

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Изучение вопросов оптимального выбора газоразделительной установки и ее конструкции, применяемой в системе получения и применения азота</b>

УДК 661.938.071.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Швец Анатолий Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Вольф Э.Л.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Романюк В.Б.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Черемискина М.С.	-		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Манабаев К.К.	к.ф.-м.н.		

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<b>В соответствии с универсальными, общепрофессиональными и профессиональными компетенциями</b>		
<b>Общие по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»</b>		
P1	Применять базовые естественнонаучные, социально-экономические, правовые и специальные знания в области нефтегазового дела, для решения <i>прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем</i> , соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики) , самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	УК-1, УК-2, УК-6, ОПК-1, ОПК-2, (ЕАС-4.2, АВЕТ-3А, АВЕТ-3i).
P2	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные <i>исследования</i> с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в <i>сложных и неопределённых условиях</i> ; использовать <i>принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности</i>	УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, , ОПК-2, ОПК-6,
<i>в области производственно-технологической деятельности</i>		
P3	Проявлять профессиональную <i>осведомленность о передовых знаниях и открытиях</i> в области нефтегазовых технологий с учетом <i>передового отечественного и зарубежного опыта</i> ; использовать <i>инновационный подход</i> при разработке новых идей и методов <i>проектирования</i> объектов нефтегазового комплекса для <i>решения инженерных задач развития</i> нефтегазовых технологий, <i>модернизации и усовершенствования</i> нефтегазового производства.	УК-1, УК-2, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-5, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9, ПК-10, ПК-11
P4	<i>Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы</i> для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила <i>охраны здоровья и безопасности труда</i> , выполнять требования по <i>защите окружающей среды</i>	ОПК-6, ПК-12, ПК-13, ПК-14, ПК-15
<i>в области экспериментально-исследовательской деятельности</i>		
P5	Быстро ориентироваться и выбирать <i>оптимальные решения в многофакторных ситуациях</i> , владеть методами и средствами <i>математического моделирования</i> технологических процессов и объектов	УК-3, УК-8, ОПК-3, ОПК-7, ПК-16, ПК-17, ПК-18), (ЕАС-4.2-h), (АВЕТ-3d).
<i>в области проектной деятельности</i>		
P6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при <i>разработке и реализации проектов</i> , проводить <i>экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность</i>	УК-2, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7, , ПК-19, ПК-20, ПК-21, ПК-22
<i>в области организационно-управленческой деятельности</i>		
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести ответственность за результаты работы	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-23, ПК-24, ПК-25, ПК-26)

<i>Код результата</i>	<i>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</i>	<i>Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон</i>
<i>в области проектной деятельности</i>		
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	УК-2, ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-27, ПК-28, ПК-29, ПК-30, (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е).
<b>Профиль «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»</b>		
P9	Планировать и организовывать работу по проведению планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания технологического оборудования	ОПК-5, ОПК-6, ПК-3, ПК-7, ПК-9, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-21, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»
P10	Планировать внедрение новой техники и передовых технологий, разрабатывать и реализовывать программы модернизации и технического перевооружения предприятия с целью повышения надежности, долговечности и эффективности работы технологического оборудования	ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-10, ПК-12, ПК-17, ПК-21, ПК-23, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»
P11	Организовывать проведение проверок технического состояния и экспертизы промышленной безопасности, проводить оценку эксплуатационной надежности технологического оборудования.	ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-9, ПК-10, ПК-17, ПК-30, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2018 /2019 учебного года)

Форма представления работы:

<b>МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ</b>
---------------------------------

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.04.19	<i>Теоретическая часть работы + анализ технологических решений</i>	25
05.05.19	<i>Разработка конструкции установки на исследование абразивного износа при отрицательных температурах, проведение расчетов.</i>	50
20.05.19	<i>Написание разделов финансовый менеджмент, социальная ответственность. Перевод раздела на английский язык</i>	25

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Вольф Э.Л.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
	Манабаев К.К.	к.ф-м.н		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 Нефтегазовое дело  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ74	Швец Анатолию Сергеевичу

Тема работы:

Изучение вопросов оптимального выбора газоразделительной установки и ее конструкции, применяемой в системе получения и применения азота	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№852/с от 04.02.2019 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2019 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Научная и учебная литература, годовые отчеты и внутренние руководящие документы нефтегазовых компаний, нормативно-правовая база по разработке месторождений нефти и газа.</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений науки и техники в рассматриваемой области.</li> <li>2. Анализ различных способов получения азота</li> <li>3. Финансовый менеджмент.</li> <li>4. Социальная ответственность.</li> <li>5. Выводы по работе.</li> </ol>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p><i>Таблицы:</i>  Таблица 1 – Сводная таблица способов получения инертного газа  Таблица 2 – Способы абразивного низкотемпературного изнашивания.  Рисунок 45 - Схема плоского центробежного ускорителя</p>
--	---

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	Романюк Вера Борисовна доцент, к.э.н.
<b>Социальная ответственность</b>	Черемискина Мария Сергеевна ассистент

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Анализ методов и технологических процессов получения азота

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Вольф Э.Л.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Швец Анатолий Сергеевич		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 187 с., 53 рис., 24 табл., 41 источник, 1 прил.

Ключевые слова: азот, система инертного газа, установка получения азота, хладноломкость, криогенные процессы, мембранный блок, адсорбент, установка получения азота, абразивный износ, низкотемпературная воздушная среда, испытываемые стали, закономерности изнашивания, схемы износных испытаний.

Объектом исследования является система получения и применения инертного газа (азота).

Цель работы – в соответствии с темой настоящей работы необходимо осуществить анализ промышленных способов и лабораторных методов (машины Стирлинга) получения азота в виде инертного газа и криопродукта для их использования, как в нефтегазовой отрасли, так и для применения исследовательской практике.

Задачи:

1. Определить потребности в азоте как в виде инертного газа, так и криопродукта и разработать систему их получения и использования.
2. Изучить изменение абразивности горных пород под влиянием отрицательных температур.
3. Выявить виды поверхностного разрушения долот и разобраться с Российской классификацией их износа.
4. Разработать - в рамках системного подхода - методику испытаний металлических материалов (в основном сталей и сплавов) для выявления закономерностей их абразивного низкотемпературного изнашивания.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были проанализированы способы получения азота в нефтегазовой отрасли на примере морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная», а также осуществлено сопоставление широко применяемых: адсорбционного, мембранного и криогенного способов. Выявлены их преимущества и недостатки. Изучено оборудование для системы получения инертного газа.

Помимо отмеченного также изучено влияние схемы воздействия абразивных частиц в условиях низких температур на изнашиваемую металлическую поверхность. В качестве базового варианта предложена схема оригинальной конструкции на основе типового сверлильного станка, для исследования абразивного низкотемпературного изнашивания металлических материалов, применяемых в нефтегазовой отрасли.

## **Обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы следующие сокращения:

МЛСП – морская ледостойкая стационарная платформа

КРС – капитальный ремонт скважин

КЦА – короткоцикловая адсорбация

НД – азот низкого давления

ВД – азот высокого давления

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация

ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования

ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования

ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Общие требования

## Оглавление

Введение.....	12
1. Обзор Литературы.....	15
1.1. Анализ методов и промышленных способов получения азота.....	17
1.2 Назначение и использование сжатого азота.....	25
1.2.1. Мембранная установка .....	25
1.2.2. Определение расхода азота .....	33
1.2.3. Определение потребности воздуха .....	34
1.2.4. Подбор и расположение оборудования .....	35
1.4. Машины Стирлинга .....	40
2. Использование жидкого азота в качестве криопродукта.....	45
2.1. Вводные замечания.....	45
2.2. Об изнашивающей способности горных пород (абразивность) .....	47
2.3. Механизм работы шарошечных долот .....	55
2.4. Классификация износа долот.....	66
2.5. Механическое изнашивание бурового инструмента.....	70
2.6. Исследование ударно-абразивного изнашивания.....	87
2.7. Исследование низкотемпературного ударно-абразивного изнашивания .....	98
3. Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	121
3.1. Анализ промышленных способов получения азота .....	121
3.2. Потенциальные потребители результатов исследования .....	122

3.3. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	123
3.4. Планирование научно-исследовательских работ .....	125
3.5. Определение ресурсоэффективности проекта .....	137
4. Социальная ответственность .....	143
4.1. Профессиональная социальная ответственность.....	145
4.1.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды .....	146
4.2. Экологическая безопасность.....	148
4.2.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду ..	148
4.2.2. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды .....	149
4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	150
4.3.1. Анализ вероятных чрезвычайных ситуаций, которые могут возникнуть на производстве, при внедрении и эксплуатации объекта исследований .....	151
4.3.2. Обоснование мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций и разработка действий в случае возникновения чрезвычайной ситуации .....	153
4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	155
4.4.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	155
4.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .	157
Заключение .....	159
Список использованных источников .....	161
Приложение А .....	165

## **Введение**

В настоящее время добыча углеводородного сырья в Российской Федерации является одним из краеугольных камней национальной экономики. Сохранение высоких темпов добычи нефти и газа, это важная задача, в решении которой необходим комплексный подход. Ввиду того, что новые месторождения углеводородных ресурсов открываются все реже, дальнейшее развитие отрасли возможно только путем повышения эффективности эксплуатации уже открытых месторождений и широкого внедрения технологий, которые позволят добывать нефть и газ из истощенных залежей с аномально низкими пластовыми давлениями, а также из залежей с трудноизвлекаемыми запасами, которые характеризуются низкой проницаемостью коллекторов и сложными реологическими свойствами пластовых флюидов. Эксплуатация таких залежей требует большого количества скважинных операций, которые сопровождаются глушением скважины. Последующий ввод скважины в эксплуатацию – освоение, в таких условиях становится критически важной операцией, от которой зависит продуктивность скважины после ремонтных работ и достигаемый эффект от мероприятий по интенсификации притока. Освоение скважин азотом с применением колтюбинга лучше всего подходит для решения данной задачи, так как позволяет производить вызов притока со стабильными и высокими значениями депрессии и минимальными негативными воздействиями на пласт. Проблемами освоения нефтяных и газовых скважин в разное время занимались многие отечественные и зарубежные авторы, среди них необходимо отметить Качмара Ю.Д., Басарыгина Ю.М., Зозулю Г.П., Овчинникова В.П., Кустышева А.В., Булатова А.И, Тагирова К.М., Шлеина Г.А., Яремийчука Р.С., Hongren Gu, Yunxu Zhou, I.C. Wallton.

Помимо отмеченного на сегодняшний день азот используется и в других сферах нашей жизни, а именно: в химической и нефтехимической, нефтегазовой, металлургической, лакокрасочной промышленности, медицине и фармацевтике, электронной, пищевой промышленности. Такой обширный перечень показывает, насколько широко азот и азотные установки используются в разных отраслях производства. Более того актуальность рассмотренных в работе вопросов обусловлена стратегией освоения перспективных в экономическом отношении регионов России (рисунок 1), для которых характерны суровые климатические условия. Это приводит прежде всего к неблагоприятному воздействию на материал деталей эксплуатируемой техники климатически низких температур. Выход из строя деталей, а нередко целых узлов бывает связан чаще всего с их износом [1,2,3], интенсивность которого, как правило, нарастает при воздействии отрицательных температур (к низкотемпературным принято относить процессы, протекающие при температурах ниже 273 К). Наиболее губительным, в плане влияния на работоспособность этих элементов механических систем, является их абразивное изнашивание [4]. При этом практика эксплуатации техники в северных условиях показала, что интенсивность этого вида механического изнашивания деталей в узлах трения связана с неблагоприятным воздействием на физико-механические свойства, а значит и на износостойкость сталей охлажденной воздушной среды [5,6]. Поэтому изучение характера и причин поверхностного разрушения деталей, изготовленных из стальных материалов, представляет как научный [7], так и сугубо практический интерес [8,9]. Применение инертного азота это и наиболее эффективное и перспективное направление развития не только современных способов освоения скважин, но и для операций по вытеснению остатков нефти, нужд технологического комплекса, проведению капитального ремонта скважин (КРС), для испытания и продувки трубопроводов, пожаротушения (создание инертной среды).

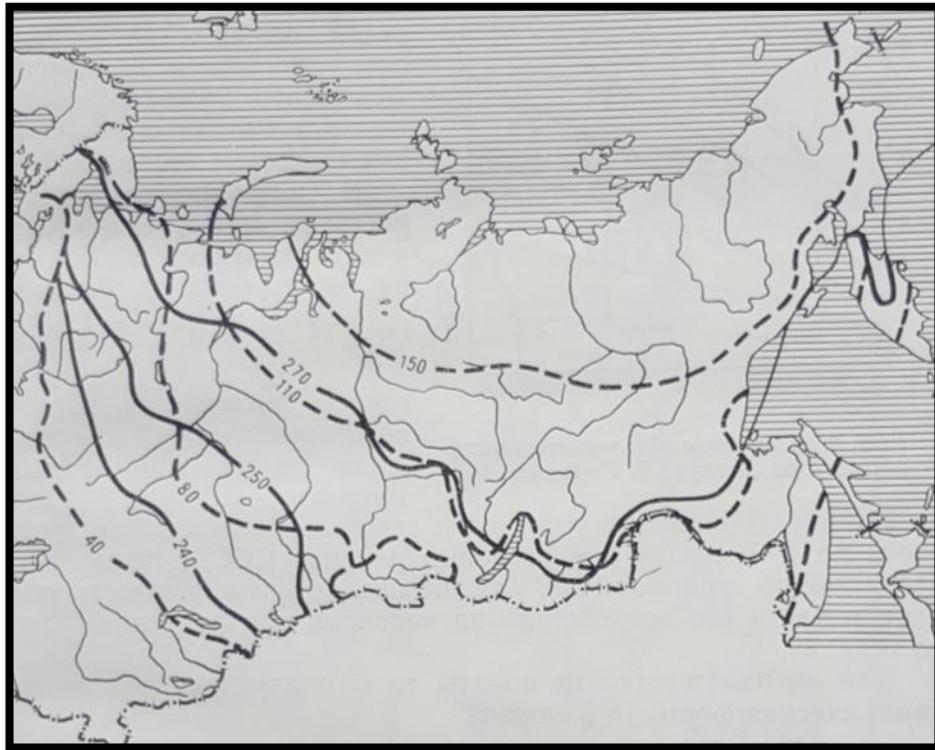


Рисунок 1 - Распределение числа дней в году отрицательной температурой:

——— изолинии числа дней в году с температурой 0°C и ниже;

- - - - - изолинии числа дней в году с температурой - 15°C и ниже

## 1. Обзор литературы

На сегодняшний день азот используется почти во всех сферах нашей жизни, а именно: в химической и нефтехимической, нефтегазовой, металлургической, лакокрасочной промышленности, медицине и фармацевтике, электронной, пищевой промышленности. Такой обширный перечень показывает, насколько широко азот и азотные установки используются в разных отраслях производства. В работе [22] автором были изложены основы производства кислорода, азота и редких газов, приведены сведения о вспомогательных материалах, описано оборудование, аппаратура и процессы получения этих газов из воздуха, рассмотрены методы контроля производства и правила техники безопасности. Даны схемы и технические характеристики новых, освоенных промышленностью в последние годы, установок для разделения воздуха. Работа [23] является более обширной, суммирующей основные особенности химии всех химических элементов. Она охватывает вводные разделы и сведения по VII, VI, V, IV группам периодической системы, а также инертным газам (включая их основные соединения). Установка по производству азота в основе имеет генератор азота (работающий по принципу короткоциклового безнагревной адсорбции) и систему фильтров с компрессором. Также в установку включаются воздушные ресиверы, которые сглаживают пульсации давления. Отводчики конденсата первично очищают сжатый воздух от лишних примесей. По мере надобности установка может комплектоваться ресивером для азота, а также дожимающим компрессором. Установка по производству азота может функционировать на основе одной из технологий газоразделения: мембранной, адсорбционной или же криогенной. В работе [24] подробно рассмотрены системы инертизации и дегазации, операции с системами инертизации, эксплуатация и техническое обслуживание системы инертного газа, обеспечение безопасности при применении инертного газа, нормативные положения, касающиеся применения инертного газа и технических требований к системам.

В работе [25] рассматриваются основные технологические процессы и аппараты химической промышленности - гидромеханические, тепловые, массообменные, химические и механические. Изложены теоретические основы типовых процессов химической технологии, принципы действия важнейших аппаратов и методы их расчета.

Автором работы [26], были рассмотрены основные составляющие азотных установок, дана информация о каждом оборудовании, таком как: генератор азота, воздушный компрессор, воздушные фильтры, осушитель воздуха, воздушная емкость, буферная емкость азота, технологический резервуар.

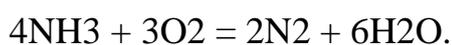
В работе [27] описаны все основные и распространенные способы получения азота, как с помощью оборудования, так и в лаборатории, расписаны все комплектующие азотных установок, приведены примеры и чертежи.

## 1.1 Анализ методов и промышленных способов получения азота

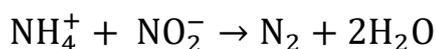
Инертный двухатомный газ азот является одним из самых распространенных химических элементов во Вселенной. Из него на 75 % по массе состоит атмосфера Земли. Азот в нормальных условиях (760 мм рт. ст., 0 °С) представляет собой бесцветный и безвкусный газ, не имеющий запаха и плохо растворяющийся в воде. После охлаждения до -198,5 °С в виде жидкого вещества он внешне очень похож на обычную воду. При дальнейшем охлаждении до -209,86 °С азот переходит в твердое агрегатное состояние в виде кристаллоподобной массы.

Химические свойства азота в целом обуславливаются его инертностью. В нормальных условиях он практически не способен к диссоциации на отдельные атомы и реакции с другими элементами. Исключением является реакция азота с литием с образованием нитрида лития. При нагревании возможно получение более обширного перечня химических соединений. Рассмотрим способы получения азота. В лабораториях можно получить небольшое количество азота следующими методами:

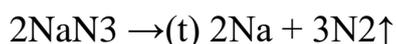
1) в процессе окисления аммиака или иона аммония,



2) при окислении иона аммония нитрит – ионом



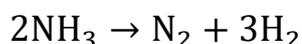
3) посредством разложения при нагревании азидов,



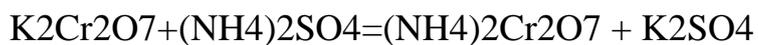
4) при разложении аммиака оксидом меди при температуре около 700 С:



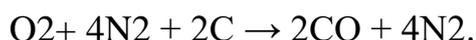
5) каталитическим разложением аммиака при высоких температурах



б) при нагревании смеси сульфата аммония и дихромата калия в соотношении 1:2;



7) при реакциях воздуха и раскаленного кокса можно получать «атмосферный» или «воздушный» азот, который представляет собой смесь азота и благородных газов.



Один из самых распространенных способов - это получение азота из атмосферы. Этот способ обусловлен, прежде всего, экономически, поскольку характеризуется сжижением очищенного воздуха от паров воды, пыли и CO<sub>2</sub> за счет последовательности циклов его сжатия, охлаждения и расширения. Затем проводится фракционная перегонка жидкого воздуха при плавном увеличении температуры. Сначала отделяются благородные газы, потом азот, а жидкий кислород остается. Многочисленные процессы фракционирования обеспечивают его очистку. Так, ежегодно производится азот в количестве многих миллионов тонн, который используется, главным образом, в синтезе аммиака – исходного сырья в производстве соединений с азотом, используемых в сельском хозяйстве и промышленности. Очищенная азотная атмосфера может также использоваться в случаях, когда нельзя допускать присутствия кислорода. Получение азота из воздуха считается промышленным процессом. Вначале воздух проходит охлаждение, его сжижают, и уже жидкий он подвержен дистилляции, другими словами перегонке. Азот кипит при температуре ниже, чем температура кипения кислорода. Температура кипения азота – 195,8 °С, а кислорода – 182,9 °С.

Таким образом, если очень осторожно нагревать жидкий воздух, азот испарится первым.

Азот в газообразном виде потребителям доставляют в сжатом виде (15 МПа или 150 атм.). По госту баллоны должны быть черного цвета и иметь надпись «азот» желтого цвета. Жидкий азот хранится в сосудах Дьюара.

Для получения азота в промышленности применяют установки по производству азота. Установка по производству азота – это установка, используемая для получения азота из атмосферного воздуха. Представляет она собой целый комплекс оборудования, которое необходимо для производства азота. Нужные значения концентрации азота в продукционном газе могут быть выставлены без конструктивных изменений в установке. В целом же, установка может производить азот с чистотой до 99,999%. Установка по производству азота в основе имеет генератор азота и систему фильтров с компрессором. Также в установку включаются воздушные ресиверы, которые сглаживают пульсации давления. Отводчики конденсата первично очищают сжатый воздух от лишних примесей. По мере надобности установка может комплектоваться ресивером для азота, а также дожимающим компрессором. Установка по производству азота может функционировать на основе одной из технологий газоразделения: мембранной, адсорбционной или же криогенной.

Таблица 1 - сводная таблица типов газоразделительных установок.

Тип установки	Чистота азота	Получение азота	Тип азота
<i>Установка мембранного типа</i>	от 99,5% до 99,9%	От 10 до 5000 нм <sup>3</sup> /ч	Газ
<i>Установка адсорбционного типа</i>	99,9%	От 100 до 3,000 нм <sup>3</sup> /ч	Газ
<i>Криогенная технология</i>	99,9%	200000 нм <sup>3</sup> /ч	Газ, жидкость

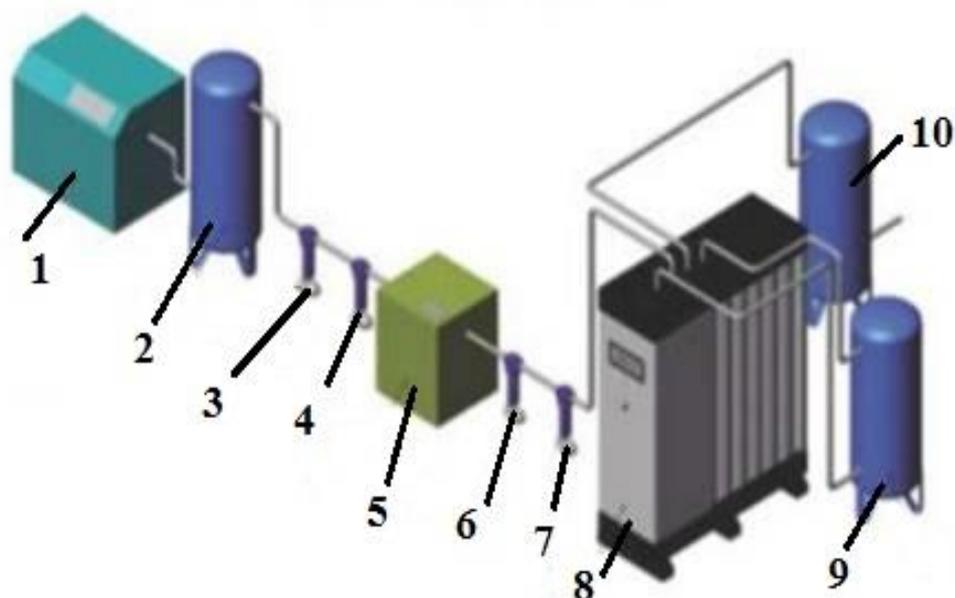


Рисунок 2 - Схема установки в сборе

1. Компрессор; 2. Емкость сжатого воздуха; 3. - 7. Осушитель воздуха и фильтры; 8. Генератор азота; 9. Регенеративная ёмкость; 10. Буферная ёмкость азота.

**Адсорбционная технология** предполагает связывание отдельных элементов смеси твердым адсорбирующим веществом благодаря силам взаимодействия между молекулами газа и адсорбента. Наиболее распространенные азотные установки адсорбционного типа – это установки безнагревной короткоцикловой адсорбции. Схема организации процесса, применяемая в азотных установках с такими системами, основана на регулировании скорости поглощения компонентов разделяемой газовой смеси и регенерации адсорбента путём изменения давления в двух адсорберах — сосудах, содержащих адсорбент. Этот процесс протекает при температуре, близкой к комнатной.

При использовании этой схемы азот производится установкой при давлении выше атмосферного.

Процесс короткоцикловой адсорбции (КЦА) в каждом из двух адсорберов состоит из двух стадий. На стадии поглощения происходит улавливание адсорбентом преимущественно одного из компонентов газовой смеси с получением продуктового азота. На стадии регенерации поглощённый компонент выделяется из адсорбента и отводится в атмосферу. Далее процесс повторяется многократно.

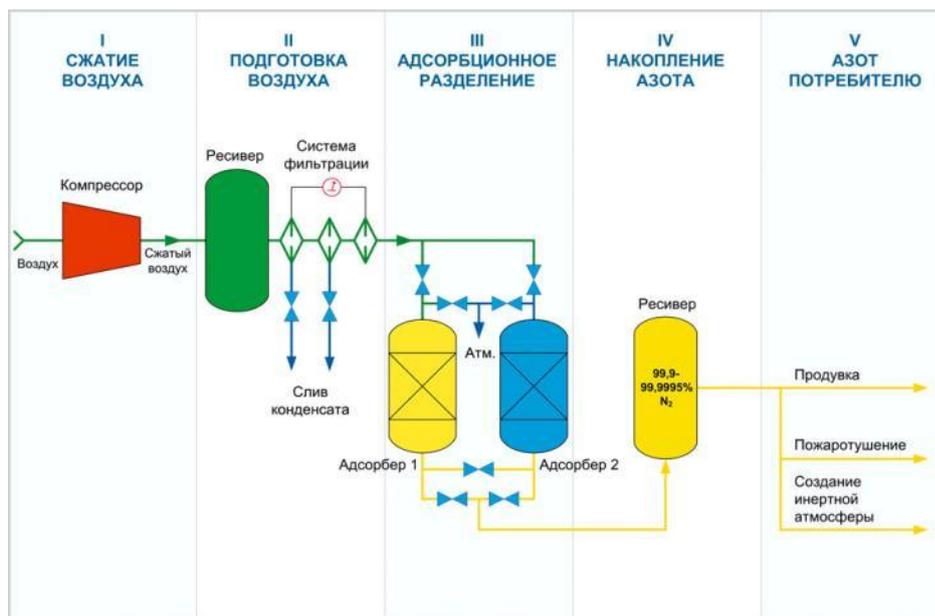


Рисунок 3 - Схема и принцип работы адсорбционной установки

Преимущества: азотные установки адсорбционного типа дают возможность получать азот чистотой до 99,9995 %. Такая чистота азота может быть получена также криогенными системами, но они значительно сложнее и оправданы только при очень большом объёме производства. А также - минимальные эксплуатационные затраты, высокая степень надёжности и безотказности, небольшие габариты и вес полная автоматизация, простота в эксплуатации, быстрый запуск и остановка установки, большой ресурс работы установок.

Недостатки: повышенное содержание пароводяной влаги вызывает снижение эффективности работы адсорбента, в связи с чем обязательно требуется установка фреонового осушителя сжатого воздуха.

Намного лучше, для продления срока службы адсорбента, установить адсорбционный осушитель. Конструкция адсорбционных установок сложнее, чем мембранных, что означает и большую, при прочих равных, вероятность возникновения неполадок. Получение азота от 100 до 3 000 м<sup>3</sup>/час при чистоте продукта 99,9%.

**Мембранная технология** основана на разнице скоростей проникновения отдельных газов через мембранную поверхность. Здесь решающей является разница парциального давления на противоположных сторонах стенки мембраны. В таких установках отсутствуют движущиеся части, что обеспечивает надежность. Мембраны довольно устойчивы к вибрациям и ударам, а также практически не подвержены воздействию влаги и масел.

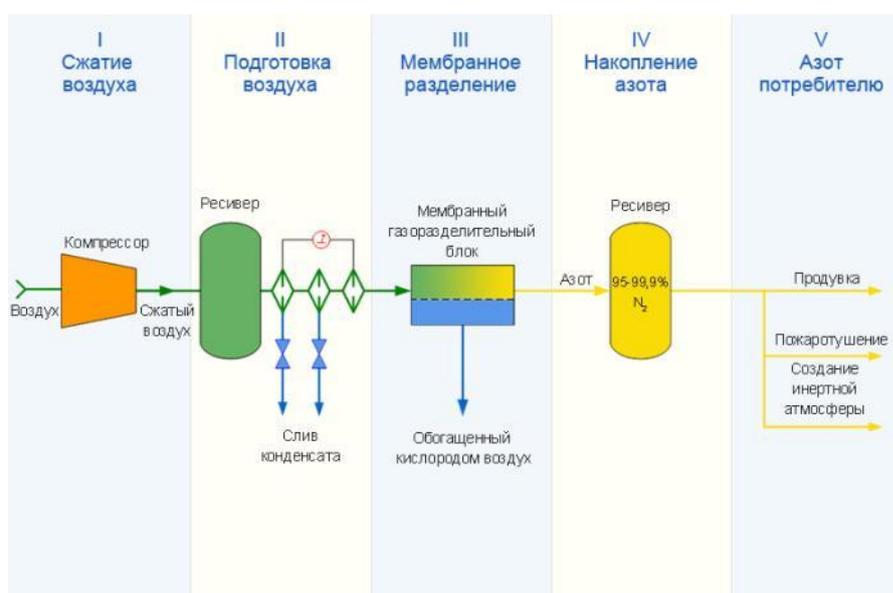


Рисунок 4 - Схема и принцип работы мембранной установки

Преимущества: в газоразделительных блоках полностью отсутствуют движущиеся части, что обеспечивает надёжность установок. Мембраны очень устойчивы к вибрациям и ударам, химически инертны к воздействию масел и нечувствительны к влаге, функционируют в широком диапазоне температур от -40 °С до +60 °С.

При соблюдении условий эксплуатации ресурс мембранного блока составляет от 130 000 до 180 000 часов (15-20 лет непрерывной работы).

Недостатки: деградация мембран, т.е. утрата, снижение производительности мембранного картриджа. Также относительно низкая чистота получаемого азота, мембранная установка способна вырабатывать азот с чистотой 99,5...99,9%, она потребляет намного больше сжатого воздуха (и, следовательно, электроэнергии), чем адсорбционная, что делает её эксплуатацию экономически невыгодной.

Получение азота от 10 до 5000  $\text{nm}^3/\text{час}$ , при концентрации 95 - 99,8 %.

**Криогенная технология.** В основе работы криогенных установок разделения воздуха лежит метод низкотемпературной ректификации, базирующийся на разности температур кипения компонентов воздуха и различии составов находящихся в равновесии жидких и паровых смесей. В процессе разделения воздуха при криогенных температурах между находящимися в контакте жидкой и паровой фазами, состоящими из компонентов воздуха, осуществляется массо- и теплообмен. В результате паровая фаза обогащается низкокипящим компонентом (компонентом, имеющим более низкую температуру кипения), а жидкая высококипящим компонентом. Таким образом, поднимаясь по ректификационной колонне вверх, пар обогащается низкокипящим компонентом – азотом, а стекающая вниз жидкость насыщается высококипящим компонентом – кислородом.

У криогенных установок более длительный период запуска, поэтому такая технология лучше подходит для стационарных масштабных комплексов.



Рисунок 5 - Криогенная станция получения азота

Преимущества: криогенный метод - единственный метод, который обеспечивает высокую чистоту продуктов разделения, что немаловажно, при высоком коэффициенте извлечения, и любом количестве продукта, что обуславливает высокую экономичность. При этом метод позволяет одновременно получать несколько продуктов разделения и получать продукты, как в виде газа, так и в виде жидких продуктов. Таким образом, криогенная технология обеспечивает более высокую гибкость технологии.

Недостатки: к недостаткам криогенных установок можно отнести более длительный, по сравнению с адсорбционными и мембранными установками, пусковой период. В силу чего данный метод целесообразно применять для крупных стационарных комплексов большой производительности с длительным периодом непрерывной работы. Получение азота до 200 000 нм<sup>3</sup>/час.

## **1.2. Назначение и использование сжатого азота**

С помощью сжатого азота нефтегазовая промышленность решает те задачи, в которых требуются давление, и обеспечение взрывобезопасности и пожаробезопасности.

К таким задачам относятся:

- проверка надежности емкостей под давлением и трубопроводов (с помощью закачивания в них инертного азота);
- продувка азотом трубопроводов и емкостей, осушение и удаление кислорода с целью предотвращения их коррозии;
- тушение подземных пожаров и прочих возгораний в закрытых объёмах азотом (в отличие от воды без ущерба месторождению или помещению);
- использование сжатого азота для работы пневмооборудования;
- выравнивание давления между технологическими емкостями, создание инертной газовой подушки над агрессивными жидкостями в резервуарах.
- Продувка поршневого компрессора
- На сухие газодинамические уплотнения

### **1.2.1 Мембранная установка**

Самым распространенным методом получения азота, является мембранный метод. В мембранных установках отсутствуют движущиеся части, что обеспечивает надежность. Мембраны довольно устойчивы к вибрациям и ударам, а также практически не подвержены воздействию влаги и масел. Мембранная установка обладает производительностью от 10 до 5000 нм<sup>3</sup>/ч, при чистоте азота от 95% до 99,8%, а при соблюдении условий эксплуатации, ресурс мембранного блока составляет 15-20 лет непрерывной работы. Поэтому целесообразно применять установки данного типа на производстве. Далее будет рассмотрено оборудование для мембранной установки.

Система инертного газа предназначена для обеспечения объекта сжатым азотом низкого и высокого давления. Под системой инертного газа подразумевается установка для выработки инертного газа и система распространения инертного газа вместе со средствами предотвращения противотока газов, а также стационарные и переносные измерительные устройства и приборы контроля.

В состав системы инертного газа входит:

- компрессор воздуха низкого давления;
- воздухохранилище, состоящий из ресиверов;
- блок осушки сжатого воздуха;
- мембранные газоразделительные блоки;
- азотохранилище, состоящий из ресиверов;
- дожимной компрессор азота;
- блок баллонов с азотом;

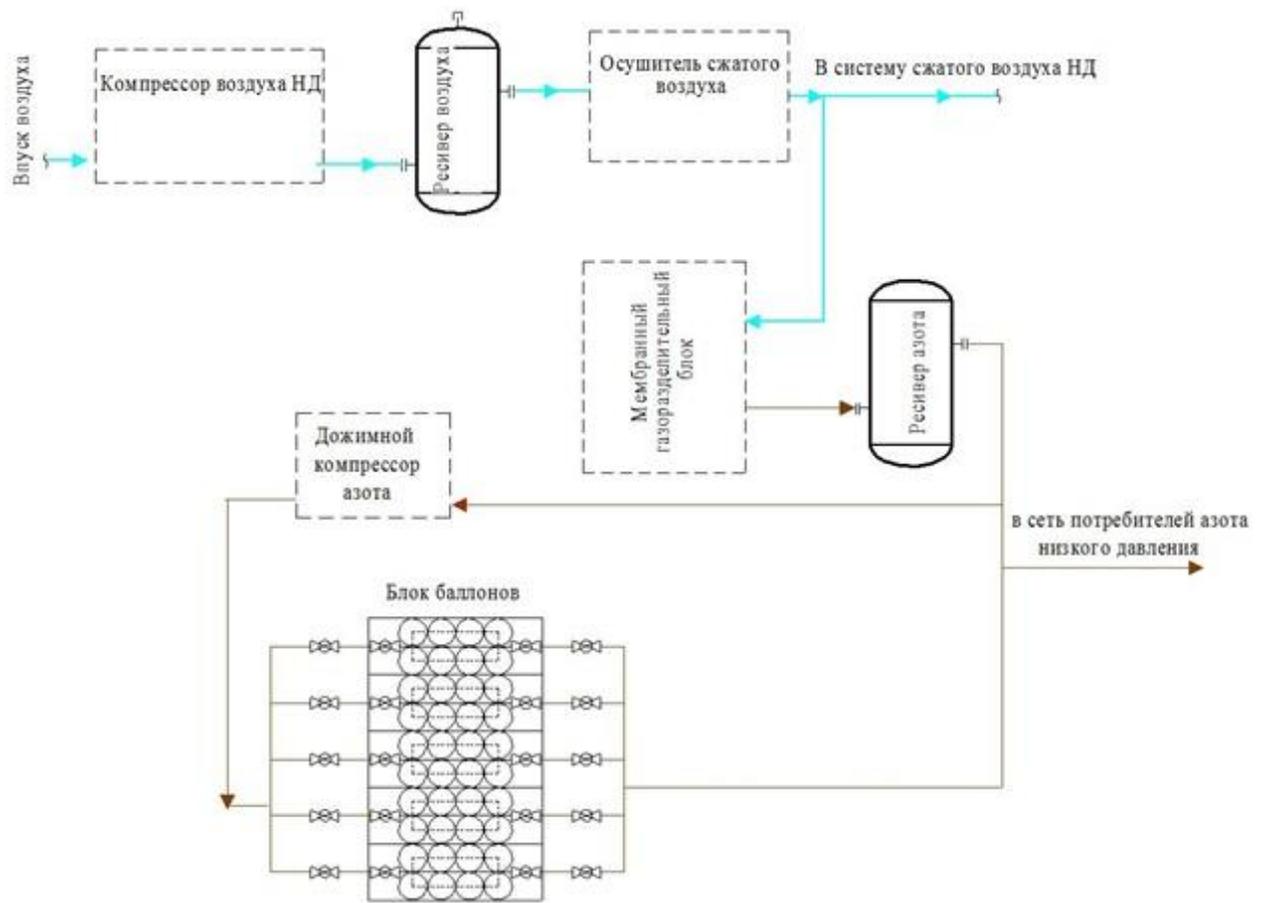


Рисунок 6 – Система инертного газа

## **Осушители сжатого воздуха**

Осушитель сжатого воздуха – предназначен для осушки воздуха до точки росы минус 60 °С. Осушитель воздуха состоит из двух сушильных башен, заполненных сиккативом (адсорбентом). Работа сушильных башен циклическая, в то время когда в одной из них идет процесс поглощения влаги, вторая находится на регенерации адсорбента. Функции адсорберов меняются каждые 4 часа, если выбран режим работы по таймеру, или по мере насыщения адсорбента влагой, если выбран режим работы по точке росы осушенного воздуха. Адсорбер представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд со сферическими днищами оборудованный люком для загрузки и выгрузки сиккатива и люком для ввода нагревательных элементов (ТЭНа).

В каждый адсорбер загружено по два типа сиккатива: нижний слой – сиккатив тип 1 (обычный силикагель) в количестве 300 кг, верхний слой – сиккатив тип 3 (водостойкий силикагель) в количестве 850 кг. Срок службы адсорбента – 5 лет непрерывной работы при условии правильной эксплуатации осушителя. Для выполнения регенерации в адсорберах установлены электронагреватели.

Подача воздуха на первом этапе регенерации осуществляется воздуходувкой. Адсорберы оснащены предохранительными клапанами, соответственно, установленными на трубопроводе сброса давления. Сброс давления из отключенного на регенерацию адсорбера производится через выпускной клапан на глушитель. На входе и выходе воздуха установлены фильтры. Входной фильтр и адсорберы оборудованы арматурой слива конденсата. Трубопроводы входа и выхода воздуха, а также трубопроводы воздуха регенерации оснащены автоматическими электромагнитными клапанами, обратными клапанами.

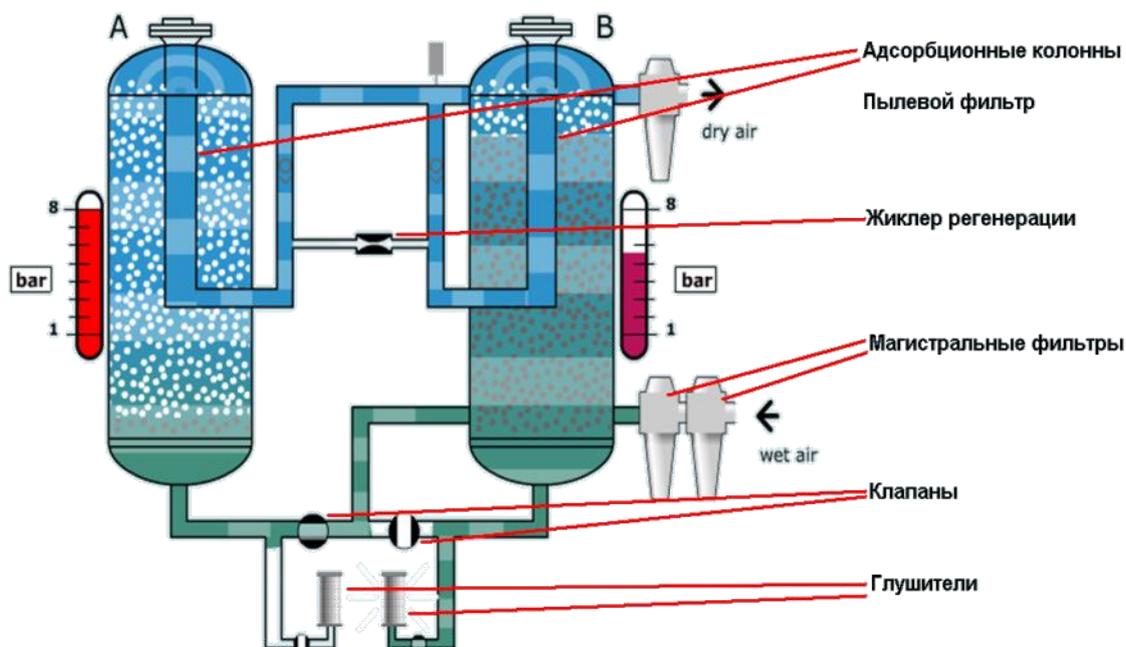


Рисунок 7 - Принцип работы осушителя

### Ресивер (воздухосборник)

Ресиверы воздуха (воздухосборники) - вертикальные цилиндрические аппараты со сферическими днищами, предназначены для создания запаса сжатого воздуха низкого давления и сглаживания пульсаций при работе компрессоров. Каждый ресивер установлен на трех стойках-опорах, имеет люк-лаз для проведения внутреннего осмотра, оснащен трубопроводами входа и выхода воздуха, трубопроводом вывода конденсата, дренажным патрубком, воздушником с пробкой, предохранительным клапаном, приборами контроля давления по месту и дистанционно. Так же он служит для создания сети запаса сжатого воздуха. От этого запаса воздуха, какое - то время может работать пневмооборудование в случае, каких-либо перебоев в работе компрессора, который закачивает сжатый воздух в сеть, частью которой этот ресивер является.

Воздухосборник может служить источником сжатого воздуха при кратковременном большом потреблении, превышающим подачу от компрессора



Рисунок 8 - Ресивер

### **Разделители**

Мембранные газоразделительные блоки - предназначены для получения азота чистотой не менее 95 %. Возможно получение азота более высокой чистоты за счет снижения производительности установки по азоту. Газоразделительный блок состоит из следующих частей:

- блока подготовки сжатого воздуха,
- модульного газоразделительного блока
- стойки управления.

Блок подготовки сжатого воздуха включает в себя фильтры общей очистки и тонкой очистки, предназначенные для очистки воздуха от масла, твердых частиц и капельной влаги, а так же адсорбционный фильтр, предназначенный для дополнительной очистки сжатого воздуха от паров масла.

Фильтры содержат сменные фильтроэлементы, и оснащены дифференциальными манометрами для контроля степени загрязнения фильтроэлементов. Модульный газоразделительный блок представляет собой стойку с установленными на ней по кругу мембранными модулями, воздушным и азотным коллекторами. Соединение мембранных модулей с коллекторами выполнено по параллельной схеме. Каждый мембранный модуль состоит из алюминиевого теплоизолированного корпуса, в котором помещен мембранный картридж. В воздушный коллектор встроен нагреватель воздуха, который служит для подогрева и поддержания постоянно заданной температуры воздуха, поступающего в мембранные модули. Нагреватель укомплектован ТЭН-ми, позволяющими подогревать воздух. На стойке управления расположены распределительный и силовой электрические шкафы с электронными блоками управления работой установки, анализатор концентрации кислорода в продукте (азоте) и баллоны с поверочными газовыми смесями, с пневмодресселем для точного регулирования подачи газовой смеси при калибровке газоанализатора.



Рисунок 9 - Мембранный газоразделительный блок

## **Баллоны, емкости**

Блок баллонов - предназначены для хранения и транспортировки, сжатых водорода, гелия, продуктов разделения воздуха (азот, кислород, аргон), природного газа и углекислоты, газовых смесей. Блок баллонов состоит из моноблоков. Каждый моноблок оснащен вентилем для заполнения и разрывной предохранительной мембраной на случай превышения допустимого давления.

Трубопроводная обвязка моноблоков позволяет централизованно заправлять их азотом до рабочего давления.



Рисунок 10 - Блок баллонов

Азот может пребывать в разных состояниях, в виде газа и жидкости. Газообразный азот рекомендуется под давлением закачивать в специальные баллоны из стали разного объема. Чаще всего используются 40-литровые емкости. Вентиль, предохранительный колпачок, «башмак» и кольцо — основные составляющие подобных баллонов. Их делают черными с желтыми надписями, чтобы было понятно, какой тип газа транспортируется. Организовать хранение жидкого азота можно при использовании другой емкости для азота. Это большие, габаритные цистерны и сосуды Дьюара с многослойной изоляцией — порошкового или вакуумного типа.

## 1.2.2 Определение расхода азота

Целью расчета является определение расхода азота и воздуха в системе, определение необходимого количества воздуха и азота, а также подбор компрессора исходя из нужных условий.

Полученный азот низкого давления (НД) подается в сеть потребителям азота низкого давления.

Постоянно азот НД подается на уплотнение газовых компрессоров и на создание азотных подушек в технологическом оборудовании, на продувку коллектора.

Периодически – на продувку систем и аппаратов перед пуском и при подготовке к ремонту. Также азот используется при авариях, для создания и поддержания инертной среды. Часть азота из системы азота НД поступает в дожимной компрессор для выработки азота высокого давления (ВД) и заполнения моноблоков баллонов для подпитки системы азота низкого давления в периоды пиковых расходов. Суммарный расход азота на постоянные продувки составляет 2200 нм<sup>3</sup>/ч. Общий максимальный расход азота: 3540 нм<sup>3</sup>/ч.

$$V_1 = 40 \times 50 = 2000 \text{ л} = 2 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ - объем баллонов}$$

$$P_1 = 20 \text{ МПа} \text{ - давление в баллонах}$$

$$P_2 = 1,3 \text{ МПа} \text{ - давление в системе}$$

Из формулы  $P_1 V_1 = P_2 V_2$ , найдем  $V_2$ :

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{20 \times 2}{1,3} = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Таким образом запас азота ВД при расширении составит 30 м<sup>3</sup>, при давлении  $P_2$ .

$$Q_{\text{азота (пост.)}} = 2200 \text{ нм}^3/\text{ч} \text{ - количество азота на постоянные продувки}$$

$$Q_{\text{азота(перем.)}} = 1340 \text{ нм}^3/\text{ч} \text{ - количество азота на переменные нужды}$$

$$Q_{\text{азота(макс.)}} = Q_{\text{азота (пост.)}} + Q_{\text{азота(перем.)}} = 3540 \text{ нм}^3/\text{ч}$$

Для получения данного количества азота, выберем мембранный газоразделительный блок МВА-1.4-95.0-1170-В1.

$Q_1 = 1170 \text{ нм}^3/\text{ч}$  - производительность одной установки

Таким образом, для обеспечения нужного количества необходимо 3 установки.

$Q_{\text{сумм}} = 1170 \times 3 = 3510 \text{ нм}^3/\text{ч}$  - общая производительность мембранного блока

При этом, недостача по азоту составляет:

$$3540 - 3510 = 30 \text{ м}^3$$

Данное количество азота можно аккумулировать под высоким давлением в баллонах. Используем 5 моноблоков по 8 баллонов, с общей обвязкой.

### 1.2.3 Определение потребления воздуха

Подогретый, тщательно отфильтрованный воздух подается в мембранный модуль, состоящий из тысяч полых волокон, при этом кислород проходит сквозь стенку мембраны, а азот под давлением выходит из противоположного конца мембраны. Каждый блок предназначен для получения азота чистотой не менее 95 %.

Модульный газоразделительный блок представляет собой стойку с установленными на ней по кругу 18-ю мембранными модулями, воздушным и азотным коллекторами. Объемный расход воздуха на входе на установку не менее 2400 нм<sup>3</sup>/ч. Возможно получение азота более высокой чистоты за счет снижения производительности установки по азоту.

$Q_{\text{воздуха (азот)}} = 7200 \text{ нм}^3/\text{ч}$  - количество воздуха необходимое для азота;

$Q_{\text{воздуха (продувки)}} = 200 \text{ нм}^3/\text{ч}$  - количество воздуха на продувки оборудования;

$Q_{\text{воздуха(макс.)}} = 7200 + 200 = 7400 \text{ нм}^3/\text{ч}$  -общий расход воздуха;

#### **1.2.4 Подбор и расположение оборудования**

Для получения необходимого нам объема азота, необходим компрессор, обладающий нужной производительностью. Как говорилось выше, винтовые компрессоры обладают рядом преимуществ, таких как меньшие габариты, большая производительность, долговечность. Для нашей установки мы возьмем компрессор Atlas Copco GA-250-13. Стационарный воздушный компрессор GA-250-13 производительностью 1900 нм<sup>3</sup>/ч, предназначенный для сжатия воздуха до 13 бар (1,3 МПа) и подачи его в воздухохоборник. В нашем случае, понадобится 4 компрессора. Компрессор – одноступенчатый винтовой с впрыском масла и механическим приводом через редуктор от электродвигателя мощностью 250 кВт. Компрессор помещен в звукопоглощающий корпус. Компрессор состоит из двух винтовых компрессорных элементов, фильтра всасываемого воздуха, системы смазки, системы охлаждения нагнетаемого газа и системы охлаждения масла. Компрессор оснащен системой управления, которую осуществляет электронный регулятор Atlas Copco Elektronikon. Этот электронный блок смонтирован на двери передней панели.

Регулятор позволяет программировать управление компрессором в автоматическом режиме и контролирует его работу.



Рисунок 11 - Компрессор Atlas Copco GA-250-13

Далее необходимо выбрать мембранный газоразделительный блок в количестве трех штук. Нужными нам характеристиками обладает установка *MBA-1.4-95.0-1170-B1*. Производительностью по азоту не менее 1170  $\text{нм}^3/\text{час}$ . Объемный расход воздуха на входе на установку не менее 2400  $\text{нм}^3/\text{час}$ . Модульный газоразделительный блок представляет собой стойку с установленными на ней по кругу 18-ю мембранными модулями, воздушным и азотным коллекторами. Соединение мембранных модулей с коллекторами выполнено по параллельной схеме. Каждый мембранный модуль состоит из алюминиевого теплоизолированного корпуса, в котором помещен мембранный картридж "Generon 6500".

Далее необходим осушитель воздуха, производительностью не менее 7200  $\text{нм}^3/\text{ч}$ . Такой производительностью обладает осушитель BD 1800, компании Atlas Copco. Он предназначен до осушки воздуха до точки росы минус 60°C.

Дожимной компрессор предназначен для выработки азота высокого давления и заполнения моноблоков баллонов для подпитки системы азота низкого давления в периоды пиковых расходов. В качестве дожимного компрессора выберем поршневой компрессор GIB 15.3-11-5. Здесь нам не требуется большая мощность или производительность, поэтому целесообразно и экономически выгодно будет взять данный компрессор. Поршневой двухступенчатый четырехцилиндровый компрессор высокого давления GIB 15.3-11-5 производительностью 30 нм<sup>3</sup>/ч. Служит для обеспечения комплекса азотом высокого давления. Привод компрессора осуществляется от электродвигателя мощностью 16 кВт через ременную передачу. Азот из системы сжатого азота низкого давления редуцируется на всасывании компрессора до давления всасывания, после чего проходит 2 ступени сжатия с промежуточным и конечным охлаждением потока в охладителях. Охлаждение производится вентилятором, установленным на одном валу с компрессором.



Рисунок 12 - Дожимной компрессор GIB 15.3-11-5

Ресиверы воздуха Remeza вертикальные цилиндрические аппараты со сферическими днищами вместимостью по 4,5 м<sup>3</sup>. Каждый ресивер установлен на трех стойках-опорах, имеет люк-лаз для проведения внутреннего осмотра, оснащен трубопроводами входа и выхода воздуха, трубопроводом вывода конденсата, дренажным патрубком, воздушником с пробкой, предохранительным клапаном, приборами контроля давления по месту и дистанционно. Количество ресиверов воздуха выберем по количеству компрессоров. Так как на постоянные продувки требуется 2200 нм<sup>3</sup>/час азота, то постоянно будет работать 2 мембранных установки, поэтому для работы примем 2 ресивера азота.

Блок баллонов состоит из пяти моноблоков, каждый моноблок включает в себя 8 баллонов. Такое количество баллонов обеспечит нас недостающими 30 нм<sup>3</sup>/час азота ВД.

Правильное размещение оборудования является основным звеном в организации безопасной работы производственного участка и цеха. При размещении оборудования необходимо соблюдать установленные минимальные разрывы между станками, между станками и отдельными элементами здания, правильно определять ширину проходов и проездов. Невыполнение правил и норм размещения оборудования приводит к загромождению помещений и травматизму. Расположение оборудования на площади цеха или участка определяется в основном технологическим процессом и местными условиями. При автоматизированном производстве (комплексные автоматические заводы или цеха, автоматические линии, поточное производство) оборудование размещается по ходу технологического процесса в единую цепочку с соблюдением расстояний между оборудованием и конструктивными элементами здания. На автоматических и поточных линиях большой протяженности для перехода с одной стороны линии на другую устраивают переходные мостики.

Проходы и проезды требуется содержать в чистоте и порядке, границы их обычно отмечают белой краской или металлическими светлыми кнопками. Ширина рабочей зоны принимается не менее 0,8 м. Расстояние между оборудованием и элементами зданий, а также размеры проходов и проездов определяются нормами технологического проектирования механических и сборочных цехов машиностроительных заводов.

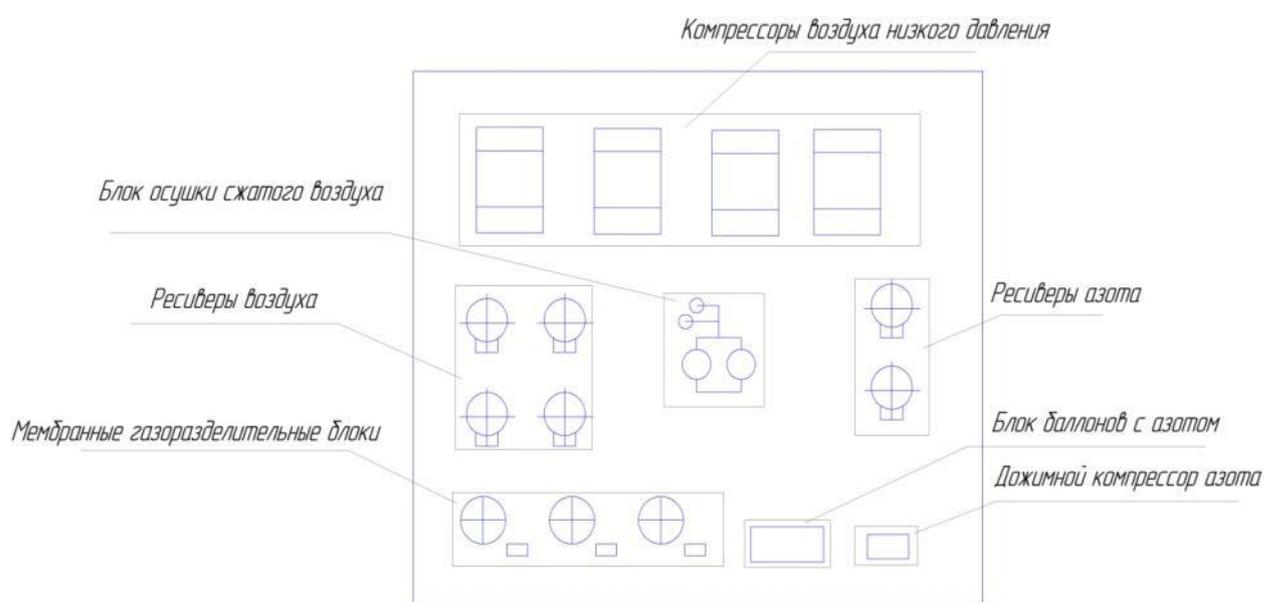


Рисунок 13 - Схема расположения оборудования

## 1.4 Машины Стирлинга

Машины Стирлинга. Наибольшее распространение в криогенной технике получили машины группы П (машины Стирлинга). Они отличаются высоким КПД и являются наиболее компактными. Одноступенчатая КГМ марки PLA-107, серийно выпускаемая фирмой Philips, приведена на рисунке 13. При температуре 77К холодопроизводительность машины составляет 870 Вт. Машина типа ПВ выполнена по соосной схеме. Вытеснитель 3 и поршень 7 компрессора расположены в одном цилиндре 10 диаметром  $d = 80$  мм. Ходы вытеснителя и компрессорного поршня равны 30 и 52 мм соответственно. Отношение максимальных объемов рабочих полостей 2,1. В качестве приводного механизма в машине использовался наиболее простой и надежный в работе кривошипно-шатунный механизм компрессорного поршня и вытеснителя.

Для обеспечения разности фаз движения компрессорного поршня и вытеснителя кривошип 13 коленчатого вала имеет угол развала, равный  $70^\circ$ . Таким образом, при вращении коленчатого вала кривошип вытеснителя опережает кривошип поршня на угол  $\beta$ .

Блок теплообменных аппаратов расположен кольцеобразно, вокруг цилиндра машины. Это в значительной степени позволило уменьшить поперечные размеры машины. В конструкции используется водяной холодильник 5 трубчатого типа: газ циркулирует внутри трубок, снаружи омываемых водой. В качестве насадки регенератора 4 применены галеты из медной проволоки (путанки) диаметром 15...20 мкм. Внутренняя и наружная поверхности теплообменника нагрузки 2 образованы фрезерованными щелевыми каналами, холодная головка КГМ защищена теплоизоляционным кожухом 1. В качестве рабочего газа используется гелий, при этом картер машины заполнен гелием под давлением 1,6 МПа.

При работе машины минимальное и максимальное давления составляют  $p_{min} = 1,67$  МПа и  $p_{max} = 3,53$  МПа. Полумуфта 9 одновременно является и маховиком, вал машины приводится в движение асинхронным электродвигателем мощностью  $N = 11$  кВт с частотой вращения ротора  $n = 1450 \text{ мин}^{-1} = 24,17 \text{ с}^{-1}$ .

В машине применена система принудительного смазывания узлов трения. С помощью масляного насоса 14 масло подается в радиальные 12 и осевые 15 подшипники скольжения, а также в уплотнение 11 коленчатого вала, работающего по принципу гидрозатвора. При работе машины регулирование давления в смазочной системе позволяет обеспечить поддержание разгрузочного клапана 16 в закрытом состоянии. Избыток масла через перепускной клапан 8 попадает в рубашку цилиндра, т. е. используется для охлаждения компрессорной полости. Гидрозатвор находится под рубашкой, что гарантирует герметичность при останове машины. В масляную систему входят фильтры грубой и тонкой очистки. Вытекающий через поршневые уплотнения и сальники гелий возвращается из картера в рабочий объем через буферную емкость и разгрузочный клапан 16, поддерживающий в картере минимальное давление. При перетекании из картера в буферную полость гелий очищается от масла в специальном маслоотделителе манжетного типа.

Разгрузочный клапан 16 отсоединяет рабочий объем машины от буферной полости 6 после пуска машины и объединяет рабочий объем с буферной полостью после ее останова. Это позволяет уменьшить пусковой момент, а также исключить возможность повышения давления в рабочем объеме при отогреве остановленной машины и переходе цикла машины с холодильного на двигательный после выключения электродвигателя.

Применение автоматического блокирования дает возможность остановить работу машина при пониженном давлении масла, а также при недостаточном и превышающем допустимое давлении гелия. В системе блокирования использованы электрические датчики давления.

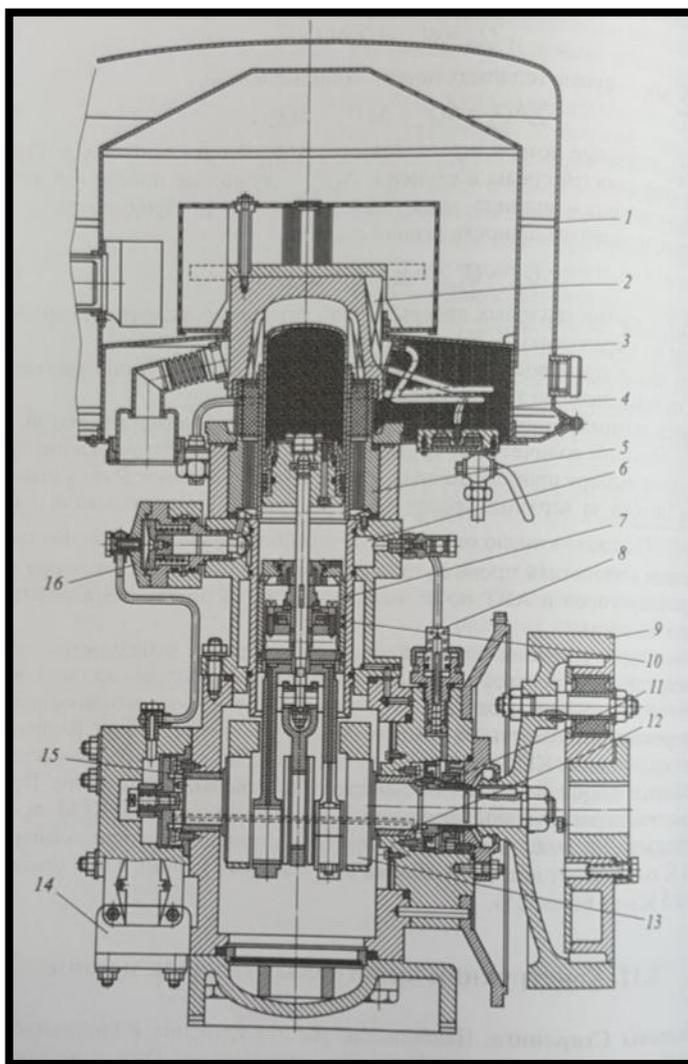


Рисунок 14 - Одноступенчатая КГМ марки PLA-107 фирмы Philips.

1 - теплоизоляционный кожух; 2 - теплообменник нагрузки; 3 - вытеснитель; 4 – регенератор; 5 - водяной холодильник; 6 - буферная полость; 7 - поршень компрессора; 8 – перепускной клапан; 9 - полумуфта-маховик; 10 - цилиндр; 11 - уплотнение коленчатого вала; 12 - радиальный подшипник скольжения; 13 - кривошип коленчатого вала; 14 - масляный насос; 15 - осевой подшипник скольжения; 16 - разгрузочный клапан.

В зависимости от конструкции холодной головки машину выпускают в четырех модификациях: первая - с головкой - вымораживателем (предназначена для получения 7,5 л/ч жидкого воздуха); вторая - с головкой без вымораживателя (применяется в воздуходелительной установке производительностью до 6,5 л/ч жидкого азота); третья - с вентиляционной головкой (используется при работе в термокамере с полезным объемом до л на уровне 93 К); четвертая - с конденсационной головкой (применяется в установках при переконденсации холодного газа). Как в России, так и за рубежом серийно выпускают несколько модификаций одноцилиндровых КГМ Стирлинга с достаточно широким диапазоном производительности. Установка ЗИФ-1002, предназначенная для производства азота высокой чистоты, представлена на рис. 5. 25. Она укомплектована КГМ Стирлинга и ректификационной колонной, позволяет получать 10 л/ч жидкого азота при мощности 17 кВт. На основе этой же машины Стирлинга была создана малогабаритная установка для ожижения природного газа «Газотрон» производительностью 20 л/ч. Отметим ряд недостатков конструкции этой машины. Первым из них является заниженное отношение максимальных объемов компрессорной и детендерной полостей, что обусловлено особенностями схемы. Этот недостаток не удастся устранить увеличением хода поршня вследствие нарушений нормальной работы и уменьшения срока службы поршневых и сальниковых уплотнений. Вторым недостатком состоит в ограниченном периоде непрерывной эксплуатации установки, так как проникающие в рабочий объем пары масла вымерзают в регенераторе, что снижает эффективность его работы (через каждые 1000...2500 ч работы КГМ требуются ее разборка и промывка). Третьим недостатком является значительная неуравновешенность сил инерции в механизме движения машины; для установки машины необходим специальный фундамент. Четвертым недостатком - избыточное давление в картере машины, что затрудняет ее изготовление и увеличивает ее массу.

И наконец, соосное расположение цилиндров усложняет конструкцию механизма движения машины.

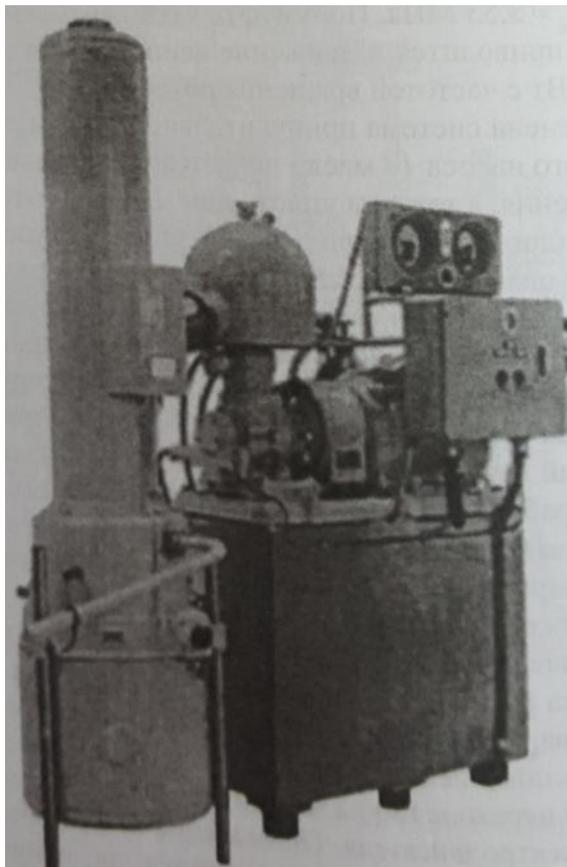


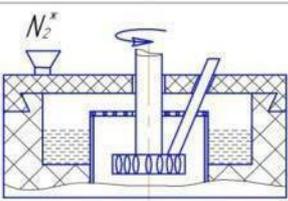
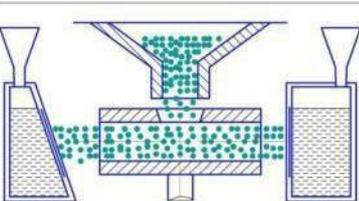
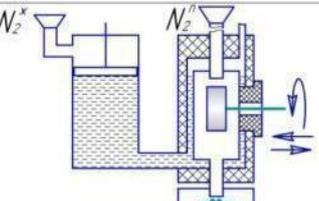
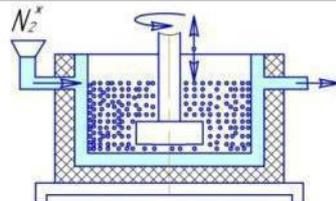
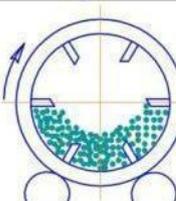
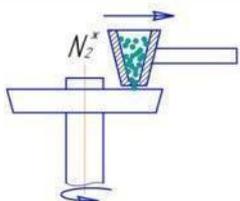
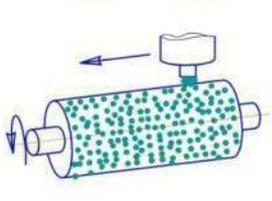
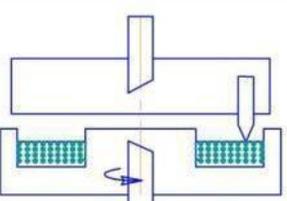
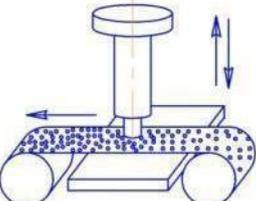
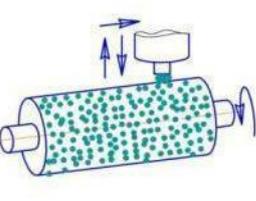
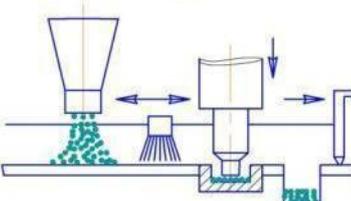
Рисунок 15 - Установка ЗИФ -1002 для производства азота высокой чистоты

## **2. Использование жидкого азота в качестве криопродукта.**

### **2.1 Вводные замечания**

Стратегия развития территорий в Арктике, Крайнем Севере и Сибири требует уделять проблемам работоспособности машин и техники северного исполнения особое внимание [10,11,12,13]. Объекты топливно-энергетического, нефтегазового, горнодобывающего, строительного, транспортного и машиностроительного комплексов в процессе эксплуатации подвержены воздействию таких неблагоприятных факторов для их эксплуатационных свойств как высокие нагрузки и значительные температурные перепады. Эти факторы, как правило, природно-техногенного характера ведут к авариям и иногда катастрофам, а также чаще всего к потере у вышеуказанных объектов работоспособного состояния. Анализируя эту ситуацию, авторы статей обращают внимание на то, что только прямой материальный ущерб от аварийных и иных ситуаций достигает 10 млрд. руб. Неблагоприятные факторы ими сгруппированы так: конструктивные, к которым, прежде всего, относят научно и нормативно необоснованный выбор материалов; технологические; эксплуатационные и влияние человеческого фактора. Отметим, что к низкотемпературным принято относить процессы, протекающие при температурах ниже 273К, а к криогенным – ниже 120К. Кроме этого, необходимо подчеркнуть и то, что к самому губительному – в плане влияния на работоспособность деталей и узлов трения – относят абразивное изнашивание, сопровождающееся царапающим, а еще хуже режущим, изнашиваемую поверхность действием абразивных частиц. Поэтому с точки зрения методологии и методики в проведенном исследовании пристальное внимание было уделено вопросу выбора способа абразивного изнашивания и обоснования принципиальной схемы абразивного воздействия на изнашиваемую охлажденную поверхность образца.

Таблица 2 – Способы абразивного низкотемпературного изнашивания.

		Схемы испытаний / Test schemes		
		1	2	3
Способы абразивного изнашивания / Abrasive wear methods	1			
	2			
	3			
	4			

Примечание к сводной таблице.

1. По горизонтали (схемы испытаний) расположены принципиальные схемы конструкции лабораторных установок (стендов), которые применялись для проведения низкотемпературных испытаний.

2. По вертикали (способы абразивного изнашивания) сгруппированы лабораторные установки (стенды), на схемах которых указаны характер приложения нагрузки и степень закрепления абразивного зерна в изнашивающей среде.

3. Системы охлаждения, которые не отражены на схемах, связаны либо с проведением испытаний на открытом воздухе, либо с размещением установок в холодильных камерах.

## 2.2. Об изнашивающей способности горных пород (абразивность)

Абразивность (abrasiveness) - способность горной породы на забое скважины и бурового шлама изнашивать бурильный и породоразрушающий инструмент, в том числе его вооружение.

Изнашивание представляет собой процесс постепенного изменения формы и размеров инструмента в процессе работы. Результат изнашивания, проявляющийся в виде отделения частиц материала или остаточной деформации поверхности инструмента, называется износом. Процесс изнашивания характеризуют, как правило, двумя показателями - интенсивностью и скоростью изнашивания.

Интенсивность изнашивания это износ, приходящийся на единицу работы трения, а скорость изнашивания - износ в единицу времени

$$a = W/t_0,$$

где  $a$  - скорость изнашивания;  $W$  - износ в любых единицах, например, в мг, мм, мм\* и т.д.;  $t_0$  - время изнашивания твердого тела.

В металловедении испытания на абразивное изнашивание проводят согласно ГОСТ 17367-71 «Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы» (Metalls. Method of abrasion test by friction against embedded abragant grain).

Сущность метода заключается в сравнении абсолютного линейного износа испытуемого и эталонного образцов после трения их при статической нагрузке о поверхность с закрепленными на ней абразивными частицами (абразивную шкурку). Изнашивание породоразрушающего инструмента зависит, главным образом, от абразивности породы, режима его трения о породу (контактное давление, скорость перемещения по породе, характер приложения нагрузки др.) и свойств промывочной жидкости, прежде всего, ее смазывающей и охлаждающей способностей.

Абразивность горных пород определяется их литолого-петрографическими и механическими характеристиками (твердость зерен породы, прочность связи между ними, их форма и размер, пористость и степень неоднородности пород).

С увеличением твердости зерен породы ее абразивность повышается. Поэтому породы, основным породообразующим минералом которых является кварц, отличаются высокой абразивностью. Однако это относится к породам, у которых твердость зерен существенно выше твердости цемента. В этом случае твердые зерна легко обнажаются, способствуя увеличению абразивности породы. При этом остроугольные зерна более абразивны, чем окатанные. Максимальную абразивность имеют, как правило, равномерно зернистые породы. Что касается размера зерен, то он влияет на абразивный износ через шероховатость горных пород. Чем крупнее зерна породы, тем более глубокие царапины они оставляют на металле и, соответственно, тем больше абразивный износ породоразрушающего инструмента.

Пористость пород увеличивает шероховатость поверхности и, соответственно, абразивный износ. Некоторые породы, например, туфопесчаники, имеют незначительную твердость, но высокую абразивность.

Абразивность зависит от степени неоднородности пород - при равной твердости полиминеральные породы более абразивны, чем мономинеральные.

Так, породы, содержащие кварц в качестве структурного элемента (граниты, гранодиориты), более абразивны, чем мономинеральные кварцевые породы. Объясняется это тем, что в полиминеральных породах менее прочные и твердые минералы (например, полевой шпат, слюда) разрушаются относительно легко, а обнажающиеся при этом зерна кварца более интенсивно изнашивают инструмент.

Разрушение мономинеральных пород происходит более равномерно, выбоины от разрушения менее твердых минералов не образуются и контактная поверхность менее шероховата, чем в случае полиминеральных пород. Вследствие этого удельные контактные давления уменьшаются и износ снижается.

Прочность связи между зернами влияет на абразивность породы двояко. С одной стороны, большая прочность связи затрудняет обновление абразивной поверхности. Затупившиеся зерна не выпадают, поверхность породы становится менее абразивной и износ уменьшается. Но, при этом до момента взрыва зерна из массива оно производит большую работу по абразивному износу. С другой стороны, если прочность связи между зернами слабая, то они отрываются еще острыми, и абразивный износ будет меньше. Но, чем легче отделяются зерна, тем быстрее обновляется абразивная поверхность и тем выше абразивный износ.

При одинаковом минералогическом составе абразивность обломочных пород обычно выше, чем кристаллических. Это обусловлено характером шероховатости поверхности трения. Чем больше пористость, крупнее обломки и остроугольные их форма, тем больше шероховатость обломочной породы. С увеличением шероховатости уменьшается реальная площадь контакта металла с породой, возрастает контактное давление, которое может достигать твердости металла.

Кристаллические горные породы по возрастанию абразивности располагаются в следующий ряд: гипс, барит, доломиты, известняки, кремнистые породы, железистомагнезиальные породы, кварц и кварциты.

Из обломочных пород наиболее абразивны кварцевые песчаники и алевролиты.

При одинаковом минералогическом составе абразивность обломочных пород обычно выше абразивности кристаллических, что обусловлено характером шероховатости поверхности трения [14,15,16,17,18,19].

Абразивность горных пород обуславливает долговечность породоразрушающего инструмента, поэтому это свойство пород учитывают как при конструировании, так и применении породоразрушающего инструмента. Существуют различные способы оценки абразивности пород, из которых наиболее распространенными являются методы изнашивания эталонного стержня (метод «сверления») и изнашивания вращающегося диска.

**Метод изнашивания эталонного стержня.** Сущность метода заключается в "сверлении" стержнем 1 плоской поверхности горной породы 2 (рисунок - 16). В качестве эталонного принят стержень из стали «серебрянка» диаметром 8 мм с плоскими торцами, в одном из которых просверлено отверстие диаметром 4 мм на глубину 10-12 мм. Горную породу "сверлят" каждым концом стержня по 10 мин при частоте вращения 400 об/мин и нагрузке = 157 Н. Показатель абразивности  $a_3$ , определяют по формуле

$$a_3 = \frac{1}{2n \sum_{i=1}^n W_i}$$

где  $W_i$ , - износ обоих торцов за одно парное испытание, мг; n – число парных испытаний.

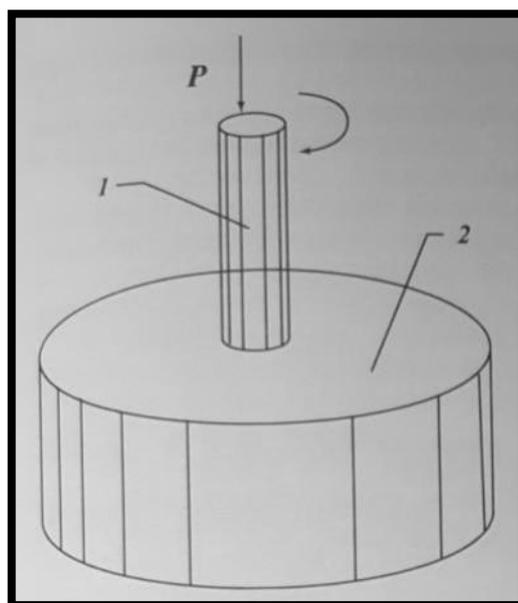


Рисунок 16 - Принципиальная схема определения абразивности породы методом изнашивания эталонного стержня.

По показателю  $a_3$ , все горные породы разделены на восемь категорий абразивности (таблица – 3). Метод изнашивания эталонного стержня используется при обосновании выбора породоразрушающих инструментов с непрерывным контактом элементов вооружения с забоем.

Таблица - 3. Классификация горных пород по показателю абразивности, определяемому методом изнашивания эталонного стержня.

Категория	Степень абразивности	$a_3$ , мг/10 мин
1	Весьма малоабразивные	< 5
2	Малоабразивные	5-10
3	Ниже средней абразивности	10-18
4	Среднеабразивные	18-30
5	Выше средней абразивности	30-45
6	Повышенной абразивности	45-65
7	Высокоабразивные	65-90
8	В высшей степени абразивные	> 90

**Метод изнашивания вращающегося диска.** Сущность метода (рисунок - 17) заключается в изнашивании металлического диска 1, прижатого к образцу горной породы 2 силой путем его трения скольжения о горную породу. Диск диаметром 30 мм и шириной рабочей поверхности 2,5 мм изготавливают из булатной стали или твердого сплава, т.е. из того металла, по отношению к которому определяют абразивность горной породы.

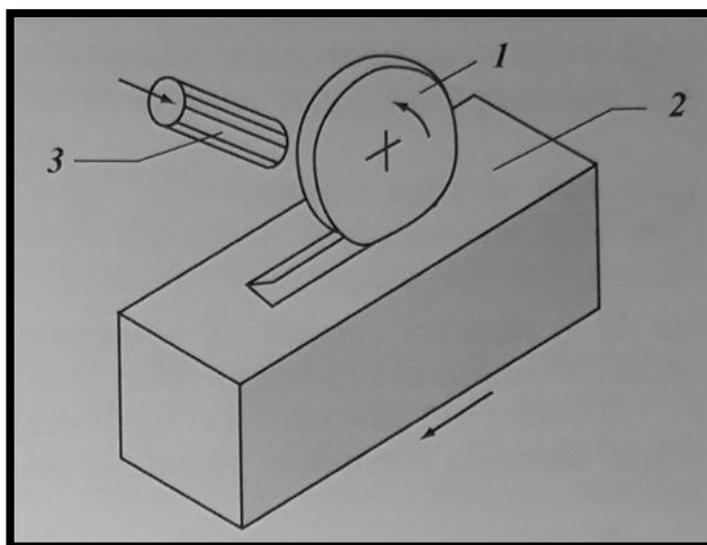


Рисунок 17 - Принципиальная схема определения абразивности породы методом изнашивания вращающегося диска.

В случае определения показателей абразивности горных пород диск через насадку 3 охлаждается водой, а при изучении влияния среды на износ - соответствующим охлаждающим агентом. Изнашивание ведется при равномерной подаче горной породы со скоростью и непрерывной записи момента трения.

Режим изнашивания характеризуют удельной мощностью трения

$$N_{уд} = \frac{M_n}{R_b},$$

где М - момент трения; n - частота вращения диска, об/с; R – радиус диска; b - ширина рабочей поверхности диска.

В качестве показателя абразивности принимают скорость изнашивания металла (скорость уменьшения радиуса диска)

$$a = \frac{dR}{dt},$$

где  $t$  - продолжительность контакта диска с образцом горной породы.

По результатам испытаний строят зависимости,  $a$  от  $N_{y\partial}$ , на которых по существенному изменению характера зависимости  $a$  от  $N_{y\partial}$  выделяют три области изнашивания стали и вычисляют для каждой из них характерную скорость изнашивания металла  $a_1, a_2, a_3$ .

Таблица – 4. Классификация осадочных горных пород по абразивности по отношению к закаленным сталям.

Горные породы		Скорость изнашивания стали, мм/ч		
Группа	Категория	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Малоабразивные (неабразивные)	1	< 0,006	<0,01	<0,1
	2	0,006 – 0,010	0,01 – 0,05	0,1 – 0,3
	3	0,010 – 0,014	0,05 – 0,10	0,3 – 0,6
	4	0,014 – 0,018	0,10 -0, 20	0,6 – 1,0
Средней абразивности	5	0,018 – 0,020	0,20 – 0,32	1,0 – 1,2
	6	0,020 – 0,023	0,32 – 0,50	1,2 – 1,5
	7	0,023 – 0,026	0,50 – 0,80	1,5 – 2,0
	8	0,026 – 0,030	0,80 – 1,20	2,0 – 2,8
Высокоабразивные (абразивные)	9	0,030 – 0,040	1,20 – 1,80	2,8 – 4,2
	10	0,040 – 0,060	1,80 – 2,60	4,2 – 6,5
	11	0,060 – 0,100	2,60 – 4,00	6,5 – 10,0
	12	> 0,100	> 4,00	> 10,0

Горные породы по результатам изнашивания при трех режимах вращающегося диска из цементированной закаленной стали марки 20ХНЗА разделены на 12 категорий, которые объединены в три группы по четыре категории в каждой (таблица - 4):

- малоабразивные - галоидные, сульфатные и карбонатные горные породы без существенной примеси кварца и халцедона;
- средней абразивности - горные породы первой группы, но с примесью кварца и халцедона до 30 (кварц и халцедон алевритовой фракции), а также глины и аргиллиты;
- высокоабразивные - карбонатные и обломочные горные породы с примесью кварца и халцедона песчаной фракции, алевриты и мелкозернистые песчаники. Средне- и крупнозернистые кварцевые песчаники относятся к 12 категории.

Метод изнашивания вращающегося диска разработан применительно к породоразрушающим инструментам с периодическим контактом элементов вооружения с забоем, имитирует изнашивание стального вооружения шарошечных долот и его результаты могут использоваться для расчетной оценки их долговечности.

Наряду с прямым определением показателей абразивности с использованием образцов из керна пород, применяют косвенные методы оценки абразивности в категориях путем исследования шлама и анализа другой геолого-геофизической информации на основе использования корреляционных зависимостей твердости и абразивности пород, выраженных в категориях.

### 2.3. Механизм работы шарошечных долот

По принципу разрушения горной породы шарошечные долота относятся к дробяще - скалывающего типу. При перекатывании шарошки с одного элемента вооружения на другой создается дробящий эффект, а при проскальзывании вооружения относительно плоскости забоя - скалывающий. Превалирование того или иного вида разрушения определяется конструктивными особенностями долота [20,21]. Механизм дробящей способности долота определяется следующими факторами. При перекатывании шарошек с одного элемента вооружения на другой происходит вертикальное перемещение корпуса долота и связанного с ним бурильного инструмента. Источником динамического воздействия долота на забой скважины является потенциальная энергия перемещающегося, сжатого в вертикальном направлении низа бурильного инструмента  $U_u$  прямо пропорциональная вертикальному перемещению долота:

$$U_u = A_u \times z, \quad (2.1)$$

где  $A_u$  - коэффициент пропорциональности;  $z$  - вертикальное перемещение долота.

Для определения величины  $z$  рассмотрим условную шарошку с фрезерованными зубьями в венцах, выполненными на одной образующей ее конуса (рисунок - 18). Поскольку долото жесткое, то вертикальные перемещения точки лежащей на оси шарошки (цапфы) и долота, совпадают. При опирании на два зуба в точках А и В ось шарошки находится в нижнем крайнем положении  $O'_i$ , а по мере перекатывания шарошки зуб в точке В принимает вертикальное положение  $O_i$ . Тогда вертикальное перемещение оси шарошки, а вместе с ней и долота будет описываться следующей зависимостью:

$$z_{max} = z_{O_i} - z_{O'_i} = r_i \times \sin\alpha(1 - \cos(\gamma/2)), \quad (2.2)$$

где  $r_i$  - радиус венца;  $\alpha$  - угол наклона оси шарошки к оси долота;  $\gamma$  - угловой шаг зубьев в венце.

Из формулы (2.2) следует, что вертикальное перемещение долота растёт с увеличением радиуса венца и его углового шага. Для упрощения примем, что горная порода деформируется на глубину по линейному закону. В этом случае баланс энергий будет иметь вид

$$U_{\text{п}} = U_{\text{и}} + \frac{1}{2} G_{\text{ст}} \delta, \quad (2.3)$$

где  $U_{\text{п}}$  - потенциальная энергия деформирования горной породы, но

$$U_{\text{п}} = \frac{1}{2} G_{\text{max}} \delta; \quad (2.4)$$

$G_{\text{ст}}$  - статическая нагрузка на долото, задаваемая весом бурильного инструмента;  $G_{\text{max}}$  - максимальная осевая нагрузка на долото.

Подставив в уравнение (2.3) значения  $U_{\text{и}}$  из выражения (2.1) и  $U_{\text{п}}$  из выражения (2.4) и сделав необходимые преобразования, получим

$$G_{\text{max}} = G_{\text{ст}} + 2A_{\text{и}} \frac{z}{\delta}. \quad (2.5)$$

Величину  $2A_{\text{и}}z/\delta = G_{\text{д}}$  называют динамической нагрузкой на долото, а отношение  $G_{\text{max}}/G_{\text{ст}} = k_{\text{д}}$  - коэффициентом динамичности.

Таким образом, динамическая нагрузка на долото прямо пропорциональна его вертикальному перемещению и обратно пропорциональна глубине деформирования горной породы. При размещении зубьев всех венцов на одной образующей шарошки вертикальные перемещения корпуса долота будут обусловлены параметрами периферийных венцов. Поэтому с целью снижения динамической нагрузки на долото зубья венцов размещают «вразбежку» так, чтобы зубья внутренних венцов были в свету зубьев периферийных венцов.

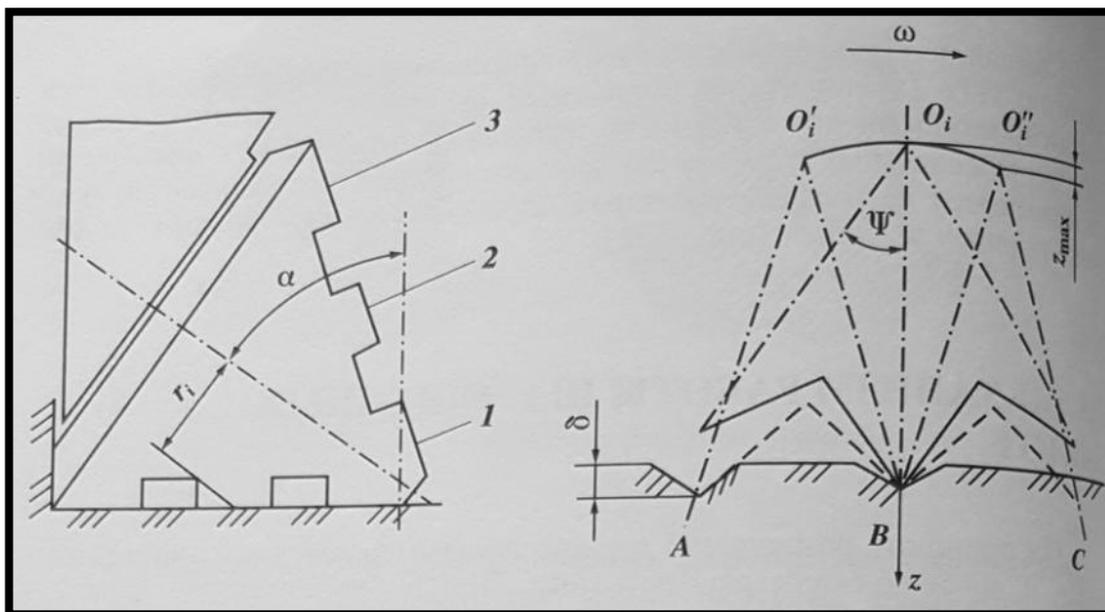


Рисунок 18 - Взаимодействие шарошки с забоем:

1, 2, 3 - номера венцов шарошки.

Коэффициент динамичности возрастает с увеличением твердости горной породы, шага зубьев и частоты вращения долота. Установлено, что при использовании долота, соответствующего твердости разбуриваемых горных пород, при бурении в мягких породах нормальным является коэффициент динамичности 1,1, в породах средней твердости - 1,2, при разбурировании твердых пород - 1,3. Следует отметить, что перекачивание шарошки с одного элемента вооружения на другой не является единственной причиной возникновения динамической нагрузки на долото и колебаний бурильного инструмента.

Долота дробяще-скалывающего действия создают при работе на забое ряд колебаний: высокочастотные (обусловлены зубчатостью шарошек), среднечастотные (вызваны изменением во времени числа контактирующих с забоем элементов вооружения), низкочастотные (являются следствием наличия забойной рейки).

Скалывающая способность шарошек задается их геометрическими параметрами, формой и смещением осей шарошек в плане.

У шарошки «чистого» качения (рисунок -19) вершина лежит на оси 1 долота радиусом  $R_d$ , а ось шарошки 2 пересекается с осью долота.

Такая шарошка не может создать существенного для разрушения горных пород скалывающего эффекта.

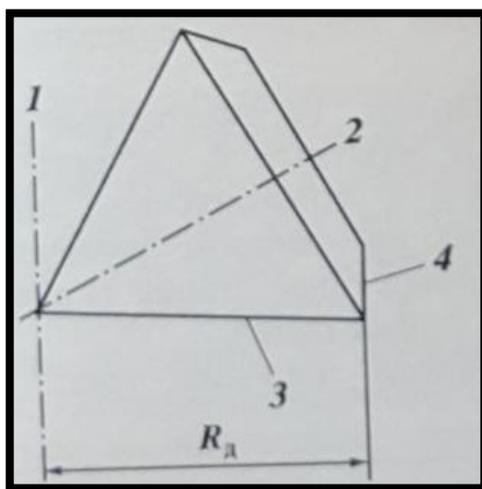


Рисунок 19 - Взаимодействие с забоем шарошки «чистого» качения

Существуют три способа обеспечения скалывающего эффекта:

1. Вынос вершины за ось долота на величину  $f$  (рисунок - 20). В этом случае мгновенная ось вращения (МОВ) шарошки при ее качении по забою проходит через точку пересечения осей шарошки и долота и пересекает образующую шарошки. При повороте шарошки вокруг МОВ вооружение долота, расположенное левее точки пересечения МОВ с образующей шарошки, будет скользить с некоторой скоростью относительно забоя в отрицательном направлении, а вооружение долота, расположенное правее этой точки - в положительном направлении.

Благодаря такому принудительному скольжению создается существенно скалывающий эффект.

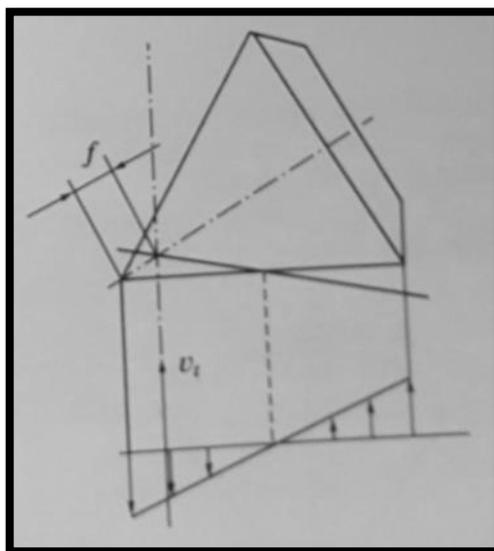


Рисунок 20 - Шарошка с вершиной, вынесенной за ось долота

2. Выполнение шарошек многоконусными. Рассмотренные выше шарошки имеют два конуса однако относятся к одноконусным, так как в обратный конус, на котором размещается вооружение, калибрующее стенку скважины во внимание не принимается. В трехконусной шарошке (рисунок - 21) есть основной конус 1 и два дополнительных (первый 2 и второй 3). В некоторых конструкциях долот последний дополнительный конус может быть заменен цилиндром. Многоконусное выполнение шарошек обеспечивает более значительный скалывающий эффект. Общим недостатком первого и второго приемов является наличие скользящего сечения шарошки, проходящего через точку пересечения МОВ и образующей шарошки.

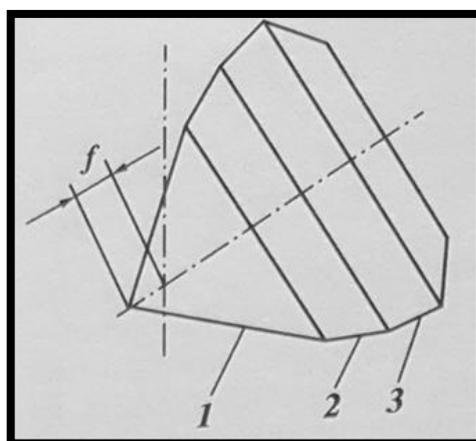


Рисунок 21 - Трехконусная шарошка

3. Смещение осей шарошек в плане на величину в направлении вращения долота (рисунок - 22). В этом случае оси долота и шарошки не пересекаются, следовательно, исключаются нескользящие относительно забоя точки на образующей шарошки, контактирующей с забоем.

В качестве классификационного признака скальвающей способности шарошек долот наиболее часто принимают относительное смещение оси шарошки в плане  $k_0 = k/R_\delta$  (рисунок - 23).

Большей твердости горных пород соответствуют долота с меньшей скальвающей способностью (таблица - 3). Это обусловлено тем, что чем тверже порода, тем больше ее сопротивление скалыванию - сдвигу, тем больше вероятность слома элементов вооружения.

Некоторые производители изготавливают долота не с параллельным смещением осей в плане, а с угловым. Механизм работы долота при этом не изменяется, разница состоит лишь в технологии изготовления долот.

Таблица – 5. Характеристики скальвающей способности шарошечных долот.

Скальвающая способность	$k_0 = k/R_\delta$	Форма шарошек	Типы долот
Низкая	0-0,01	Одно- и Двухконусные	ОК, Т К, ТК, ТС, Т, СТ
Средняя	0,04-0,05	Двух- и трехколесные	СЗ, С, МСЗ, МС
Высокая	0,08-0,10	Трехконусные	МЗ, М

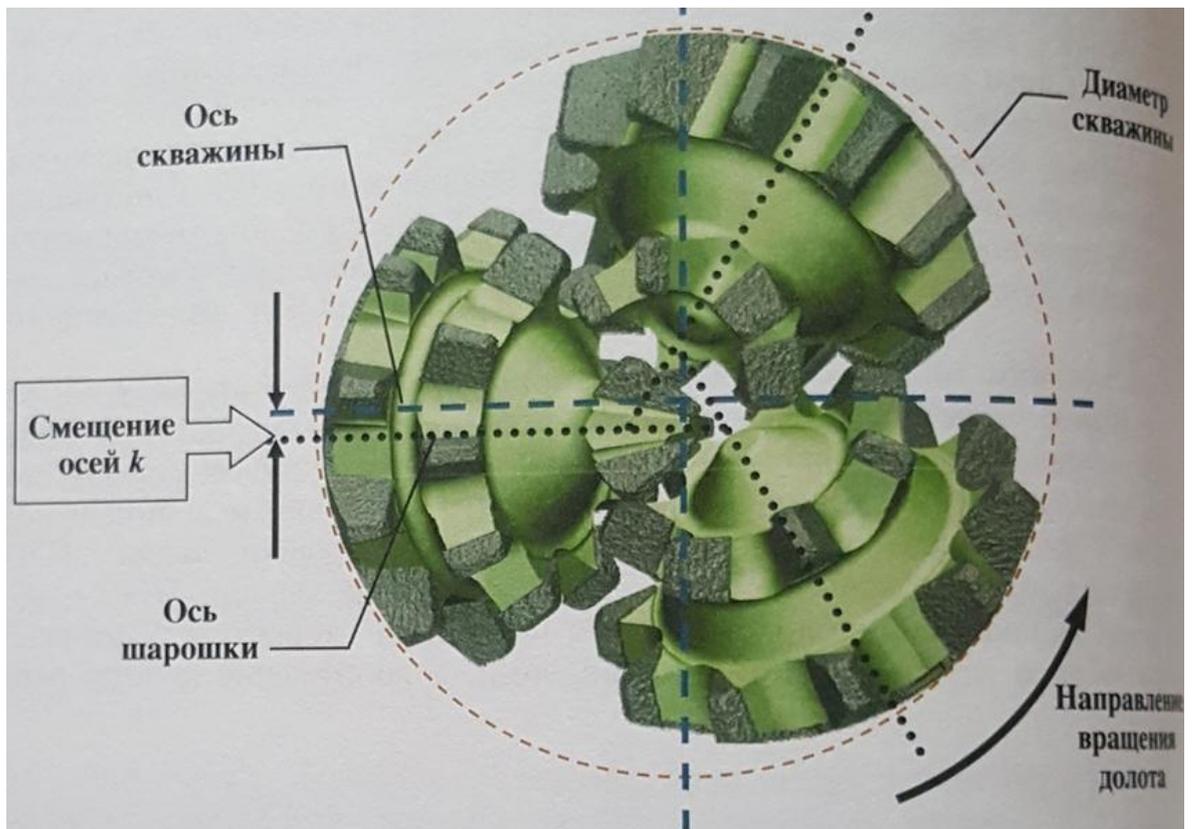


Рисунок 22 - Схема смещения осей шарошек долот

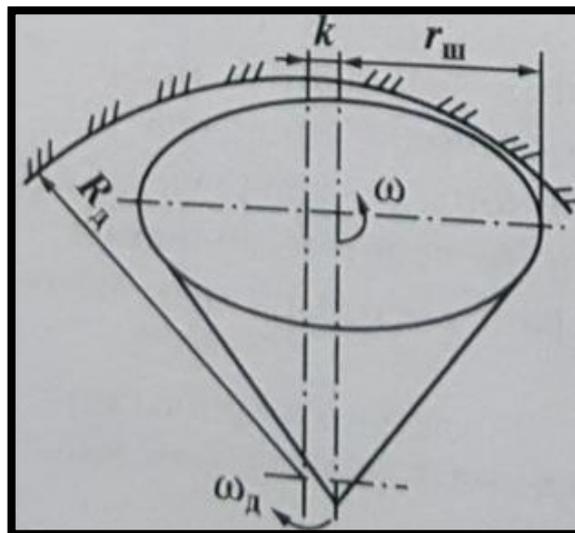


Рисунок 23 - Схема смещения шарошки в плане:

$k$  – смещение оси шарошки в плане;

$r_{ш}, R_{д}$  – радиус соответственно шарошки и долота;

$\omega, \omega_{д}$  – скорость вращения соответственно шарошки и долота.

## Схемы взаимодействия элементов вооружения с горной породой

**Дробление.** Разрушение горных пород путем дробления заключается в том, что элементом вооружения породоразрушающего инструмента наносятся прямые удары по поверхности забоя скважины (рисунок - 24).

Динамический процесс разрушения горной породы описывается уравнениями кинетической энергии  $T_k$  породоразрушающего инструмента и потенциальной энергии деформирования породы  $U$ :

$$T_k = mv_0^2/2;$$
$$U = \int_0^{\delta_{max}} P_z(\delta) \times d\delta,$$

где  $m$  - масса долота и ударной штанги;  $v_0$  - скорость в момент соударения долота с горной породой;  $\delta_{max}$  - максимальная глубина погружения долота в породу;  $P_z(\delta)$  - сопротивление горной породы внедрению долота.

Условие  $T_k = U$  является основным при анализе ударного взаимодействия породоразрушающего инструмента с горной породой.

**Дробление-скалывание.** При дроблении-скалывании элемент вооружения долота (зуб) вдавливаются в породу с силой  $P_z$  как и при дроблении. При этом вследствие специфической кинематики долота он одновременно участвует во вращении с угловой скоростью и в скольжении со скоростью (рисунок - 25).

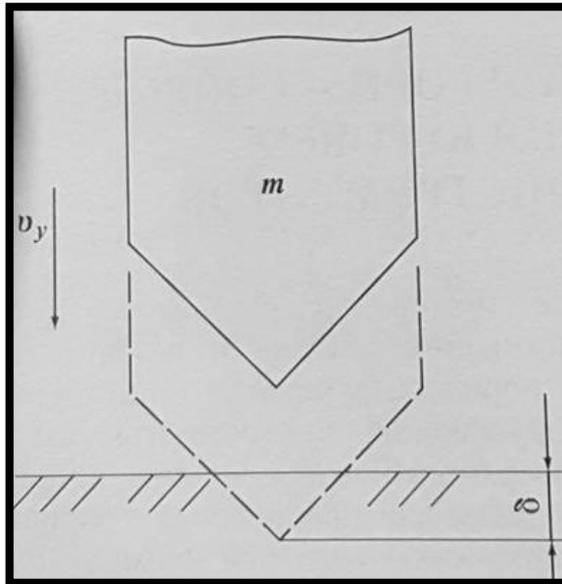


Рисунок 24 - Принципиальная схема разрушения горной породы путем дробления

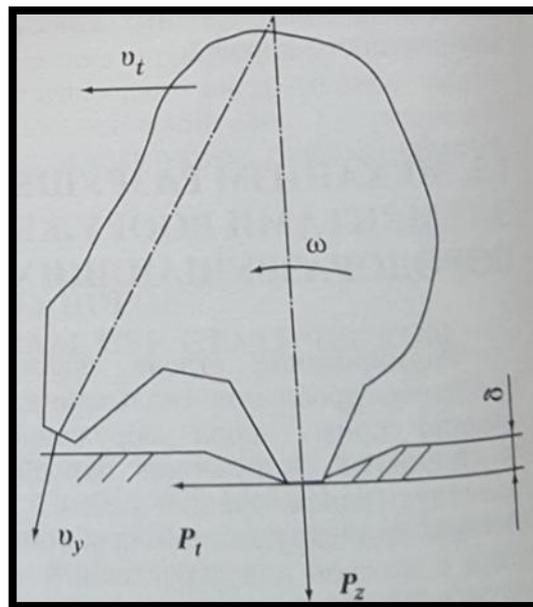


Рисунок 25- Принципиальная схема разрушения горной породы путем дробления-скалывания

В это же время соседний зуб долота движется к поверхности породы со скоростью и наносит удар по ее поверхности, В следующие моменты времени нагрузка перераспределяется с первого зуба на второй, а первый зуб выходит из контакта с горной породой.

Таким образом, каждый элемент вооружения долота периодически оказывает на горную породу сложное дробяще-скалывающее действие.

Механизм разрушения горной породы путем дробления и дробления скалывания реализуется в шарошечных буровых долотах. Превалирование одного из этих механизмов достигается путем смещения осей шарошек (рисунок - 26).

При перекачивании шарошек по забою без заметного проскальзывания осуществляется дробление горной породы, а при смещении осей шарошек в плане относительно оси долота, что обеспечивает ударное воздействие зубьев по забою с проскальзыванием, - дробление-скалывание горной породы.

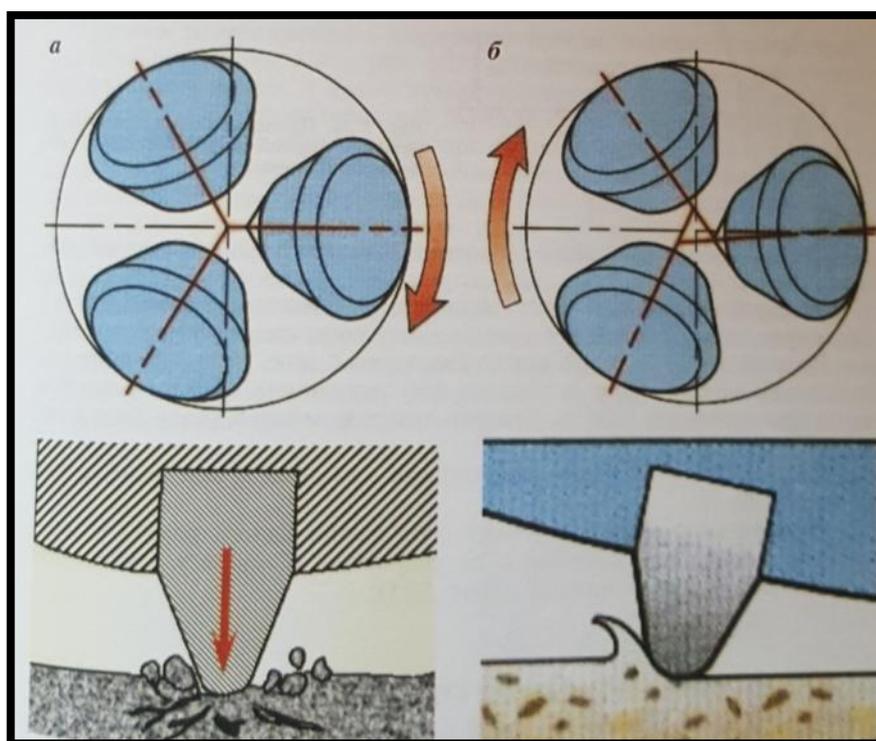


Рисунок 26 - Изменение механизма разрушения горной породы с дробления (а) на дробление - скалывание (б) путем смещения осей шарошек

**Истирание-резание.** Этот механизм разрушения горной породы характерен, прежде всего, для долот с алмазосодержащим вооружением. Вооружение с мелким алмазным зерном (рисунок - 27, а) разрушает горную породу путем истирания (микрорезания). Каждое алмазное зерно при вращении долота образует в породе микророздду (микрорезанку). Вооружение с поликристаллическими алмазами срезает слой породы (рисунок 27,б).

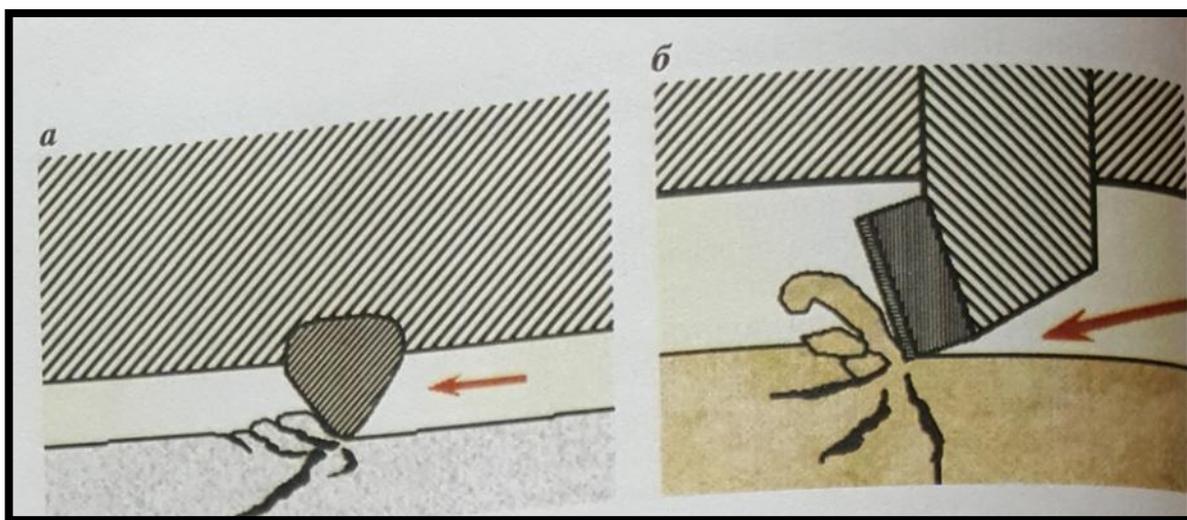


Рисунок 27 - Принципиальная схема разрушения горной породы путем истирания (а) и резания (б)

**Резание-скалывание.** Элемент вооружения долота режуще-скалывающегвающего действия, перемещаясь со скоростью  $v_t$  - срезает (скалывает) слой горной породы толщиной  $\delta$  (рисунок - 28).

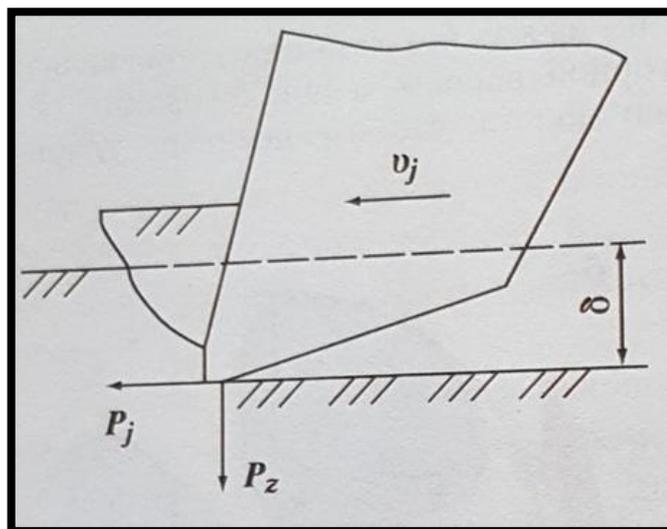


Рисунок 28 - Принципиальная схема разрушения горной породы путем резания-скалывания

#### 2.4. Классификация износа долот

Сложные условия работы шарошечных долот приводят к интенсивному изнашиванию их элементов, прежде всего вооружения и опоры, и, как следствие, зачастую, к отказам. Изучение изнашивания элементов шарошечных долот в промысловых и стендовых условиях позволило создать систему классификации износа долот для последующего анализа причин выхода их из строя и совершенствования породоразрушающего инструмента. Формально классификация износа долот, используемая в отечественной практике, отличается от классификации Международной ассоциации буровых подрядчиков (International Association of Drilling Contractors, IADC), принятой почти всеми иностранными производителями долот. Однако фактически обе системы практически идентичны и отражают большую часть видов и аспектов изнашивания долот, отработанных при бурении глубоких нефтяных и газовых скважин.

## **Классификация износа долот, используемая в России.**

Износ вооружения (индекс В) обозначается в процентах (0-100 %) после индекса В. При этом для фрезерованных зубьев этот процент означает среднюю степень износа по высоте, а для твердосплавных зубков - долю выпавших зубков от общего их количества на всех шарошках долота. При наличии скола фрезерованных зубьев или твердосплавных зубков к характеристике износа вооружения добавляется индекс С. Общее количество (в процентах) сколотых фрезерованных зубьев или твердосплавных зубков записывается в скобках после индекса С.

Пример:

ВОС(0) - отсутствие износа (т.е.  $V \% + C \% = 0$ );

В100С(0) - полный износ фрезерованного вооружения (износ фрезерованных зубьев на всю высоту);

В100С(0), В 50С(50), ВОС(100) - полный износ твердосплавного вооружения (скол, в том числе выпадение всех твердосплавных зубков, т.е.  $V \% + C \% = 100 \%$ ) Например, для долота с твердосплавным вооружением шарошек (при общем количестве зубков 120 шт.), имеющего 36 сколотых и 6 выпавших зубков, код износа будет В 5 С(30), т.е. общий износ по вооружению составляет 35 %.

При закруглении зубьев периферийных венцов к характеристике состояния вооружения добавляется индекс Р.

При зацеплении зубьев шарошек к характеристике состояния вооружения шарошек добавляется индекс Ц, например, В5С(30)Ц.

Износ опоры, хотя бы одной шарошки обозначается индексом П и цифрами 0, 1, 2, 3, 4 после него, характеризующими соответственно:

- ПО - отсутствие износа;
- П1 - уровень износа небольшой: «качка» торца шарошки относительно оси цапфы невелика (например, для долот диаметром 139,7-244,5 мм - до 2 мм; диаметром 269,9-490,0 мм - до 3 мм). Тела качения не обнажены, козырьки лап не изношены;

- П2 - уровень износа средний: «качка» торца шарошки большая (например, для долот диаметром 139,7-244,5 мм - до 4 мм, диаметром 269,9-490,0 мм - до 5 мм). Тела качения не обнажены, козырьки лап не изношены;
- П3 - уровень износа большой (предельное состояние): «качка» торца шарошки значительная (например, для долот диаметром 139,7 - 244,5 мм - более 5 мм, диаметром 269,9 - 490,0 мм - более 6-8 мм), значительный износ или разрушение части тел качения; имеется опасность выпадения; «заедание» шарошки при вращении от руки, козырьки лап изношены, нарушена герметизация опор в долотах ГНУ и ГАУ;
- П4 - отказ (разрушение) опор: разрушение и поворот роликов; износ и разрушение шариков, козырьков лап и калибрующей части шарошек с выпадением тел качения; наличие трещин и «лысок» на шарошках, заклинивание шарошек.

В случае заклинивания шарошек к характеристике износа опор добавляется индекс К, количество заклиненных шарошек указывается в скобках, например: П4К(1).

В случае повреждения узла герметизации маслонаполненной опоры (выход из строя уплотнения или его износ и разрушение) к характеристике состояния опор добавляется индекс У, количество поврежденных узлов указывается в скобках, например: У(2).

В случае повреждения гидромониторного узла (разрыв гнезда, выпадение насадок) добавляется индекс Г, количество поврежденных узлов указывается в скобках, например: Г(3).

Аварийный износ:

- $A_g$  - поломка и оставление вершин шарошек на забое;
- $A_{ш}$  - поломка и оставление шарошек на забое,
- $A_c$  - поломка и оставление секций на забое;
- $A_{ц}$  - поломка и оставление цапфы с шарошкой на забое.

Количество оставленных скважине лап, шарошек и их вершин указывается римскими цифрами, соответствующими номерам шарошек путем их перечисления в скобках, например:  $A_e$  (I),  $A_{ш}$  (II),  $A_{ц}$  (III).

Износ по диаметру. Уменьшение диаметра долота обозначается индексом Д и выражается в миллиметрах, например: Дб.

Примеры применения кода для оценки износа долот:

- фрезерованное вооружение сработано на 10 % по высоте зубьев, одна опора имеет средний износ, две другие шарошки заклинены, диаметр долота сохранился - В10П4К(2)ДО; фрезерованное вооружение изношено на 70 % по высоте зубьев;
- 20 % зубьев имеют сколы, калибрующие кромки зубьев периферийных венцов закруглены, опоры имеют большой износ («качка» торца шарошек 10 мм), диаметр долота уменьшился на 7 мм - В 20 С(20)РПЗД7;
- твердосплавное вооружение сработано полностью (скол всех зубков), опора разрушена (часть тел качения выпала) первая шарошка «оставлена» на забое - В0С(100)П4А=(I);
- в скважине оставлены все шарошки - Ам(I, II, III).

Примеры записи износа долот с помощью кода в буровом журнале и суточном рапорте:

- III 269,9 С-ГНУ № 8639 - В20С(30)РПЗД6Г(2)У(3);
- III 190,5 С-ГВ № 1642 - В10П4К(I)А,(I)ДО;
- III 215,9 МЗ-ГАУ № 256 - В90С(10)ПОДО;
- III 215,9 ТЗ-ГАУ № 134 - В20ПЗДО.

## **2.5.Механическое изнашивание бурильного инструмента (эксплуатационная практика)**

### **Абразивный износ буровых долот**

Буровые долота имеют важное значение в общем комплексе оборудования, применяемого для бурения нефтяных и газовых скважин. Повышение износостойкости и эффективности работы шарошечных долот - крупная народнохозяйственная проблема.

Объясняется это тем, что небольшая долговечность долот приводит к тому, что из общего баланса производительного времени, затрачиваемого на бурение одной скважины, большая его часть расходуется на спускоподъемные операции, связанные с заменой изношенных долот. Трехшарошечные долота для разбуривания крепких и твердых пород относятся к группе долот для бурения без отбора керна. По конструкции они представляют собой долота безкорпусного типа, состоящие из трех отдельных секций - лап, соединяемых между собой сваркой. Элементами долота, разрушающими горную породу, являются три конические шарошки, имеющие на наружной поверхности несколько зубчатых венцов с различным числом зубьев. Шарошки находятся на осях (цапфах) лап, расположенных симметрично оси долот под определенным углом, и удерживаются с помощью замкового подшипника. Каждая шарошка свободно вращается на подшипниках опоры вокруг цапфы долота. Опора шарошки состоит из подшипников качения и скольжения, один из которых является замковым.

Внутренними кольцами подшипников являются поверхности цапфы, а наружными - полость шарошки, на которой имеются береговые дорожки для шариков и роликов. Шариковый подшипник воспринимает осевую нагрузку и препятствует осевым перемещениям шарошки, по цапфе, а также выполняет роль замка, удерживающего шарошку на цапфе.

В процессе работы долото вращается вокруг своей вертикальной оси, а шарошки перекатываются по забою, поворачиваясь вокруг цапф. При этом зубья шарошек под действием статической и динамической нагрузок и крутящего момента многократно ударяются о забой скважины и разрушают горную породу, частицы которой увлекаются вверх сильным потоком промывочной жидкости.

Последняя закачивается в скважину через бурильные трубы и омывает забой, проходя через вертикальные отверстия, находящиеся внутри долота. Лапы и шарошки буровых трехшарошечных и одношарошечных долот изготавливаются из сложнолегированных цементируемых сталей. Они подвергаются сложной и трудоемкой химико-термической обработке, состоящей из цементации, двойной закалки и низкого отпуска при температуре нагрева 160-180°C. Кроме того, боковые грани зубьев шарошек и торцы зубьев периферийных венцов подвергаются дополнительному поверхностному упрочнению путем наплавки карбидами вольфрама с помощью нагрева токами высокой частоты. В результате такой обработки на поверхности лап и шарошек создается высокая твердость около HRC 58-60, а в сердцевине - достаточно высокая пластичность, что обеспечивает работу этих деталей в сложных условиях знакопеременного динамического изгиба и прямого удара, а также различных видов изнашивания в присутствии промывочной жидкости при высоком давлении.

Работа шарошечного долота при разбурировании горной породы представляет собой сложный процесс взаимодействия ряда факторов, связанных с физико-механическими свойствами разбуриваемых пород, режимом бурения и конструкцией долота.

При работе шарошечным долотом порода разрушается вследствие ударов зубьев шарошек долота, находящегося под постоянной осевой нагрузкой, при перекатывании их по забою скважины.

При разбурировании твердых пород, даже при максимально допустимых нагрузках на долото, зубья шарошек, как правило, в породу не внедряют как отдельные давления в зоне контакта между зубьями шарошек и породой недостаточны для разрушения последней. В этом случае разрушение породы носит усталостный характер в результате приложения в данной точке значительного числа циклов ударной нагрузки. В процессе бурения долото работает в условиях сложного нагружения. На него действуют осевая нагрузка, состоящая из статической динамической, и крутящий момент. Статическая с осевой нагрузки складывается при турбинном бурении из веса турбобура и веса части колонны бурильных труб, а также гидравлической нагрузки, создаваемой промывочной жидкостью, находящейся в бурильных трубах.

Как известно, в настоящее время при бурении нефтяных и газовых скважин нагрузка на трехшарошечное долото в зависимости от его диаметра меняется от 5 до 40 тс. Исследования распределения реакции забоя между венцами шарошек методом тензометрирования позволили сделать вывод о том, что реакции забоя во времени распределяются между венцами шарошек неравномерно, в результате чего некоторые моменты вся нагрузка сосредоточена на периферии, другие на вершине шарошки. В случае наиболее неблагоприятного распределения реакции забоя между венцами шарошки, когда вся нагрузка, приходящаяся на шарошку, передается через зубья одного венца, отдельные давления достигают очень высоких значений.

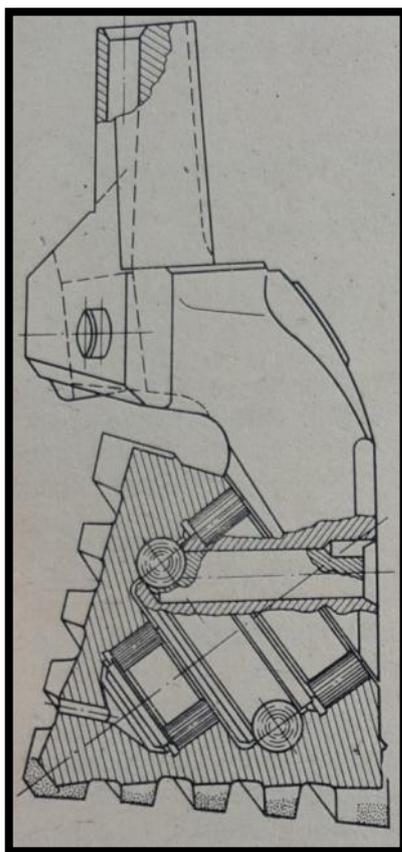


Рисунок 29 - Принципиальная схема бурового долота.

Изнашивание трехшарошечных долот с клиновидным фрезерованным зубом имеет сложный комплексный характер. Зубья шарошек и элементы опоры подвергаются различным видам изнашивания, однако числу ведущих следует отнести: абразивный, ударный, тепловой и усталостный .

Абразивное изнашивание зубьев шарошек подшипников опоры всегда сопутствует развитию других видов изнашивания. Обусловлено это тем, что при бурении скважины неизбежно наблюдается частичное проскальзывание зубьев по монолиту разбуриваемой породы. Бурение скважин сопровождается разрушением породы на мелкие частицы, которые попадают вместе с промывочной жидкостью в опору долота и совершают микро режущее действие на рабочих поверхностях подшипников. Наиболее интенсивно абразивному изнашиванию подвергаются торцы зубьев периферийных венцов.

Это связано с тем, что в момент входа в контакт с забоем скважины и в момент выхода из контакта происходит трение скольжения зуба шарошки по стенке скважины, особенно на участке, непосредственно примыкающем к поверхности забоя, который постепенно разрушается долотом. Об этом свидетельствует четко выраженная направленная шероховатость на торцах зубьев шарошек, имеющая следы микро режущего действия разбуриваемой породы (рисунок – 31). Интенсивный абразивный износ этих участков шарошки долота является подтверждением целесообразности армирования этих поверхностей литыми карбидами вольфрама, это значительно снижает износ трехшарошечных долот по диаметру. Абразивному изнашиванию подвергаются вершины зубьев периферийных венцов в моменты их проскальзывания по гребешкам ступенчатого (бугристого) забоя, образуемого главным образом у стенки скважины. В результате изнашивания зубья шарошек приобретают дополнительное обычно не симметричное заострение (рисунок - 32). Очевидность абразивного изнашивания подшипников в опоре долота не подлежит сомнению, однако оно значительно усложняется при одновременном развитии других видов изнашивания, а поэтому не имеет четко выраженного характера. Абразивное изнашивание зубьев шарошек долот, предназначенных для бурения мягких пород и пород средней твердости, происходит в моменты значительного внедрения зубьев в породу при ее разбуривании. В этом случае абразивному изнашиванию подвергаются не только площадка при вершине зуба, но и его боковые грани, что вызывает заострение зуба в результате его износа. После износа цементированного слоя на боковых гранях зуба в работу вступает менее твердая вязкая сердцевина, что в конечном итоге ускоряет изнашивание зуба. Армирование боковых граней зубьев долот, работающих в мягких породах, дает значительный эффект, так как поверхностный слой, армированный литыми карбидами вольфрама, имеет значительные преимущества по износостойкости при абразивном изнашивании по сравнению с цементованным слоем стали.

Наиболее типично абразивное изнашивание для лопастных долот, коронок и одношарошечных долот со сферической шарошкой. В этих случаях разрушение породы указанным инструментом идет путем непосредственного резания или разрушения при трении, когда рабочие элементы инструмента совершают непрерывное (лопастные долота, коронки) или прерывистое (одно-шарошечные долота со сферической шарошкой) трение скольжения по поверхности забоя разбуриваемой породы.

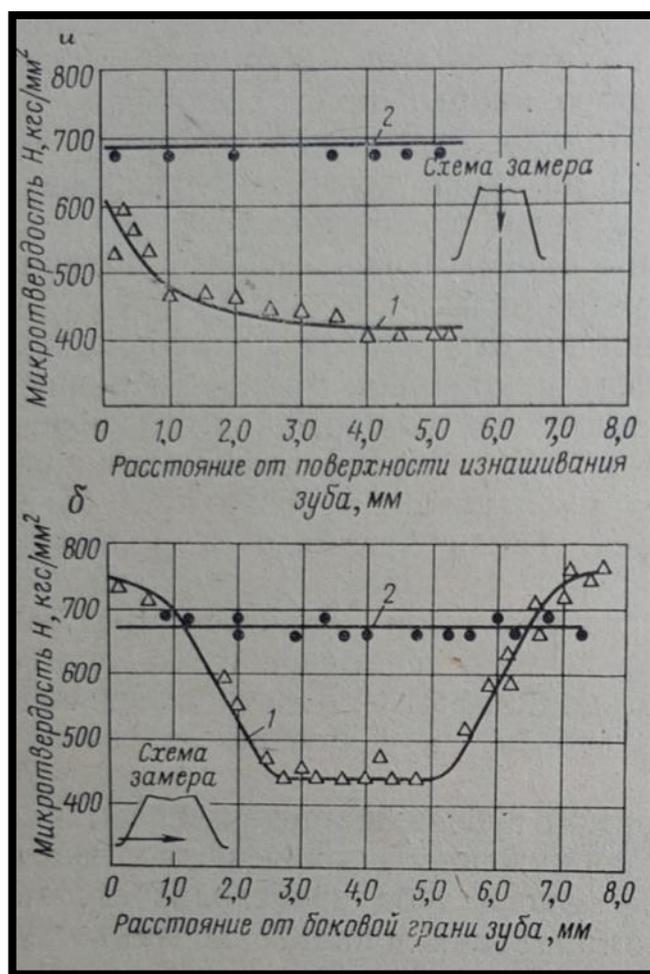


Рисунок 30 - Зависимость твердости в сечении зубьев шарошек, изготовленных из цементируемых (а) и нецементируемых (б) сталей, от состава стали: 1 – сталь марки 17НЗМА; 2 – сталь марки У7ХФ.

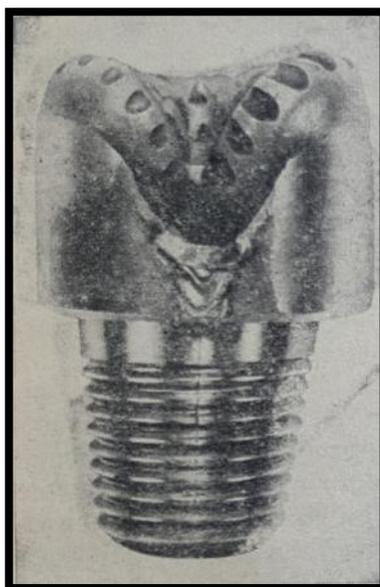


Рисунок 31 - Макрорельеф поверхностей долота при абразивном изнашивании.

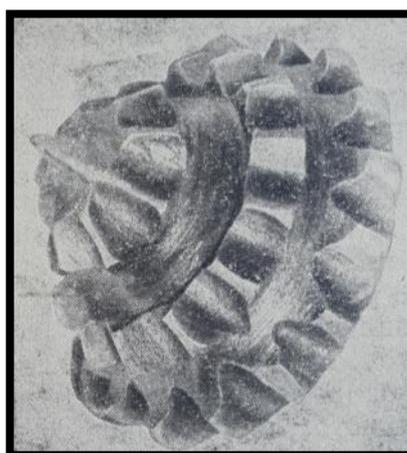


Рисунок 32 - Форма изнашивания зубьев

Твердосплавные вставки одношарошечных долот со сферической шарошкой в процессе бурения скважины совершают движение по сложной траектории. При этом на забое образуется сетка канавок - следов разрушения породы твердосплавными вставками (зубьями) путем резания при трении скольжения. При движении по сложному рельефу забоя скважины зубья шарошек одношарошечного долота подвергают статическому нагружению, ударам и изгибу в моменты встречи с участками неразрушенной породы в виде выступов. Зубья различных венцов одношарошечного долота изнашиваются неравномерно.

Это обусловлено тем, что путь трения зубьев различных венцов за один оборот долота не одинаков. На поверхности трения зубьев хорошо прослеживается направленная шероховатость следы микро режущего действия твердых частиц разбуриваемой породы. Состояние поверхностей изнашивания позволяет заключить, что в этом случае микрорезание является ведущим процессом изнашивания. Для бурильного инструмента характерна кратковременность работы. Процесс бурения сопровождается интенсивным изнашиванием инструмента и непрерывным съемом металла с поверхности в зоне трения. Породоразрушающий инструмент работает в условиях высоких удельных давлений на контакте при трении. Это приводит к тому, что в ряде случаев в определенные моменты абразивное изнашивание переходит в тепловое, с явно выраженным разогревом и оплавлением взаимодействующих металлических поверхностей трения. Износостойкость вооружения буровых шарошечных долот можно повысить путем создания рациональной конструкции этого вооружения, изыскания наиболее удачного состава специальных долотных сталей, разработки оптимальных режимов их термической обработки и поверхностного упрочнения вооружения. В связи с этим в МИНХиГП им. Губкина предпринята попытка повысить эффективность работы долота за счет уменьшения отрицательного влияния рейки на работу, износ и разрушение зубьев шарошек. С этой целью было спроектировано вооружение долота на базе серийного IV269Т, имеющее на периферийных венцах постоянный шаг и специальные перемычки, с помощью которых раздавливается образующаяся на забое рейка.

Преимущество вооружения этого долота состоит в том, что при одинаковом шаге на периферийных венцах усиливается действие зубьев на забой скважины, а специальные раздавливатели разрушают рейку забоя и исключают проскальзывание зубьев при взаимодействии с забоем скважины на этом участке. В конечном итоге это приводит к уменьшению абразивного изнашивания зубьев шарошек.

Созданная конструкция долот 1Э269Т и 23269Т на-ряду с повышением долговечности вооружения обеспечивает существенное увеличение и его износостойкости.

Объясняется это тем, что условия работы зубьев этого долота более благоприятные, так как при меньшей высоте гребешков рейки угол взаимодействия зубьев забоем уменьшается, снижаются растягивающие напряжения от изгиба. Кроме того, уменьшается расклинивающее действие гребешков рейки, которое наблюдается при их попадании во впадины между зубьями.

Одним из путей повышения долговечности буровых долот является применение более износостойких сталей для изготовления лап и шарошек. При изыскании оптимального состава специальных долотных сталей необходимо учитывать не только специфику изнашивания и его закономерности, но также условия работы буровых шарошечных долот и особенности их конструкции.

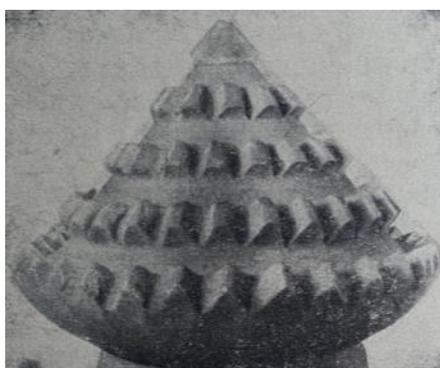


Рисунок 33 - Общий вид шарошки бурового долота

Клиновидные зубья фрезеруются на конусе шарошки и составляют одно целое с ее корпусом. Поэтому долговечность и эффективность работы долота зависят не только от износостойкости и долговечности зубьев, но и от работоспособности шарошки в целом. Конструкция шарошки долота является сложной по конфигурации (рисунок - 33).

Коническая пустотелая форма шарошки с клиновидными зубьями на ее поверхности в виде венцов, разделенных межвенцовыми канавками, является типичным примером детали, имеющей многочисленные концентраторы напряжений. Такая конфигурация шарошки отрицательно сказывается на ее долговечности. Различного рода переходы и концентраторы, небольшая толщина ее стенок, высокие статические и динамические нагрузки долота создают благоприятные условия для зарождения и развития трещин, вызывающих в конечном итоге разрушение шарошки на забое скважины. Следовательно, недостаточно иметь на конце шарошки износостойкий, прочный и эффективно работающий зуб, необходимо исключить разрушение корпуса шарошки. Задача обеспечения долговечности шарошки в целом всегда затрудняла выбор соответствующих сталей для ее изготовления. Сложная конфигурация шарошки нетехнологична при ее термической обработке, так как облегчается образование закалочных трещин. При выборе сталей для изготовления шарошек основная трудность состоит том, что сложная конструкция шарошки должна удовлетворять одновременно двум принципиальным требованиям, обусловленным характером работы долота. Зубья шарошки и ее опорные поверхности должны обладать высокой износостойкостью в условиях действия твердой и абразивной разбуриваемой породы. Одновременно зубья и корпус шарошек должны иметь высокую усталостную прочность, т. е. выдерживать циклическое воздействие высоких статических и динамических нагрузок, действующих на долото при бурении скважин. Одновременное сочетание высокой износостойкости и долговечности затрудняет выбор сталей для изготовления этой детали, так как несоблюдение одного из этих требований делает этот инструмент непригодным для работы в скважине. Применение инструментальных сталей высокой твердости обеспечивает хорошую абразивную износостойкость зубьев, но вызывает их поломку и разрушение шарошек и делает невозможным работу долота в целом.

Применение сталей с высоким запасом пластичности, но низкой твердости исключает поломку зубьев и раскол шарошек, причем резко снижаются показатели бурения вследствие интенсивного изнашивания зубьев (рисунок - 34). С раннего периода применения в бурении шарошечных долот прочно утвердилось мнение, что для изготовления лап и шарошек буровых долот могут использоваться только цементируемые стали. Поэтому более износостойкую сталь искали, прежде всего, в группе цементируемых сталей. С этой целью в разное время многочисленными организациями, заводами отдельными экспериментаторами были исследованы многие цементируемые стали. Проверяли опытные плавки самого различного состава. Анализируя обширный экспериментальный материал, можно заключить, что возможности выбора более износостойкой стали для изготовления шарошек весьма ограничены. Анализ результатов убедил нас в том, что проблему изыскания стали для шарошек буровых долот нужно решать не только путем подбора сталей из числа имеющихся, но и путем создания специальных долотных нецементируемых сталей применительно к специфическим условиям работы этого инструмента. Впервые достаточно обоснованно это направление стало развиваться в МИНХиГП им. Губкина. Для бурения крепких пород выпускаются долота, у которых на конусе шарошек вместо фрезерованного клиновидного зуба запрессовываются твердосплавные цилиндрические вставки - штыри, поэтому такие долота называют долотами с твердосплавным вооружением (рисунок - 35). Абразивное изнашивание твердосплавных вставок таких долот идет с меньшей интенсивностью. Объясняется это тем, что в этом случае соотношение твердостей абразива и металла более благоприятное в отношении износостойкости. Твердосплавные вставки, запрессованные на конусе шарошки, имеют высокое сопротивление абразивному изнашиванию, но, подвергаясь большим статическим и динамическим нагрузкам знакопеременному изгибу и удару, они при определенных режимах бурения разрушаются путем частичного выкрашивания.

Часть твердосплавных вставок выпадает из отверстия на забой в результате деформации корпуса шарошки.



Рисунок 34 - Разрушение зубьев шарошек



Рисунок 35 - Общий вид долота с твердосплавным вооружением.

## **Абразивный износ бурильных и обсадных труб**

Повышение износостойкости бурильных и обсадных труб является одним из возможных способов продления безаварийного срока их работы в процессе проводки скважины бурильные и обсадные трубы находятся в непосредственном взаимодействии, поэтому их износ взаимосвязан и взаимно обусловлен. Бурильные и обсадные трубы работают в условиях сложного комплексного воздействия высоких статических и динамических нагрузок в присутствии абразива и промывочной жидкости под высоким давлением. Сложное силовое воздействие на бурильную колонну, связанное с большими осевыми нагрузками, реакции опоры и крутящего момента приводят к тому, что в конечном итоге в результате упругой деформации колонна приобретает сложную форму, отдаленно напоминающую вид винтовой линии. При такой форме неизбежно возникновение радиальных нагрузок, действующих на колонну со стороны стенки скважины, и взаимодействие колонны бурильных труб со стенкой скважины или обсадной колонной путем трения скольжения. В таких условиях работы происходит прерывистый контакт бурильных труб со стенкой скважины или обсадной колонной. Пространственный спиральный изгиб бурильной колонны определяет интенсивность ее изнашивания и разрушения. Трение скольжения прижатой части колонны к стенке скважины сопровождается высокими удельными давлениями на контакте и является основной схемой силового воздействия при изнашивании взаимодействующих пар трения. Трение скольжения определяет развитие возможных видов изнашивания бурильных и обсадных труб. При трении бурильных труб стенку скважины в местах контакта трубы с породой проявляется прежде всего абразивный износ, вызванный действием частиц монолитного абразива, стенки скважины и частиц, движущихся в затрубном пространстве вместе с промывочной жидкостью. В условиях высоких удельных давлений частицы абразива разрушаются, совершая при этом микрорежущее или царапающее действие на металлические поверхности.

При бурении твердых пород соотношение твердостей абразива и металла бурильных и обсадных труб обычно больше единицы. Это обусловлено тем, что бурильные и обсадные трубы имеют низкую твердость, а твердость разбуриваемых пород достаточно высокая. При значительном различии твердостей абразива и металла труб создаются благоприятные условия для развития абразивного изнашивания. Контакт бурильных и обсадных труб имеет прерывистый характер и сопровождается в определенные моменты ударом наружной стенки бурильной колонны по обсадной. Соударение поверхностей в местах взаимодействия труб в присутствии гидроабразивной среды порождает развитие ударно-гидроабразивного изнашивания. В эти моменты абразивные частицы совершают прямое внедрение в поверхность контакта и мокрорезание при последующем движении между соударяемыми поверхностями.

Помимо абразивного изнашивания поверхность обсадных труб разрушается зубьями шарошек долота при спуско-подъемных операциях. Клиновидные зубья шарошек с твердостью в 2 раза выше твердости обсадных труб при движении долота внутри колонны поражают ее стенки в местах изгиба путем резания, при этом образуются глубокие риски значительной длины.

На общий срок работы бурильных труб значительно влияет износостойкость резьбовых соединений замков. Последние изнашиваются в период свинчивания и развинчивания и имеют все признаки изнашивания при трении плоских металлических поверхностей, когда в зону взаимодействия возможно попадание жидкости, содержащей достаточно твердые абразивные частицы.

Свинчивание и развинчивание бурильной колонны сопровождается деформацией резьбы, что в сочетании с износом приводит к нарушению герметизации соединения и более интенсивному изнашиванию.

Проблема повышения износостойкости бурильных и обсадных труб очень сложна, так каждый вид изнашивания имеет свой механизм, свои закономерности и свои критерии износостойкости, иногда противоречащие один другому.

Кроме того, сложность изыскания способов повышения износостойкости бурильных труб связана еще с тем, что бурильные трубы в процессе эксплуатации подвергаются знакопеременному циклическому изгибу, вызывающему усталостное разрушение. Поэтому стали, предназначенные для изготовления бурильных труб, должны удовлетворять одновременно двум требованиям: обладать высокой износостойкостью в условиях прежде всего абразивного изнашивания и хорошим сопротивлением усталостному разрушению. Следовательно, бурильные трубы должны иметь высокие твердость и предел выносливости. Однако одновременно эти две характеристики механических свойств трубных сталей удовлетворить очень трудно. Высокому значению твердости соответствует высокая склонность к хрупкому разрушению вследствие низкого предела выносливости, поэтому для исключения поломок бурильных труб снижают твердость, создавая тем самым нежелательные предпосылки для их абразивного изнашивания. Повышение предела выносливости положительно сказывается на долговечности бурильных труб. Однако повышение этой характеристики неоднозначно отражается на абразивной износостойкости. Полученные нами данные показывают, что повышение предела выносливости положительно отражается на износостойкости только в вязкой области разрушения, в хрупкой области разрушения с повышением предела выносливости абразивная износостойкость падает.

Достаточно убедительна зависимость, характеризующая связь абразивной износостойкости стали с ее пределом текучести. С ростом предела текучести стали ее абразивная износостойкость повышается.

В этой связи стремление к увеличению предела текучести бурильных труб вполне оправдано с учетом условия абразивного изнашивания.

В условиях трения скольжения металлических поверхностей без абразива большое влияние на износостойкость таких пар трения оказывает соотношение их твердостей. Установлено, что с ростом значения коэффициента, учитывающего соотношение твердостей, от 0,4 до 1,2 износостойкость падает. Эти данные позволяют считать, что износостойкость металлических пар трения равной твердости будет ниже износостойкости таких же пар с различной твердостью и чем больше это различие, тем износостойкость выше. В наших опытах при изменении соотношения твердостей от 1 до 0,4 износостойкость увеличивалась примерно в 3 раза. При изыскании способов повышения долговечности бурильных труб нельзя стремиться к максимально возможному повышению предела прочности стали, имея в виду, что предел выносливости не связан линейной зависимостью с пределом прочности, предел выносливости растет только до определенного значения предела прочности. При дальнейшем повышении предела прочности предел выносливости или остается без изменения, или имеет некоторую тенденцию к снижению. Эти данные показывают, что нецелесообразно максимально повышать предел прочности, так как в более прочной стали всегда сильнее проявляются все дефекты, способствующие зарождению хрупких трещин и развитию усталостных разрушений.

Следует отметить, что все рассмотренные виды изнашивания бурильных и обсадных труб в значительной мере обусловлены видом бурения: роторное или турбинное. Кроме того, во всех случаях изнашивание усложняется действием коррозионных сред, которые активизируют развитие изнашивания, а в ряде случаев меняют критерии износостойкости.

В частности, из всех известных структур в стали наиболее износостойкой при абразивном изнашивании является структура мартенсита, однако в присутствии сероводородных и углекислотных сред эта структура становится менее износостойкой.

К числу возможных способов повышения износостойкости и долговечности бурильных и обсадных труб следует отнести применение высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). По данным, применение ВТМО позволило значительно повысить механические свойства, определяющие износостойкость и долговечность. В таблице - 6 приведены сравнительные данные изменения механических свойств стали марки 36Г2С при обычной термической обработке и с использованием ВТМО.

Выбор и назначение сталей для изготовления бурильных и обсадных труб не имеют строгого научного обоснования. Это может быть объяснено сложностью условий их эксплуатации и большими трудностями, связанными с моделированием этих условий при лабораторных исследованиях.

Таблица 6. Сравнительные данные изменения механических свойств стали марки 36Г2С при обычной термической обработке и с использованием ВТМО

Марка стали	Предел прочности $\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %	Ударная вязкость $\alpha_n$ , кгс × м/см <sup>2</sup>	Твердость $H_m$ , кгс/мм <sup>2</sup>
36Г2С	75	55	12	4	255
36Г2С (после ВТМО)	100	92	14	8,8	293

## **2.6. Исследования ударно – абразивного изнашивания**

### **Ударно – абразивное изнашивание**

Во многих случаях абразивное изнашивание происходит при ударном приложении нагрузки с такой интенсивностью, при которой проявляется хрупкость твердых материалов или их твердых структурных составляющих. В поверхностном слое материала появляются трещины, наблюдаются выкрошивание, сколы и существенное понижение износостойкости. Ударное воздействие на материал может быть разного характера и интенсивности; контакт с абразивным телом может различаться по масштабу; при ударе разрушается и меняет свои абразивные свойства само абразивное тело. Возможных вариаций условий изнашивания при ударно-абразивном изнашивании гораздо больше, чем при безударном, и они меньше изучены.

Ударно-абразивное изнашивание имеет место при встрече металлической детали с мелкими твердыми частицами, движущимися по инерции либо увлекаемыми потоком газа или жидкости.

Соответственные методы лабораторных испытаний на изнашивание выделяются в отдельную группу. Здесь не описываются испытания на ударно-абразивное изнашивание мелющих тел шаровых мельниц, а также испытаний стальных образцов в вибрационных мельницах.

### **Изнашивание при ударе образца о закрепленные абразивные частицы**

Для испытания на ударно-абразивное изнашивание в Институте машиноведения М. Д. Крациным была разработана машина Х4-БМ2, имеющая дополнительные устройства к безударной машине Х4-Б. Опыт испытаний на машине Х4-БМ2 послужил основой для разработки М.Д.Крашениным следующей, более совершенной конструкции машины УАМ. Для осуществления ударно-абразивного испытания конструкция машины

Х4-Б усложнена, уменьшена скорость вращения диска, движение его сделано прерывистым.

В момент остановки диска образец с грузом падает и происходит удар образца о шкурку. Затем образец поднимается для нового удара, в это время диск делает поворот на небольшой угол и образец получает радиальное перемещение.

Схема машины Х4-БМ 2 представлена на рисунке 36. Через трехступенчатую клиноременную передачу I вращение от электродвигателя 2 передается барабану 3, скрепленному жестко со шкивом клиноременной передачи. Барабан свободно насажен на полую ось, закрепленную с помощью фланца на корпусе машины. Внутри этой оси свободно проходит ведущий валик 4. Барабан имеет четыре спицы 5, на которые опирается ролик 6 рычага 7. С рычагом жестко связана шестерня 8, осуществляющая с помощью шестерни 9 поворот валика 10. На конце валика 10 имеется вилка 11, поднимающая державку с образцом 13 и грузом 14.

В момент прохождения спицы барабана через верхнюю точку образец поднимается, а затем падает на абразивную шкурку, натянутую на диске 15. Диск приводится в движение тем же двигателем через червячную пару барабана, на торце которого имеется качающийся рычаг 17, прижимаемый пружиной 18 к оси барабана. Рычаг 17 имеет выступ в виде зуба 19, который входит в зацепление с шестерней 20, жестко связанной с ведущим валиком вращающим червячную пару 16.

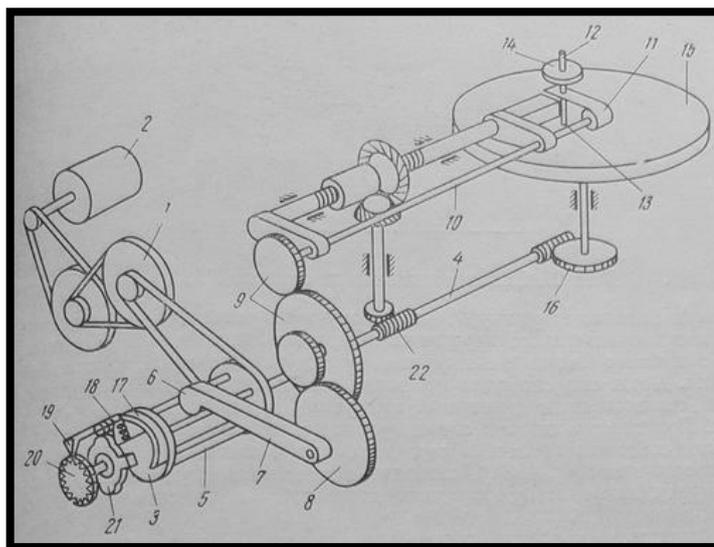


Рисунок 36 - Схема машины Х4-БМ2

При вращении барабана рычаг 17 наталкивается на выступы неподвижного кулачка, закрепленного на полой оси (вокруг которой вращается барабан), и расцепляет зуб 19 с шестерней 20. При этом диск останавливается. При выключенном кулачке 21 диск движется непрерывно. Поступательное (радиальное по диску) перемещение образца осуществляется через ведущий валик 4 с помощью червячной пары 22.

Таблица 7. Условия испытания на машине Х4-БМ2

Условия испытания	
Диаметр образца, мм	2,0
Нагрузка на образец (включая вес державки), г	800
Число ударов в минуту	136
Скорость вращения диска, об/мин	0,9
Радиальное перемещение образца за 1 оборот диска, мм	1,0
Число ударов при одном испытании	5440
Абразивная истирающая поверхность	Шлифовальная шкурка

Износ определяется по изменению длины образца или его массы (взвешиванием) с пересчетом на объемный или линейный износ. Результаты испытания выражаются относительной износостойкостью материала. На рисунке - 39 приведена схема действия машины УАМ. Барабан 1, на котором закреплена шлифовальная шкурка, вращается прерывисто; число остановок за один оборот около 172. В период остановки образец 2 под действием своего веса, веса державки 3 и груза 4 падает, ударяется о шкурку и начинает подниматься для следующего удара. Пока он поднимается, барабан поворачивается, а образец продольно перемещается. На рисунке - 38 показана схема машины УАМ. От электродвигателя вращение передается через червячный редуктор 2 и клиноременную передачу 3 валику 4, который несет на себе кулачок 5 и шестерню 6. Кулачок в верхнем положении поднимает рамку 7, на которую опирается пятка 8 подвески двух плоскопараллельных пружинах. Подвеска неподвижно закреплена на рычаге 9 и имеет на конце вилку, поднимающую образец 10, зажатый в цанге державки. Державка свободно перемещается в направляющей втулке рычага который своим концом закреплён в каретке 11, скользящей по направляющей 12.

При перемещении выступа кулачка в нижнее положение образец под действием собственного веса и веса державки, а также груза 13, накладываемого на заплечики державки, свободно падает вниз и ударяется об абразивную шкурку, закреплённую на цилиндрической поверхности стального барабана 14.

Одновременно с рамкой поднимается водило 15, которое при этом тянет за собой хомут 16, действующий таким образом, что при движении подвески с образцом в одну сторону он жестко скрепляется с валом, приводящим во вращение барабан, а при движении в обратном направлении (момент падения) свободно проворачивается на валу.

При подъеме водила барабан поворачивается на заданный угол, при этом шестерни 6 и 17 должны быть расцеплены.

От валика 4 через шестерни 6 и 18 движение передается ходовому валику 19, обеспечивающему поступательное перемещение рычага 9 вдоль направляющей 12 с помощью каретки (суппорта) 11.

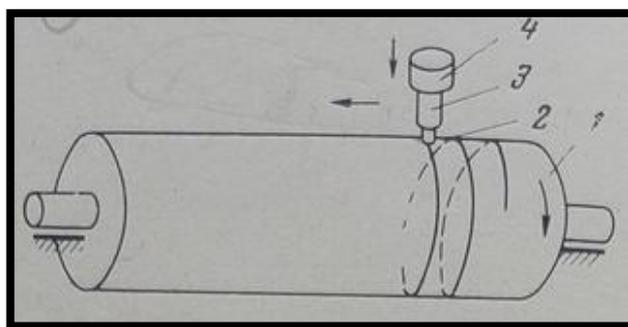


Рисунок 37 - Схема испытания на машине УАМ

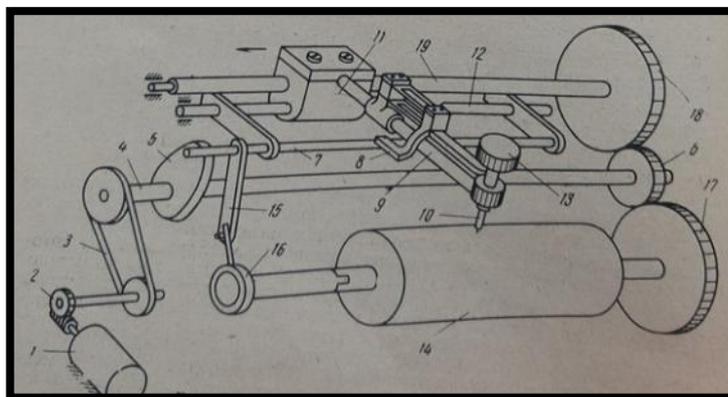


Рисунок 38 - Схема машины УАМ

Для обеспечения непрерывного движения барабана (такая возможность предусмотрена) достаточно выключить хомут и сцепить шестерни 6 и 17; в этом случае на машине можно производить испытание на абразивное изнашивание при безударном непрерывном трении образца об абразивную шкурку.

Таблица 8. Условия испытания на машине УАМ

Условия испытания	
Размеры барабана, мм:	
Диаметр -	80
Длина -	210
Габариты машины, мм	60x380x250
Вес, кг	50
Диаметр образца (такой же, как для машины Х4-Б), мм	2,0
Нагрузка на образец (включая вес державки), Г	400
Скорость вращения барабана, об/мин	0,9
Число ударов в минуту	155
Продольное перемещение образца за 1 оборот барабана, мм	2,0
Число ударов при одном испытании	7750
Абразивная истирающая поверхность	Шлифовальная шкурка

Износ определяется по изменению длины или массы (взвешиванием) с пересчетом на объемный или линейный износ. Результаты испытания выражаются относительной износостойкостью, вычисляемой как частное от эталона на износ образца изучаемого материала (как на Х4-Б).

В Московском институте нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина построена специальная машина для испытания на ударно - абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы и проведено исследование В. Н. Виноградовым, Г. М. Сорокиным и Г. К. Шрейбером.

Образец цилиндрической формы падает с некоторой высоты, ударяясь своим торцом об абразивную шкурку, лежащую на наковальне. Пока образец поднимается, шкурка перемещается, при этом подставляя свою свежую поверхность для нового удара; подача шкурки прерывистая. От электродвигателя 1 (рисунок - 39) через редуктор 2 и клиноременную передачу 3 приводится во вращение вал, на котором установлен кулачок 4.

Шпиндель 5 вместе с образцом 6 поднимается с помощью кулачка и совершает повторные удары по абразивной ленте-шкурке 7, лежащей на наковальне 8. Подача ленты происходит синхронно с движением шпинделя с помощью храпового механизма 9. Отработанная лента наматывается на катушку 10. Для устранения влияния на результаты испытаний износа самой наковальни применяется вкладыш 11, который перемещается после каждого опыта или поворачивается другой гранью. Вес грузов 12, закрепленных на шпинделе, может меняться. Приспособление 13 служит для обеспечения постоянства расстояния от торца образца до наковальни, которое может изменяться вследствие износа образца. Для устранения прилипания шкурки к образцу служит прижим 14. Во время испытания на ленту в зону удара образца подается вода, охлаждающая образец и устраняющая приставание к нему абразивных частиц. Кожух 15 защищает от разбрызгивания воды.

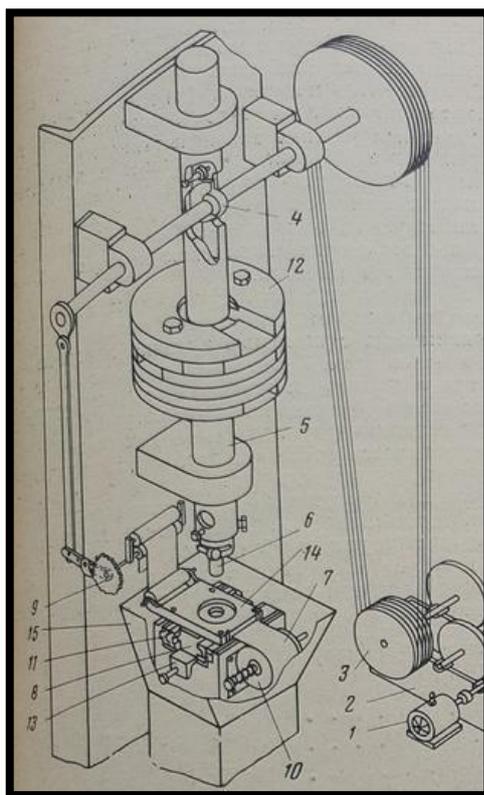


Рисунок 39 - Схема машины для испытания на ударно – абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы

Определяется износ по потере массы (взвешиванием).

## **Изнашивание при ударе образца о слой свободных абразивных частиц, лежащих на наковальне.**

Новый метод испытания на абразивное изнашивание при ударе по слою свободных абразивных частиц, лежащих на стальной наковальне, разработан (в Московском институте нефтехимической газовой промышленности им. И. М. Губкина) В. Н. Виноградовым, Г. М. Сорокиным и В. А. Коротковым. Для этого испытания применена машина, (рисунок – 40). От электродвигателя через редуктор 2 и клиноременную передачу 3 вращение передается на вал 4 и кулачок 5, который с помощью ролика 6 поднимает шпindel-боек 7, на торце которого в оправке 8 помещен испытуемый образец 9. Под действием грузов 10 шпindel 7 падает, при этом происходит удар образца по наковальне 11, на которой имеется слой абразива.

В основу испытания были положены следующие условия: 1) каждый удар образца должен происходить по свежей порции абразива; 2) каждый новый цикл испытания должен производиться при свежей поверхности наковальни, не имеющей следов изнашивания; 3) слой абразива при повторных ударах должен быть одной и той же толщины; 4) во время подъема образца после очередного удара наковальня должна освободиться от отработанного абразива и на нее должна быть подана свежая порция абразива. Для осуществления этих условий у машины имеются специальные приспособления, выполняющие за период одного удара следующие операции: подачу из бункера 12 очередной порции абразива, отмеренной дозатором 13; формирование из этой порции подвижными ножами 14 слоя строго определенной заданной толщины; очистку наковальни от отработанных абразивных частиц щетками 15, транспортировку этих частиц щетками в бункер 16. Абразив в зону удара подается щетками, приводимыми в движение с помощью приводного механизма, состоящего конической передачи 17 и валика 18.

Машина снабжена устройством для регулирования толщины абразивного слоя на наковальне и приспособлением для перемещения вкладышей наковальни после каждого цикла испытаний.

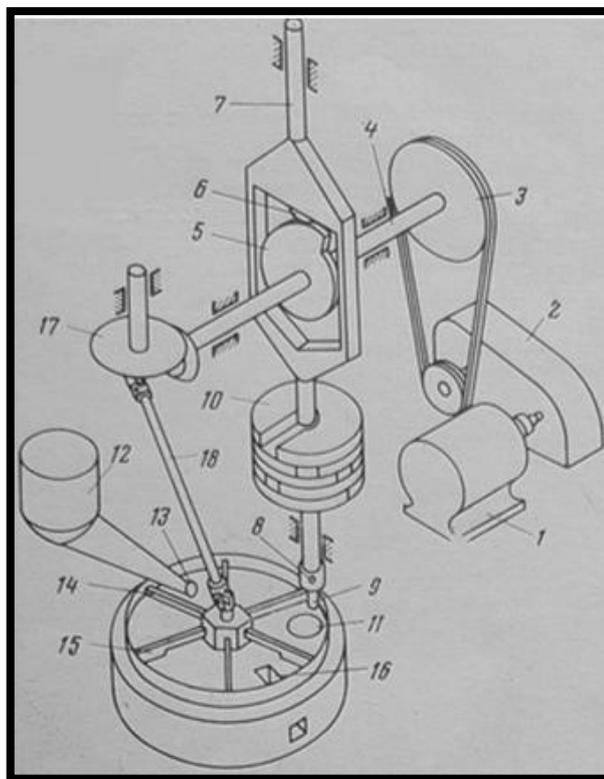


Рисунок 40 - Схема машины для испытания на ударно-абразивное изнашивание о слой свободных абразивных частиц

### **Изнашивание при ударе абразивного тела о металлические материалы**

В Московском инженерно – строительном институте им. В.В. Куйбышева. К.П.Чудаковым и И. В. Петровым разработана машина ЧП – 1, предназначенная в основном для испытания на изнашивание наплавочных материалов при ударно – абразивном воздействии с ударами высокой интенсивности. Ее назначение - оценка работоспособности материалов рабочих строительных машин, контактирующих с твердым грунтом, рудой или камнями. На рисунке - 41 приведен схематический разрез барабана машины, которая опирается на ролики и приводится во вращение от электродвигателя.

Испытуемые образцы материала закрепляются на внутренней поверхности барабана, частично заполняемого кусками абразивного материала (руда, базальт, гранит).

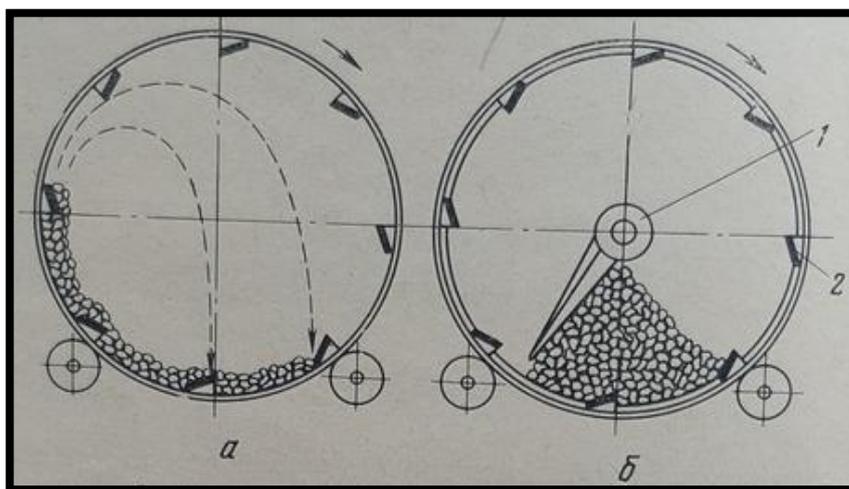


Рисунок 41 - Поперечный разрез барабана машины ЧП-1 со свободным движением абразива (а) и с ограниченным движением абразива (б)  
1- неподвижный щиток; 2 - кассета с образцами.

Авторы отмечают возможность варьирования условий испытания на этой машине путем изменения скорости вращения барабана (меняется интенсивность ударов), установки неподвижного щитка в барабане, который будет удерживать куски абразива от увлечения их барабаном, и таким образом будет осуществляться трение образца об абразивные тела с меньшей динамической интенсивностью. В барабане устанавливаются 15-20 кассет, в каждой кассете 15-20 образцов, так что одновременно можно испытывать много образцов.

Ниже приводятся в качестве примера условия испытания износостойкости твердых наплавов применительно к зубьям экскаватора, работающего в тяжелых условиях.

Таблица – 9. Условия испытания износостойкости твердых наплавов

Скорость вращения барабана, об/мин	15-18
Абразив	Базальт
Содержание (в %) в абразиве кусков размером, мм:	
30-60	10
60-90	20
90-120	50
120-150	20
Коэффициент заполнения барабана	0,15
Длительность испытания, час	120
В том числе:	
Предварительного –	40
Основного -	80
Периоды обновления абразива, час	4
Коэффициент динамичности	2,2

Коэффициентом динамичности названо отношение твердости НВ эталона (закаленной стали Г13Л), определенной после испытания, к ее твердости до испытания. При испытании 16 твердых износостойких наплавов на этой машине в режиме интенсивного ударно-абразивного изнашивания на большей их части образовались от школы через 20-30 час. Авторами машины намечено пять возможных режимов испытания, различающихся скоростью вращения барабана (от 9,6 до 20 об/мин), примененным абразивом (кирпичные кварциты или базальт), а также фракционным составом и крупностью кусков.

## **2.7. Исследование низкотемпературного абразивного изнашивания**

Различие в объеме разрушений, возникающих на изнашиваемых поверхностях, на наш взгляд, обуславливается в рассматриваемых способах испытаний рядом факторов. С одной стороны, влияние механо-физических свойств изнашиваемого материала, с другой – способа абразивного воздействия, а также абразивной способностью самой изнашивающей среды.

В том случае, когда отрицательная температура влияет на все перечисленные факторы одновременно, об исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания металлов и сплавов с позиций физики и механики разрушения судить весьма проблематично. В подобных ситуациях вернее всего вести речь об исследованиях, имеющих конкретное прикладное значение. По этой причине, с нашей точки зрения, при исследовании закономерностей абразивного низкотемпературного изнашивания (механо-физический аспект) при выборе способа и обосновании схемы износных испытаний следует, прежде всего, обеспечить такие условия:

1) на изнашиваемых металлических поверхностях процесс разрушения должен происходить при реализации такого напряженного состояния, когда свободно развиваются пластические деформации;

2) абразивная среда не должна менять своих обычных характеристик за весь период фрикционного взаимодействия с охлажденной поверхностью изнашиваемого образца;

3) параметры режима износных испытаний, например: скорость, угол атаки, характер приложения нагрузки не должны оказывать существенного влияния на механизмы, контролирующие процесс хрупкого разрушения, а значит и на механизм возникновения частицы износа.

На основании указанных выводов, следующих из анализа раньше выявленных закономерностей абразивного износа, сделано заключение о том, что наиболее приемлемым для решения поставленных задач является способ,

действие которого основано на свободном воздействии абразивных частиц на изнашиваемую поверхность.

Весьма распространенным является разгон частиц воздушным потоком. В практическом отношении способ интересен, однако, для цели настоящего исследования малоприменим, т.к. обладает существенным недостатком. В результате того, что скорость воздушного потока, применяемого для разгона частиц, оказывается выше скорости разгоняемых частиц, а также его растекание у изнашиваемой поверхности образца возникают значительные, причем неконтролируемые искажения в значениях первоначально заданных параметров износных испытаний. Широко известен способ центробежного разгона частиц. Этот способ, может быть применим для решения вопросов, связанных с основной целью настоящего исследования, но с учетом необходимости устранения главного недостатка – направление выведенного абразивного потока из радиальных каналов ускорителя (равнодействующая касательной и радиальной скоростей частиц) должно быть фиксируемым. Однако в известных конструкциях ускорителей в направляющих каналах имеется существенное влияние на радиальную скорость частицы трения о стенки каналов по их длине. Ниже представлено обоснование способа, позволяющего исключить этот фактор.

#### **Установка для исследования ударного абразивного воздействия на образцы**

На рисунке - 42 представлена схема установки для исследования ударного абразивного воздействия на образцы; Установка содержит корпус 1 со слоем термоизоляции 2, два двигателя 3 и 4, центральный ускоритель 5 центробежного типа и кольцевой держатель 6 образцов, имеющие возможность независимого вращения вокруг вертикальной оси, при этом вращение держателя 6 образцов осуществляется двигателем 3, а ускорителя 5 двигателем 4.

Верхняя часть корпуса 1 содержит термоизолирующую крышку 7 с центральным отверстием для трубки 8, служащей для подачи абразивных зерен 9 из приспособления 10 в полусферическую чашу 11, размещенную внутри корпуса 1.

Внутри корпуса 1 вмонтировано также средство для изменения температуры образцов, например криокамера, которая связана с резервуаром 13 по принципу сообщающихся сосудов.

Температура на поверхности образцов 14, установленных в держателе 6, фиксируется с помощью датчика 15.

Уровень хладагента, например жидкого азота, в рабочей полости криокамеры контролируется указателем 16. Отработанный абразив скапливается в приспособлении 17 для их сбора. Установка монтируется на виброустойчивом основании 18.

Установка работает следующим образом.

Образцы 14 исследуемого материала закрепляют в держателе 6, заполняют хладагентом криокамеру 12, охлаждают образцы до заданной температуры, запускают двигатели 3 и 4. Абразивные зерна из приспособления 10 поступают в направляющую трубку 8 и измененные в верхней ее части, ударяются о поверхность исследуемых образцов.

За счет разного соотношения частот и направлений вращения держателя с образцами и чаши устанавливаются определенные скорости удара и угол атаки.

Геометрическая форма внутренней полости полусферической чаши (рисунок - 43) обеспечивает подъем попавших в нее абразивных зерен вследствие центробежных сил до уровня входных отверстий радиально ориентированных клапанов, выполненных в корпусе чаши вблизи крышки. Функциональное назначение крышки заключается в удерживании абразивного зерна в полости чаши. Малая длина каналов, не превышающая средний размер зерна, обеспечивает прохождение зерен через каналы без дальнейшего прироста радиальной составляющей скорости.

Скорость абразива на выходе из каналов равна линейной скорости вращения периферийных точек внешней поверхности полусферической чаши в экваториальной плоскости и направлена по касательной к ней. Экспериментально зафиксированный разброс по скоростям ударов и углам атаки при работе данной установки не превышает 5% от среднеарифметического. После взаимодействия с образцами абразив поступает в приспособление 17 для сбора. Установка позволяет проводить испытания образцов материалов на абразивное изнашивание в диапазоне скорости ударов до 100 м/с и изменения углов атаки 5 - 90° изобретения.

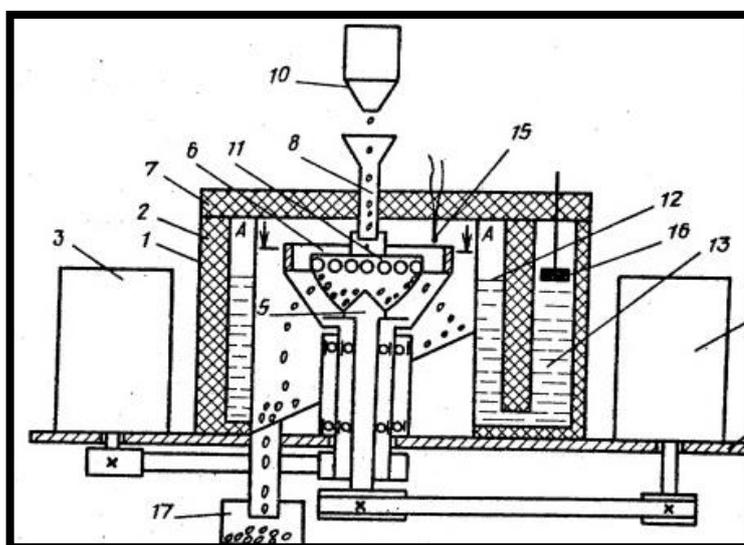
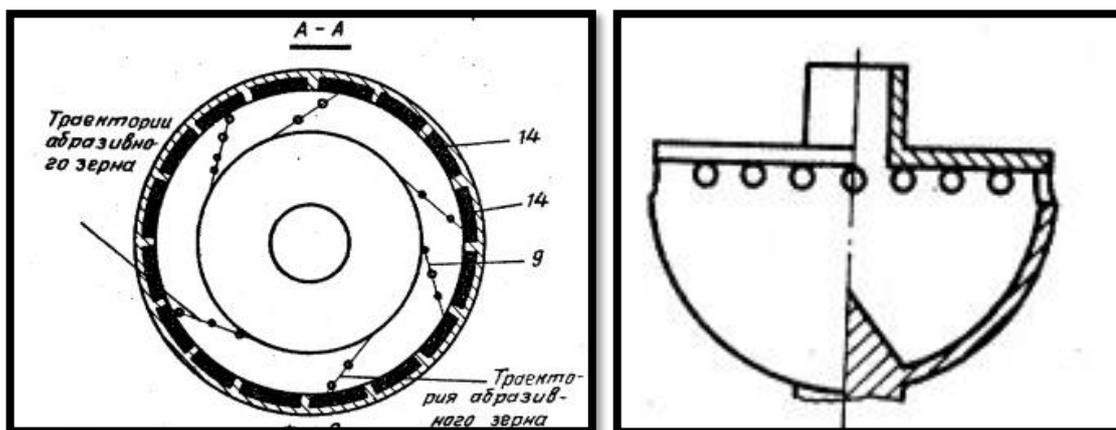


Рисунок 42 - Схема установки для исследования ударного абразивного воздействия на образцы.



(а)

(б)

Рисунок 43 - Геометрическая форма внутренней полости полусферической чаши (а); полусферическая чаша (б).

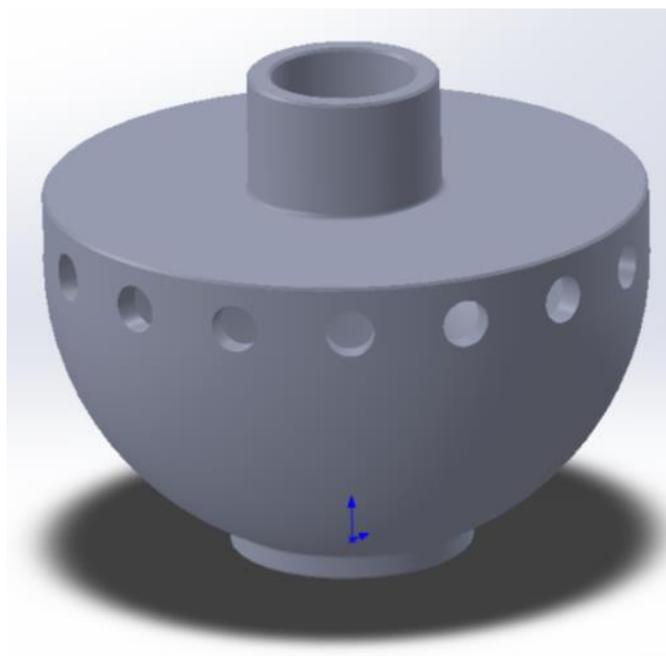


Рисунок 44 - 3D модель полусферической чаши

## Расчетно-аналитическая оценка траектории и параметров скольжения абразивных частиц по плоскому дну ускорителя

Для определения траектории частицы на дне плоского вращающегося центробежного ускорителя воспользуемся уравнением кинестатики

$$F_{\text{тр}} + F_{\text{ин}} = 0, \quad (1)$$

в котором сила трения равна

$$F_{\text{тр}} = -mgf \frac{v}{\sqrt{v^2}} \quad (2)$$

и сила инерции

$$F_{\text{ин}} = -ma \quad (3)$$

В последнем выражении ускорение равно

$$a = a^r + a^e + a^k, \quad (4)$$

где:

$a^r$  – относительное ускорение;  $a^e$  – переносное ускорение;

$a^k$  – Кориолисово ускорение

Перепишем выражение (1) с учетом зависимостей (2)-(4) и сократив на  $m$ :

$$gf \frac{v}{\sqrt{v^2}} + a^r + a^e + a^k = 0. \quad (5)$$

Введем прямоугольную декартовую систему координат. Теперь положение частицы можно находить радиус-вектором  $r$  (рисунок - 45).

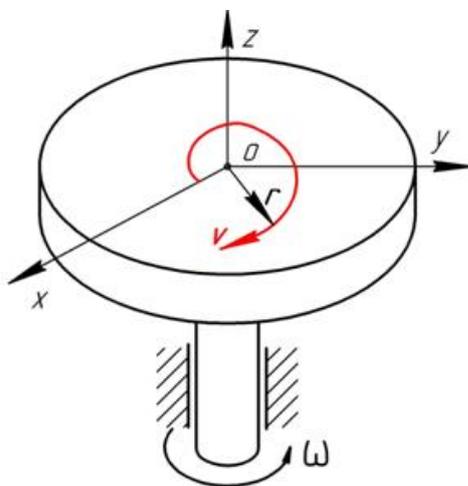


Рисунок 45 - Схема плоского центробежного ускорителя

После несложных преобразований из векторного уравнения (5) получим два дифференциальных уравнения второго порядка:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 2\omega \frac{dy}{dt} + \omega^2 x - gf \frac{\frac{dx}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}}, \quad (6)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -2\omega \frac{dx}{dt} - \omega^2 y - gf \frac{\frac{dy}{dt}}{\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}}. \quad (7)$$

На рисунках 46, 47 представлены результаты численного решения уравнений (6) и (7) при начальных условиях  $x=5\text{мм}$ ,  $y=0$ ,  $z=0$  ( $\frac{dx}{dt} \neq 0$ ,  $\frac{dy}{dt} = 0$ ), когда сила трения оказывается меньше центробежной силы и начало движения возможно. Коэффициент трения  $f$  задавался равным 0,10; 0,15; 0,20. Радиус ускорителя  $R=0,05$  мм. Использовались несколько значений угловой скорости. Расчетные траектории представляют спирали типа Архимеда, причем подход частиц к отверстиям обода ускорителя происходит под весьма острыми углами, так что частица может набрать радиальную составляющую скорости ( $v_r$ ) лишь на пути в длину выходного канала ускорителя.

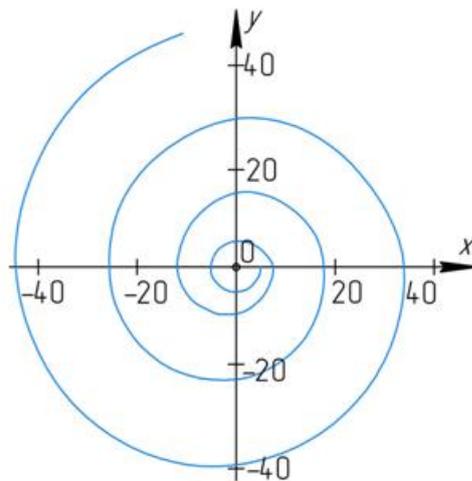


Рисунок 46 - Спиралеобразная траектория частицы относительно дна вращающегося ускорителя  $f=0,15$ ;  $\omega=78,75 \text{ c}^{-1}$

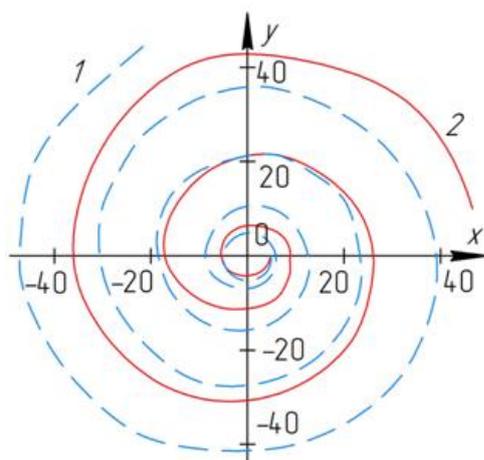


Рисунок 47 - Спиралеобразные траектории частицы относительно вращающегося дна ускорителя: 1-  $f=0,1$ ;  $\omega=78,75 \text{ c}^{-1}$ ; 2-  $f=0,1$ ;  $\omega=52,5 \text{ c}^{-1}$

Из полученных графиков следует, что увеличение коэффициента трения  $f$  ведет к уменьшению времени достижения границы диска, увеличению шага спирали и мало оказывает на величине скорости вблизи периферии диска. Рост значения  $\omega$  сопровождается увеличением количества витков спирали, увеличением скорости скольжения, что обеспечивает острый угол подхода частицы к ободу ускорителя и мало влияет на общее время движения.

Можно предполагать, что по мере продвижения по спирали скорость частицы  $v$  должна несколько возрасть. В самом деле, сила Кориолиса лишь в начальные моменты движения перпендикулярна радиусу ускорителя, т.е. центробежной силе. Далее сила Кориолиса, оставаясь перпендикулярной скорости  $v$ , будет составлять с направлением центробежной силы уже тупой угол, который по мере движения по спиральной кривой будет становиться все больше и больше. И хотя обе силы (центробежная и Кориолисова) с ростом радиуса будут увеличиваться, но увеличение их равнодействующей замедлится вследствие увеличения тупого угла между ними.

Для проверки приведенных выше предположений умножим уравнение (6) на  $\frac{dx}{dt}$ , а (7) на  $\frac{dy}{dt}$  и сложим их. Далее учитывая, что  $\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = v^2$  и  $\sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = dL$  есть дифференциал длины дуги  $L$ , то интегрируя, получим:

$$v = \omega r \sqrt{1 - \frac{2gfL}{\omega^2 r^2}}.$$

Из полученной формулы следует, что с ростом  $L$  скорость  $v$  все более отстает от значения  $\omega r$ , хотя и возрастает с ростом  $r$ , что и высказывалось в предположении.

Учитывая силы трения в выходном канале ускорителя (рисунок 48), обусловленные прижимающими частицу к стенкам канала силой веса  $mg$  и силой Кориолиса  $2m\omega v_r = Q$ , можно написать:

$$v_r \frac{dv_r}{ds} = \omega^2(R + S) - f(g + 2\omega v_r). \quad (8)$$

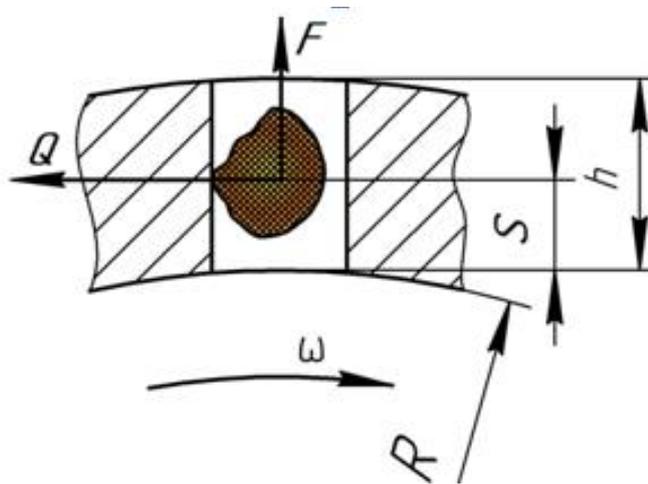


Рисунок 48 - Частица в радиальном канале.

Так как  $S$  по сравнению с радиусом дна ускорителя  $R$  мало, то можно для упрощения принять, что  $S=h/2$ .

Тогда обозначив

$$A = \omega^2 \left( R + \frac{h}{2} \right) - fg = \text{const}, \quad \text{из выражения (8) получим}$$

зависимость

$$dS = \frac{v_r dv_r}{A - 2f\omega v_r}.$$

Интегрируя последнее выражение при  $S=0$  и  $v_r = 0$ , получаем уравнение для определения значения скорости в момент вылета частицы из канала

$$v_r + 2f\omega h = \frac{A}{2f\omega} \{ \ln A - \ln(A - 2f\omega v_r) \}. \quad (9)$$

Решение численного примера показало, что величина скорости, найденная по формуле при  $R=0,05\text{м}$ ;  $\omega = 314\text{с}^{-1}$ ;  $h=0,001\text{м}$ , равна  $v_r = 3,11\text{м/с}$ . При этом  $\tan \alpha = \frac{3,11}{\omega(R+h)}$  и  $\alpha \approx 10,59^\circ$ . Естественно, что с увеличением коэффициента трения радиальная скорость на вылете будет меньше. Меньше будет и сам угол.

Аналогичный подсчет для  $\omega = 52,35\text{с}^{-1}$ ;  $f = 0,1$ ;  $R = 0,05\text{м}$  и  $h = 0,001\text{м}$  показывает, что радиальная скорость на вылете  $v_r$  будет  $0,515\text{м/с}$ , а угол между направлением полета частицы вне ускорителя и касательной составляет  $\alpha \approx 10,55^\circ$ . Следовательно, можно утверждать, что простой по изготовлению плоский центробежный ускоритель обладает таким свойством, что траектории частиц относительно вращающегося дна ускорителя носят спиралеобразный характер, причем подход частиц к цилиндрическому ободу ускорителя происходит под острыми углами. При малых каналах траектория частиц практически остается неизменной с сохранением линейной скорости периферийных точек ускорителя. Таким образом, частицы могут быть направлены на исследуемые образцы под заданными углами атаки и найденной выше скоростью.

## Экспериментальные исследования

В соответствии с выше изложенным позднее была создана установка, принцип действия которой базировался на центробежном разгоне абразивных частиц. В отличие от известных конструкций установок типа ЦУК в ускорителе (роторе) отсутствовали радиальные каналы большой длины (делались в боковой стенке ротора отверстия). Таким образом, обеспечивался выход абразивных частиц практически по касательной к боковой поверхности ротора. Угол атаки  $\alpha$  в рассматриваемом случае не зависел от скорости выхода абразивных частиц из боковых отверстий ротора и определялся из чисто геометрических соображений:  $\alpha = \arccos(\rho/R)$ , где  $\rho$  – радиус окружности внешней боковой поверхности ротора;  $R$  – радиус окружности концентрически расположенного относительно ротора неподвижного цилиндрического образца.

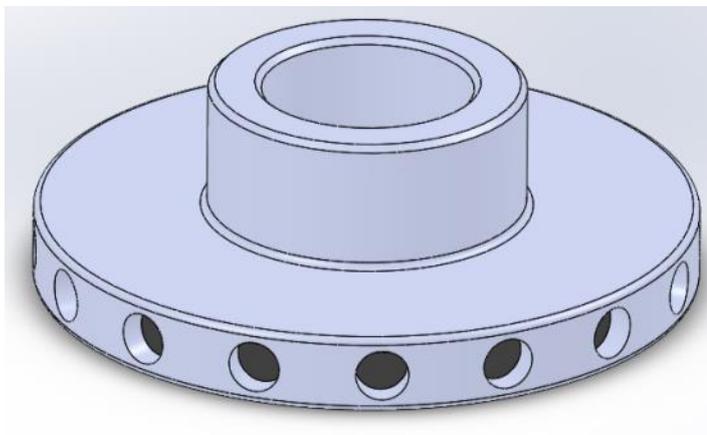


Рисунок 49 - Ускоритель с плоским дном.

Разработанная в упрощенном варианте система охлаждения позволяла плавно изменить температуру на изнашиваемой поверхности от комнатной до 143К.

Износ определялся одним из самых достоверных способов – взвешиванием на аналитических весах, до и после опыта. Весовой износ пересчитывался в объемный, мм<sup>3</sup>.

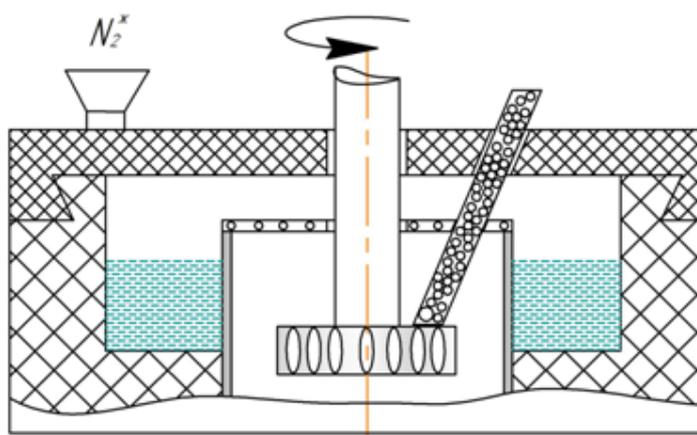


Рисунок 50 - Схема конструкции установки для низкотемпературных испытаний на износ по способу центробежного разгона

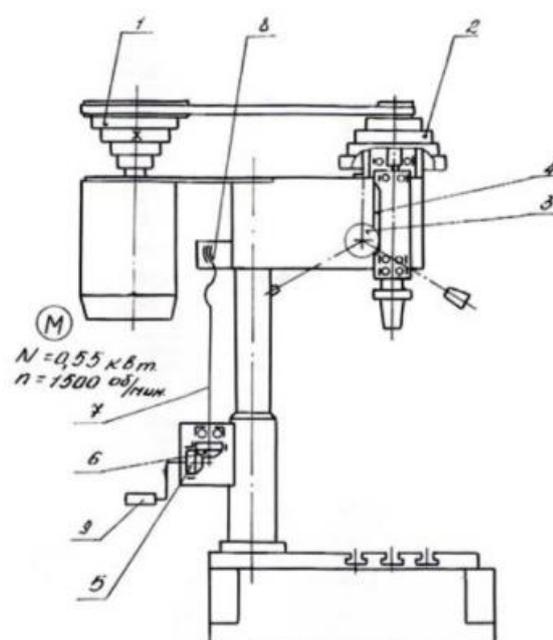


Рисунок 51 - Кинематическая схема станка ГС-2112.

Кинематическая схема станка (рисунок - 51) содержит три кинематические цепи: вращения шпинделя, ручной подачи и перемещение шпиндельной бабки по колонне. Вращение от электродвигателя М передается через ременную передачу на вал шпинделя. Ручная подача осуществляется рукоятками штурвального устройства, вращение которых через зубчатое колесо 3 передается на рейку 4 пиннолы шпинделя.

На станке ГС2112 установлен один асинхронный электродвигатель мощностью 0,55 кВт для привода шпинделя.

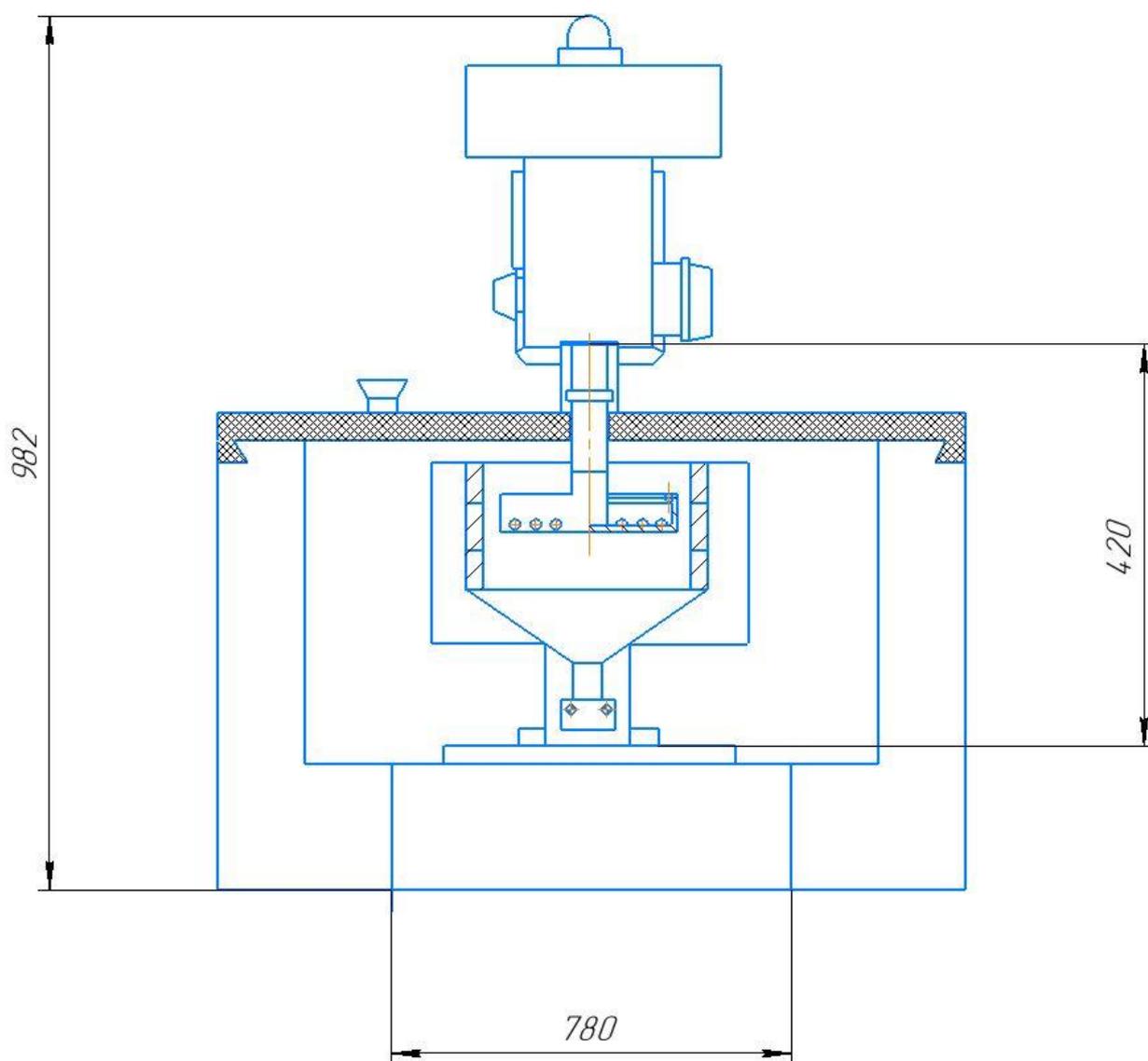


Рисунок 52 - Упрощенная схема установки, для низкотемпературных испытаний, на основе сверлильного станка ГС 2112.

Результаты оценки влияния температуры на закономерности абразивного изнашивания отожженной стали 20 представлены на рисунке 53. Монотонное возрастание абразивной износостойкости,  $\text{мм}^{-3}$  (линейная зависимость) по мере понижения температуры изнашиваемой поверхности образца, вместе с ростом твердости НВ объяснить на основе известных исследований по проблеме хрупкого разрушения, весьма затруднительно.

По-видимому, повышение износостойкости при понижении температуры как-то связано с проявлением эффекта хладноломкости в сталях.

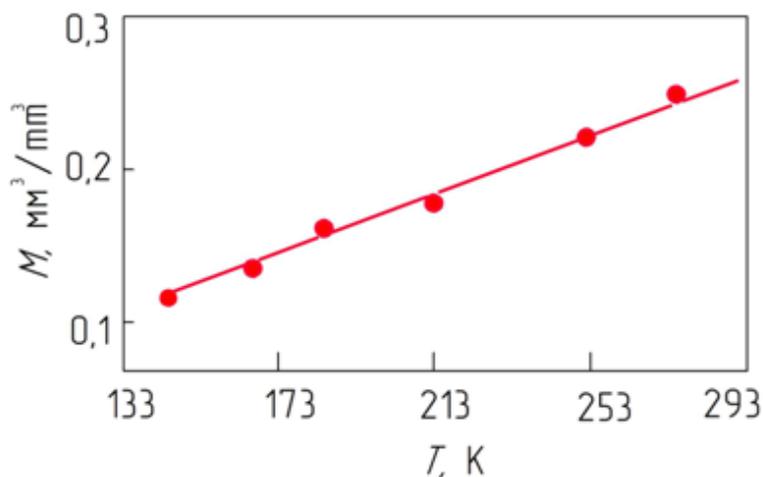


Рисунок 53 - Зависимость величины износа стали 20 от низких температур

Однако найти до конца удовлетворительное объяснение полученному результату с точки зрения изменения только твердости и физико-механических характеристик в рассматриваемом интервале изменения температуры затруднительно. В какой-то мере удовлетворительное объяснение выявленным закономерностям абразивного низкотемпературного изнашивания дают результаты склерометрических испытаний, которые проведены Н.Н. Титовским и В.О. Титовской (выполнены под руководством докт. физ.-мат. наук В.Н. Кащеева). Исследовался характер поверхностного разрушения сталей при царапающем воздействии конического индентора в широком интервале температур от +20°C до -196°C. Обнаружено, что с понижением температуры воздушной среды прежде всего уменьшается глубина царапин и вместе с этим возрастает тангенциальное усилие микрорезания. Вместе с этим было зафиксировано также возникновение в контактной зоне сложного напряженного состояния (микрообъем), которое отличается от напряжённого состояния, возникающего в приконтактной зоне (макрообъем).

В свете отмеченного нужно подчеркнуть тот факт, что образование микростружки связано как с деформационными характеристиками, так и с характеристиками процесса разрушения (причём специфического поверхностного).

В частности, также не исключено, что в использованной схеме износных испытаний в разрушаемой поверхности реализуется напряженное состояние, при котором затруднено свободное развитие пластической деформации, а упрощенный способ охлаждения неподвижного образца отвечает условиям, при которых по толщине неподвижного цилиндрического образца возникают градиенты температур, влияние которых на характеристики износа раньше было доказано исследованиями проф. В.Н. Кашеева. В этой связи проведено исследование абразивного изнашивания с использованием способа, исключающего влияние фактора, связанного с градиентом температуры.

### **Низкотемпературные узлы трения и применяемые материалы.**

Низкие температуры составляют обширный диапазон от 0 К до 273,15К. Температуры ниже 120 называют криогенными, а ниже 0,3 - сверхнизкими.

В криогенном машиностроении прослеживается общая тенденция выноса узлов трения из области низких температур, что имеет целью повышение надежности и уменьшение потерь холодопроизводительности. Однако осуществление подобных конструктивных мероприятий в ряде случаев невозможно. Поэтому с развитием криогенного машиностроения и особенно электрических машин со сверхпроводящими обмотками, охлаждаемыми сжиженными газами, число низкотемпературных узлов трения постоянно увеличивается. Низкотемпературные узлы трения могут работать со смазкой, например в среде криогенной жидкости или применением специальной жидкой смазки, а также без смазки. В последнем случае в узлах трения применяют самосмазывающиеся материалы.

*Область применения.* Применяют следующие типы низкотемпературных узлов:

- торцевые и радиальные уплотнения валов насосов для перекачивания криогенных жидкостей, вращающихся регенераторов, ректификаторов, турбодетандеров, электрических генераторов со сверхпроводящими роторами;
- поршневые уплотнения насосов для перекачки криогенных жидкостей, гелиевых холодильных газовых машин, низкотемпературных поршневых "детандеров";
- радиальные подшипники качения узлов и машин, работающих в разнообразных средах, в вакууме при низких температурах;
- опоры скольжения узлов и машин, работающих в разнообразных средах, в вакууме при низких температурах.

Примером низкотемпературного торцевого уплотнения может служить сильфонное двухстороннее металлографитовое уплотнение, примененное в погружном насосе жидкого кислорода на космическом корабле. Уплотнение установлено на валу приводного электродвигателя, размещенного герметичном корпусе, который заполнен гелием под давлением до 5,5 кгс/см<sup>2</sup>. Электродвигатель, находящийся в корпусе со сжатым гелием, отделен от перекачиваемого жидкого кислорода гелиевым и кислородным уплотнением, частота вращения электродвигателя 11 000 об/мин. Графитовое (неподвижное) кольцо изготовлено из графита P5N, вращающееся кольцо - из нержавеющей стали 440C (США) с хромовым покрытием толщиной после притирки более 25 мкм.

*Конструкционные материалы.* Металлы, целый ряд углеродистых сталей и металлы с объемно центрированной кубической решеткой (Fe, Cr, Mo, Ta, W) подвержены при низких температурах хрупкому разрушению (хладноломкости) не могут быть рекомендованы к применению в широком диапазоне температур.

Для использования в низкотемпературных узлах и машинах рекомендуются металлы с гранецентрированной кубической решеткой (Al, Ni, Pb, Cu, Ag) или гексагональной плотноупакованной решеткой (Ti, Zn, Mg, Co); стали с мелкозернистой структурой (до 45°C), закаленные и отпущенные низколегированные ферритные стали с мелкозернистой мартенситной структурой (до 100°C), нержавеющие стали с аустенитной структурой (до 200°C), никелевые стали со стареющим мартенситом (до - 240°C).

### **Материалы для низкотемпературных узлов трения, применяемых в проектируемой установке.**

Самое широкое применение при низких температурах нашли медные, никелевые, магниевые, титановые и алюминиевые сплавы.

В узлах трения, которых одна из сопряженных деталей пары трения является металлической, ее изготавливают чаще всего из нержавеющей стали. В паре с графитом хорошие результаты дает отожженная нержавеющая сталь 440C (США) с твердым хромовым покрытием. Находят применение стали 40X, Г13Л, 38ХМЮА, У8, 12х18Н9Т, сталь 45 (термообработанная) и др.

При изготовлении одного из тел пары трения из стали 40X для повышения износостойкости может быть проведено газовое цианирование при 860°C с непосредственной закалкой в масло (твердость поверхности достигает HRC 61). Однако влияние термообработки на износостойкость является сложным и неоднозначным.

*Неметаллические материалы.* Одним из распространенных материалов пар трения в условиях низких температур является графит, применяемый в сочетаниях графит - графит, графит - сталь. Графит широко используют в качестве добавок к различным пластмассам, например, для изготовления композиций графит 15% фторопласт-4 85% или графит 5% + нейлон 95% работающих в среде жидкого азота и жидкого водорода (по иностранным данным). Из графита можно изготавливать сепараторы шарикоподшипников для работы при очень низких температурах.

Однако наибольшее распространение в качестве антифрикционных материалов для низкотемпературных узлов трения получили фторопласты и фторопласт содержащие материалы.

Фторопласты в отличие от многих пластмасс сохраняют свою эластичность при низких температурах и широко используются в низкотемпературных узлах трения, как в чистом виде, так и композициях с другими пластмассами, металлами, твердыми смазками ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Pb}$  и др.). Добавление бронзы в количестве 30 - 50% по объему во фторопласт-4 приводит к желательному снижению температурного коэффициента линейного расширения в 2 раза, повышению теплопроводности в 3 раза, резкому снижению интенсивности износа (по иностранным данным).

Для повышения износостойкости, механической прочности и теплопроводности фторопласта-4 в него вводят наполнители в виде мелкодисперсных порошков твердых смазок.

Материалами, получившими распространение в узлах трения низкотемпературных машин, являются материалы на основе фторопластов: ФН-202 – наполненный фторопласт-4 (фторопласт-4 основа, 10% никеля, 3% дисульфида молибдена) ТУ П-889-64; АМИП-15М наполненный фторопласт-4 (фторопласт-4 основа, 15%, ситалла, 3% дисульфида молибдена) ТУ П-407-65; Ф4Ж-20 наполненный фторопласт, ТУ П-369 - 64; материалы ФКД5Б, Ф4К20, Ф3 5, ФКД 5.

Для изготовления сепараторов шарикоподшипников, работающих в среде жидкого азота, в США успешно использовался фторопласт-4 наполнителем из стекловолокна; сепараторы из композиций фторопласт-4 стекловолокно +  $\text{WSe}_2$  имели незначительный износ при работе в вакууме  $10^{-8}$  мм рт. ст, при температурах от 185 до  $+235^\circ\text{C}$ , Хорошие антифрикционные свойства и износостойкость в США показали при работе в вакууме до  $10^{-9}$  мм рт. ст. в температурном диапазоне от  $-195$  до  $+230^\circ\text{C}$  следующие фторопласт содержащие композиции: 70%  $\text{Ag}$  + 20% фторопласт-4 + 10%,  $\text{WSe}_2$  и 60%  $\text{Cu}$  + 30% фторопласт-4 + 10%  $\text{WSe}_2$ .

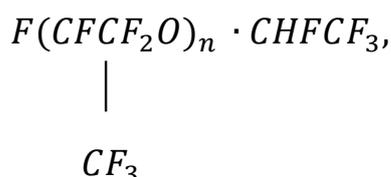
Положительно зарекомендовали себя при работе в насосах жидкого кислорода и азота комбинированные подшипники скольжения, составленные из трех слоев: стальной подкладки (основы), пористой бронзы, пропитанной смесью 20% свинца и 80% фторопласта-4, и слоя фторопласта-4 толщиной 25 мкм. В диапазоне температур 200 до + 200°С удовлетворительные результаты получены при использовании подшипников из оловянистой бронзы и слоя смеси фторопласта-4 со свинцом.

В подшипниках скольжения при низких температурах используют полимерные материалы, такие, как текстолит марки ПТ, полиамиды марок П-68, АК 80-20, капрон; стеклонаполненный капрон, стеклонаполненный полиамид П-68, а также их композиции с дисульфидом молибдена. Полиамиды типа П-68, АК 80-20 имеют порог хладноломкости в интервале -30 ÷ -70°С; стеклонаполненные полиамиды могут применяться при значительно более низких температурах.

*Низкотемпературные смазки.* Долговечность узлов трения низкотемпературных машин может быть в некоторых случаях увеличена за счет применения специальных жидких смазок. Основные требования к таким смазкам - низкая температура замерзания (существенно ниже рабочей температуры), высокая температура кипения, низкая испаряемость при максимально возможных температурах работы узла, химическая инертность, низкая адсорбционная способность по влаге, хорошие теплопередающие свойства. В качестве таких смазок можно использовать кремнеорганическую жидкую смазку № 3, консистентную смазку ЦИАТИМ-221 (на основе смазки № 3), углеводородную смазку ЦИАТИМ-205. Исследования показали, что применение жидких смазок целесообразно до вполне определенной температуры, зависящей от температуры затвердевания смазки, ниже которой коэффициент трения со смазкой превышает коэффициент трения без смазки.

При трении ненаполненной резины из СКМС-10 по металлу эти температуры составили для смазок № 3 ЦИАТИМ-221 -- 100°С и для смазки ЦИАТИМ-205 - 50°С.

Значительно более широкий диапазон температур применения имеют фтористые полиэферы, которые различаются степенью полимеризации:



где n = 1, 2, 3 или 4. Жидкости, соответствующие различным индексам n, обозначают

Е-1, Е-2, Е-3 и Е-4, они отличаются вязкостью (с увеличением n вязкость возрастает). Свойства фтористых полиэфиров приведены в таблице 10.

Исследования фтористых полиэфиров показали, что они могут обеспечить условия образования гидродинамической пленки смазки при низких температурах и в области температур

от - 45 до 185°С их смазочные свойства сопоставимы со свойствами минеральных масел в диапазоне 40-150°С.

Таблица 10. Свойства фтористых полимеров

Параметры	Е-1	Е-2	Е-3	Е-4
Степень полимеризации	1	2	3	4
Молекулярная масса	286,03	452,08	618,12	784,15
Температура кипения, °С	39	101	153	193
Сжимаемость при 25°С и 500 кгс/см <sup>2</sup> , %	8,20	6,48	5,64	5,18
Теплота испарения при кипении, кДж/кг	960	730	610	520
Приблизительная температура застывания (ν=0,2 м <sup>2</sup> /с), °С	-154	-123	-107	-94
Плотность при 25°С, кг/м <sup>3</sup>	1580	1660	1710	1760
Удельная теплоемкость, с <sub>p</sub> , кДж/(кг·°С)	1,025	1,02	1,015	1,0

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,086	0,086	0,086	0,086
Температурный коэффициент объемного расширения, $m^3/(кг \cdot °C)$	1,12 $\cdot 10^{-6}$	0,96 $\cdot 10^{-6}$	0,73 $\cdot 10^{-6}$	0,67 $\cdot 10^{-6}$
Абсолютное давление насыщенных паров при 52°С, кгс/см <sup>2</sup>	1,64	0,14	0,016	0,006

В качестве резюме отметим, что в предисловии к тематическому выпуску журнала «Физическая мезомеханика» (2015, №5, С.4): «Многоуровневая природа разрушения: концепции, модели, эксперименты», его редакторы проф. F. Verto и акад. РАН В. Панин подчеркивают: «Понимание явления разрушения связано с изучением различных форм диссипации энергии, микроскопических свойств и их взаимодействие с макроскопическими параметрами, что представляет собой сложную, но актуальную задачу».

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2БМ74	Швец Анатолию Сергеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШПР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОНД</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистрант	<b>Направление/специальность</b>	21.04.01. «Нефтегазовое дело» / «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Расчет сметной стоимости типов газоразделительных установок. Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску; стоимость интернета – 360 руб. в месяц.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Учитываются следующие нормы и нормативы оплат труда: 30 % премии – за отсутствие недостатков в работе 20 % надбавки - за профессиональное мастерство 1,3 районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Общая система налогообложения с учетом льгот для образовательных учреждений: 27,1% - отчисления во внебюджетные фонды 20% - налог за добавленную стоимость 2,2% - налог на имущество

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	1.Технико-экономическое обоснование целесообразности применения адсорбционного, мембранного и криогенного способа получения азота. 2.Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования; 3.Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований; 4.Определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	1.Структура работ в рамках научного исследования. 2.Определение трудоемкости выполнения работ. 3.Разработка графика проведения научного исследования. 4. Бюджет научно-технического исследования.

	5. Основная заработная плата исполнительской темы. 6. Дополнительная заработная плата исполнительской темы. 7. Отчисление во внебюджетные фонды. 8. Прочие расходы 9. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	1. Расчет экономической эффективности способов получения азота; 2. Расчет интегрального показателя финансовой эффективности разработки; 3. Расчет интегральных показателей ресурсоэффективности вариантов исполнения объектов исследования.
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
1. Оценка конкурентоспособности технических решений. 2. Альтернативы проведения научного исследования. 3. График проведения и бюджет научного исследования. 4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности научного исследования.	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романюк В.Б.	к.э.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Швец Анатолий Сергеевич		

### 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

#### 3.1. Анализ промышленных способов получения азота

На сегодняшний день азот используется почти во всех сферах нашей жизни, а именно: в химической и нефтехимической, нефтегазовой, металлургической, лакокрасочной промышленности, медицине и фармацевтике, электронной, пищевой промышленности. Такой обширный перечень показывает, насколько широко азот и азотные установки используются в разных отраслях производства.

Чтобы отделить кислород от воздуха (или, возможно, азота и аргона), необходимо применять один из доступных способов разделения воздуха. Эти методы обычно можно разделить на две категории: криогенные и не криогенные.

Таблица 11: Сравнение технологий разделения воздуха.

Вид технологии	Чистота N, [%]	Производительность [т/день]	Вид азота	Время запуска
Криогенный метод	> 99,9	До 200 000 $нм^3/ч$	Жидкость, газ	Часы/дни
Адсорбционный метод	> 99,9	От 100 до 3000 $нм^3/ч$	Газ	Минуты/часы
Мембранный метод	> 99,5	От 10 до 5000 $нм^3/ч$	Газ	Минуты

Криогенные методы используют различия в температурах конденсации конкретных газов. Процесс разделения происходит в ректификационных колоннах после предварительного охлаждения воздуха до температуры его конденсации. Основная стоимость энергии относится к работе воздушных компрессоров. Для достижения соответствующего уровня мощности охлаждения и преодоления перепадов давления в потоках газа требуется сжатие воздуха. На нынешних установках используются двойные колонны Линде, необязательно с аргоновой колонной.

Такие решения позволяют достичь очень высокого состояния чистоты продуктов разделения (кислорода, азота, аргона). Криогенные установки также позволяют получить максимально возможную эффективность разделения газов.

Не криогенные методы в основном включают адсорбцию и мембранные методы, методы адсорбции имеют наибольшее значение.

Они основаны на адсорбционных возможностях азота на поверхности слоев. К резервуару поступают кислород и аргон. Азот из слоев удаляется путем понижения давления (ПСА - адсорбция под действием давления). Процесс протекает циклически и требует соответствующего сжатого воздуха для подачи.

Выбор подходящего метода выделения азота из атмосферного воздуха зависит от требуемого масштаба производства этого газа, его чистоты, и чистоты потоков газовых отходов, которые могут быть полезными побочными продуктами, такими как, например, аргон или благородные газы, криптон и ксенон.

### **3.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

Нефтегазовые компании, занимающиеся добычей, транспортировкой, хранением, переработкой и реализацией газа, газового конденсата и нефти повсеместно используют технологии газоразделения, с целью получения азота. Строим карту сегментирования рынка услуг (таблица 12) для различных видов данных технологий.

Таблица 12. Карта сегментирования рынка услуг

		Метод получения азота		
		Адсорбционный метод	Мембранный метод	Криогенный метод
Размер компании	Крупные			
	Средние			
	Мелкие			

 - «Газпром Нефть»     - «Новатэк»     - «Нортгаз»

Вывод: криогенный метод получения азота подходит только для крупных компаний, так как этот метод позволяет получить большое количество азота как в жидком, так и в газообразном состоянии, также у криогенной станции большой период запуска, поэтому данный метод целесообразно применять для крупных стационарных комплексов большой производительности с длительным периодом непрерывной работы. Адсорбционный и мембранный метод получения азота подходят для мелких и средних предприятий, так как имеют минимальные эксплуатационные затраты, высокую степень надежности и безотказности, небольшие габариты и вес, полную автоматизацию, простоту в эксплуатации, быстрый запуск и остановку, а также, большой ресурс работы установок.

### 3.3. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам.

Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты.

Таблица 13 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Компактность	0,1	1	3	3	0,3	0,2	0,3
2. Высокий КПД	0,13	3	3	3	0,52	0,26	0,26
3. Безопасность	0,1	4	4	4	0,4	0,2	0,3
4. Надежность	0,12	4	4	4	0,48	0,36	0,48
5. Простота эксплуатации	0,11	1	3	4	0,33	0,22	0,44
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,08	3	4	4	0,4	0,32	0,32
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	3	4	4	0,21	0,28	0,28
3. Цена	0,1	2	4	4	0,2	0,4	0,4
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	3	3	0,5	0,2	0,2
5. Послепродажное обслуживание	0,09	2	3	3	0,36	0,18	0,36
Итого	1	27	35	40	3,7	2,62	3,34

Б<sub>ф</sub>– Криогенный способ получения азота;

Б<sub>к1</sub> – Адсорбционный способ получения азота;

Б<sub>к2</sub> – Мембранный способ получения азота.

По таблице 13 видно, что наиболее эффективно использовать мембранный способ получения азота, так же они являются наиболее конкурентоспособными к другим видам, так как обладают рядом преимуществ. В частности, установки мембранного типа отличаются надежностью и высоким КПД, а так же большим ресурсом работы.

$$k1 = \frac{Бф}{Бк1} = \frac{27}{35} = 0,77; k2 = \frac{Бк2}{Бк1} = \frac{40}{35} = 1,142 \quad (1)$$

### **3.4. Планирование научно-исследовательских работ**

#### **Структура работ в рамках научного исследования**

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составим перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведем распределение исполнителей по видам работ.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор темы исследований	1	Техническое задание	Руководитель, исполнитель
	2	Календарное планирование работ по теме	
	3	Выбор алгоритма исследований	Руководитель
	4	Подбор и изучение литературы по теме	Исполнитель
Разработка технического задания	5	Утверждение технического задания	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснование	Исполнитель
	7	Проектирование модели и проведение экспериментов	Исполнитель
Обобщение и оценка результатов	8	Оценка результатов исследования	Руководитель, Исполнитель
Оформление отчета исследовательской работы	9	Составление пояснительной записки	Руководитель, Исполнитель

### Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (2)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (3)$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб.дн.;  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;  $ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе.

## Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $T_{\text{кал}} = 365$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}} = 52$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}} = 14$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  округляем до целого числа. Все рассчитанные значения сведены в таблице 15.

Таблица 15 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях, $T_{ki}$
	$t_{min}$ , Чел-дни	$t_{max}$ , Чел-дни	$t_{ож}$ , Чел-дни			
Составление и утверждение тех. задания	1	2	1,4	Руководитель	1,4	2
Выбор направления исследования	2	4	2,8	Руководитель	2,8	4
Календарное планирование работ по теме	2	4	2,8	Руководитель Исполнитель проекта	1,4	2
Подбор и изучение материалов по теме	6	10	7,6	Исполнитель проекта	7,6	10
Анализ технологий получения азота	6	12	8,4	Исполнитель проекта	8,4	11
Разработка конструкции установки для исследования абразивного изнашивания	6	10	7,6	Исполнитель проекта	7,6	10
Оценка результатов исследования	5	7	5,8	Руководитель, Исполнитель проекта	2,9	4
Составление пояснительной записки	7	14	9,8	Руководитель, Исполнитель проекта	4,9	6

На основе таблицы 15 строим план график, представленный в таблице 16.

Таблица 16 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ р	Вид работ	Испол - нител и	Т <sub>кi</sub> , кал. дни	Продолжительность выполнения работ													
				Фев.		Март			Апрель			Май					
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение тех. задания	Р	2	■													
2	Выбор направления исследования	Р	4	■													
3	Календарное планирование работ по теме	Р,И	2	■	□												
4	Подбор и изучение материалов по теме	И	10		□												
5	Анализ технологий получения азота	И	11		□	□											
6	Разработка конструкции установки для исследования абразивного изнашивания	И	10			□	□										
7	Оценка результатов исследования	Р, И	4				■										
8	Составление пояснительной записки	Р, И	6				□	■									

 - руководитель (Р)  - исполнитель (И)

### Основная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, а также рабочих опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме.

Величина расходов по заработной плате определяется на основе трудоемкости выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок и окладов.

В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Таблица 17 – Расчет основной заработной платы

№	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу(окладам), тыс. руб.
1	Составление и утверждение тех. задания	Руководитель	1,4	1,839	2,574
2	Выбор направления исследования	Руководитель	2,8	1,839	5,149
3	Календарное планирование работ по теме	Исполнитель проекта	2,8	0,908	2,542
4	Подбор и изучение материалов по теме	Руководитель, Исполнитель проекта	7,6	2,747	20,877
5	Анализ технологий получения азота	Исполнитель проекта	8,4	0,908	7,627
6	Разработка конструкции установки для исследования абразивного изнашивания	Исполнитель проекта	7,6	0,908	6,901
7	Оценка результатов исследования	Руководитель, Исполнитель проекта	5,8	2,747	15,932
8	Составление пояснительной записки	Руководитель, Исполнитель проекта	9,8	2,747	26,921
Итого:					88,523

Настоящая статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением научно-технического исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = T_p \cdot Z_{\text{дн}}, \quad (7)$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{42637 \cdot 10,4}{241} = 1839 \text{ руб.}, \quad (8)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб.дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней  $M = 10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Таблица 18– Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель проекта
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: - выходные - праздничные	66	66
Потери рабочего времени: - отпуск - невыходы по болезни	58	72
Действительный годовой фонд рабочего времени	241	217

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{TC} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 18221 \cdot (1 + 0,3 + 0,5) \cdot 1,3 = 42637 \text{ руб, (9)}$$

где  $Z_{TC}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{TC}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 - 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от  $Z_{TC}$ );

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата  $Z_{TC}$  находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда  $T_{C1} = 600$  руб. на тарифный коэффициент  $k_T$  и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке.

Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии.

Таблица 19 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З <sub>тс</sub> , тыс. руб.	к <sub>пр</sub>	к <sub>д</sub>	к <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , тыс. руб.	З <sub>дн</sub> , тыс. руб.	Т <sub>р</sub> , раб. дн.	З <sub>осн</sub> , тыс. руб.
Руководитель	18,221	0,3	0,5	1,3	42,637	1,839	18	33,118
Исполнитель проекта	14,584	0	0	1,3	18,959	0,908	40	36,32
Итого:								69,438

#### Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 33118 = 4305 \text{ руб}; \quad (10)$$

$$Z_{дон} = k_{дон} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 36320 = 4721 \text{ руб}, \quad (11)$$

где  $k_{дон}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

## Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,271 \cdot (33118 + 4305) = 10141 \text{ руб, (11)}$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, в 2014 году водится пониженная ставка – 27,1%

Таблица 20 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб	Дополнительная заработная плата, тыс. руб
	Исп. 1	
Руководитель	33118	4305
Исполнитель проекта	36320	4721
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Итого		
Исполнение 1	10141	

## Прочие расходы

Прочие расходы учитывают затраты организации, непопавшие в предыдущие статьи расходов: оплата услуг интернет-кафе, расходы на различные канцтовары (бумага, ручки), размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З = (36 * d_{ик}) + (10 * d_p) + d_б = (36 * 50) + (10 * 20) + 230 = 2230 \text{ руб. (12)}$$

где  $d_{ик}$  – стоимость использования компьютера в интернет-кафе (за час);  $d_p$  – стоимость ручки;  $d_б$  – стоимость упаковки бумаги.

## Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 21 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	69438	
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	4305	
3. Отчисления во внебюджетные фонды	10141	
4. Прочие расходы	2230	
5. Бюджет затрат НИИ	86114	Сумма ст. 1-4

### 3.5. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения. Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{исп i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{86114}{86114} = 1, (13)$$

где  $I_{финр}^{исп i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{max}$  - максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля). Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, (14)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент разработки;  $b_i$  – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 22 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэф.	Криогенный способ получения азота	Адсорбционный способ получения азота	Мембранный способ получения азота
1. Безопасность	0,15	3	3	3
2. Удобство в эксплуатации	0,15	3	4	4
3. Срок службы	0,2	4	4	5
4. Ремонтопригодность	0,15	4	3	4
5. Надёжность	0,25	4	4	5
6. Материалоёмкость	0,1	2	3	5
Итого:	1	3,3	3,5	4,3

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 2 = 3,5 \quad (15)$$

$$I_p = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,25 \cdot 4 + 0,1 \cdot 3 = 3,6 \quad (16)$$

$$I_p = 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 + 0,1 \cdot 5 = 4,4 \quad (17)$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

По расчетам видно следующее, что самый наибольший коэффициент интегральности является у мембранной технологии получения азота. Таким образом, данная технология остается наиболее эффективной и сохраняет конкурентоспособность.

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного способа газоразделения. Также был посчитан бюджет НТИ равный 86114 руб. основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2БМ74	Швец Анатолию Сергеевичу

<b>Школа</b>	<b>ИШПР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОНД</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	21.04.01.Нефтегазовое дело./ «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

<p>1. <i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шум, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</i></li> <li>– <i>опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</i></li> <li>– <i>негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</i></li> <li>– <i>чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</i></li> </ul>	<p>Рабочее место – станция получения азота. Оборудование: компрессор, ресиверы.</p> <p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– повышенный уровень вибрации;</li> <li>– механические опасности.</li> </ul> <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенная температура маслосистемы;</li> <li>– пожароопасность;</li> <li>– наличие вращающихся механизмов;</li> <li>– наличие сосудов под давлением.</li> </ul> <p>Воздействие на окружающую среду:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– загрязнение атмосферы;</li> <li>– загрязнение литосферы;</li> <li>– загрязнение атмосферы.</li> </ul> <p>Защита в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– пожар при повреждении системы подачи газа.</li> </ul>
<p>2. <i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i></p>	<p>ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.</p>

	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты</li> </ul> <p><i>(сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</i></p>	<p>Физико-химическая природа вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– повышенный уровень шума;</li> <li>– повышенный уровень вибрации;</li> </ul> <p>Действие факторов на организм человека:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ухудшение слуха;</li> <li>– влияние на нервную систему;</li> <li>– раздражение человека;</li> <li>– нарушение работы сердечно-сосудистой системы;</li> <li>– головные боли;</li> <li>– тошнота.</li> </ul> <p>Средства коллективной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– демпферы и виброгасители;</li> <li>– звукоизолирующие кожухи.</li> </ul> <p>Средства индивидуальной защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вибродемпфирующие перчатки;</li> <li>– защитные очки и каска;</li> <li>– беруши;</li> <li>– противошумные наушники;</li> <li>– противошумные вкладыши;</li> </ul>
<p><i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<p>Источник опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– работающие клапана;</li> <li>– сосуды;</li> <li>– маслосистема.</li> </ul> <p>Средства защиты:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защитные экраны;</li> <li>– термостойкие перчатки;</li> <li>– системы пожаротушения.</li> </ul> <p>Причины пожаров:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механическое повреждение патрубков;</li> <li>– утечка газа.</li> </ul> <p>Профилактические мероприятия:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– обучение пожарной ТБ;</li> <li>– контроль оборудования.</li> </ul> <p>Первичные средства пожаротушения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– огнетушитель;</li> <li>– песок.</li> </ul>
<p><i>3. Охрана окружающей среды:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу</li> </ul>	<p>Защита селитебной зоны: учет санитарно-защитной зоны при строительстве азотных станций.</p>

<p><i>(выбросы);</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>– разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p>Воздействие на атмосферу:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– продукты полного сгорания горючих компонентов топлива;</li> <li>– компоненты неполного сгорания топлива.</li> </ul> <p>Воздействие на гидросферу:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– возможный разлив смазочно-охлаждающих жидкостей.</li> </ul> <p>Воздействие на литосферу:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– твердые бытовые отходы при техническом обслуживании и ремонте агрегатов.</li> </ul> <p>Решения по обеспечению экологической безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– соблюдение инструкций при операциях по наливу и сливу смазочно-охлаждающих жидкостей;</li> <li>– все работники должны быть обучены безопасности труда в соответствии с ГОСТ 12.0.004-90;</li> <li>– применение индивидуальных средств защиты по типовым отраслевым нормам при работе с нефтепродуктами.</li> </ul>
<p><i>4.Защита в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>– разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;</li> <li>– разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий</li> </ul>	<p>Наиболее типичная ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– пожар.</li> </ul> <p>ЧС может случиться из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ошибка персонала, человеческий фактор;</li> <li>– сбой автоматизированного процесса.</li> </ul> <p>В случае возникновения аварийной ситуации необходимо действовать согласно инструкции, предписанной данному предприятию на случай возникновения ЧС.</p>
<p><i>5.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны</li> </ul>	<p>Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства. Рассмотреть организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны;</p>
<p><b>Перечень графического материала:</b></p>	
<p><i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i></p>	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент	Черемискина М. С.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2БМ74	Швец Анатолий Сергеевич		

#### **4.Социальная ответственность.**

Современная организация труда невозможна без создания благоприятных условий труда на каждом рабочем месте. Механизация и автоматизация производственных процессов, научная организация труда основы снижения и исключения производственного травматизма, аварий и профессиональных заболеваний. В современных условиях главным в проблемах безопасности труда является создание техники, исключающей несчастные случаи на производстве. Охрана труда и техника безопасности в нефтегазовой промышленности имеет ряд специфических особенностей, технологическим процессам присущи высокие давления и повышенные температуры. В них используются агрессивные и токсичные вещества, большие массы горючих жидкостей и газов, взрывоопасные и радиоактивные вещества, что потенциально может стать причиной производственных несчастных случаев и заболеваний. Основными причинами, которые могут повлечь за собой создание аварийного положения и угрозу безопасности обслуживающего персонала, являются неправильная эксплуатация аппаратуры и оборудования установки, нарушение герметичности аппаратуры, оборудования и трубопроводов, нарушение технологического режима, отсутствие чистоты рабочего места, пренебрежение правилами личной безопасности, курение в местах, не оборудованных для этой цели. К тому же существует вероятность чрезвычайных ситуаций, таких как взрывы, возникающие в результате разрушений газовых ёмкостей, коммуникаций и аппаратов; пожары, возникающие из-за повреждения отопительных печей, электропроводки, ёмкостей и трубопроводов с легко воспламеняющимися жидкостями; загрязнение местности, атмосферы и водоёмов, возникающее при разрушении резервуаров и технологических коммуникаций, ядовитыми веществами, которые могут стать причиной летальных исходов среди работников объекта и жителей города, в котором расположен объект.

Кроме того, эти чрезвычайные ситуации неизбежно приведут к загрязнению окружающей среды и ухудшению экологической обстановки в городе или во всём регионе. Для предотвращения негативного воздействия функционирования проектируемых объектов на окружающую среду последние должны соответствовать экологическим требованиям, установленным техническими регламентами и законодательством в области охраны окружающей среды. Объектом исследования разработки данного проекта является система инертного газа, предназначенная для обеспечения объекта сжатым азотом низкого и высокого давления, который используется для нужд технологического комплекса.

#### 4.1.Профессиональная социальная безопасность

Таблица 23 - Вредные и опасные факторы при эксплуатации газоразделительной установки

Факторы	Этапы работ при эксплуатации установки			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Повышенный уровень шума			+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003
Повышенный уровень общей вибрации		+	+	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.
Пожароопасность			+	ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
Поражение электрическим током		+	+	ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

#### 4.1.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды

Таблица 24 – Анализ вредных и опасных производственных факторов

Факторы	Источник возникновения фактора	Воздействие фактора на организм человека	Допустимые нормы	Предлагаемые средства защиты
Повышенный уровень шума	Движущиеся машины,	Снижение слуховой чувствительности, повышенная утомляемость, головные боли	Допустимый уровень шума - 75-80 дБ (децибел). Шум, вызываемый компрессорным модулем МКУ, составляет 72 дБ, и не превышает общего уровня.	Противошумные наушники, противошумные вкладыши, шумопоглощающая изоляция
Повышенный уровень общей вибрации	Машины, оборудование, технологические процессы	Вибрационная болезнь	Допустимые нормы: локальной вибрации – 2 м/с <sup>2</sup> при 126 дБ; общей вибрации 1 категории (транспортная вибрация) – 0,56 м/с <sup>2</sup> при 115 дБ; общей вибрации 3 категории (технологическая вибрация) – 0,1 м/с <sup>2</sup> при 100 дБ.	Виброзащитные прокладки, виброзащитные пластины, одежда с виброизолирующими элементами

Поражение электрическим током	Статическое электричество, накопленное на металлическом оборудовании	Электроожоги, электрический удар, потеря сознания	Допустимая напряженность электростатического поля на рабочих местах ограничивается в зависимости от времени воздействия: до 1 часа - 60 кВ/м; от 1 до 9 часов - $60/\sqrt{t}$ кВ/м, но не более 20 кВ/м на остальное рабочее время.	Устройство заземленных рабочих площадок, защитные оболочки, токопроводящая одежда и обувь.
Пожароопасность	Воспламеняющиеся и взрывоопасные смеси и газы.	Термический ожог, отравление угарным газом.	Предельно допустимая концентрация паров сжиженных углеводородных газов предельного характера в воздухе составляет 300 мг/м <sup>3</sup> , непредельного характера - 100 мг/м <sup>3</sup> .	Применение огнезащитные составов и строительных материалов, переносные и передвижные огнетушители (пенные, углекислотные), средства индивидуальной защиты органов дыхания (противогаз марки БКФ) и зрения.

## **4.2. Экологическая безопасность**

### **4.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

#### *Защита селитебной зоны*

Работы производятся непосредственно на месторождении вдали от населенных пунктов, вследствие этого никаких мер для защиты селитебной зоны предпринимать нет необходимости.

#### *Воздействие на атмосферу*

Приводом компрессора является газотурбинная установка, использующая в качестве топлива природный газ, дизельное топливо.

В общем случае продукты сгорания данного топлива могут содержать;

- продукты полного сгорания горючих компонентов топлива;
- компоненты неполного сгорания топлива.

Выхлопные газы с продуктами неполного сгорания загрязняют атмосферу. Частицы, содержащиеся в выхлопном газе, наносят вред здоровью человека, попадая в органы дыхания.

Для снижения концентрации вредных веществ выхлопных газов необходима более тщательная подготовка топливного газа, для снижения содержания механических примесей, т.е. его дополнительное очищение. На выхлопном тракте необходимо устанавливать фильтры, чтобы очистить выхлопной газ от вредных частиц.

Также на станции в процессе получения азота, выделяется кислород, перенасыщение воздуха кислородом опасно для человека, это наносит не только вред здоровью, но и создает пожароопасную ситуацию. Могут произойти и утечки азота, что тоже плохо влияет на здоровье.

#### *Воздействие на гидросферу*

Возможным воздействием является разлив смазочно-охлаждающих жидкостей, а также отработанного масла компрессора и двигателя, в случае несоблюдения правил замены жидкостей и их транспортировки.

### *Воздействие на литосферу*

Работа системы инертного газа подразумевает осуществление регулярного технического обслуживания. Замена отработавших материалов и узлов приводит к образованию твердых отходов производства (металлолом, фторопласт, прочий бытовой и технический мусор). Для утилизации бытовых отходов применяются полигоны твердых бытовых отходов.

#### **4.2.2 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды**

При выполнении работ по наливу, сливу, зачистке транспортных средств и хранилищ следует соблюдать инструкции и правила техники безопасности, производственной санитарии и пожарной безопасности, разработанные для каждого предприятия с учетом специфики производства.

Работающие с нефтепродуктами должны быть обучены безопасности труда в соответствии с ГОСТ 12.0.004-90. При работе с отработанными нефтепродуктами, являющимися легковоспламеняющимися и ядовитыми веществами, необходимо применять индивидуальные средства защиты по типовым отраслевым нормам.

Для предотвращения загрязнения окружающей среды нефтепродуктами, уменьшения пожарной опасности и улучшения условий труда рекомендуются установки герметичного налива и слива, стационарные шланговые устройства, системы автоматизации процессов сливно-наливных операций. Режим слива и налива нефтепродуктов, конструкция и условия эксплуатации средств хранения и транспортирования должны удовлетворять требованиям электростатической искробезопасности по ГОСТ 12.1.018-93.

Устройства полигонов твердых бытовых отходов должны организовываться в соответствии с СанПиНом 2.1.7.722-98.

### 4.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Существуют различные мероприятия по защите населения от ЧС. Это оповещение населения об опасности, его информирование о порядке действий в сложившихся чрезвычайных условиях; эвакуационные мероприятия; меры по инженерной защите населения; меры радиационной и химической защиты; медицинские мероприятия; подготовка населения в области защиты от чрезвычайных ситуаций.

Самым главным является оповещение населения об опасности. Ведь как скоро выяснится, где опасность, тем быстрее проинформируют население о надвигающейся угрозе. Также важным является в этом сообщении то, как передают порядок правильных действий в сложившейся ЧС. Важно избежать паники населения. Своевременное оповещение производится органами гражданской обороны. Оно организуется, главным образом, по радио и телевидению. К примеру, услышав сигналы «Внимание всем!», нужно включить теле- и радиоприемники и ждать сообщения от органов власти. После выполнять дальнейшие действия по их указаниям!

Особое место занимает индивидуальная защита. Для защиты органов дыхания изготавливают тканевые маски, ватно-марлевые повязки, а для защиты кожных покровов используют различные накидки, плащи, резиновую обувь, резиновые или кожаные перчатки. Средства индивидуальной защиты обязательно должны присутствовать, как и на рабочем месте, так в домашних условиях.

Чрезвычайные ситуации классифицируются в зависимости от их характера, сферы возникновения, масштабов и размеров ущерба. По характеру источников возникновения: природного; техногенного; экологического ;биолого-социального характера.

### **4.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на производстве при внедрении и эксплуатации объекта исследований**

Возможные ЧС на объекте:

- нарушение рабочего режима маслосистемы;
- аварийная остановка при превышении уровня вибрации;
- аварийная остановка при превышении уровня шума;
- аварийная остановка при превышении допустимой температуры деталей системы;
- пожар при повреждении системы подачи топлива в привод;
- пожар при утечке газов.

Для предупреждения проявления данных чрезвычайных ситуаций необходимо соблюдать график технического обслуживания, текущего и капитального ремонта, для выполнения своевременной затяжки крепежных элементов, проверки работы деталей и механизмов, проверки и замены различных уплотнений, замены масла в маслосистеме, проверке работоспособности различных контрольных датчиков. Необходимо проверять знания и компетентность рабочего персонала, обслуживающего систему.

Система получения инертного газа относится к взрывопожароопасному производству. Так как оборудование выработки сжатого азота находится в закрытом пространстве, При разгерметизации трубопроводов пермеата и недостаточной кратности воздухообмена в помещениях, повышении содержания кислорода более 24 % об.существует вероятность поражения органов дыхания вплоть до отека легких. Кроме того, увеличивается вероятность самовоспламенения паров масла, возникновения пожара или взрыва. Для обеспечения безопасной эксплуатации системы инертного газа предусмотрена герметизация технологического оборудования и трубопроводов, соединения труб выполнены сваркой.

Используемые арматура, материалы труб и детали трубопроводов должны соответствовать климатическим условиям и условиям эксплуатации.

Все трубопроводы рассчитаны и испытаны на прочность в соответствии с условиями эксплуатации. Основная запорная арматура обвязки оборудования имеет автоматическое управление, обеспечивающее быстрое отключение оборудования и трубопроводов. Для контроля воздушной среды в рабочей зоне предусматриваются взрывобезопасные переносные газоанализаторы. Механизированный пожарный инструмент и инвентарь располагаются на щите. Щиты должны быть доступны для визуального осмотра. Все противопожарное оборудование должно быть в исправном состоянии, окрашивается в красный цвет и имеет соответствующие обозначения.

#### **4.3.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Пожарная безопасность представляет собой единый комплекс организационных, технических, режимных и эксплуатационных мероприятий по предупреждению пожаров. Общие требования пожарной безопасности изложены в Федеральном законе от 22.07.2008 №123-ФЗ (ред. от 13.07.2015).

Мероприятия по пожарной безопасности разделяются на четыре основные группы:

- предупреждение пожаров, т.е. исключение причин их возникновения;
- ограничение сферы распространения огня;
- обеспечение успешной эвакуации людей и материальных ценностей из очага пожара;
- создание условий для эффективного тушения пожара.

Допуск работников к проведению работ должен осуществляться после прохождения ими противопожарного инструктажа. Если происходит изменение специфики работ, то необходимо провести внеочередной инструктаж. Вся передвижная техника в зоне проведения работ должна быть обеспечена искрогасителями заводского изготовления.

В зависимости от размера и расположения очага, в качестве средств пожаротушения применяются следующие средства:

- первичные средства пожаротушения;
- огнетушители переносные, передвижные, стационарные углекислотные;
- пожарные рукава.

При возникновении пожара действия администрации, пожарной охраны, членов ДПД, первую очередь должны быть направлены на обеспечение безопасности и эвакуацию людей, оказавшихся в зоне пожара.

Безопасность людей должна обеспечиваться:

- конструктивно-планировочными решениями зданий, сооружений и помещений, гарантирующими возможность проведения быстрой эвакуации в случае возникновения пожара и ограничивающими его распространение;
- постоянным содержанием в надлежащем состоянии путей эвакуации и имеющихся в здании средств противопожарной защиты;
- применением для отделки стен и потолков на путях эвакуации людей негорючих материалов, а также материалов, неспособных распространять горение по поверхности;
- содержанием в исправном состоянии устройств, обеспечивающих герметизацию дверей коридоров и тамбуров;
- исправным, в том числе аварийным освещением в ночное время путей эвакуации;
- установлением со стороны администрации систематического контроля за соблюдением мер пожарной безопасности при проведении ремонтных работ, на путях эвакуации.

В случае возникновения пожара должна быть обеспечена возможность безопасной эвакуации людей из производственных, вспомогательных и других зданий, сооружений и помещений. Запоры на дверях эвакуационных выходов должны обеспечивать возможность их свободного открывания изнутри без ключа. В зданиях (помещениях) запираение дверей помещений, в которых находятся люди, а также дверей запасных эвакуационных выходов запрещается.

#### **4.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

##### **4.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Система получения инертного газа является объектом повышенной опасности для всего персонала. Она также является объектом, на котором установлено дорогостоящее оборудование, эксплуатировать которое должны специалисты предприятия, прошедшие обучение и имеющие допуск к работе оборудования, транспорта. Такие специалисты должны знать, как действовать в нештатных ситуациях и в случаях аварий. Правила безопасного ведения работ регламентируются ПБ 12-368-00 "Правила безопасности в газовом хозяйстве", который разработан в соответствии с "Положением о Федеральном горном и промышленном надзоре России" и учитывают требования Федерального закона "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.97 N 116-ФЗ, а также других действующих нормативных документов. Допуск к работе имеют лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование в установленном порядке и не имеющие противопоказаний к выполнению данного вида работ, обученные безопасным методам и приемам работы, применению средств индивидуальной защиты, правилам и приемам оказания первой медицинской помощи пострадавшим и прошедшие проверку знаний в установленном порядке. Лица женского пола могут привлекаться к проведению отдельных газоопасных работ, предусмотренных технологическими регламентами и инструкциями и допускаемых законодательством о труде женщин. К выполнению работ допускаются руководители, специалисты и рабочие, обученные и сдавшие экзамены на знание правил безопасности и техники безопасности, умеющие пользоваться средствами индивидуальной защиты и знающие способы оказания первой (доврачебной) помощи.

Первичное обучение рабочих безопасным методам и приемам труда; руководителей и специалистов, лиц, ответственных за безопасную эксплуатацию газового хозяйства и ведение технического надзора, а также лиц, допускаемых к выполнению газоопасных работ, должно проводиться в организациях (учебных центрах), имеющих соответствующую лицензию.

Действующая с 1 января 2014 г. редакция ТК РФ определяет, что работникам, занятым на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, положены следующие гарантии и компенсации:

1) сокращенная продолжительность рабочего времени с возможностью выплаты денежной компенсации за работу в пределах общеустановленной 40-часовой рабочей недели (ст. 92 ТК РФ);

2) ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск работникам с возможностью выплаты компенсации за часть такого отпуска, превышающую минимальную продолжительность (ст. 117 ТК РФ);

3) повышенная оплата труда работников (ст. 147 ТК РФ).

Основным органом государственного надзора и контроля за состоянием охраны труда является Федеральная служба по труду и занятости. В ее структуру входят Управление надзора и контроля за соблюдением законодательства о труде, территориальные органы по государственному надзору и контролю за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права, государственные инспекции труда субъектов Российской Федерации.

#### **4.4.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Производственные объекты и помещения необходимо располагать с наветренной стороны (по розе ветров) по отношению к источнику возможного выделения сероводорода.

На территории промплощадок должны быть установлены хорошо видимые устройства для определения направления ветра (конус, флюгер и др.). В темное время устройства необходимо освещать. Число, типы и места установки этих устройств определяются проектом.

Производственные объекты, газоопасные места и прилегающая к ним территория (в том числе подъездные пути), а также трассы действующих газо-, нефте- и конденсатопроводов должны быть обеспечены необходимыми знаками безопасности и надписями.

Помещения для приготовления и приема пищи, отдыха свободной от работы вахты размещаются на расстоянии не менее 200 м от устья скважины. Помещения буровых установок должны быть оборудованы вытяжной вентиляцией, включаемой от датчиков на сероводород при достижении ПДК.

График оснащения помещений буровых установок вентиляционным оборудованием согласовывается с местными органами Госгортехнадзора.

Правильное размещение оборудования является основным звеном в организации безопасной работы производственного участка и цеха. При размещении оборудования необходимо соблюдать установленные минимальные разрывы между станками, между станками и отдельными элементами здания, правильно определять ширину проходов и проездов. Невыполнение правил и норм размещения оборудования приводит к загромождению помещений и травматизму. Расположение оборудования на площади цеха или участка определяется в основном технологическим процессом и местными условиями.

При автоматизированном производстве (комплексные автоматические заводы или цеха, автоматические линии, поточное производство) оборудование размещается по ходу технологического процесса в единую цепочку с соблюдением расстояний между оборудованием и конструктивными элементами здания. На автоматических и поточных линиях большой протяженности для перехода с одной стороны линии на другую устраивают переходные мостики. Проходы и проезды требуется содержать в чистоте и порядке, границы их обычно отмечают белой краской или металлическими светлыми кнопками. Ширина рабочей зоны принимается не менее 0,8 м. Расстояние между оборудованием и элементами зданий, а также размеры проходов и проездов определяются нормами технологического проектирования механических и сборочных цехов машиностроительных заводов.

## **Заключение**

В разделах и главах настоящей магистерской работы выявлены (при проведении сравнительного анализа) промышленные способы и лабораторные методы (на базе машин Стирлинга) получения азота как в виде инертного газа, так и криопродукта, данные для анализа были получены с МЛСП «Приразломная». Показано, что преимущественной областью применения азота, как инертного газа, является разработка и освоение, включая эксплуатацию, нефтяных и газовых скважин. Вопросы бурения нефтегазоносных скважин серьезно осложняются при эксплуатации бурового оборудования и инструмента в арктической и близкой ей по климатическим условиям зонах РФ.

Проблемные вопросы обусловлены тем, что климатически низкие температуры влияют как на степень закреплённости абразивных частиц в разрабатываемых грунтах (изменяется изнашивающая способность), так и на механофизико - химические свойства материалов, из которых изготовлены детали оборудования и сам инструмент. В рассматриваемом контексте и поверхностные и объёмные разрушения связаны, как правило, с явлением хрупкости. Вместе с отмеченным необходимо подчеркнуть, что проявление хрупкого разрушения обусловлено и ударным приложением нагрузки в бурильных колоннах.

Изучению закономерностей механического изнашивания в условиях отрицательных температур и посвящена исследовательская часть магистерской работы.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был проведен анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, в ходе которого сделали оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Выполнен SWOT-анализ проекта с определением его сильных и слабых сторон с последующей оценкой угроз и возможностей. Были определены возможные альтернативы проведения научных исследований. Также посчитан бюджет НТИ, равный 86114 руб.

В разделе «Социальная ответственность» проведен анализ возможных вредных и опасных факторов. В качестве вредных факторов выявлены повышенный уровень шума и вибрации, опасных - поражение электрическим током и пожароопасность. Рассмотрено влияние на окружающую среду и предложены мероприятия для обеспечения экологической безопасности.

При эксплуатации и установке азотной станции, а так же сосудов находящихся под давлением следует строго соблюдать технику безопасности, иметь средства коллективной и индивидуальной защиты, проводить своевременные проверки по знаниям промышленной безопасности персонала, проверки рабочего оборудования, чтобы заранее предотвратить аварию, которая может привести к последствиям различной тяжести.

## Список использованных источников

1. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Шрейбер Г.К. Ударноабразивный износ буровых долот. М., Недра, 1975.
2. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Пашков А.Н., Рубарх В.М. Долговечность буровых долот. М., Недра, 1977.
3. К.П.Чудаков, И.В.Петров, Л.С.Валова. Исследование работоспособности наплавочных материалов при динамическом абразивном изнашивании. - Вестник машиностроения, 1963, № 8.
4. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений.– Новосибирск: Наука СО, 1976.– 206 с.
5. Кузнецов В.Д., Добровидов А.Н. Хрупкость рельс при низких температурах и способы ее уменьшения // Сталь.– 1930.– №3–4.– С. 86–87.
6. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел.– М.: Металлургия, 1971.– 264 с.
7. Патент 1237951 Российская федерация. Установка для исследования ударного абразивного воздействия на образцы / Кащеев В.Н., Солод А.Н., Вольф Э.Л.–Опубл. 15. 06. 1986.
8. Симонов В. В. Работа шарошечных долот и их совершенствование. М., Недра, 1975.
9. Балицкий П. В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. М., Недра, 1975.
10. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.Н. Создание техники северного исполнения - проблема социально-экономического развития восточных регионов России // Вестник РАН. –2015.– Т.85, №2.– С. 155-163.
11. Бузник В.М., Бурковская Н.П., Зибарева И.В. и др. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения. Ч.1 // Материаловедение.– 2017. –№4.– С. 8-16.

12. Бузник В.М., Бурковская Н.П., Зибарева И.В. и др. К вопросу построения дорожной карты отечественного арктического материаловедения. Ч.2 // *Материаловедение*. – 2017. – №5. – С. 22–28.
13. Махутов М.А., Гаденин М.М., Иванов В.В. и др. Научно-методические основы дефектоскопии, диагностики и мониторинга состояний материалов и технических систем // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2015. – №10. – С. 47–56.
14. Абатуров В.Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент: Учеб. пособие для вузов, Тюмень: Изд-во «Нефтегазовый университет», 2008. - 238 с.
15. Битахзм М.Г. Проблемы буримости горных пород. - М.: ВНИЙОЭНГ, 1966. - Ч. 1. - 147 с.
16. Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород: Учеб. пособие для вузов. - М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2007. - 592 с.
17. Евсеев В.Д. Физика разрушения горных пород при бурении нефтяных и газовых скважин: Учеб. пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2004. - 151 с.
18. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. - М.: Гостоптехиздат, 1950. - 211 с.
19. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении. - М.: Недра, 1971. 231 с.
20. Балицкий П. В. Взаимодействие бурильной колонны с забоем скважины. М., Недра, 1975.
21. Симонов В. В. Работа шарошечных долот и их совершенствование. М., Недра, 1975.
22. Д.Л.Глизманенко. Получение кислорода. [Текст]: учеб. пособие. Москва, 1972 - 742 с.: ил
23. Некрасов Б. В., Основы общей химии, т. 1, М.: «Химия», 1973

24. О.П.Хайдуков. Системы инертных газов на танкерах и их эксплуатация. [Текст]: учеб. пособие / О.П.Хайдуков, А.С.Трусов, Е.В. Кузнецов. - Новороссийск: НГМА, 2000. – 120 с.: ил.
25. П.Г.Романков. Процессы и аппараты химической промышленности.
26. Интех ГмбХ» (LLC «Intech GmbH») [Электрон. ресурс] – 2014 - URL: [http://www.intech-gmbh.ru/N2\\_production.php](http://www.intech-gmbh.ru/N2_production.php)
27. Азотная станция [Электрон. ресурс] – 2014 - URL: <http://azotnaya.ru/azotnaia-stantciia>
28. Дунаев В.Ф. Экономика предприятий нефтяной и газовой промышленности. – М.: «Нефть и газ». 2006. – 352 с.
29. Справочник по нефтепромысловому оборудованию // Под ред. Е.И. Бухаленко. М.: Недра, 1983. – 400 с.
30. Чичеров Л.Г., Молчанов Г.В., Рабинович А.М. и др. «Расчёт и конструирование нефтепромыслового оборудования» - М.: Недра, 1987 – 422с.
31. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности / Белов С.В. 7-е изд. - М.: Высшая школа, 2007. - 616 с.
32. Ставкин Г.П. Правила и инструкции по технике безопасности на установках КПП / Ставкин Г.П. – М.: Недра, 1998. - 125 с.
33. Максименко Г.Т. Техника безопасности при применении пожароопасных, взрывоопасных и токсичных материалов / Г. Т. Максименко, В. М. Покровский. — 3-е изд., перераб. и доп. — Киев: Будівельник, 1987. — 150 с.: ил.: 22 см. — Библиогр.: с. 148 (27 назв.).
34. Пряников, В.И. Техника безопасности в химической промышленности : учебное пособие / В. И. Пряников. — Москва: Химия, 1989. — 288 с.: ил. — Библиогр.: с. 240-242.
35. Корнилович О.П. Техника безопасности при работе с инструментами и приспособлениями / О. П. Корнилович. — Москва: Энергоатомиздат, 1992. — 93 с.: ил. — Библиотека электромонтера; Вып. 633. — Библиогр.: с. 94.

- 36.Мастрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях в природно-техногенной сфере. Прогнозирование последствий: учебное пособие / Б. С. Мастрюков. — Москва: Академия, 2011. — 368 с.: ил. — Высшее профессиональное образование. Безопасность жизнедеятельности. — Библиогр.: с. 364- 365.
- 37.ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 38.ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 39.ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
- 40.ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
- 41.Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.

## Приложение А

(обязательное)

### Analysis of methods and technological processes for nitrogen production

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ74	Швец Анатолий Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Вольф Э.Л.	к.э.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Бекишева Т.Г.	к.п.н.		

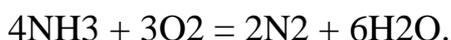
## 1. Analysis of methods and technological processes for nitrogen production

### 1.1 Laboratory methods and industrial ways

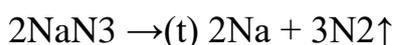
Inert diatomic gas nitrogen is one of the most common chemical elements in the universe. 75% of the mass of it is the atmosphere of the Earth. Nitrogen under normal conditions is a colorless and tasteless gas, odorless and poorly soluble in water. After cooling to  $-198.5^{\circ}\text{C}$  in the form of a liquid substance, it looks very similar to ordinary water. When given the greatest cooling to  $-209.86^{\circ}\text{C}$ , the nitrogen passes into a solid state of aggregation in the form of a crystal-like mass.

The chemical properties of nitrogen in general are determined by its inertness. Under normal conditions, it is practically not capable of dissociation into individual atoms and reactions with other elements. An exception is the reaction of nitrogen with lithium to form lithium nitride. When heated, it is possible to obtain a more extensive list of chemical compounds. Consider ways to produce nitrogen. In laboratories, you can get a small amount of nitrogen by the following methods:

1) in the process of ammonia or ammonium ion oxidation:



2) by decomposition when heated azides:



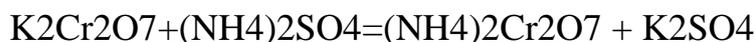
3) in the decomposition of ammonia with copper oxide at a temperature of about  $700^{\circ}\text{C}$ :



4) catalytic decomposition of ammonia at high temperatures:



5) by heating a mixture of ammonium sulfate and potassium dichromate in a ratio of 1:2:



6) during the reactions of air and hot coke, it is possible to produce “atmospheric” or “air” nitrogen, which is a mixture of nitrogen and noble gases:



One of the most common ways is to get nitrogen from the atmosphere. This method is primarily due to economics, since it is characterized by the liquefaction of purified air from water vapor, dust and CO<sub>2</sub> due to the sequence of its compression, cooling and expansion cycles. Then fractional distillation of liquid air is carried out with a gradual increase in temperature. First, noble gases are separated, and then nitrogen and liquid oxygen remains. Numerous fractionation processes ensure its purification. Annually nitrogen is produced for millions of tons, which is used mainly in the synthesis of ammonia - the raw material in the production of compounds with nitrogen are used in agriculture and industry. Purified nitrogen atmosphere can also be used in cases where the presence of oxygen cannot be allowed. Getting nitrogen from the air is considered an industrial process. Initially, the air is cooled, it is liquefied, and already liquid is the subject to distillation, in other words, distillation. Nitrogen boils at a temperature lower than the boiling point of oxygen. The boiling point of nitrogen is 195.8 °C, and that of oxygen is 182.9 °C.

In this way if it is very careful to heat the liquid air, the nitrogen will evaporate first. Nitrogen in gaseous form is delivered to consumers in a compressed form (15 MPa or 150 atm.). Liquid nitrogen is stored in Dewar vessels. To produce nitrogen for industry, special installation for the production of nitrogen is used. Nitrogen installation - is a plant used to produce nitrogen from atmospheric air. It represents a whole complex of equipment that is necessary for the production of nitrogen.

The required nitrogen concentration in the production gas can be set without any design changes in the installation. In general, installation can produce nitrogen with purity up to 99.999%. Nitrogen installation based on nitrogen generator and filter system with compressor. In addition, air receivers are included to smooth out pressure pulsations.

Condensate drains primarily clean compressed air from excess impurities. As required installation can be completed with a receiver for nitrogen, and the booster compressor. Nitrogen plant can function based on one of the gas separation technologies: membrane, adsorption or cryogenic.

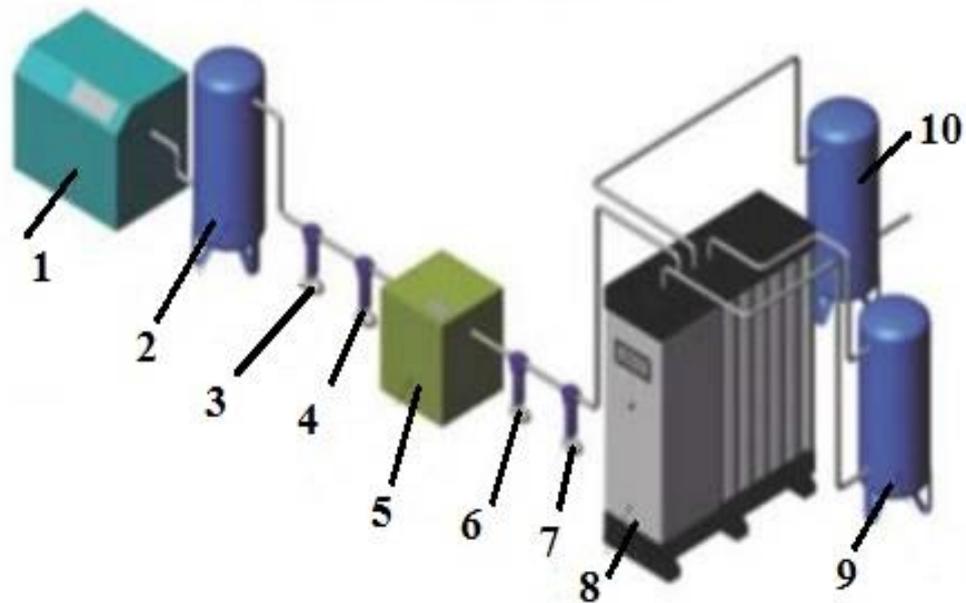


Figure 2 - Installation diagram assembly

- 1-Compressor; 2-Compressed air capacity; 3-7- Air dryer and filters;  
8-Nitrogen generator; 9-Regenerative capacity;  
10-Buffer capacity of nitrogen.

**Adsorption technology** involves the binding of individual elements of a mixture of solid adsorbing substance due to the forces of interaction between the gas molecules and the adsorbent. The most common nitrogen adsorption unit type is a heat - free cycle adsorption installation. The scheme of the organization of the process, used in nitrogen installation with such systems, is based on controlling the rate of absorption of the components of the partial gas mixture and regeneration of the adsorbent by changing the pressure in two adsorbers - vessels containing adsorbent. This process takes place at a temperature close to room temperature.

When using this scheme, nitrogen is produced by the installation at a pressure above atmospheric.

The process of short-cycle adsorption (SCA) in each of the two adsorbers consists of two stages. At the absorption stage, the adsorbent predominantly collects one of the components of the gas mixture to produce product nitrogen. At the regeneration stage, the absorbed component is released from the adsorbent and is discharged into the atmosphere. Then the process is repeated many times.

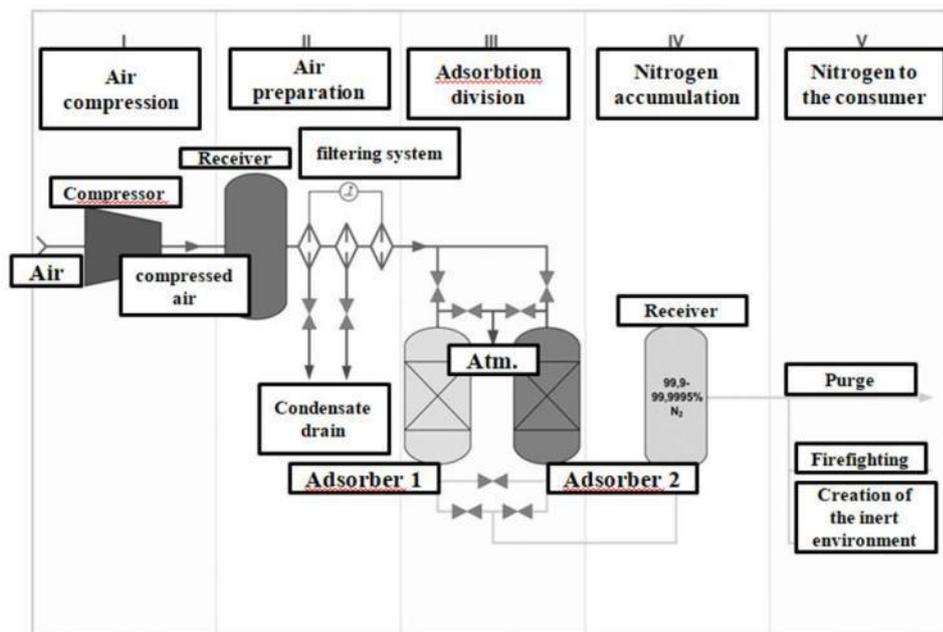


Figure 3 - The scheme and principle of operation of the adsorption plant.

*Advantages:* adsorption type nitrogen installation makes it possible to produce nitrogen with a purity of up to 99.9995 % .This purity of nitrogen can also be obtained by cryogenic systems, but they are much more complicated and justified only with a very large volume of production. And also - minimal operating costs, a high degree of reliability and reliability, small size and weight full automation, simplicity in operation, quick start and stop the installation, a long service life of installations.

*Disadvantages:* the increased content of vaporous moisture causes a decrease in the efficiency of the adsorbent and ,therefore, the installation of a freon compressed air dryer is required , and it is better to install an adsorption dryer to extend the service life of the adsorbent. The design of adsorption plants is more complicated than membrane ones, which means a greater, with other things being equal, probability of malfunctions.Production of nitrogen from 100 to 3,000  $nM^3/h$  with a product purity of 99.9%.

**Membrane technology** based on the difference in the rate of penetration of individual gases through the membrane surface. Here the difference in partial pressure on opposite sides of the membrane wall is decisive. In such installations, there are no moving parts, which ensures reliability. Membranes are quite resistant to vibrations and hits, as well as practically not exposed to moisture and oils. They can be used in the operating temperature range from -40 to + 60°C.

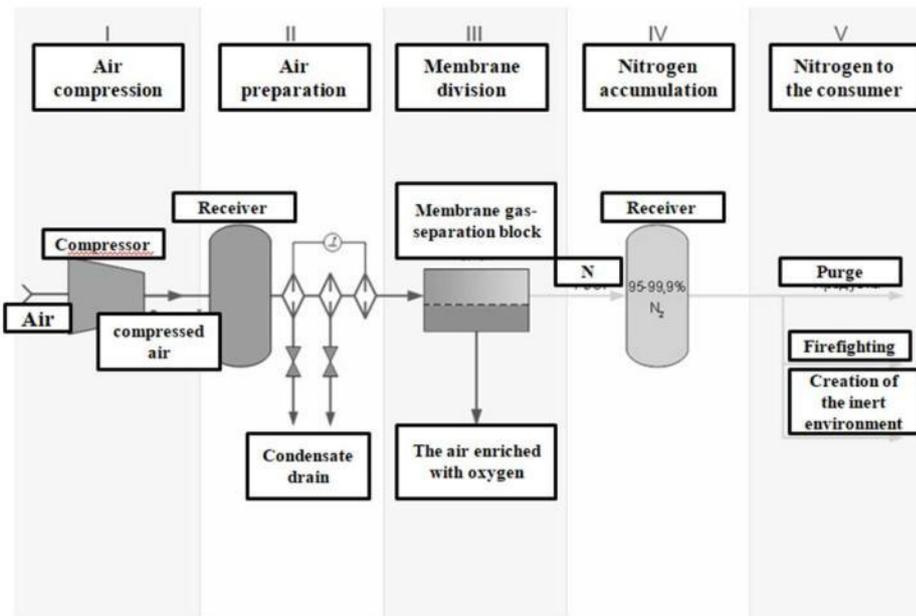


Figure 4 - The scheme and principle of operation of the membrane plant

*Advantages:* in the gas separation plant there are no moving parts, which ensures the reliability of the installations. The membranes are very resistant to vibrations and hits, are chemically inert to the effects of oils and are insensitive to moisture, function in a wide range of temperatures from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+60^{\circ}\text{C}$ , if the operating conditions are met, the life of the membrane unit ranges from 130,000 to 180,000 hours (15-20 years of continuous operation).

*Disadvantages:* membrane degradation, that is, the loss, reduced performance of the membrane cartridge. Also, the relatively low purity of the nitrogen produced, the membrane unit is capable of generating nitrogen with a purity of 99.5-99.9%, it consumes much more compressed air (and, therefore, electricity) than adsorption, which makes its operation economically unprofitable. Receiving nitrogen from 10 to  $5000, \text{m}^3/\text{h}$  at a concentration of 95 - 99.8 %

**Cryogenic technology.** The operation of cryogenic air separation plants is based on the method of low-temperature rectification, based on the difference in boiling points of air components and the difference in the compositions of equilibrium liquid and vapor mixtures. In the air separation process at cryogenic temperatures, between the liquid and vapor phases, consisting of components of air, the weight and heat transfer is carried out.

As a result, the vapor phase is enriched with a low-boiling component (a component having a lower boiling point), and a liquid one with a high-boiling component. Thus, rising upwards through the distillation column, the steam is enriched with a low-boiling component — nitrogen, and the downward-flowing liquid is saturated with a high-boiling component — oxygen. Cryogenic plants have a longer start-up period; therefore, this technology is better suited for stationary large-scale complexes.



Figure 5 - Cryogenic station receiving nitrogen

*Advantages:* the cryogenic method is the only method that provides high purity of the separation products, which is important, at a high recovery rate, and any amount of product, which causes high efficiency. In this case, the method allows simultaneously obtaining several separation products and obtaining products, both in the form of gas and in the form of liquid products. Thus, cryogenic technology provides higher technology flexibility.

*Disadvantages:* disadvantages of cryogenic plants include a longer start-up period as compared with adsorption and membrane units. Because of this, it is advisable to use this method for large stationary complexes of high productivity with a long period of continuous operation.

Production of nitrogen up to 200000  $nM^3$  .

### Pivot table

Installation type	Purity of nitrogen	Receiving nitrogen	Type of nitrogen
Installation of membrane type	from 99,5% to 99,9%	10 to 5000 $nM^3/h$	Gas
Installation of adsorption type	99,9%	100 to 3,000 $nM^3/h$	Gas
Cryogenic technology	99,9%	200000 $nM^3/h$	Gas, liquid

### 1.3 Appointment and use of compressed nitrogen

With the help of compressed nitrogen, the oil and gas industry solves the problems in which pressure is required, and the provision of explosion and fire safety.

These solves include:

- verification of the reliability of pressure vessels and pipelines (by pumping inert nitrogen into them);
- nitrogen purging of pipelines and tanks, drying and removal of oxygen in order to prevent their corrosion;
- extinguishing of underground fires and other fires in closed volumes with nitrogen (unlike water without damage to the deposit or premises);
- the use of compressed nitrogen for pneumatic equipment ;
- pressure equalization between process tanks, creating an inert gas cushion over aggressive fluids in tanks;
- piston compressor purge;
- for dry gas seals;

### 1.3.1 Membrane installation

The most common method of producing nitrogen is the membrane method. In membrane installations there are no moving parts, which ensures reliability. Membranes are quite resistant to vibrations and shocks, as well as practically not exposed to moisture and oils. The membrane unit has a capacity from 10 to 5000  $n_m^3/h$ , with nitrogen purity from 95% to 99.8%, and under the conditions of operation, the life of the membrane unit is 15-20 years of continuous operation. Therefore, it is advisable to use this type of installation in production. Next the equipment for membrane installation will be considered.

The inert gas system is designed to provide a facility with low and high pressure compressed nitrogen. An inert gas system means an installation for inert gas generation and an inert gas distribution system together with means for preventing backflow of gases, as well as stationary and portable measuring devices and control devices.

The inert gas system includes:

- low pressure air compressor;
- air collector consisting of receivers ;
- compressed air drying installation;
- membrane gas separation installation;
- nitrogen collector, consisting of receivers;
- nitrogen booster compressor;
- a block of nitrogen cylinders;

## Scheme of work of a system of inert gas

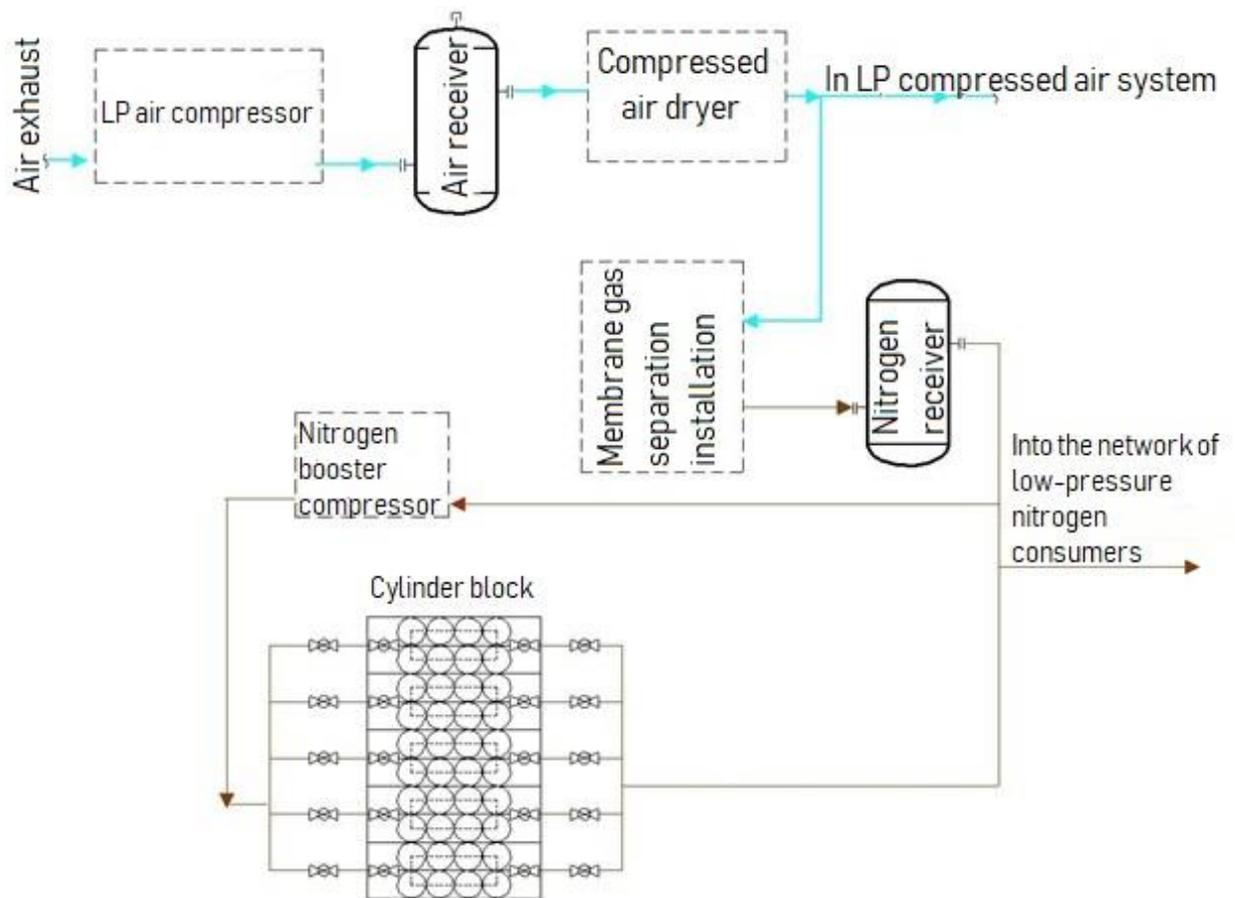


Figure 6 - Scheme of work of a system of inert gas

## **Compressed air dryers**

Compressed air dryer is designed for drying air to the dew point of minus 60°C. The dehumidifier consists of two drying towers filled with a desiccant (adsorbent). The work of the drying towers is cyclical, while in one of them moisture is being absorbed, the second is in the regeneration of the adsorbent. The functions of adsorbents change every 4 hours if the timer mode is selected, or as the adsorbent is saturated with moisture, if the mode of operation on the dew point of dry air is selected. The adsorber is a vertical cylindrical vessel bottoms equipped with spherical aperture for loading and unloading of a desiccant and a hatch for entering the heating elements.

Two types of desiccant are loaded into each adsorber: the bottom layer is type 1 desiccant (regular silica gel) in an amount of 300 kg; the top layer is type 3 desiccant (waterproof silica gel) in an amount of 850 kg. The service life of the adsorbent is 5 years of continuous work, if the dryer is used correctly. Electric heaters are installed in the adsorbents to perform regeneration.

A blower carries out an air supply at the first stage of regeneration. The adsorbents are equipped with safety valves, respectively, installed on the pipeline pressure relief. Pressure relief from the disconnected adsorber for regeneration is performed through the exhaust valve to the silencer. Filters are installed at the air inlet and outlet. The inlet filter and adsorbents are equipped with condensate drain fittings.

Air inlet and outlet pipelines as well as regeneration air pipelines are equipped with automatic solenoid valves and non-return valves.

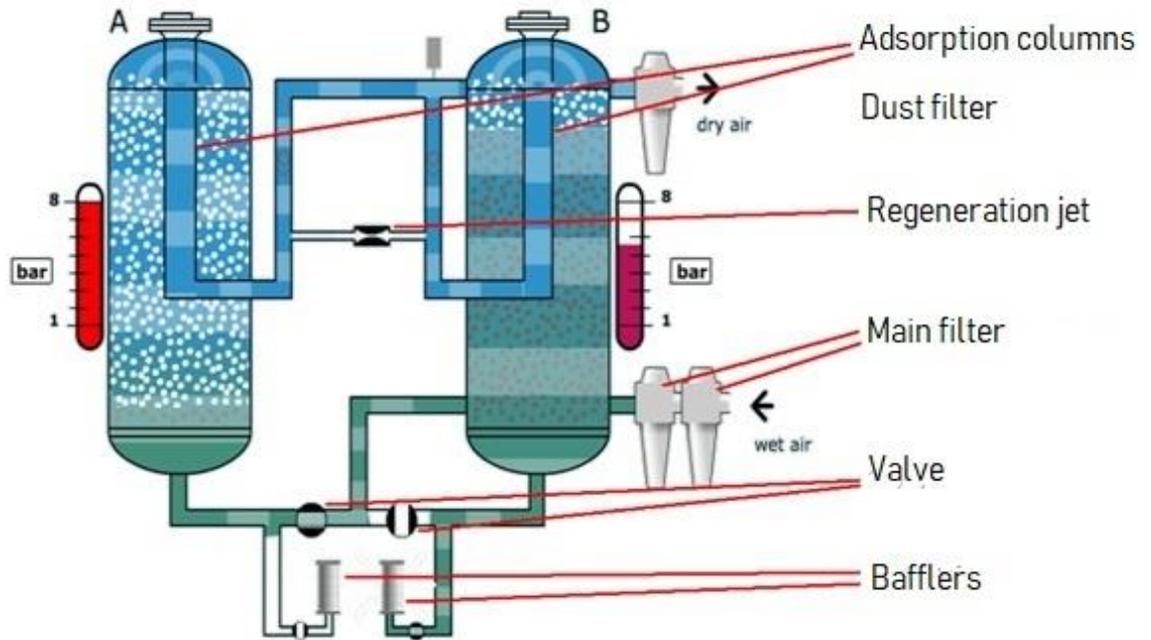


Figure 7 - The principle of the dryer operation

### Receiver (air collector)

Air receivers (air collectors) are vertical cylindrical devices with spherical bottoms, designed to create a supply of low-pressure compressed air and smoothing pulsations during operation of compressors. Each receiver is installed on three racks-supports, has a manhole for internal inspection, is equipped with air inlet and air outlet pipes, a condensate discharge pipe, a drainage pipe, a vent with a stopper, a safety valve, and pressure control devices locally and remotely. It also serves to create a network of compressed air.

From this air supply, the pneumatic equipment can work for some time in the event of any interruptions in the operation of the compressor, which pumps compressed air into the network of which this receiver is a part. The air collector can serve as a source of compressed air with a short-term large consumption exceeding the flow from the compressor.



Figure 8 – Receiver

### **Separators**

Membrane gas separation installations are designed to produce nitrogen with a purity of at least 95%. It is possible to produce higher-purity nitrogen by reducing the nitrogen capacity of the plant. The gas separation installation consists of the following parts:

- compressed air preparation unit
- modular gas separation unit
- control rack.

The compressed air preparation unit includes general cleaning and fine cleaning filters designed to clean air from oil, particulate matter and condensed moisture, as well as an adsorption filter designed to further clean compressed air from oil vapor. The filters contain replaceable filter elements and are equipped with differential pressure gauges to control the degree of contamination of the filter elements. The modular gas separation unit is a rack with membrane modules installed on it, air and nitrogen collectors in a circle.

The connection of membrane modules with collectors is performed according to a parallel scheme.

Each membrane module consists of an aluminum heat insulated housing in which a membrane cartridge is placed. An air heater is built into the air manifold, which serves to heat and maintain a constantly set temperature of air entering the membrane modules. The heater is equipped with heating elements that allow to warm the air. Distribution and power electrical cabinets with electronic control units of the plant, an oxygen concentration analyzer in the product (nitrogen) and gas calibration tanks with a pneumothrottle for precise control of the gas mixture during the calibration of the gas analyzer are set on the control stand.



Figure 9 - Membrane gas separation installation

## Capacities and cylinders

Cylinder block is designed to store and transport compressed hydrogen, helium, air separation products (nitrogen, oxygen, argon), natural gas and carbon dioxide, gas mixtures. The block of cylinders consists of monoblocks. Each monoblock is equipped with a valve for filling and a bursting safety membrane in case of exceeding the permissible pressure. Monoblock piping allows you to centrally fill them with nitrogen to the operating pressure.



Figure 10 - Cylinder Block

Nitrogen can be in different states, in the form of gas and liquid. Nitrogen gas is recommended to be pumped into special cylinders of steel of different sizes under pressure. 40-liter containers are the most commonly used. The valve, the safety cap, the “shoe” and the ring are the main components of such cylinders. They are made black with yellow inscriptions to make it clear what type of gas is being transported. It is possible to organize storage of liquid nitrogen when using a different capacity for nitrogen. These are large, overall tanks and Dewar vessels with multi-layer insulation - powder or vacuum type.

### 1.3.2 Determination of nitrogen flow

The purpose of the calculation is to determine the flow rate of nitrogen and air in the system, determine the required amount of air and nitrogen, and select the compressor based on the desired conditions.

The resulting low-pressure nitrogen (LP) is fed to the network to low-pressure nitrogen consumers.

Constantly ND nitrogen is fed to the gas compressor seal and to the creation of nitrogen pillows in the process equipment, to the collector purge. Periodically it is fed to purge systems and devices before starting and in preparation for repair. In addition, nitrogen is used in accidents to create and maintain an inert environment.

Some of the nitrogen from the ND system is fed to a booster compressor to generate high pressure nitrogen (HP) and fill monoblocks of cylinders to feed the low pressure nitrogen system during periods of peak flow. The total flow rate of nitrogen for continuous blowdowns is 2,200 Nm<sup>3</sup> / h. Total maximum nitrogen flow : 3540 Nm<sup>3</sup> / h.

$$V_1 = 40 \times 50 = 2000l = 2 \text{ m}^3/\text{h} - \text{volume of cylinders}$$

$$P_1 = 20 \text{ MPA} - \text{pressure in cylinders}$$

$$P_2 = 1,3 \text{ MPA} - \text{system pressure}$$

From the formula  $P_1V_1 = P_2V_2$ , we find  $V_2$ :

$$V_2 = \frac{P_1V_1}{P_2} = \frac{20 \times 2}{1,3} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$$

Thus, the supply of nitrogen to the HP during expansion will be 30 m<sup>3</sup>/h, at a pressure of P 2.

$Q_{N(\text{cons.})} = 2200 \text{ nm}^3/\text{h}$ - the amount of nitrogen on the continuous purge

$Q_{N(\text{variable})} = 1340 \text{ nm}^3/\text{h}$  -the amount of nitrogen for variable needs

$Q_{N(\text{max.})} = Q_{N(\text{cons.})} + Q_{N(\text{var.})} = 3540 \text{ nm}^3/\text{h}$

To obtain a given amount of nitrogen, choose the membrane gas separation unit MBA-1.4-95.0-1170-B1.

$Q_1 = 1170 \text{ nm}^3/\text{h}$ - performance of one installation

Thus, to ensure the required amount, 3 installations are required.

$Q_{\text{total}} = 1170 \times 3 = 3510 \text{ nm}^3/\text{h}$ - overall performance of the membrane unit

In this case , the shortage of nitrogen is :

$3540-3510=30\text{m}^3$

This amount of nitrogen can be accumulated under high pressure in cylinders.

We use 5 monoblocks of 8 cylinders each, with common strapping.

### **1.3.3 Definition of a consumption of air**

The warmed-up, carefully filtered air moves in the membrane module consisting of thousands of hollow fibers, at the same time oxygen passes through a membrane wall, and nitrogen under pressure comes out the opposite end of a membrane. Each block is intended for receiving nitrogen by purity not less than 95%. The modular gas-separating assembly represents a rack with 18 membrane modules installed on it around, air and nitric collectors. Connection of membrane modules with collectors is executed according to the parallel scheme. Each membrane module consists of the aluminum heat-insulated case in which the membrane cartridge is placed. Volume flow of air on an input on installation is not less than  $2400 \text{ nm}^3/\text{h}$ . Receiving nitrogen of higher purity due to decline in production of installation on nitrogen is possible.

$Q_{\text{air}(\text{nitrogen})} = 7200 \text{ nm}^3/\text{h}$  – the amount of air necessary for nitrogen;

$Q_{\text{air}(\text{purge})} = 200 \text{ nm}^3/\text{h}$ - the amount of air on equipment purges;

$Q_{\text{air}(\text{max})} = 7200 + 200 = 7400 \text{ nm}^3/\text{h}$

### **1.3.4 Selection and arrangement of the equipment**

For obtaining the nitrogen volume necessary for us, the compressor having the necessary productivity is needed. As it was told above, screw compressors have a number of advantages, such as smaller dimensions, big productivity and durability. For our installation we will take the Atlas Copco GA-250-13 compressor. The stationary air GA-250-13 compressor with a productivity of 1900 nm<sup>3</sup>/h, intended for compression of air up to 13 bars (1.3 MPa) and its giving in the air collector. In our case, 4 compressors are required. The compressor is a one-stage screw with injection of oil and the mechanical drive through a reducer from the 250 kW electric motor. The compressor is placed in the sound-absorbing building. The compressor consists of two screw compressor elements, the filter of the soaked-up air, the lubrication system, the cooling system of the forced gas and the cooling system of oil. The compressor is equipped with a control system which is carried out by the electronic Atlas Copco Elektronikon regulator. This electronic block is mounted on a door of the front panel.

The regulator allows to program control of the compressor in the automatic mode and controls its work.



Figure 11 - Atlas Copco GA-250-13 Compressor

Further it is necessary to select the membrane gas-separating block in number of three pieces. MBA-1.4-95.0-1170-B1 installation has characteristics, which are necessary to us. Productivity on nitrogen is not less than  $1170 \text{ nm}^3/\text{h}$ . The volume flow of air on an input on installation is not less than  $2400 \text{ nm}^3/\text{h}$ . The modular gas-separating assembly represents a rack with 18 membrane modules installed on it around, air and nitric collectors. Connection of membrane modules with collectors is executed according to the parallel scheme. Each membrane module consists of the aluminum heat-insulated case in which the membrane cartridge of "Generon 6500" is placed.

Further the air dryer, with a productivity not less than  $7200 \text{ nm}^3/\text{h}$  is necessary. The BD 1800 dehumidifier, the Atlas Copco companies has such productivity. It is intended to an air drying to a dew point minus  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

The booster compressor is intended for production of nitrogen of high pressure and filling of monoblocks of cylinders for feed of low pressure nitrogen system during the periods of peak expenses. As the booster compressor we will choose the piston GIB 15.3-11-5 compressor.

Here we do not need the big power or productivity therefore it will be expedient and economic to take the given compressor. Piston two-level four-cylinder GIB 15.3-11-5 high pressure compressor with a productivity of 30  $\text{m}^3/\text{h}$ . Serves for providing a complex with nitrogen of high pressure. The drive of the compressor is carried out from the 16 kW electric motor via the belt drive. Nitrogen from the system of compressed nitrogen of low pressure is reduced on absorption of the compressor to the suction pressure then it passes 2 steps of compression with intermediate and final cooling of a stream in coolers. Cooling is made by the fan, which is installed on one shaft with the compressor.



Figure 12 - Booster compressor GIB 15.3-11-5

“Remeza” are air receivers, vertical cylindrical devices with the spherical bottoms with a capacity of 4,5  $\text{m}^3$ . Each receiver is set on three racks support, has the hatch manhole for carrying out internal inspection, is equipped with pipelines of an input and air outlet, the condensate output pipeline, a drainage branch pipe, the inflation valve with a stopper, the safety valve, pressure monitoring devices in

the place and remotely. We will select quantity of receivers of air by the number of compressors. As for constant purges it is required 2200 nm<sup>3</sup>/h nitrogen, then 2 membrane installations are at work, therefore we will accept 2 receivers of nitrogen will constantly work.

The block of cylinders consists of five monoblocks, each monoblock includes 8 cylinders. Such quantity of cylinders will provide us missing 30 nm<sup>3</sup>/h HP nitrogen.

The correct placement of the equipment is the main link in the organization of a safe work of the production site and shop. At placement of the equipment it is necessary to observe the established minimum gaps between machines, between machines and separate elements of the building. It is correct to determine width of passes and drives. Failure to follow rules and norms of placement of the equipment leads to blocking up of rooms and traumatism. The arrangement of the equipment is defined on the areas of the shop or site by generally technological process and local conditions. By the automated production (complex self-starters or shops, automatic transfer lines, line production) the equipment is placed on the course of technological process in a uniform chain with observance of distances between the equipment and structural elements of the building. On automatic and product lines of big extent for transition from one side of lines to another transitional bridges are suited. Passes and drives are required to be kept clean and in order, its borders are usually noted by white paint or metal light buttons. Width of the working area is accepted not less than 0.8 m. Distance between the equipment and the elements of buildings and also the amount of passes and drives are defined by norms of technological design of mechanical and assembly shops of engineering plants.

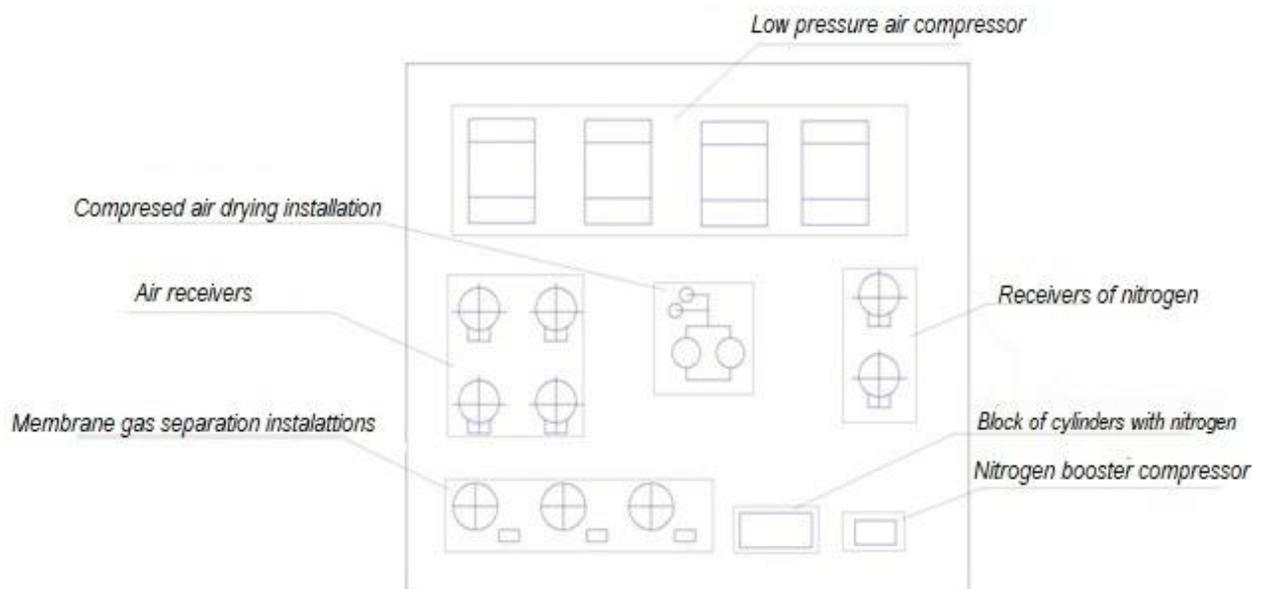


Figure 13 - Equipment layout