным объектам.

Наличие на объекте аппаратов, работающих при высоких температурах и содержащих большое количество нефтепродуктов в газообразном состоянии, создает опасность загазованности территории, что может привести к объемному взрыву или отравлениям.

Процесс относится к вредным для здоровья обслуживающего персонала производствам, так как связан с переработкой и получением продуктов, являющихся токсичными веществами [21].

3.2 Характеристика опасностей производства

Эксплуатация установки осушки и удаления ртути связана с обращением значительных количеств горючих и сжиженных газов, легковоспламеняющихся жидкостей.

Согласно ГОСТу 12.1.007-78 «Система безопасности труда. Вредные вещества» [24] по степени воздействия на организм человека вредные вещества разделяют на четыре класса опасности:

1 – вещества чрезвычайно опасные, – например: бериллий, свинец, марга-

нец, никель, хром, пары ртути;

2 – высокоопасные, – например: хлор, фосген, фтористый водород, плавиковая кислота, азотная кислота и др.;

3 – умеренно опасные, – например: табак, стеклопластик, метиловый спирт;

4 – малоопасные, – например: аммиак, бензин, ацетон, этиловый спирт.

Класс опасности вредных веществ устанавливают в зависимости от норм и показателей, указанных в таблице 5.

Таблица 5 – Классы опасности вредных веществ

Показатель	Нормы для класса опасности			
	Первого	Второго	Третьего	Четвёртого
Предельно-допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	0,1 – 1,0	1,1 – 10,0	Более 10,0

В регламенте установки содержится раздел подтверждающий, что обрабатываемые вещества по степени воздействия на организм относятся к веществам 1, 2, 3, 4 классов опасности.

Учитывая свойства веществ, основными факторами опасности на производстве являются:

– возможность возгорания и взрывов горючих газов и паров ЛВЖ при аварийной разгерметизации оборудования и трубопроводов;

– возможность возгорания и взрывов горючих газов и паров ЛВЖ внутри оборудования при грубых нарушениях норм технического режима;

– способность обрабатываемых продуктов накапливать статическое электричество, что может, в свою очередь, привести к воспламенению и взрыву как внутри оборудования, так и на открытых пространствах;

– возможность воздействия на обслуживающий персонал токсичных веществ при аварийной утечке их оборудования.

При контакте с организмом эти вещества могут вызывать производственные травмы, производственные заболевания или отклонения в состоянии здоровья человека.

Физиологическое воздействие на организм человека проявляется в виде острых или хронических отравлений за счет токсичности применяемых веществ, либо в виде травм слизистых оболочек и кожных покровов при попадании на незащищённые участки тела.

К основным физически опасным производственным факторам также относятся:

1. высокая взрывопожароопасность нефтепродуктов, взрывоопасность паров нефтепродуктов, наличие в технологических процессах горючих газов и других продуктов;
2. проведение технологических процессов при повышенных давлениях и температурах;
3. возможная загазованность воздуха рабочей зоны в случае разгерметизации трубопроводов и аппаратов;
4. повышенный уровень статического электричества вследствие транспортировки нефтепродуктов, обладающих способностью накапливать заряды статического электричества;
5. наличие процесса коррозии, эрозии в аппаратах и трубопроводах;
6. движущиеся машины и механизмы, подвижные части производственного оборудования;
7. возможность образования пиррофорных соединений;
8. повышенная и пониженная температура поверхностей оборудования, нефтепродуктов;
9. наличие и применение пара;
10. повышенная и пониженная температура воздуха рабочей зоны;
11. наличие электрооборудования, работающего под высоким напряжением;
12. повышенный уровень шума на рабочем месте;

13. наличие колодцев, прямиков, опорных обечеек колонн, ёмкостей с возможностью образования в них высокой степени загазованности.

Вредные вещества могут поступать в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, поврежденную и неповрежденную кожу.

При нарушении герметичности трубопроводов и оборудования, попадающие в атмосферу углеводороды образуют поровые облака, которые могут привести к трем типам аварий:

- взрыву парового облака;
- пожару;
- к токсичному воздействию на людей.

К основным опасностям производства относят также непрофессиональные или ошибочные действия обслуживающего персонала.

На установке осушки и удаления ртути обращаются вещества, способные образовывать взрывоопасные смеси горючих газов и паров воды с воздухом с низким пределом взрываемости. Ряд этих веществ отнесен к вредным т.е. при контакте с организмом человека в случае нарушения требований безопасности они могут вызывать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья человека.

Описанные вещества определяются в первую очередь физиологическим воздействием на организм человека, а также способностью этих веществ взрываться, гореть образовывать взрывчатые соединения или инициировать взрывы и пожары [21].

3.3 Должностные инструкции оператора установки адсорбционной осушки

Оператор установки отвечает за: своевременное и качественное выполнение им задач по назначению; соблюдение исполнительской и трудовой дисциплины; соблюдение мер безопасности труда, поддержание порядка, выполнение правил пожарной безопасности на порученном ему участке работы (рабочем месте).

К должностным обязанностям аппаратчика адсорбции относятся выпол-

няет следующие должностные обязанности:

1. Ведение технологического процесса адсорбции-улавливания газообразных или жидких продуктов поверхностью твердых поглотителей.

2. Подготовка адсорбента, загрузка его в аппараты.

3. Подача в аппараты очищаемых разделяемых газов или жидкостей, наблюдение за ходом процесса адсорбции, выключение аппаратов по мере насыщения адсорбента и снижения качества очистки, выделение (десорбция) адсорбированных продуктов продувкой аппаратов адсорбции паром.

4. Конденсация паров, извлечение адсорбированных продуктов отстаиванием конденсата или его перегонкой.

5. Улавливание или очистка (осушка) выделяющихся в ходе процесса газов, нейтрализация сточных вод, передача разделенных (очищенных) продуктов на последующие операции или на склад.

6. Отбор проб и проведение необходимых анализов.

7. Контроль над ходом проводимого технологического процесса по показаниям контрольно-измерительных приборов и результатам анализов.

8. Обслуживание адсорберов, конденсаторов, перегонных аппаратов, скрубберов, насосов и другого оборудования.

9. Устранение неисправностей в работе обслуживаемого оборудования и коммуникаций.

10. Подготовка обслуживаемого оборудования к ремонту.

Аппаратчик адсорбции должен знать: физико-химические и технологические свойства используемых сырья и адсорбентов; технологическую схему обслуживаемого производственного участка; физико-химические основы проводимого технологического процесса; устройство, принцип работы обслуживаемого основного и вспомогательного оборудования, применяемых контрольно-измерительных приборов и схему коммуникаций обслуживаемого производственного участка; параметры технологического режима адсорбции, правила регулирования обслуживаемого технологического процесса; правила отбора проб; методику проведения анализов [25].

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		55

3.3.1 Защита технологических процессов и оборудования от аварий и работающих от травмирования

В регламенте к установке осушки и удаления ртути сказано, что технологические процессы установки являются пожароопасными и взрывоопасными процессами. Важное значение для безопасности технологических процессов имеет их автоматизация и комплексная механизация, наличие специальных защитных устройств и ограждений, герметичность, механическая и коррозионная прочность производственного оборудования. На установке предусмотрены современные средства и методы, обеспечивающие безопасное ведение технологического процесса, автоматизированное управление производством, а также мероприятия по организации условий и охраны труда рабочих и служащих.

Конструкционные материалы, выбранные для различных узлов установки, минимизируют коррозию оборудования и трубопроводов.

Характер рабочих жидкостей предполагает потенциальное накопление статического электричества. При введении жидкостей в ёмкостную аппаратуру, для исключения истечения жидкостей падающей струёй штуцера ввода продуктов выполнены под уровень жидкости, либо по специальным узлам ввода. Кроме того, оборудование обеспечено заземлением для предотвращения накопления статического электричества.

Комбинированная установка оснащена системой обнаружения газовой опасности, которая обеспечивает выполнение функции обнаружения и сигнализации повышения предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ и НКПВ [21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа научных статей и литературных источников по тематике работы, была изучена технология адсорбционной осушки природного газа, рассмотрены современные методы глубокой осушки природного газа. Изучена методика адсорбционной осушки природного газа на Амурском ГПЗ, рассмотрены требования к товарному газу, представлена технологическая схема установки адсорбционной осушки газа с блоком регенерации и предложены методы повышения эффективности работы установки, выполнен технологический расчёт процессов адсорбции и десорбции для предложенного адсорбента.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Шубина Е.Ю.</i>			<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>				У	57	60
<i>Н. контр.</i>		<i>Родина Т.А.</i>				<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Утверд.</i>		<i>Гужель Ю.А.</i>						

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Кусов Г. В., Савенок О. В., Анализ эффективности подготовки газа на УКПГ-9 Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Наука. Техника. Технологии. – 2016. – № 3. – С. 40 – 51.

2 Запорожец Е.П. Промысловая подготовка нефтяных и природных газов: Учебное пособие // Е.П. Запорожец, Г.К. Зиберт, Е.Е. Запорожец. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – 424 с.

3 ИТС 50-2017. Переработка природного и попутного газа. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 222 с.

4 ГОСТ 5542-2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. 01.07.2015. – М.: Стандартинформ, 2015. – 11 с.

5 Лapidус А.Л. Методические указания по выполнению лабораторных работ: Адсорбционная осушка газа // А.Л. Лapidус, Н.А. Григорьева, Ф.Г. Жагфаров. – М.: РГУ нефти и газа, 2009. – 15 с.

6 Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа: Учебное пособие // А.К. Мановян. – М.: Химия, 2001. – 568 с.

7 Султанов О. Н. Инновационная 3 Э технология осушки природного газа. // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 10. – С. 85 – 92.

8 Лapidус А. Л. Газохимия // А. Л. Лapidус, И. А. Голубева, Ф. Г. Жагфаров. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. – 407 с.

9 Шестерикова Р.Е., Шестерикова А.А. Инновационная технология осушки природных и нефтяных газов // Наука без границ. – 2017. – № 12. – С. 50 – 54. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnaya-tehnologiya-osushki-prirodnih-i-neftyanyh-gazov> (дата обращения: 06.05.2022).

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>					
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Методы повышения депрессии точки росы на установках адсорбционной осушки природного газа Амурском ГПЗ</i>					
<i>Разраб.</i>	<i>Шубина Е.Ю.</i>							<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Гужель Ю.А.</i>							<i>У</i>	58	60
<i>Н. контр.</i>	<i>Родина Т.А.</i>							<i>АмГУ, 818-об гр.</i>		
<i>Утверд.</i>	<i>Гужель Ю.А.</i>									

10 Запорожец Е.П. Очистка нефтяных и природных газов от воды и кислых компонентов: Учебное пособие // Е.П. Запорожец, Г.К. Зиберт, Е.Т. Запорожец. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. – 318 с.

11 Запорожец Е.П. Процессы и оборудование в технологиях подготовки и переработки углеводородных газов: монография / Запорожец Е.П., Шостак Н.А., Запорожец Е.Е. – Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 600 с.

12 Мельников В.Б. Технологический расчет адсорбционной осушки природного газа для производства СПГ: Учебное пособие // В.Б. Мельников, Е.Б. Федорова, Н.П. Макарова, Э.Б. Гафарова. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2017. – 35 с.

13 Потехин В.М. Химия и технология углеводородных газов и газового конденсата: учебник в 2-х частях // Потехин В.М. – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2016. – 560 с.

14 ГОСТ 3956-76. Силикагель технический. 01.01.77. – М.: ИПК издательство стандартов, 2008. – 11 с.

15. Берлин М.А. Переработка нефтяных и природных газов / М.А. Берлин, Н.П. Волков, В.Г. Гореченков. – М.: Химия, 1981. – 472 с.

16. Искалиева С. К, Пивоварова Н. А. Усовершенствование технологии процесса адсорбционной осушки обессеренного газа // Технологии нефти и газа. – 2010. № 3. – С. 13 –18.

17 Скосарь Ю. Г. Совершенствование технологии глубокой осушки природного газа: автореф. дис... канд. тех. наук: 05.17.07 / Ю. Г. Скосарь. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2007. – 29 с.

18 Искалиева С. К., Пивоварова Н. А., Литвинова Г. И. Экспериментальная установка для изучения эффективности адсорбционного // Вестник АГТУ. – 2008. № 6. – С. 164 – 166.

19 Таратанов М.А. Технологические расчеты установок переработки нефти: Учебное пособие // М.А. Таратанов, М.Н. Ахметшина, Р. А. Фасхутдинов. – М.: Химия, 1987. – 352 с.

20 Аджиев А.Ю., Морева Н.П., Долинская Н.И. Отечественные цеолиты для глубокой осушки газа при производстве сжиженного природного газа // НефтеГазоХимия. – 2015. № 3. – С. 34 – 38.

21 Технологический регламент установки осушки и удаления ртути № 1 ТР-1-01-2020, ООО «Газпром переработка Благовещенск», 2020 – 267 с.

22 Дытнерский Ю.И., Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие // Ю.И. Дытнерский, Г.С. Борисов, В.П. Брыков. – М.: Химия, 1987. – 352 с.

23 Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 № 116-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ – 16.05.2022.

24 ГОСТ 12.1.007-76. Классификация и общие требования безопасности. 01.01.77. – М.: ИПК издательство стандартов, 2008. – 11 с.

25 Должностная инструкция аппаратчика адсорбции 4-го разряда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://instrukzii.ru/rabochie/obshhie-professii-himicheskikh-proizvodstv/apparatchik-adsorbicii-4-go-razryada.html> – 16.05.2022.

					<i>ВКР.181138.180301.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>		60