

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Горно-металлургический институт им.О.А.Байконурова

Кафедра «Технологические машины и оборудование»

Утянов Азамат Нурдаулетович

**Исследование и совершенствование эксплуатационно-технических
характеристик погружных тандемных насосных установок**

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

6М072400 – Технологические машины и оборудование

Алматы 2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Горно-металлургический институт им.О.А.Байконурова

УДК: 621.694; 621.65/.69; 621.6.052

На правах рукописи

Утянов Азамат Нурдаулетович

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание степени магистра технических наук

Название диссертации «Исследование и совершенствование эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок»

Специальность 6М072400–Технологические машины и оборудование

Рецензент

канд. техн. наук, доцент
Д.В. Громова
" 31 " мая 2019 г.

Научный руководитель,

канд. техн. наук, профессор
М.А. Мырзахметов
Мырзахметов Б.А.
" 30 " мая 2019 г.

Нормоконтроль

канд. техн. наук, профессор
М.А. Мырзахметов
Мырзахметов Б.А.
" 30 " мая 2019 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой ТМиО,
канд. техн. наук, ассоц. проф.
К.К. Елемесов
К.К. Елемесов
" 03 " июня 2019 г.

Алматы

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
НАО «КазННТУ им. К.И. Сатпаева»
Горно-металлургический
институт им. О.А. Байконурова

2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Горно-металлургический институт им.О.А.Байконурова

Кафедра «Технологические машины и оборудование»

6М072400 – «Технологические машины и оборудование»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой ТМиО
канд. техн. наук, асс.проф.
К.К.Елемесов
2017 г.



ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Утянову Азамату Нурдаулетовичу

Тема: «Исследование и совершенствование эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок»

Утверждена приказом Проректора по науке университета № 1597-М от «30» 10 2017 г.

Срок сдачи законченной диссертации «24» мая 2019 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: данные месторождения «Хорасан-2»

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) краткие сведения о технологии разработки месторождений урана методом ПСВ (на примере месторождения «Хорасан-2»);

б) факторы, влияющие на эффективность, надежность и ресурс работы глубиннонасосного оборудования;

в) типы и конструкции скважин;

г) общая методика расчетно-экспериментального моделирования и исследования режимов работы комбинированной насосной установки;

д) описание конструкции и принципа действия стенда для исследования эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок;

е) аппаратурное оформление стенда;

ж) планирование экспериментов

Перечень презентационного материала;

а) технологическая схема откачки продуктивных растворов при

подземном скважинном выщелачивании с помощью комбинированных струйных насосных установок;

б) общий вид струйного насоса;

в) общий вид стенда для исследования эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок»;

г) общий вид элементов аппаратного оформления стенда;

д) схема функционирования системы;

е) матрица плана эксперимента

Рекомендуемая основная литература:

1 Петров Н.Н., Берикболов Б.Р., Аубакиров Х.В. и др. Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные) // – 2-е изд. – Алматы, 2008. – 320 с.

2 Казаков, Д.П. Повышение эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами после гидравлического разрыва пласта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2010. – 26 с.

3 Султанов Б.З., Орекешев С.С. Проблемы добычи и внутрипромыслового транспорта нефти с высоким содержанием песка // Новоселовские чтения: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – С. 45-47.

4 Соколов Е.Я., Зингер Н.Л. Струйные аппараты, М. : Энергоатомиздат, 1989.

5 Тищенко И.Т., Гумерский Х.Х., Марьенко В.П. Струйные насосы для добычи нефти. М. : Нефть и газ, 1996.

6 Дроздов А.Н., Вербицкий В.С., Деньгаев А.В. и др. Погружные насосы и насосно-эжекторные системы – новые возможности в нефтегазодобыче, нефтеотдаче и нефтегазосборе // Вестник НК «ЮКОС». – 2004. – № 10. – С. 3–9.

7 Инструкция по управлению процессом гидроструйной эксплуатации скважин с использованием блока распределения, измерения и фильтрации//БРИФ-1-100-20-700-1-6-1-1. ОАО «ТНК-Нягань», 2012 г.

8 Шерстюк А.Н., Анникова Ю.Н., Ермолаева Т.А. и др. Режим работы погружного центробежного насоса для добычи нефти // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2005. - №8. - С.18-20.

9 Каменев, П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. – М. : Стройиздат, 1970. – 172 с.

10 Берман Л. Д., Ефимочкин Г.И. Методика расчета водоструйного эжектора. - Теплоэнергетика, 1964. - №8. С. 92-95.

11 Шамаков Н.П., Дядин А.Н., Лабинский А.Ю. Двухфазные струйные аппараты. - Л. : Судостроение, 1989. – 240 с.

12 Берман Л. Д., Ефимочкин Г.И. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов. - Теплоэнергетика, 1964. - №7. С. 44-48.

13 Дроздов А.Н., Демьянова Л.А. Исследование работы струйного аппарата при различных длинах камеры смешения и эжектировании струей жидкости газожидкостной смеси// Нефтепромысловое дело, 1994. - №6. - С.4-7.

АННОТАЦИЯ

В диссертационной работе приведены результаты аналитических, расчетно-экспериментальных и стендовых лабораторных исследований по обоснованию применения комбинированных насосных установок в составе «Струйный насос + ЭЦН» для откачки продуктивных растворов урана в технологии подземного скважинного выщелачивания.

В результате исследований подтверждена принципиальная возможность их применения на откачных скважинах урановых месторождений.

Полученные результаты могут представлять научный и практический интерес при разработке новых конструкций струйных насосов и их компоновок и в других условиях эксплуатации.

АҢДАТПА

Диссертациялық кеңесте жерасты ұңғымалық шаймалау технологиясында өнімді уран ерітінділерін сорып алу үшін «Jet Pump + ESP» құрамдас бөлігі ретінде аралас сорғы қондырғыларын пайдалануды негіздеу үшін аналитикалық, эксперименттік және стендтік зертханалық зерттеулердің нәтижелері келтірілген.

Зерттеу нәтижесінде уран кен орындарының скважиналарын пайдаланудың іргелі мүмкіндігі бекітілді.

Алынған нәтижелер реактивті сорғылардың жаңа конструкцияларын және олардың орналасуын және басқа пайдалану шарттарында ғылыми және тәжірибелік қызығушылықты тудыруы мүмкін.

ANNOTATION

The dissertation paper presents the results of analytical, experimental design and bench laboratory studies to justify the use of combined pumping units as part of the “Jet Pump + ESP” for pumping productive uranium solutions in underground well leaching technology.

As a result of the research, the fundamental possibility of their use in pumping wells of uranium deposits has been confirmed.

The results obtained may be of scientific and practical interest in the development of new designs of jet pumps and their layouts and in other operating conditions.

Термины и определения

ПСВ – подземное скважинное выщелачивание;
ЭЦН – электроцентробежный насос;
УЭЦН – установка электроцентробежного насоса;
ТНУ – тандемная насосная установка;
ГНО – глубиннонасосное оборудование;
КНУ – комбинированная насосная установка;
НКТ – насосно-компрессорная труба;
КВЧ – количество взвешенных частиц;
ТС – технологическая скважина;
ОС – оголовок скважины;
ОНС – оголовок нагнетательной скважины;
ООС – оголовок откачной скважины;
ТУЗ – технологические узлы закисления;
УППР – узлы сбора продуктивных;
УРВР – узлы распределения выщелачивающих растворов;
ЦППР – центральный пункт приготовления раствора;
п.м. – погонный метр;
ТУЗ – технологический узел закисления;
ПДК – предельно-допустимая концентрация;
ПР – продуктивный раствор;
ПВ – подземное выщелачивание;
СН – струйный насос;
КПД – коэффициент полезного действия;
СНО – скважинное насосное оборудование

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Сбор, анализ и обобщение материалов по технологии ПСВ при добыче урана, применяемого глубиннонасосного оборудования	7
1.1 Краткие сведения о технологии разработки месторождений урана методом ПСВ (на примере месторождения «Хорасан-2»)	7
2 Выбор и обоснование технологии применения комбинированных насосных установок	14
2.1 Выбор и обоснование исходных параметров и методики в расчета основных элементов и узлов модели струйного насоса комбинации с погружным электроцентробежным	18
3 Общая методика моделирования	22
3.1 Общая компоновка струйного насоса	22
3.2 Методика расчета струйного насоса для использования в составе комбинированной насосной установки	24
3.3 Расчетно-экспериментальное моделирование и исследование режимов работы комбинированной насосной установки	29
3.4 Методика расчетно-экспериментального моделирования комбинированной насосной установки с применением программного комплекса MAPLE	32
4 Разработка стенда для имитационного моделирования струйной насосной установки	35
4.1 Принципиальная схема стенда	35
5 Планирование экспериментов	45
6 Некоторые результаты предварительных лабораторных экспериментов	49
6.1 Анализ результатов эксперимента	51
Заключение	52
Список использованных источников	53
Приложение А	55

ВВЕДЕНИЕ

Казахстан является крупнейшим поставщиком уранового сырья на мировые рынки и развитие работ в области интенсификации добычи с одновременным повышением энергоэффективности процесса является важным и своевременным направлением исследований.

Для подъема продуктивных растворов при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) используются электроцентробежные насосы (ЭЦН), которые не обеспечивают достаточной эффективности и надежности из-за высокой агрессивности откачиваемой жидкости, высокого содержания механических примесей в ней, многообразия условий и осложнений в работе скважинного насосного оборудования. Поэтому остро назрела необходимость поиска альтернативных способов откачки продуктивных растворов и совершенствования энергоэффективных показателей скважинных насосных установок.

Объектом исследований являются комбинированные скважинные насосные установки, включающие в состав соединенные последовательно ЭЦН и струйный насос для откачки продуктивных растворов урана.

Проведенный анализ по оценке эффективности и надежности ГНО на откачных скважинах ряда месторождений урана показал, что дальнейшего повышения эффективности погружных электронасосов можно добиться путем сочленения их со струйными насосами. Это позволит увеличить суммарную подачу насосной установки, существенно расширить диапазон регулирования режима работы ЭЦН или использовать насос с меньшей подачей. Важно и то, что при повышенном содержании механических примесей в скважинной жидкости часть ее будет проходить через струйный насос, минуя ЭЦН, что также будет способствовать повышению его ресурса работы.

Учитывая высокую актуальность проблемы повышения энергоэффективности и надежности ГНО в технологии ПСВ на большинстве месторождений урана Казахстана разработан и утвержден проект настоящей НИОКР, конечной целью которой является разработка расчетной методики и практических рекомендаций по проектированию и изготовлению эффективных конструкции КНУ для различных условий эксплуатации.

Проведенные расчетно-аналитические исследования показали принципиальную возможность создания эффективной комбинированной насосной установки на базе состыкованных последовательно ЭЦН и струйного насоса для применения на откачных скважинах при ПСВ. Эти же струйные насосы могут эффективно работать и в качестве подпорных для наземных технологических насосных установок.

Предлагаемые в диссертации тандемные насосные установки (ТНУ) в практике добычи урана методом ПСВ до настоящего времени не применяются.

Результаты исследований позволили разработать действующую модель

струйного насоса и стенд для исследования параметров комбинированных струйных насосных установок.

Целью исследований является повышение эффективности технологии откачки продуктивных растворов при подземном скважинном выщелачивании применением комбинированных струйных насосных установок.

Объектом разработки является стенд для исследования параметров комбинированных струйных установок.

Предмет исследования – оценка эффективности комбинированных струйных насосных установок в стендовых условиях с имитацией скважинных условий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) На базе патентно-литературного обзора разработать схему компоновки струйного насоса с ЭЦН.

2) Провести расчетное моделирование с определением конструктивных размеров струйного насоса и изготовить действующую модель.

3) Отработать варианты стенда для исследования струйных установок.

4) Подобрать КИП и инструментальные средства для оснащения стенда.

5) Разработать схему и изготовить стенд.

6) Проверести экспериментальные исследования по оценке работоспособности и эффективности комбинированной насосной установки.

Научная новизна работы заключается в разработке методики расчета струйного насоса и методики расчета эффективных показателей комбинированной насосной установки с разработкой инструмента для проверки их достоверности в лабораторных условиях.

Практическая значимость работы состоит в разработке конструкции стенда для исследования работы струйной насосной установки, позволяющей имитировать реальные условия эксплуатации.

Апробация полученных результатов. Результаты исследований докладывались на научных семинарах кафедры.

Опубликовано два доклада в трудах Международных конференций.

1 Сбор, анализ и обобщение материалов по технологии ПСВ при добыче урана, применяемого глубиннонасосного оборудования

1.1 Краткие сведения о технологии разработки месторождений урана методом ПСВ (на примере месторождения «Хорасан-2»)

Так как разрабатываемую комбинированную насосную установку (КНУ) предполагается испытать на месторождении «Хорасан-2» с самыми глубокими скважинами, с участием в качестве партнера проекта - ТОО «Байкен-У», ниже приведены некоторые сведения по данному конкретному месторождению.

Месторождение Северный Харасан является самым крупным месторождением Сырдарьинской урановорудной провинции и в соответствии с генеральным планом развития урановой промышленности Республики Казахстан разделено на два участка: Харасан-1 и Харасан-2. Данные по количеству технологических скважин на эксплуатационных блоках приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1 Сведения по количеству скважин на эксплуатационных блоках на месторождении «Хорасан-2»

№ блоков	Количество скважин, шт			
	Откачных	Закачных	Набл.	Всего
1	3	4	5	6
6-3-4	13	22	3	38
6-4-2	14	27	3	44
6-4-3	8	19	3	30
6-5-(2)	7	24	3	34
6-5-6	7	18	3	27
Всего:	48	110	15	173
6-10-1в	9	33	3	45
6-10-1н	6	21	2	29
6-15-2в	11	27	4	42
6-15-3в	5	18	3	26
6-15-3н	6	14	2	22
Всего:	37	113	14	164
ИТОГО:	86	223	29	338

На месторождении применяется рядная схема вскрытия и отработка добычных блоков с параметрами - 50х(30-25)х20 м, скорректированными по результатам опытных работ на ОПВ-1 и ОПВ-2.

В состав объектов полигона скважин эксплуатационной добычи участка «Харасан-2» и юго-восточного фланга месторождения «Северный Харасан» входят:

- технологические скважины с поверхностной обвязкой;

- наблюдательные скважины;
- раствороподъемное (насосное) оборудование;
- технологические узлы закисления (ТУЗ);
- узлы сбора продуктивных (УППР);
- узлы распределения выщелачивающих растворов (УРВР);
- пункты экстренной помощи;
- магистральные технологические трубопроводы;
- трубопроводы между технологическими узлами растворов и технологическими скважинами;
- объекты энергоснабжения;
- подъездные и внутриплощадочные дороги.

1.1.1 Эксплуатационная добыча урана. Средняя фактическая глубина технологических скважин на ГТП составляет порядка 650 метров, однако имеются достаточно глубокие скважины до 900 метров. Закачка выщелачивающих растворов производится под давлением 3-4 атмосферы от наземной насосной станции. Откачка продуктивных растворов осуществляется преимущественно погружными электронасосами следующих типов: «Grundfos SPM 14A-18H», «Odesse POSS-13-13/6», «Sinar 4SP5-24» и «Ульба KSPN-6-Z616-8-5,5». Параметры откачных скважин приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Средние данные по откачным скважинам

Наименование параметра	Един. изм.	Средние показатели
Средняя производительность откачных скважин	м ³ /ч	4,8 - 8
Статический уровень раствора	м	(+3) – (- 7)
Динамический уровень раствора	м	(-35) – (-40)

Транспортировка продуктивных растворов производится наземными насосами с ГТП на завод «Харасан-2» по трубопроводам, возвратных – с завода на ГТП к УПВР и далее через УПВР-ы к скважинам.

В процессе работы блоков при снижении производительности технологических скважин до предельного минимального уровня или возникновении других нарушений в режиме их работы предусматривается проведение ремонтно-восстановительных работ, включающих и промывку скважин от механических примесей с применением установки УОС. Состояние эксплуатационных скважин контролируется периодически методами ГИС.

При проведении технологического бурения на опытных участках месторождения Харасан-2, выявился сложный геологический разрез рудной части, обусловленный высокой литологической гетерогенностью и фациальной изменчивостью, что и обусловило выбор рядной схемы расположения технологических скважин 50х(30÷25)х20 м, с расстоянием

между рядами откачных и закачных скважин 50 м, 30 ± 25 м в ряду между откачными и 20 м в ряду между закачными скважинами.

1.1.2 Типы и конструкции скважин. Геотехнологическое поле состоит из четырех типов скважин: закачных, откачных, наблюдательных и контрольных. Глубина скважин в среднем 600-670 м. Однако имеются скважины и до 900м (ТОО «Байкен-У»).

Конструктивно технологические скважины представляют собой колонну, состоящую из оголовка, обсадной колонны, каркасно-дискового фильтра и отстойника. Оголовки откачных и закачных скважин аналогичны применяемым на ОПВ-1 и ОПВ-2.

Закачные скважины предназначены для подачи выщелачивающих растворов в продуктивный горизонт. Обсадная колонна, и отстойник для закачных скважин выполняются из труб ПВХ-90/8 мм, фильтр КДФ-118/0,8-1,2, (длиной 4-12м).

Откачные скважины предназначены для подъема насыщенных ураном продуктивных растворов. Конструкция: обсадка трубами ПВХ-195/13 мм - до глубины 60-66 м, далее ПВХ-90/8 мм, фильтр КДФ-118/0,8-1,2 (длина 4-12), длина отстойника 11 м. На откачных скважинах предусмотрен насосный подъем продуктивных растворов. Для подъема растворов используются, преимущественно, погружные насосы фирмы «Grundfos» SP17-11N, max \varnothing -138 мм, мощностью: 5,5 кВт и производительностью: 10 ± 14 м³/час.

Длина фильтра зависит от эффективной мощности добычного блока и определяется для каждой скважины на основе результатов ГИС. Учитывая опыт работ ПСВ, длина оптимально работающего фильтра составляет не более 10-12м.

Наблюдательные скважины предназначены для наблюдения и контроля за условиями формирования продуктивных растворов, геохимическим состоянием рудовмещающего горизонта, растеканием технологических растворов за пределы эксплуатационных участков и их возможными перетоками в надрудный, подрудный горизонты. Конструкция наблюдательных скважин аналогична закачным. Наблюдательные скважины оборудованы крышками, на которых указывается номер скважины и горизонт, по которому будут проводиться наблюдения.

Контроль загрязнения подземных вод продуктивного горизонта осуществляется по наблюдательным скважинам, пробуренным за контуром эксплуатационного блока в направлении движения естественного потока подземных вод на расстоянии 50-70 м от крайних эксплуатационных скважин.

Если в пробах воды концентрация радионуклидов превышает ПДК, то от данной скважины на расстоянии 50-70 м сооружается дополнительная скважина.

Контроль за растеканием ВР в продуктивном горизонте в пределах рудного контура осуществляется при помощи эксплуатационных скважин,

пройденных на подготавливаемых к отработке блоках по направлению движения подземных вод. Контроль за растеканием ВР выше и ниже продуктивного горизонта осуществляется при помощи наблюдательных скважин, пройденных в пределах рудного контура.

Контрольные скважины проходятся после отработки блоков участка с организацией комплекса гидрогеологических и геохимических исследований с целью:

- подтверждения полноты отработки участка;
- выделения площадей с сохранившимися в недрах продуктивными растворами;
- определения степени загрязнения водоносных горизонтов кислотными растворами и радиоактивными элементами в пределах полигона;
- изучения процесса естественного раскисления подземных вод;
- определения степени загрязнения водоносных горизонтов за пределами полигона под влиянием естественного потока подземных вод.

Местоположение контрольных скважин определяется после отработки запасов блока, количество их уточняется по необходимости.

Скважины каждого эксплуатационного блока обвязываются трубопроводами с подключением к соответствующему технологическому узлу.

В закачные скважины, работающие в режиме закисления, ВР подаются под давлением 3-5 атм. Обвязка их производится шлангом ШАПП Ø50 мм.

Обвязка откачных скважин производится трубами ПНД Ø63 мм, поставляемыми в бухтах. Внутриблоковые трубопроводы прокладываются в траншеях на глубине 0,5 м.

1.1.3 Факторы, влияющие на эффективность, надежность и ресурс работы глубиннонасосного оборудования. Технология откачки продуктивного раствора предусматривает применение погружных скважинных насосов, преимущественно, электроцентробежных с подачами от 10 до 17м³/ч и напором до 150м. Режим работы непрерывный, за исключением технологических перерывов или аварийных ситуаций. Средняя проектная глубина технологических скважин составляет ~ 650 метров. Закачка выщелачивающих растворов производится под давлением 3-4 атмосферы.

Малый гидростатический уровень, а в отдельных случаях, наличие избыточного давления растворов в скважинах (самоизлива) и необходимость транспортировки продуктивных растворов в пескоотстойник ПР, расположенный на геотехнологическом полигоне, на расстоянии порядка 900-1000 метров от проектируемых блоков, определяют выбор насосного способа раствороподъема. Вероятность самоизлива продуктивного раствора зависит от коллекторских свойств породы, глубины скважины, давления и объема закачки кислого раствора. При отсутствии самоизлива динамический уровень на большинстве скважин незначительный. Глубина погружения насосов под уровень жидкости составляет порядка 50м для обеспечения его

бескавитационной работы и достаточного охлаждения. Технологические трубопроводы ПР слабонапорные, давление растворов в них создаётся погружными скважинными насосами, установленными в откачных скважинах.

Несмотря на то, что скважинные условия работы насосов не столь жесткие, как в нефтедобывающих скважинах (малые глубины погружения, малая вязкость продуктивного раствора и т.п.), как показал длительный опыт их применения на практике, они не обеспечивают достаточной надежности и ресурса работы.

Ниже представлена сравнительная информация по ресурсу и надежности погружных насосов на месторождении «Хорасан-2» за период с 2010 по 2016г. (таблица 1.3).

Таблица 1.3 Сравнительные данные по ресурсу и причинам отказов погружных насосов на месторождении «Хорасан-2»

№ п/п	Марка насоса	Средняя наработка	% выхода из строя	Причины выхода из строя	Примечание
1	Grundfos SPM 14A-18H	6830	56%	Износ рабочих камер, колес и вала насосной части	Ремонт за счет замены насосной части. Электродвигатель неремонтопригодный
2	Odesse POSS-13-13/6	6953	54%	Поломка вала, трещины в корпусе винта крепления шлицевой муфты насосной части при 4800м/час	
3	Sinar 4SP5-24	6384	69%	Обрыв кабеля электродвигателя, завышенный ток электродвигателя	Ремонт за счет замены электродвигателя
4	Ульба KSPN -6-Z616-8-5,5	7839	33%	Быстрый износ вала и контгайки между электродвигателем и насосной частью.	

На основании десятилетнего опыта эксплуатации был проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков представленных выше погружных насосов для унификации насосного оборудования на руднике и выбора в качестве основного одного из них (таблица 1.4).

Анализ показывает, что у каждого из насосов имеются определенные достоинства и недостатки. Общим для них является недостаточный ресурс работы насосов, связанный с присутствием в продуктивном растворе механических примесей, преимущественно песка, так как продуктивные пласты сформированы слабосцементированными породами, прочность которых снижается в кислой среде и гидромеханикой раствора в породе при наличии подпора со стороны нагнетательных скважин.

Механические примеси в продуктивном растворе приводят к интенсификации абразивного износа элементов насосной части, перегреву и заклину насоса из-за роста механических потерь на трение, снижению КПД насосных установок и перерасходу электроэнергии. Несомненно, что на интенсивность износа оказывает влияние и гранулометрический состав выносимого песка.

Таблица 1.4 Достоинства и недостатки погружных насосов

Grundfos SPM 14A-18H		Odesse POSS-13-13/6		Sinar 4SP5-24		Ульба KSPN-6-Z616-8-5,5	
Положительные качества	Отрицательные качества	Положительные качества	Отрицательные качества	Положительные качества	Отрицательные качества	Положительные качества	Отрицательные качества
1.Электродвигатель и кабель имеет штепсельный разъем. 2.Электродвигатель подлежит ремонту механических частей	1.Насосная часть неустойчива к механическим взвесям и требует ремонта уже через 2500м/часов. 2.Электродвигатель не подлежит перемотке.	Присутствует контроль температуры обмоток по перегреву	1.Насосная часть неустойчива к механическим взвесям. 2. Выход из строя валов насосной части	1.Насосная часть устойчива к механическим взвесям (при наработке 3800м/ч). 2. Электродвигатель подлежит ремонту (ремонт механических частей и замена обмотки статора)	1.Слабое крепление кабеля к электродвигателю без штепсельного разъема	1.Присутствует возможность откачки ПРС с низким дебитом	1.Вал насоса выходит из строя при наличии песка

На рисунке 1.1 приведена диаграмма основных причин отказов глубиннонасосного оборудования за период 2010-2016г.г., откуда также следует, что основными причинами отказов насосов являются механический износ подвижных частей насоса – в среднем 45%, далее следует неисправности электрической части (кабеля, электродвигателя) – 14% и 41% прочие.

Осложнения при выводе скважины на режим обусловлены большим содержанием КВЧ в начальный период работы после подземного ремонта –

от 200 до 1000 мг/л. Это часто превышает паспортные характеристики насосов, даже износостойкого исполнения. Механические частицы, проходя через рабочие органы насосов, производят абразивную работу и являются основной причиной износа рабочих камер, рабочих колес и валов, перегрева обмоток электродвигателя из-за забивания фильтров.

Во многих вновь осваиваемых насосных скважинах значительное количество мехпримесей поступает из пласта только в первые дни эксплуатации. Основная масса отказов глубинно-насосного оборудования по засорению – порядка 80 %, приходится на вновь введенные скважины из бурения, после забуривания второго ствола или проведения подземного ремонта. В дальнейшем, при отработке скважины в определенный промежуток времени отказы по причине засорения на этих скважинах снижаются [5,6,7,8 и др.].

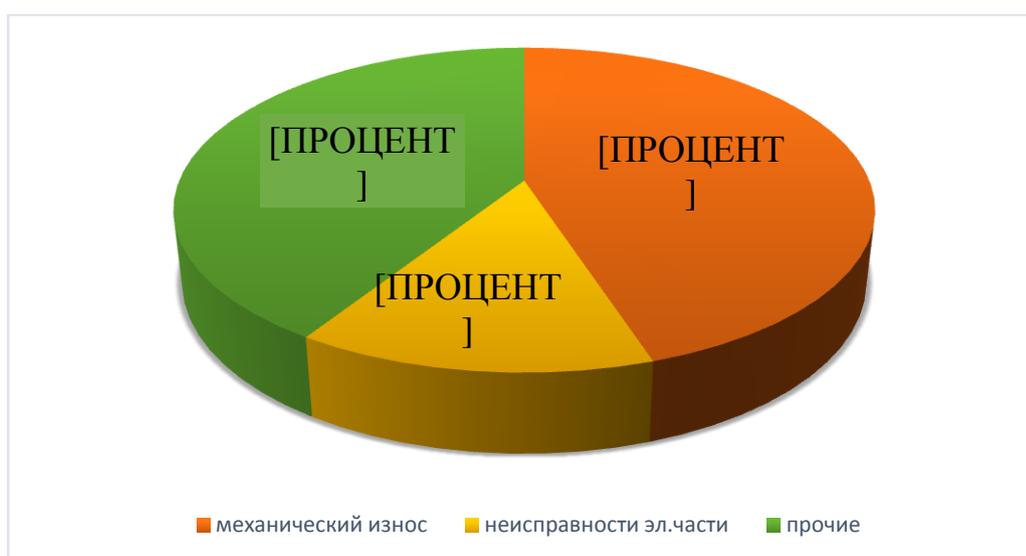


Рисунок 1.1 – Причины отказов глубиннонасосного оборудования

Таким образом, низкая надежность и ресурс работы глубиннонасосного оборудования на рудниках приводит к росту накладных расходов на их обслуживание и ремонт, а также росту простоев скважин. На месторождении для борьбы с мехпримесями и защиты насоса часто применяются скважинные фильтры типа КДФ-118/0,8-1,2 (фильтровая колонна). Содержание твердых примесей в откачиваемом растворе согласно техническим требованиям не должно превышать 50 мг/л.

2 Выбор и обоснование технологии применения комбинированных насосных установок

В связи с отсутствием практического опыта разработки и применения тандемных глубинных насосов при добыче урана методом ПСВ было решено обратиться к опыту нефтедобывающих компаний, работа которых проводится в более осложненных условиях (большие глубины, высокая вязкость, повышенное содержание мехпримесей и газа и т.д.). Имеющиеся наработки и опыт применения струйных насосов в нефтяной промышленности с успехом могут быть применены и в уранодобывающей промышленности. К примеру, в нефтяной промышленности имеются ряд успешных разработок и апробированных на практике тандемных насосных установок для различных условий эксплуатации [12,13,14,15].

Однако, для применения струйных насосов для добычи раствора урана в классическом виде, имеются некоторые ограничения – нежелательность применения в качестве эжектирующей жидкости воды во избежание разубоживания раствора, трудности с монтажом двухрядного лифтового подъемника. Поэтому наиболее предпочтительным является применение иного агента, который может быть легко отделен в последующем от раствора.

Во-первых, этим агентом может быть воздух. Во втором случае, этим агентом может быть непосредственно сам добываемый скважинный раствор. Воздух более предпочтителен с точки зрения простоты и безопасности применения компрессорных установок. В этом случае насосная установка будет представлять газоструйный инжектор. При работе такой установки может проявиться двойной эффект, когда газирование раствора в лифтовой трубе обеспечит дополнительную подъемную силу (рисунок 2.1).

Во втором случае может быть применен известный своей эффективностью струйный насос, в котором часть добываемой скважинной жидкости будет служить эжектирующей. Схема пакерной гидроструйной насосной установки с наземным высоконапорным насосом приведена на рисунке 2.2.

В обоих случаях подача высоконапорного агента (воздуха или жидкого раствора) осуществляется с наземных установок через НКТ или межтрубное пространство.

В первом варианте компримированный газ или воздух от наземной станции подается по НКТ в струйный насос, а смешанная с пластовой жидкостью раствор поднимается по межтрубному пространству на дневную поверхность. В последующем, происходит удаление газа в сепараторе.

Во втором варианте, при эксплуатации скважины с пакерной гидроструйной насосной установкой, часть очищенного в сепараторе 8 продуктивного раствора от наземной насосной станции 10 по НКТ 5 подается в струйный насос 1. Далее вместе с пластовой жидкостью, отбираемого ниже установки пакера 2, поднимается по межтрубному пространству на дневную поверхность. Проходя через замерную установку 7 поступает на сепаратор 8

наземной станции и далее на выкидную линию для дальнейших технологических операций.

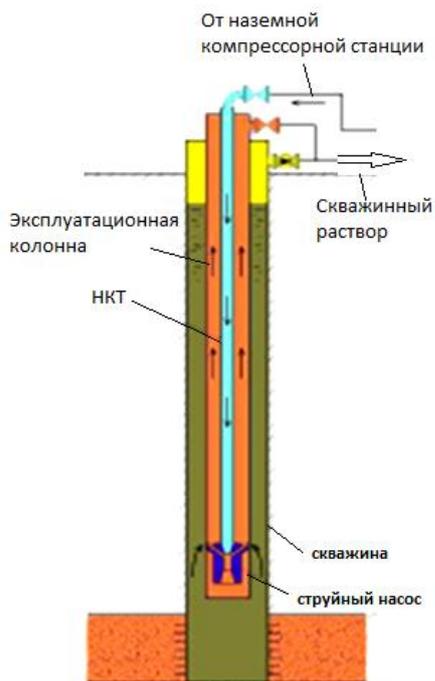


Рисунок 2.1 Принципиальная схема газоструйного инжектора (струйного насоса) с наземным приводом

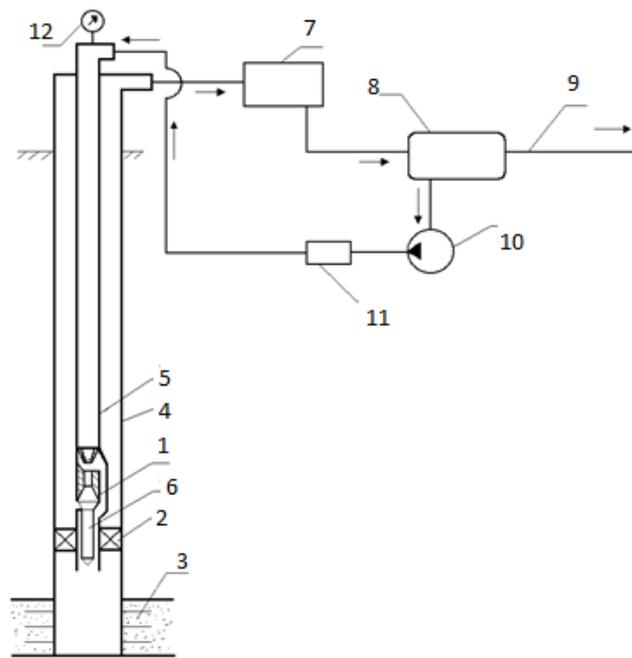


Рисунок 2.2 Схема пакерной гидроструйной насосной установки

Возможен и вариант применения беспакерной гидроструйной насосной установки с двухрядным лифтом (рисунок 2.3). Отличием является компоновка нагнетательной и лифтовой труб одна в другой, т.е. типа «труба в трубе» и наличие в концевике лифтовой трубы обратного клапана 3.

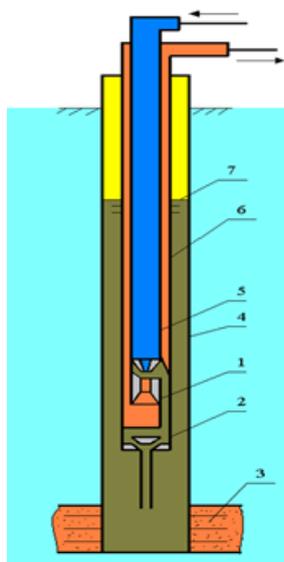


Рисунок 2.3 Схема беспакерной тандемной насосной установки «ЭЦН + СН»

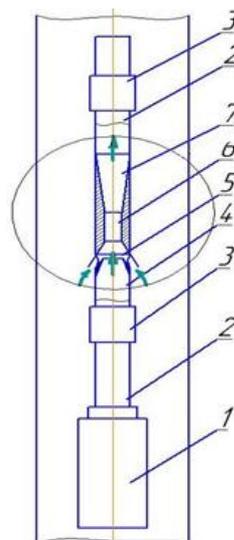


Рисунок 2.4 Принципиальная схема гидроструйной насосной установки

Для повышения эффективности работы уже применяемых на месторождениях погружных скважинных электронасосов наиболее предпочтительным, на наш взгляд, является применение ТНУ типа «УЭЦН + СН» (рисунок 2.4), которые с успехом были апробированы в нефтяной промышленности на скважинах, выходящих из бурения, или скважинах, которые плохо осваиваются после подземного ремонта для форсированного отбора жидкости [13,14,15]. Для этого требуется лишь дооснастить ЭЦН дополнительным струйным насосом, что даст возможность увеличения отбора продукции из добычных скважин, повышение КПД установки за счет прироста производительности установки, упрощения конструкции и повышение ее надежности за счет исключения варианта двухрядного подъемника, отпадает необходимость специальной подготовки рабочей жидкости и обслуживания поверхностного оборудования, отпадает необходимость в пакере.

Другим немаловажным преимуществом является автоматическая подстройка ТНУ при изменении условий эксплуатации скважин (изменение пластового давления, свойств продукции, продуктивности скважин и др.), так как у ЭЦН и струйного насоса имеется прямая зависимость «напор - подача». Применение ТНУ позволяет увеличить суммарную подачу скважинной жидкости, что позволяет существенно расширить диапазон регулирования режима работы ЭЦН или использовать насос с меньшей подачей.

Это дает возможность увеличения отбора продукции из скважин, повышение КПД установки за счет прироста производительности установки, упрощение конструкции и повышение ее надежности за счет исключения варианта двухрядного подъемника, отпадает необходимость специальной подготовки рабочей жидкости и обслуживания поверхностного оборудования, отпадает необходимость в пакере.

Принципиальная компоновка ТНУ, включающая в себя ЭЦН+СН и рабочая характеристика показана на рисунке 2.5.

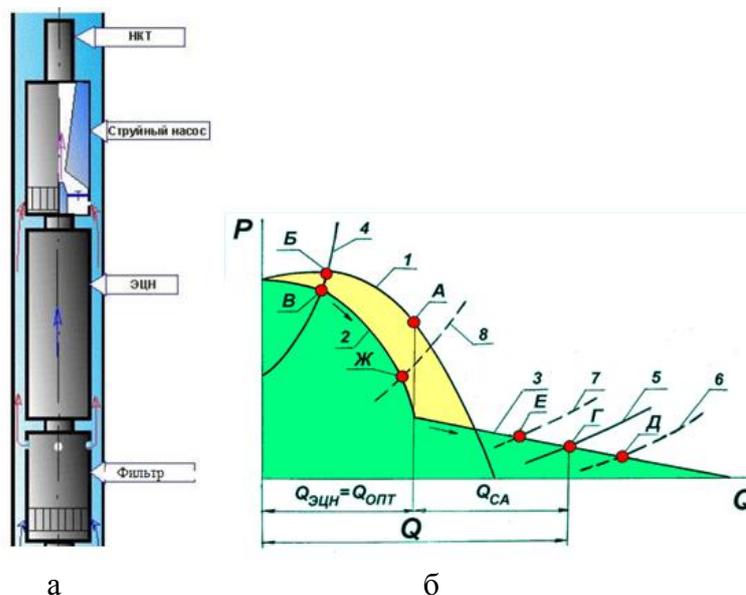


Рисунок 2.5 Принципиальная компоновка тандемной насосной установки

(а) и его сравнительная характеристика с характеристикой ЭЦН (б)

Так, результаты промышленных испытаний установки «ЭЦН + СН» на месторождениях Западной Сибири [13] показали прирост добычи жидкости примерно на 20%, а КПД тандемной установки на 15% по сравнению только с одним ЭЦН при равных электрических параметрах обеих установок и одинаковых технологических показателях. Таким образом, доказана принципиальная возможность работы струйного насоса с погружным силовым насосом и подтверждена ее достаточно высокая энергетическая эффективность.

Другим немаловажным преимуществом КНУ является автоматическая их подстройка при изменении условий эксплуатации скважин (изменение пластового давления, свойств продукции, продуктивности скважин и др.), так как у ЭЦН и струйного насоса имеется прямая зависимость «напор - подача». Применение тандемной установки позволяет увеличить суммарную подачу скважинной жидкости, что позволяет существенно расширить диапазон регулирования режима работы ЭЦН или использовать насос с меньшей подачей.

Практика широкомасштабного промышленного применения тандемных установок «ЭЦН+СН» для добычи нефти вскрыла еще одно чрезвычайно важное их преимущество перед всеми известными установками: возможность вызова притока, освоения и вывода на проектный режим работы скважин любых категорий сложности, которые не могут быть освоены известными способами за разумное время, т.е. при допустимой стоимости процесса освоения.

Технология применения тандемных установок позволяет:

- стабилизировать режим работы системы «погружная установка → скважина → пласт», а также легко регулировать забойное давление и дебит скважины;
- установить и поддерживать оптимальный режим работы УЭЦН при неконтролируемом изменении условий эксплуатации (пластовое давление, обводненность и др.);
- облегчить и ускорить вызов притока и вывод скважины на установившийся режим работы после ее глушения или остановки;
- эффективно использовать отсепарированный на входе в ЭЦН свободный газ в процессе подъема продукции путем его перепуска из затрубного пространства через струйный насос в колонну НКТ с созданием благоприятной структуры газожидкостной смеси;
- улучшить охлаждение погружного электродвигателя;
- снизить и стабилизировать токовые нагрузки погружного электродвигателя;
- повысить наработку на отказ элементов погружной установки;
- повысить КПД добывающей системы.

Разнообразие конструктивных вариантов обусловило и соответствующее распространение насосов такого типа. В частности, их

также используют в химической промышленности для перекачки кислот, щелочей, нефтесодержащих носителей, солевых смесей и мазута из-за их механической выносливости и стойкости. Таким образом, успешная практика их применения в нефтяной промышленности, позволяет ставить вопрос их широкого применения и в уранодобывающей промышленности.

2.1 Выбор и обоснование исходных параметров и методики расчета основных элементов и узлов модели струйного насоса в комбинации с погружным электроцентробежным

Эффективная эксплуатация скважин тандемными установками "УЭЦН+СН» может быть достигнута только в случае согласования работы погружного центробежного насоса (силового привода для СН) и струйного насоса при их работе на оптимальном режиме.

Подача струйного насоса с оптимальными геометрическими параметрами является функцией пяти основных характеристик: давления и расхода силовой (рабочей) жидкости, поступающей из ЭЦН; давления инжестируемой продукции из затрубного пространства на глубине установки струйного насоса; давления на выкиде струйного насоса.

С увеличением глубины спуска струйного насоса возрастает противодавление на выкиде струйного насоса, что приводит также к снижению подачи последнего. Из вышеперечисленных параметров, влияющих на работу СН, давление на входе в струйный насос и давление на выкиде струйного насоса напрямую связаны с глубиной его спуска, т.е. глубина спуска струйного насоса является оптимизируемым параметром.

Сопоставление характеристик серийного ЭЦН и погружной насосно-эжекторной системы "Тандем" в координатах подача Q - давление P представлено на рисунке 2.6. Вид рабочей характеристики ЭЦН при компоновке системы струйным аппаратом меняется и на новой характеристике можно выделить две области: левую и правую. Если погружная насосно-эжекторная система работает в левой области характеристики при высоких значениях развиваемого давления P , струйный аппарат выполняет роль забойного штуцера, а дебит скважины равен подаче ЭЦН.

При небольших значениях P насосно-эжекторная система эксплуатируется в правой части характеристики, а дебит скважины складывается из подачи ЭЦН Q и подачи струйного аппарата Q .

При рациональном проектировании геометрии проточной части эжектора можно добиться того, что граница между левой и правой областями, характеристики системы "Тандем" будет соответствовать подаче ЭЦН в оптимальном режиме Q . В этом случае при работе системы в правой части характеристики режим эксплуатации ЭЦН будет неизменным и соответствующим оптимальному, а все изменения подачи при различных противодавлениях P возьмет на себя струйный аппарат. Дополнительным

преимуществом при работе в правой части характеристики установки "Тандем" является улучшение условий охлаждения погружного электродвигателя и кабельного удлинителя в следствие повышения общего дебита системы по сравнению с подачей ЭЦН.

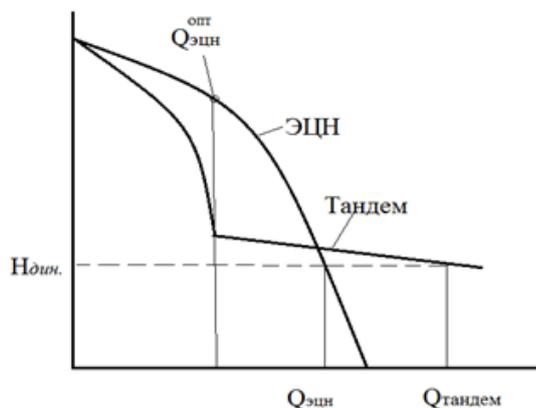


Рисунок 2.6 Характеристики ЭЦН и системы «Тандем (ЭЦН+СН)»

Погружная насосно-эжекторная система, таким образом, является в левой части характеристики высоконапорной низкодебитной установкой, а в правой - высокопроизводительной низконапорной системой, причем в этом случае погружной центробежный насос работает в оптимальном режиме вне зависимости от колебаний противодействия.

Такая форма характеристики позволяет системе подстраиваться к изменяющимся в широком диапазоне режимов работы откачных скважин, а также успешно проходить этап освоения скважин при подземных ремонтах.

Основными исходными данными для проектирования и моделирования режимов работы тандемных насосных установок для равнофазных жидкостей служат следующие основные технологические и конструктивные параметры:

- требуемые подача и напор тандемной установки в зависимости от условий эксплуатации в откачной скважине;
- конструктивные габаритные размеры в зависимости от конструкции скважины;
- параметры высоконапорной струи от ЭЦН (развиваемый напор и расход жидкости);
- свойства жидкостей (вязкость и плотность и др.);
- параметры подсасываемой жидкости на входе в струйный эжектор, определяемый глубиной погружения тандемной установки;
- конструктивные параметры элементов струйного насоса (выконапорного сопла, и диффузора, соотношение их площадей, размеры камеры смешения, размеры диффузора и др.).

Наиболее тщательно при конструировании струйных аппаратов требуется моделирование комбинаций размеров сопел и входных горловин, которые и определяют, в основном, эффективность их параметров. Исходя из анализа информации, собранной по урановым рудникам Казахстана, проведено обоснование исходных параметров и методики расчета основных

элементов и узлов модели струйного насоса в комбинации с погружным ЭЦН.

Для расчетного моделирования струйных аппаратов имеются различные методики, однако некоторые из них имеют ограниченное применение для определенных целей, т.к. требуют очень много эмпирических данных, корректность которых иногда вызывает сомнения. Другие не позволяют рассчитать режимы возникновения кавитации в установке.

На основании анализа существующих методик расчета СН-ов разработана методика расчетно-экспериментального моделирования режимов работы ТНУ в скважинных условиях. Расчетно-экспериментальное моделирование проводилось с применением хорошо зарекомендовавшего среди проектировщиков программного комплекса «MAPLE».

При выполнении компьютерного моделирования режимов работы тандемного насоса предполагаются следующие допущения:

- жидкости являются несжимаемыми;
- процессы протекают изотермически, а параметры насоса остаются неизменными;
- потери кинетической энергии на входе и выходе струйного насоса незначительны;
- жидкости однородны и хорошо смешиваются;
- средняя скорость высоконапорной струи сохраняется до входа в горловину.

Такие допущения не сильно влияют на точность расчета и вполне возможны, так как продуктивный раствор практически не содержит растворенный газ, по плотности незначительно отличается от обычной воды, рабочей жидкостью в струйном аппарате является сам продуктивный раствор скважины.

На основании анализа конструкций скважин на месторождениях Казахстана для расчетно-экспериментального исследования и моделирования принята виртуальная модель откачной скважины со следующими параметрами (таблица 2.1).

Таблица 2.1 Исходные данные для моделирования режима работы комбинированной насосной установки (ЭЦН+СН)

Параметр	Значение параметра/ размерность
Диаметр лифтовой трубы	90мм
Глубина скважины (варьируется)	от 50 до 800м
Подача насоса или дебит скважины (варьируется)	от 8 до 15 м ³ /ч
Глубина погружения насоса под уровень жидкости (варьируется)	от 35- до 55м
Гидравлическое сопротивление линии сбора	до 35м. вод.ст.
Плотность продуктивной жидкости	1,05 г/см ³
Статический уровень жидкости (варьируется)	от - 30 до 0м.
Динамический уровень жидкости (варьируется)	От -50 до 0м.

Техническое задание на расчетно-экспериментальное исследование режимов работы виртуальной модели комбинированной насосной установки предусматривало:

- создание виртуальной модели откачной скважины;
- создание схемы обвязки внутривидовой сети сбора и транспорта продуктивного раствора;
- разработку конструкции струйного насоса и схемы обвязки с ЭЦН;
- расчетное моделирование режимов работы скважинного погружного ЭЦН в тандеме со струйным насосом с применением специализированных компьютерных программ.

В результате расчетно-экспериментальных исследований и моделирования планировалось установить:

- характеристики режимов работы комбинированной насосной установки с установлением оптимальных режимов;
- оптимальные конструктивные параметры струйного насоса;
- предельные параметры и режимы работы комбинированной насосной установки, при которых возможно возникновение кавитации жидкости в струйном насосе.

При проектировании струйного насоса, работающего в тандеме с электронасосным, учитывалось требование вписывания его в компоновку и конструкцию откачной скважины. Учитывались также режимы откачных скважин, при которых возможно наличие избыточного давления растворов в скважинах (самоизлива), а также необходимость транспортировки продуктивных растворов в пескоотстойник ПР, расположенный на геотехнологическом полигоне на расстоянии порядка 900-1000 метров от проектируемых блоков.

3 Общая методика расчетно-экспериментального моделирования

В основном, в промышленных условиях эксплуатации, для работы струйного аппарата необходим насос, нагнетающий жидкость под давлением в сопло эжектора. При этом, совместно работающие струйный аппарат и насос образуют насосно-эжекторную систему [12, 21, 22, 23,24, 25].

К настоящему времени, существует множество насосно-эжекторных систем, среди которых следует выделить комбинированные насосные установки УЭЦН-струйный насос, где струйные насосы существенно облегчают работу ЭЦН при эксплуатации скважин.

В настоящей работе предложена модель работы скважины с ЭЦН и эжектором при постоянном дебите и проведены расчеты, которые позволяют по известным технологическим характеристикам скважины и насосного оборудования определить основные конструктивные размеры струйного насоса и место закрепления системы эжектора-УЭЦН для обеспечения устойчивой работы системы в рамках естественных ограничений.

3.1 Общая компоновка струйного насоса

Принципиальная схема струйного аппарата представлена на рисунке 3.1. Основные элементы аппарата: высоконапорное сопло, приемная камера, камера смешения и диффузор.

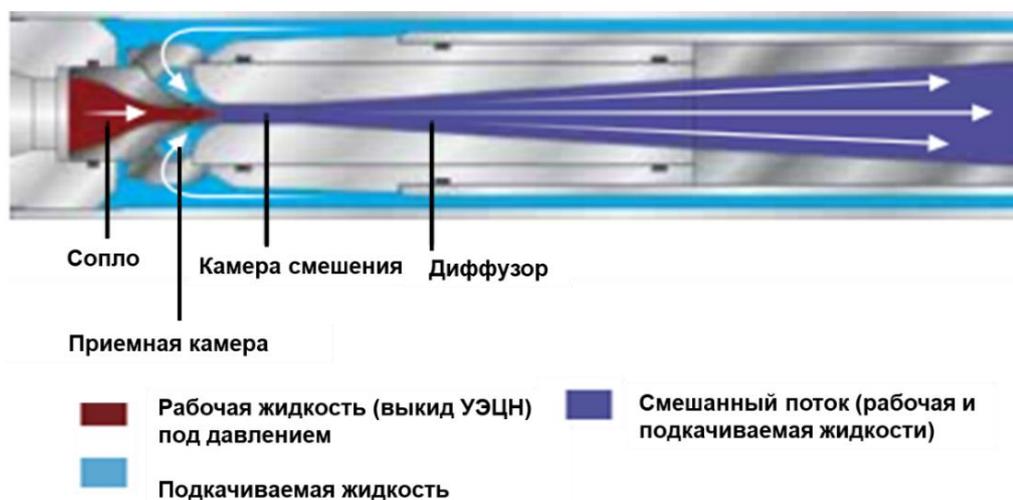


Рисунок 3.1 Принципиальная схема струйного аппарата

Высоконапорное сопло является одним из основных конструктивных элементов струйного аппарата и служит для преобразования потенциальной

энергии давления в кинетическую энергию рабочего потока и создания определенного распределения завихренности в струе. Приемная камера предназначена для подвода инжектируемого потока к струе рабочей среды. Камера смешения служит для смешения и выравнивания поля скоростей двух потоков. Диффузор выполняет роль преобразователя кинетической энергии общего потока в потенциальную энергию давления за счет постепенного снижения скорости.

Обычно в струйных аппаратах сначала потенциальная энергия рабочего потока преобразуется в кинетическую. Кинетическая энергия рабочего потока частично передается инжектируемому потоку. В процессе движения через проточную часть струйного аппарата происходит выравнивание скоростей смешиваемых потоков, а затем обратное преобразование кинетической энергии смешанного потока в потенциальную. На рисунке 3.2 представлено изменение кинетической энергии и давления рабочей жидкости в струйном насосе.

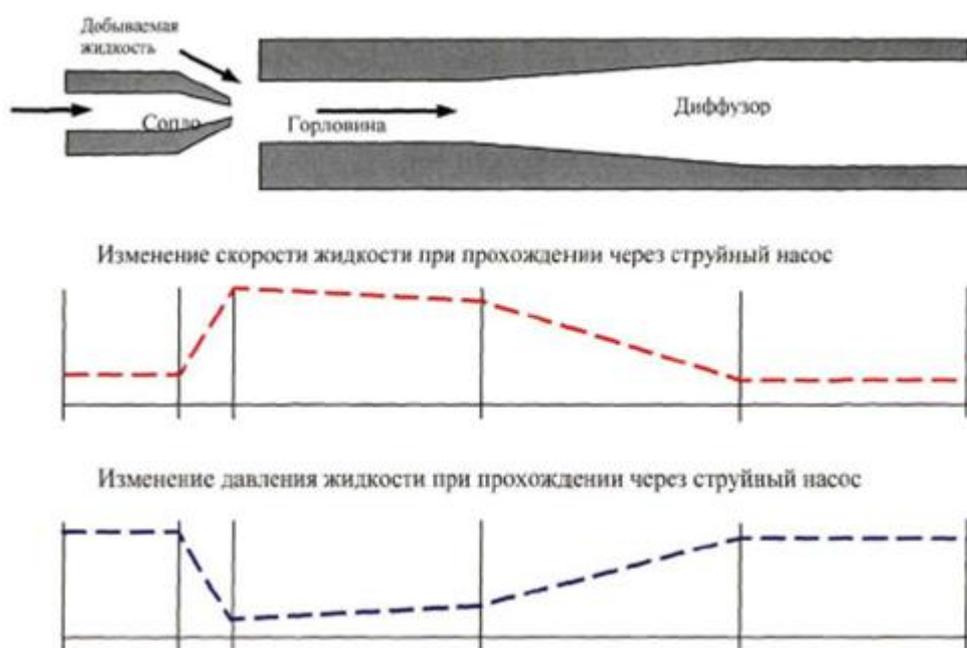


Рисунок 3.2 Изменение давления и скорости рабочей жидкости в струйном насосе [30]

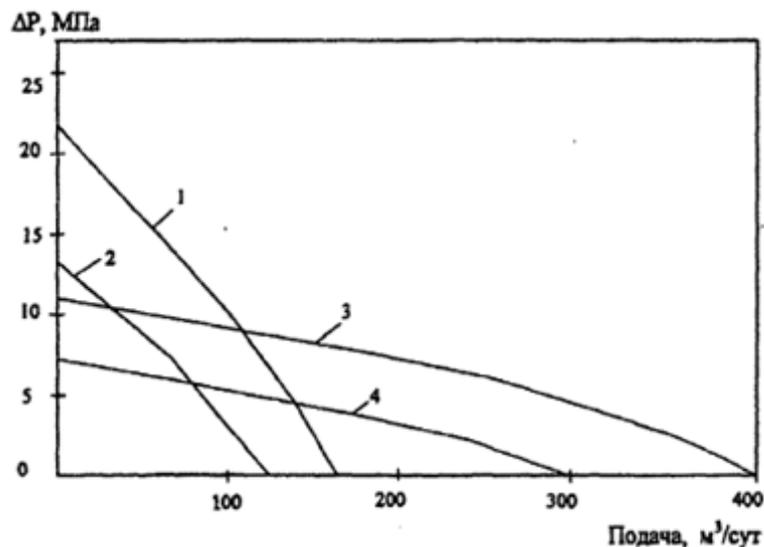


Рисунок 3.3 Рабочие характеристики струйного насоса [30]

Струйный насос имеет рабочие характеристики, подобные характеристикам погружного электроцентробежного насоса. На рисунке 3.3 приведен пример таких характеристик, которые зависят от давления в сопле [26].

При заданном размере сопла, различным размерам горловины соответствуют различные характеристики. Обычно характеристические кривые довольно пологие, особенно при большом диаметре горловины, что говорит о высокой зависимости между подачей струйного насоса и давлением на приеме или выходе из насоса. Поскольку давление зависит от плотности или вязкости жидкостей и от присутствия газа, расчет работы насоса сложен и требует численного решения.

Подбор оборудования струйного насоса должен предусматривать расчеты диаметров сопла и горловины, а также соответствующих расхода и давления [27,28]. Расчеты должны проводиться исходя из геолого-технических данных по скважине, физико-химических свойств добываемой и закачиваемой жидкостей (всего более 20 параметров). По результатам предварительных расчетов для конкретной скважины выбирается тип струйного насоса. Следующий шаг заключается в компоновке забойного узла и оптимизации по мощности и гидравлическим параметрам, унификации и минимизации стоимости оборудования.

3.2 Методика расчета струйного насоса для использования в составе комбинированной насосной установки

Модель гидроструйного насоса основана на законе сохранения энергии, импульса и массы. При этом потери давления на трение в потоке учитываются коэффициентами трения. Каждая часть струйного аппарата имеет собственный режим потока, описываемые соответствующими

уравнениями для расчета изменения давления и других параметров по длине аппарата.

В качестве допущений, которые использовались при выводе уравнений и получении результатов в настоящей работе, были приняты следующие:

1) гидродинамические процессы в скважине и внутри эжектора протекают изотермически;

2) при изменении давления плотность жидкости остается постоянной;

3) коэффициент сжатия струи в сопле эжектора равен единице.

Высоконапорное сопло. Энергия, приносимая силовой жидкостью, состоит из кинетической энергии и потенциальной энергии. Кинетическая энергия связана со скоростью истечения струи и потенциальной энергией, зависящую от давления на входе в сопло. Силовая жидкость, в общем случае, подается от силовой насосной установки (например, УЭЦН) и направляется в камеру смешения через сопло как высокоскоростная струя.

При входе в камеру смешения силовая жидкость смешивается с эжектируемой жидкостью.

Уравнение Бернулли описывает закон сохранения энергии для сопла:

$$P_i + \frac{1}{2}\rho_1 v_i^2 = P_o + \frac{1}{2}\rho_1 v_n^2 + K_n \frac{1}{2}\rho_1 v_n^2 \quad (3.1)$$

Данное выражение (3.1) можно представить как:

$$P_i - P_o = Z(1 + K_n) \quad (3.2)$$

При этом давление на выходе из сопла P_o , приблизительно, равно давлению на приеме струйного насоса P_s . Данное допущение справедливо для струйных насосов с соплом, удаленным на некоторое расстояние от камеры смешения, и, следовательно, высокоскоростная струя истекает в среду с давлением, близким или равным давлению в приемной камере. Z определяется как динамический напор:

$$Z = \frac{1}{2}\rho \cdot v_n^2 \quad (3.3)$$

Приемная камера. Эжектируемый поток жидкость подается в струйный насос через приемную камеру, представленным кольцевым пространством. Важно отметить, что пассивный (эжектируемый) поток подается насос (приемную камеру) за счет снижения давления в камере смешения. Смешение рабочей и эжектируемой жидкостей, а также обмен энергией, происходит практически мгновенно.

Изменение давления в приемной камере может быть сформулировано из уравнения Бернулли и выражено следующим образом:

$$M = (P_s - P_o) = Z(1 + K_{en}) \frac{SM^2}{c^2} \quad (3.4)$$

Для случая, когда плотности рабочей и пассивной жидкостей равны, выражение (3.4) может быть представлено следующим образом:

$$M = (P_s - P_0) = Z(1 + K_{en}) \frac{M^2}{c^2} \quad (3.5)$$

Камера смешения. Основной обмен энергией происходит в камере смешения, при этом предполагается полное смешение рабочей и эжектируемых жидкостей. Основным допущением является то, что скорости потоков на входе в камеру смешения и на выходе имеют равномерное распределение (рисунок 3.1 и 3.2). На основе данного предположения применяется закон сохранения импульса: импульс смешанного потока при выходе из камеры смешения равен импульсу жидкостей, поступающих в нее.

Импульс жидкостей, покидающие контрольный объем, минус импульс поступающих жидкостей, равен внешней силе; то есть изменению давления в контрольном объеме с площадью поперечного сечения A_{th} . Объединив это с установленным соотношением объема газа, баланс можно записать в виде:

$$A_{th}(P_0 - P_t) - \int dFr = (m_1 + m_2)V_{3t} - m_1 v_n \quad (3.6)$$

Используя уравнение неразрывности и деля выражение (3.6) на A_{th} , получено следующее выражение для несжимаемой жидкости:

$$P_t - P_0 = Z \left[2b + \frac{SM^2 b^2}{1 - b} - b^2(2 + K_{th})(1 + SM)(1 + M) \right] \quad (3.7)$$

При этом на выходе из камеры смешанный поток имеют высокую кинетическую энергию, в связи с чем необходим диффузор для конвертации ее в потенциальную энергию.

Диффузор. Диффузор представляет собой расширяющийся канал течения смешанного потока. Длина диффузора определяет восстановление давления в струйном насосе, при этом пологий угол диффузора обеспечивает наилучшее восстановление давления.

Как описывалось выше, на выходе из диффузора большая часть кинетической энергии превращается в потенциальную энергию, что обеспечивает необходимую энергию для подъема смешанного потока жидкостей на поверхность.

Увеличение давления по длине диффузора описывается так же, как для камеры смешения и сопла, а изменение энергии - уравнением непрерывности:

$$\int_t^d \frac{dP}{\rho} + \int_t^d V dV + \int_t^d \Delta P_f / \rho_{3t} = 0 \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8) в окончательной форме может быть выражено следующим образом:

$$P_d - P_t = Z^2 b^2 (1 + SM)(1 + M)(1 - K_{di} - a^2) \quad (3.9)$$

Потери давления на трение в струйном насосе. При эксплуатации струйного насоса имеются потери на трение, наблюдаемые во всех его частях.

Для учета этих потерь используются так называемые коэффициенты потерь давления на трения в различных узлах струйного насоса. Эти коэффициенты потерь зависят от геометрии насоса, давлений, вязкости, расходов и т.д. Коэффициенты потери постоянной величины также вероятны в случаях с высокими числами Рейнольдса. Стандартным подходом является их экспериментальное определение для конкретного используемого насоса и для конкретной перекачиваемой среды при определенных расходах жидкости.

Кроме того, имеется ряд публикации обосновывающих, что коэффициенты трения имеют некоторые усредненные значения, которые действительны для определенного диапазона отношений сопло-камера смешения. В таблице 3.1 приведены рекомендуемые значения коэффициентов потерь давления на трение, полученные экспериментальным путем.

Таблица 3.1 Рекомендуемые значения коэффициентов потерь давления на трение [29]

Параметр	Значение
K_n	0.05
K_{en}	0.00
K_{td}	0.20

Коэффициент полезного действия струйного насоса. Как и для любого насоса, эффективность (КПД) струйного насоса описывается как:

$$\eta = \frac{\text{Полезная работа}}{\text{Затраченная энергия}} \quad (3.10)$$

Следующее уравнение может быть выражено из (3.10) через расходы жидкостей и перепады давлений для конкретных условий:

$$\eta = \frac{(P_d - P_s) \cdot Q_2}{(P_i - P_d) \cdot Q_1} = MN \quad (3.11)$$

Таким образом повышение давления в эжектируемом потоке до уровня давления силовой жидкости определяет эффективность струйного насоса. Обмен энергией рассматривается как изменение давления в струйном насосе (рисунок 2.8).

Выражая (3.10) через (3.1) - (3.9) можно получить теоретический параметр N , характеризующий струйный насос:

$$N = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.12)$$

где

$$n_1 = 2b + \frac{2SMc^2b^2}{1-b} - b^2(1 + K_{th} + K_{di} + a^2)(1 + m)(1 + SM) - \frac{SM^2}{c^2}(1 + K_{en}) \quad (3.13)$$

$$n_2 = 1 + K_n - n_2 \quad (3.14)$$

Определение оптимального коэффициента эжекции. Рекомендуемое значение рабочей точки для коэффициента эжекции является значение $M = \frac{2}{3}M_{ОРТ}$, при этом значение $M_{ОРТ}$ – является коэффициент эжекции при максимальном КПД. Значение $M_{ОРТ}$ может быть выведено путем дифференцирования уравнений (3.11) - (3.12), а после приравненным нулю для нахождения его действительного корня.

Более высокие значения эжекции чреваты повышенным риском кавитации при незначительном увеличении КПД насоса.

Режим кавитации струйного насоса. Струйные насосы подвержены кавитации, которая возникает при падении давления в камере смешения ниже давления насыщения паров. Обычно кавитационные режимы наблюдаются при прокачивании большого объема жидкости через камеру смешения.

При кавитационном режиме снижение противодавления на насос не оказывает влияния на коэффициент эжекции M_c . Помимо этого кавитация ведет к износу струйного насоса из-за схлопывания пузырей пара (газа).

Следующий критерий выведен на основе экспериментальных данных для оценки работы струйного насоса в бескавитационном режиме:

$$M_c = c \left(\frac{P_s - P_v}{\sigma Z} \right)^{0.5}, \quad (3.15)$$

где σ - кавитационный коэффициент равный 1,35.

Сравнение прогнозируемого коэффициента эжекции M_c предполагаемой M_c является важным шагом при проектировании струйного насоса и служит для выбора оптимальной геометрии насоса.

Геометрия струйного насоса. Одномерное представление работы струйного насоса, описанное выше, не указывает его продольных

параметров/профилей. В тоже время отмечено, что продольные значения струйных насосов могут также влиять на производительность струйного насоса. Важными параметрами при дизайне являются расстояние между соплом и камерой смешения, длина камеры смешения.

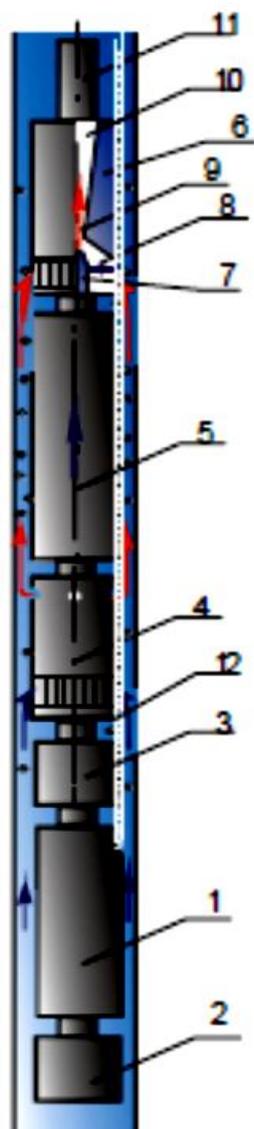
При выборе слишком длинных камер смешений возможна потеря кинетической энергии и, как следствие, ухудшение напорной характеристики насоса.

При неправильном выборе расстояния между соплом и камерой смешения возможна также потеря кинетической энергии рабочего потока, что может ухудшить кавитационную устойчивость насоса, снизить его характеристики.

Сопло рекомендуется короткого конического дизайна для снижения потерь давления на трение при истечении высокоскоростной струи. Согласно экспериментальным данным получено оптимальное расстояние между соплом и горлом камеры смешения как Sp/D_{th} в диапазоне 0,5-2 для предотвращения кавитации, однако рекомендуемое значение – 1.

Длина камеры смешения рекомендуется $L/D_{th}=8$ для общего промышленного гидроструйного насоса, однако эффективность предложенного насоса может быть улучшена в дальнейшем за счет изменения длины камеры смешения.

3.3 Расчетно-экспериментальное моделирование и исследование режимов работы виртуальной модели комбинированной насосной установки



5.

При откачке скважинной жидкости комбинированной насосной установкой важное значение имеет место расположения эжектора по отношению к ЭЦН и устью скважины. При этом струйный насос призван увеличить общий КПД и производительность всей комбинированной системы за счет подкачки дополнительного объема жидкости из межтрубного пространства.

Конструкция комбинированной насосной системы обычно требует проектирования совместной работы на пересечении рабочих кривых двух насосов и, конечно, включение потерь на трение в соответствующем подъемнике.

Комбинированная струйная насосная система включает в себя струйный аппарат 6 в компоновке с ЭЦН 5 (рисунок 3.4). Струйный насос 6 монтируется в напорной колонне над ЭЦН 5. В некоторых случаях, не исключена возможность установки струйного насоса на несколько метров выше ЭЦН 5 для снижения противодействия

жидкости в колонне НКТ 11 на работу струйного насоса 6.

Насос 5 приводится в действие погружным электродвигателем 1, оборудованным гидрозащитой (компенсатор 2 и протектор 3). Питание подводится к электродвигателю по кабелю 12. Отличие от эксплуатации серийными установками ЭЦН 5 состоит в наличии струйного насоса 6, расположенного над секциями центробежного насоса в составе насосно-эжекторной системы. Над струйным насосом возможна установка сбивного и обратного клапанов.

(1–погружной электродвигатель; 2–компенсатор; 3–протектор; 4–приемный модуль; 5–ЭЦН; 6–струйный насос; 7–сопло; 8–обратный клапан; 9–камера смешения; 10–диффузор; 11–НКТ; 12–кабельная линия)

Рисунок 3.4 - Схема комбинированной насосно-эжекторной системы

При эксплуатации системы продукция из скважины поступает в ЭЦН через приёмный модуль 4 и далее нагнетается в сопло эжектора – струйного насоса. Рабочая жидкость, истекая через сопло с высокой скоростью, подсасывает жидкость из затрубного пространства скважины в приемную камеру струйного насоса.

В условиях месторождения для ликвидации фонтанирования скважин по затрубному пространству, а также для повышения уровней отбора жидкости, целесообразно использование комбинированной установки с расположением струйного аппарата ниже динамического уровня.

Далее приведены основные расчетные этапы при моделировании системы «пласт-УЭЦН-струйный насос».

3.3.1 Потенциал откачной скважины. Соотношение забойного давления с дебитом откачной скважины (индикаторная диаграмма) является основным инструментом для оценки потенциала скважин.

Для однофазного потока индикаторная диаграмма определяется законом Дарси для радиального притока флюида в скважину:

$$Q = K_{\text{пр}}(P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}) \quad (3.16)$$

На практике, проведение прямого замера пластового и забойного давлений осложнено необходимостью остановки скважин и проведения гидродинамических исследований. В тоже время основным инструментом для оценки работы скважины зачастую являются данные о замеренном уровне скважины: статическом (при остановленной скважине) и динамическом (при работающей насосной установке). С учетом этого при постоянной плотности откачиваемой жидкости (т.е. отсутствии газа), данное выражение может быть представлено в следующем виде:

$$Q = K'_{\text{пр}} \rho g (H_{\text{дин}} - H_{\text{ст}}) \quad (3.17)$$

Типичная индикаторная диаграмма при использовании данных о динамическом уровне представлена на рисунке 3.5.

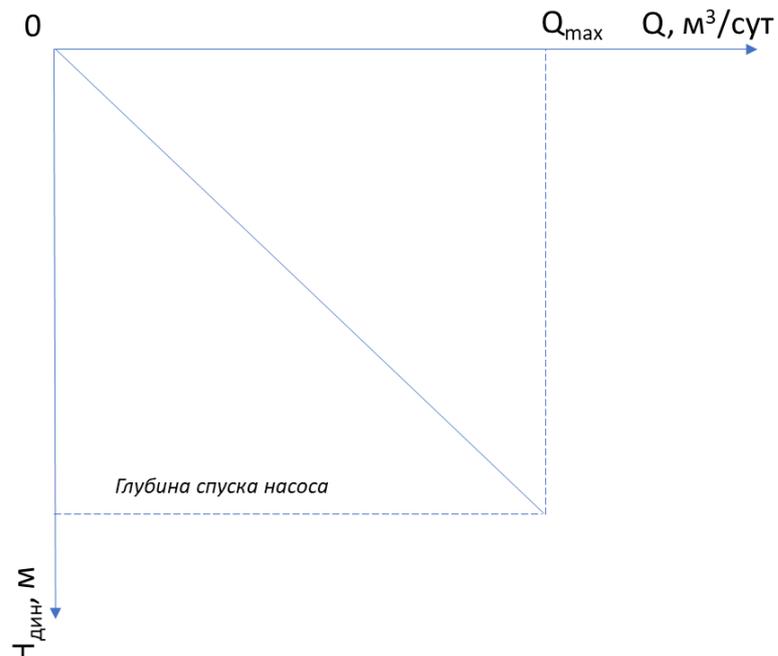


Рисунок 3.5 Индикаторная кривая откачной скважины

Стоит отметить, что дебит скважины ограничен определенным значением Q_{\max} , которое зависит от ряда параметров. $K'_{\text{пр}}$ определяет угол наклона индикаторной кривой и напрямую влияет на максимальную производительность скважины.

3.3.2 Техническая характеристика УЭЦН. Установки погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН) предназначены для откачки жидкостей из скважин. Компоненты, входящие в состав установки, описаны выше.

Основными параметрами УЭЦН являются подачи и напор. Под напором понимается максимальная высота, на которую насос может поднять жидкость (Н, м) или давление, которое способен развить насос, выраженное в метрах столба жидкости. Подача – объем жидкости, перекачиваемой насосом за определенный промежуток времени.

Отличительной особенностью является переменная подача и напор в зависимости от частоты вращения. Обычно характеристика УЭЦН приводится в паспортных данных для частоты 50 Гц, при стандартных условиях и плотности жидкости (вода) 1000 кг/м^3 (рисунок 3.6).

При этом возможно определение напора и подачи УЭЦН при изменении частоты:

$$q_1 = q_n \left(\frac{F}{50} \right) \quad (3.18)$$

$$h_1 = h_n \left(\frac{F}{50} \right)^2 \quad (3.19)$$

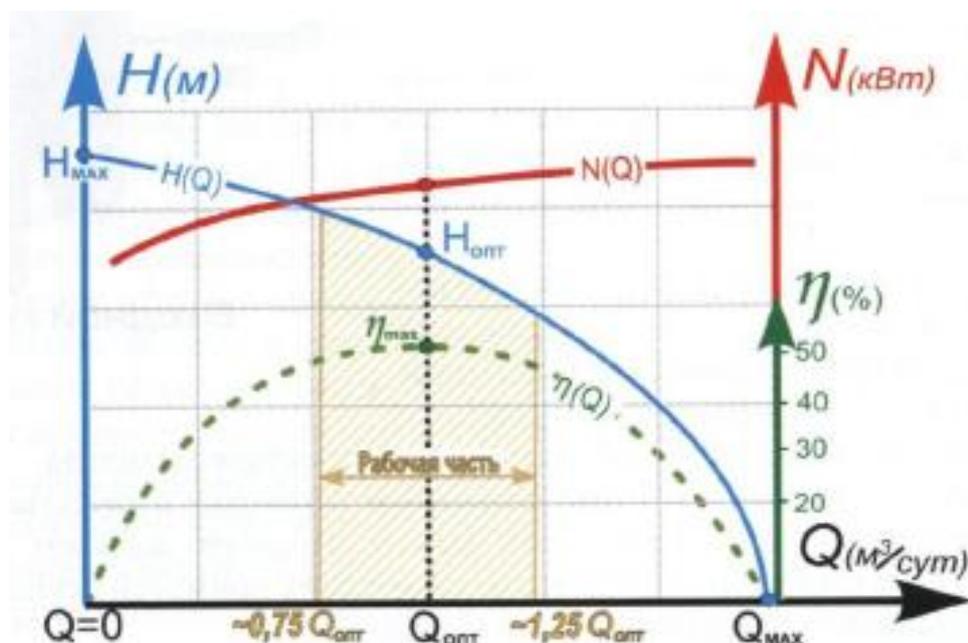


Рисунок 3.6 Напорная характеристика $H(Q)$ УЭЦН

3.4 Методика расчетно-экспериментального моделирования комбинированной насосной установки с применением программного комплекса MAPLE

3.4.1 Методика и алгоритм расчетов комбинированной установки. Эффективная эксплуатация откачных скважин комбинированными струйными насосными установками может быть достигнута только в случае согласованной работы УЭЦН, струйного насоса и пласта.

Производительность струйного насос является функцией основных характеристик:

- геометрические параметры;
- давления и подачи рабочей жидкости, поступающей из выкида УЭЦН;
- давления инжестируемой жидкости в затрубном пространстве на глубине установки струйного насоса (т.е. от динамического уровня);
- давление на выкиде струйного насоса.

Основной целью расчета комбинированной насосной установки является нахождение оптимальной геометрии насоса, которая обеспечит согласованную работу «пласт-УЭЦН-струйный насос» в согласованном режиме.

Подача комбинированной установки рассчитывается как сумма подач УЭЦН и струйного насос, равная проектному дебиту откачной скважины. Расчет производится для выбранного типоразмера УЭЦН, характеристики которого известны.

Далее приведены пошаговые инструкции при расчете струйного насоса, работающего совместно с УЭЦН в откачной скважине.

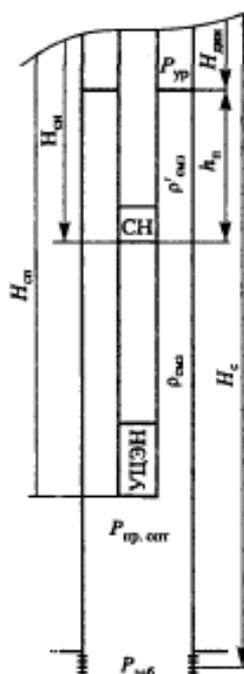


Рисунок 3.7 Схема расчета комбинированного струйного насоса

1) Определение давления на выкиде УЭЦН и производительности при данной частоте.

$$q_1 = q_n \left(\frac{Hz}{50} \right); \quad (3.20)$$

$$P_i = \rho g h_n \left(\frac{Hz}{50} \right)^2. \quad (3.21)$$

На основе (3.20) - (3.21) можно построить напорную характеристику УЭЦН для заданной частоты, а также рассчитать давление и напор установки в рабочей точке при различной частоте.

2) Определение давления на приеме струйного насоса

$$P_s = (H_{\text{насоса}} - H_{\text{дин}}) \rho g. \quad (3.22)$$

3) Определение давления на выкиде струйного насоса

$$P_d = TDH + H_{\text{дин}} \rho g \quad (3.23)$$

4) Определение теоретического параметра N , характеризующего струйный насос

$$N = \frac{(P_d - P_s)}{(P_i - P_d)} \quad (3.24)$$

5) Определение оптимального коэффициента эжекции для диапазона значений параметра b путем дифференцирования и приравнивания нулю уравнение (3.12) и определение соответствующего данной точке КПД. При этом расчет производить для $b=0,1 \dots 0,9$.

6) Определение кавитации для разного соотношения площадей сопла и камеры смешения по уравнению (3.15).

7) Расчет кавитационной устойчивости струйного насоса для каждого варианта параметра b :

$$CR = \frac{M_L - M_{op}}{M_{op}} \cdot 100\% \quad (3.25)$$

8) На основе расчетов, проведенных на этапе 5-7 выбрать оптимальное значение параметра b , вывести полученное значение КПД, оптимального коэффициента эжекции.

9) Определение диаметра сопла:

$$A_n = \frac{q_1}{v_n} = q_1 \frac{1}{\frac{2(P_i - P_s)}{\rho(1 + K_{nz})}} \quad (3.26)$$

$$D_n = \left(A_n \cdot \frac{4}{\pi} \right)^2 \quad (3.27)$$

10) Определение диаметра камеры смешения на основе этапа 8-9.

11) Расстояние между соплом и камерой смешения принимается равным D_{th} .

12) Длина камеры смешения принимается равной:

$$L = 8D_{th} \quad (3.28)$$

13) Проверка скважинных условий (потенциала скважины) для работы комбинированной установки.

Для расчета потенциала скважины необходимо хотя бы одно замеренное значение дебита скважин и соответствующего ему статического и динамического уровней. На основе замера выводится коэффициент продуктивности скважины ($\text{м}^3/\text{сут}/\text{Мпа}$):

$$K'_{np} = \frac{Q_{test}}{9.81(DL_{test} - DL_{static})\rho 10^{-6}} \quad (3.29)$$

Далее рассчитывается ожидаемый динамический уровень при работе комбинированной насосной установки:

$$DL_{op} = \frac{q_1 + q_2}{K_{np} 9.81\rho} + DL_{static} \cdot \quad (3.30)$$

14) Этапы 2-13 повторяются с учетом полученного ожидаемого динамического уровня системы.

4 Разработка стенда для имитационного моделирования струйной насосной установки

4.1 Принципиальная схема стенда

Для успешной реализации этих процессов необходимо знать действительные напорные и энергетические характеристики жидкостно-газовых эжекторов. К настоящему времени имеется довольно большое число опубликованных исследований в этом направлении /1–6/, однако многие особенности работы струйных аппаратов для технологий эксплуатации таких систем остаются неясными.

В связи с этим в КазНИТУ им.К.И.Сатпаева был разработан экспериментальный стенд для исследования характеристик различных жидкостных эжекторов. Экспериментальная установка (рис.4.1, 4.2) содержит бак 1 для жидкости, полочный гравитационный сепаратор 5, подпорный электроцентробежный насос 2, электроцентробежный насос 4, исследуемый струйный аппарат 3, систему распределительных трубопроводов, регулировочных вентилей и задвижек – 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, а также контрольно-измерительную аппаратуру. Последняя включает в себя расходомеры жидкости (13,14,15), датчики давления и температуры.

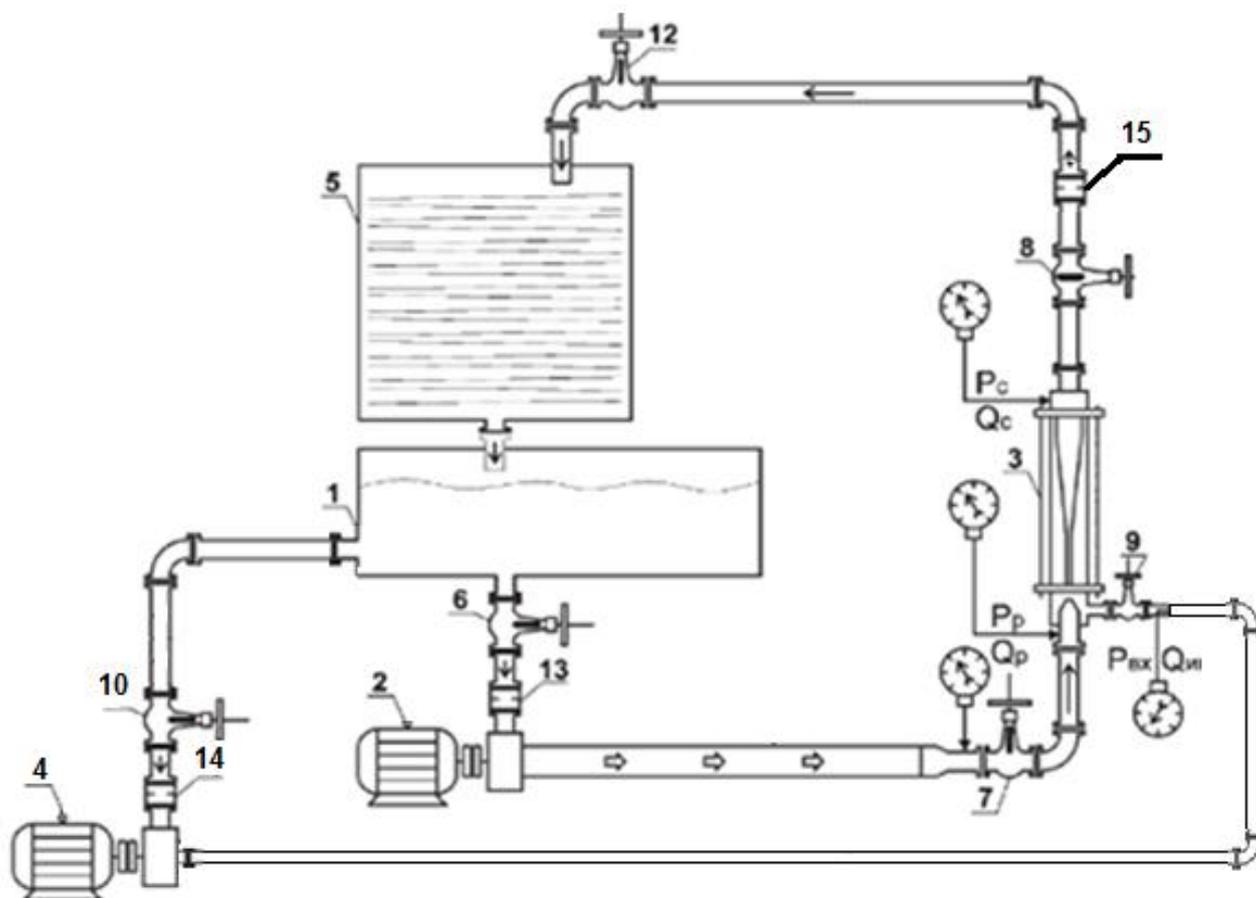


Рисунок 4.1 Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования характеристик струйных аппаратов

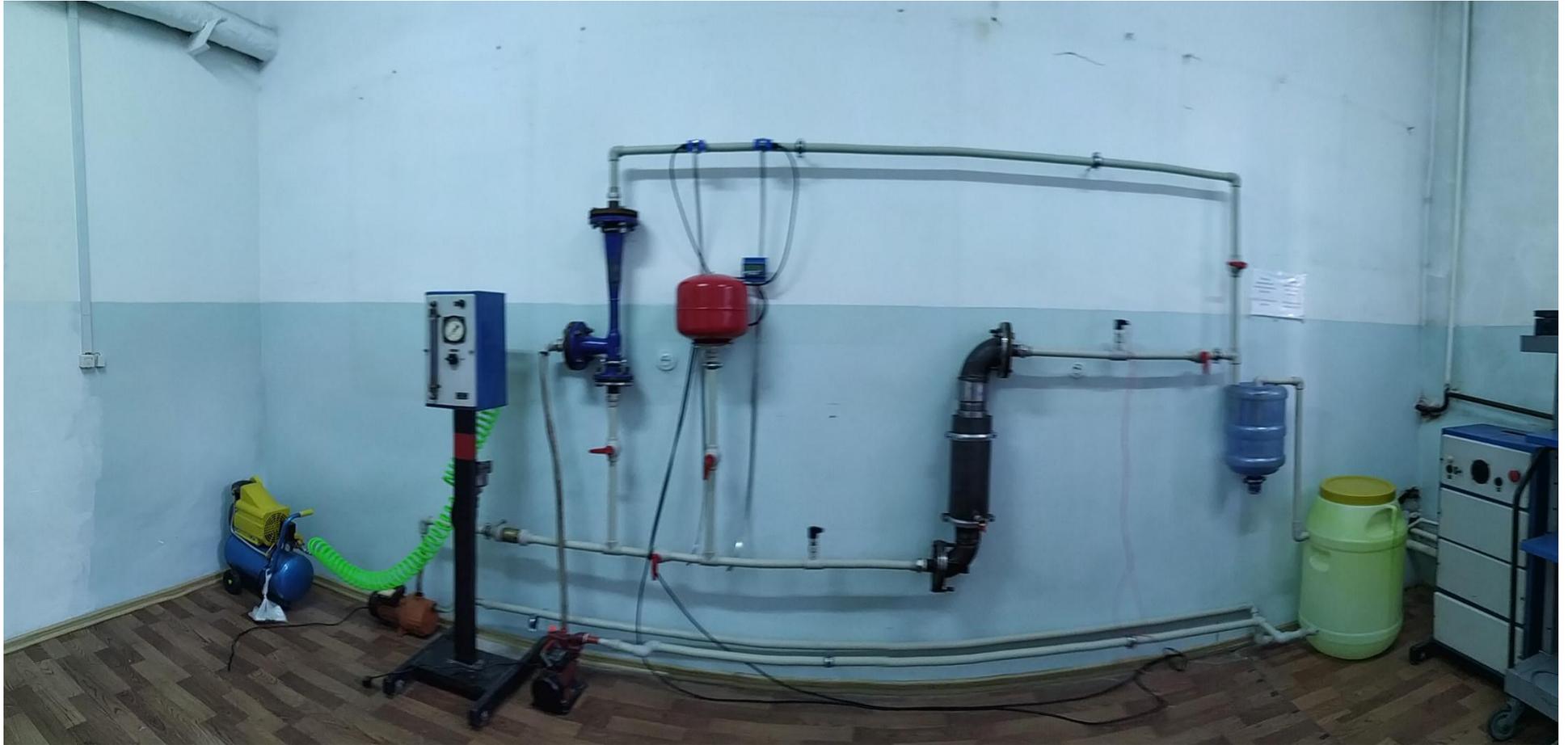


Рисунок 4.2 Панорама стенда

Также в состав экспериментальной установки включен напорный центробежный регулируемый насос (4) для создания избыточного давления воды в приемной камере струйного аппарата. Жидкость из бака 1 поступает на прием подпорного насоса 2. Далее рабочая жидкость поступает в сопло струйного аппарата 3 и инжектирует жидкость, подаваемую из бака 1 под давлением 0,15...0,2 МПа (рис. 4.3).

а)



б)

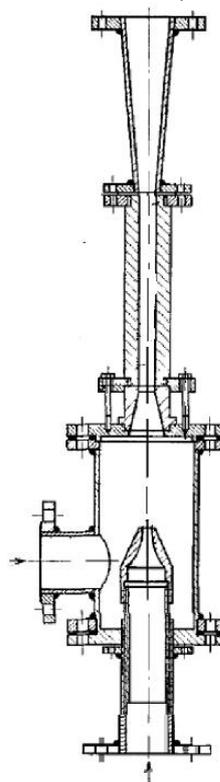


Рисунок 4.3 Струйный насос (а) и разрез разборной модели струйного аппарата (б)

Для определения расхода рабочей жидкости (Q_p), нагнетаемой в сопло и расход инжектируемой (Q_i), расходной составляющей использован ультразвуковой расходомер TUF-2000M (рис.4.4) разработанный для измерений скорости движения жидкости в закрытых трубопроводах. Расходомер TUF-2000M использует два приёмных датчика, которые оба функционируют как ультразвуковой передатчик и приёмник. Эти устройства крепятся на внешней стороне герметичного трубопровода на установленном расстоянии друг от друга. Датчики (преобразователи) могут быть установлены методом V (V-метод), когда звук пересекает трубопровод дважды, или W методом (W-метод), когда звук пересекает трубопровод четырежды, или Z методом (Z-метод), когда преобразователи устанавливаются на трубопроводе в точности один напротив другого и звук пересекает трубу единожды.



Рисунок 4.4 Установка ультразвукового расходомера TUF-2000M.

Тарировку расходомера воды определяем по перепаду давлений на сопле Вентури, устанавливаемой в линии сброса. Предельная относительная погрешность измерения расхода воды соплом Вентури составляет 1,56%.

Давления перед рабочим соплом струйного аппарата (P_p), на выходе из его диффузора (P_c) и в приемной камере эжектора ($P_{вх}$) измеряются цифровыми и манометрическими датчиками давления. Различные по подаче и давлению режимы работы создаются посредством регулирующих задвижек и вентилях.



Рисунок 4.5 Общий вид бака и гравитационного сепаратора



Рисунок 4.6 Насос для подачи эжектируемой жидкости



Рисунок 4.7 Подпорный насос



Рисунок 4.8 Струйный аппарат



Рисунок 4.9 Обратный клапан

4.2 Аппаратурное оформление стенда

4.2.1 *Ультразвуковой расходомер TUF-2000M.* Ультразвуковой расходомер TUF-2000M (рис.4.10) разработан для измерений скорости движения жидкости в закрытых трубопроводах. Приёмные датчики не контактные, зажимного (скобяного) типа, что несёт в себе множество преимуществ работы при гарантии отсутствия неполадок и неисправностей, а также возможности лёгкого монтажа прибора на объект.

Расходомер TUF-2000M использует два приёмных датчика, которые оба функционируют как ультразвуковой передатчик и приёмник. Эти устройства крепятся на внешней стороне герметичного трубопровода на установленном расстоянии друг от друга. Датчики (преобразователи) могут быть установлены методом V (V-метод), когда звук пересекает трубопровод дважды, или W методом (W-метод), когда звук пересекает трубопровод четырежды, или Z методом (Z-метод), когда преобразователи устанавливаются на трубопроводе в точности один напротив другого и звук пересекает трубу единожды. Выбор метода установки преобразователей зависит от типа трубопровода и характеристик измеряемой жидкости.



Рисунок 4.10 Комплект расходомера TUF-2000M

Принцип работы. Измерения скорости выполняются по принципу временных измерений частотно модулированного выброса и отклика акустической энергии между двумя преобразователями.

Технические характеристики

- Скорость потока: -30...+30 м/с.
- Линейная погрешность: 0,5%.
- Погрешность: $\pm 1\%$; линейная погрешность: 0,5%; повторяемая ошибка: 0,2%.
- **Допустимый диаметр трубы:**
 - от DN15 до DN100 мм с датчиками TS2.
 - от DN50 до DN700 мм с датчиками TM1.
 - от DN50 до DN1000 мм с датчиками TM1-НТ.
- **Допустимый диапазон температур:**
 - от -30°C до +90 °C с датчиками TS2.

- от -30°C до +90 °С с датчиками ТМ1.
- от от -30°C до +160 °С с датчиками ТМ1-НТ.

- Противодействие интерференции: двойной сбалансированный сигнал различный в приемнике и сенсоре позволяет избежать интерференции.

- Интерфейс: изолированный выход RS-485, 2 изолированных выхода ОСТ, один изолированный вход 4...20 мА (двухпроводный), вход Pt100 (3-х проводной).

- Протоколы обмена данными: совместим с протоколами METER-BUS, MODBUS, расширенным протоколом FUJI и общим протоколом счетчиков воды.

4.2.2 Датчик давления MIDAS 0 - 10 бар JUMO. Этот датчик имеет компактные размеры в сочетании с долгим сроком службы. Точное измерение при стабильном режиме температуры. Возможные применения: компрессоры, автоматика зданий, грузовая техника.



Рисунок 4.11 Датчик давления

№	Преобразователь давления JUMO MIDAS S05	
1	Сенсор	из нерж. стали, пьезорезистивный
2	Верхние пределы измерений	от 0,6 до 100 бар (отн. давление) от 1 до 40 бар (абс. давление).
3	Выходной сигнал	4-20 мА, 0-10 V, 0.5-4.5V, 1- 5V, 1-6V
4	Конструктивное исполнение	компактное, IP 65, IP 67

Преобразователь давления JUMO MIDAS S05 предназначен для измерения относительного давления жидкостей и газов.

Основные технические характеристики

Сенсор: из нерж. стали пьезорезистивный принцип измерения

Диапазоны измерения: 0...1 / 1,6 / 2,5 / 4 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 60 / 100
-0,6...0,6 ; -1...0 / 1 / 0,6 / 3 / 5 / 9 / 15 / 24 бар (отн.
давления)
0...1 / 1,6 / 2,5 / 4 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 бар (абс.
давления)

Выходной сигнал: 4...20 мА, 0...10 V, 0.5...4.5V, 1...5V, 1...6V

Погрешность: ± 0,5%

Температура измеряемой среды: -40...+125°C

Температура окружающей среды: -40...+100°C или -40...+125°C

Конструктивное исполнение: компактный корпус

Подключение к процессу: штуцер с резьбой G 1/8 , G 1/4 , G 1/2" , 1/4"
18NPT, 7/16" - 20UNF

4.3 Выходные данные экспериментов

На основе полученных данных будут рассчитываться параметры, характеризующие эффективность работы струйного аппарата такие как:

- относительный перепад давления

$$\frac{dP_c}{dP_p} = \frac{P_c - P_{\text{ВХ}}}{P_p - P_{\text{ВХ}}} \quad (4.1)$$

- коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{ВХ}} \cdot U_{\text{И}}}{P_p - P_c} \cdot \ln \frac{P_c}{P_{\text{ВХ}}} \quad (4.2)$$

- коэффициент инъекции жидкости

$$U_{\text{ж}} = \frac{Q_{\text{И}}}{Q_{\text{п}}} \quad (4.3)$$

Затем для каждой конструкции струйного аппарата будут построены графики зависимости относительного перепада давления dP_c/dP_p и коэффициента полезного действия КПД от коэффициента инжекции струи.

При проведении подобных экспериментов необходимо учитывать, что давление жидкости в промышленных трубопроводах значительно выше атмосферного. Поэтому будут проведены эксперименты, когда в приемную камеру струйного аппарата вода будет подаваться под давлением 0,2...0,3 МПа.

На рис.4 представлены напорно-энергетические характеристики условного струйного аппарата при подаче воды в приемную камеру под давлением. Как показали результаты моделирования, создание дополнительного подпора в приемной камере струйного аппарата должно приводит к значительному росту его инжектирующей способности и КПД и расширению напорной характеристики струйного аппарата в область более высоких значений коэффициента инжекции.

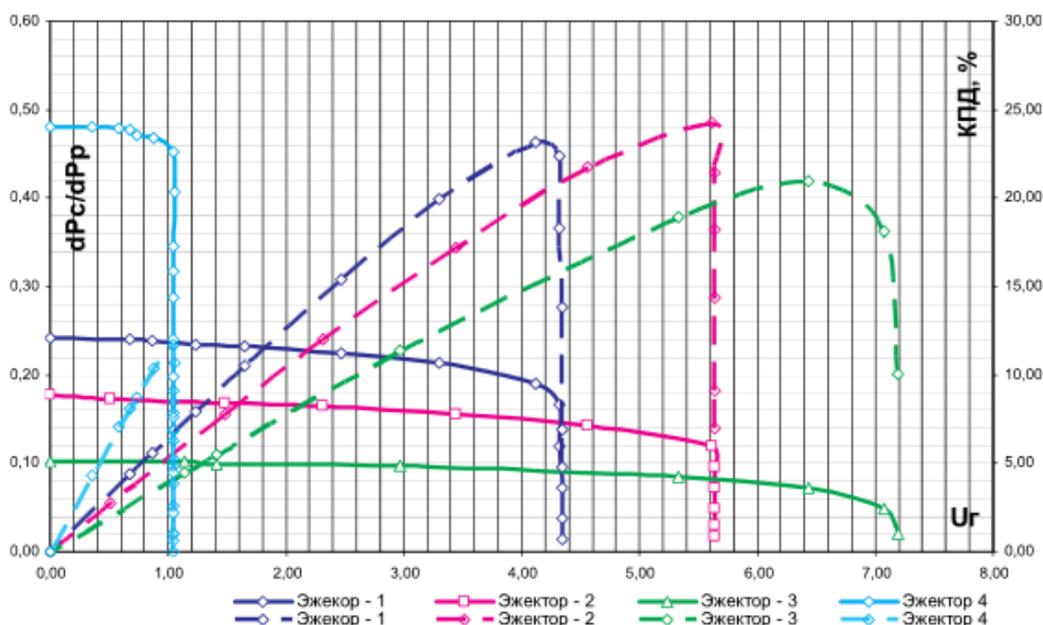


Рисунок 4.12 Напорно-энергетические характеристики условного струйного аппарата

Полученные характеристики могут быть использованы в методике подбора струйных аппаратов (в составе тандемных установок) к скважинам различного назначения.

5 Планирование экспериментов

В задачи исследований на данном этапе входило составить план экспериментов по определению параметров стенда и степени влияния каждого параметров на величину подпора.

Сравнительная оценка параметров позволит не только дать их оценку, но и выделить наиболее важные.

На работу струйного устройства влияют следующие параметры:

- подача Q_0 , м³/ч;
- давление в подпорной магистрали, МПа;
- внутренний диаметр сопла d_o , мм.;
- диаметр входа камеры смещения d_m .; мм
- длина камеры смещения, мм.;
- длина камеры конфузора, мм.

Эффективность влияния указанных параметров оценивается величиной подпора Δh , создаваемого эжекционным устройством.

Предварительный сравнительный анализ влияния указанных параметров на величину подпора Δh показывает, что оно неравнозначно. Так, подача Q и подпор Δh могут коррелировать в очень широких пределах при постоянных значениях диаметров входа в сопло d_m , диаметра d_k , диаметра d_o . *Во внимание также будут приниматься* изменение величины расстояний L и l и всех остальных параметров..

При проведении испытаний для выполнения замеров будут использованы следующие средства измерений:

- датчики давления MIDAS 0 - 10 бар JUMO (Сенсор: из нерж. стали, пьезорезистивный; верхние пределы измерений: от 0,6 до 100 бар (отн. давление) от 1 до 40 бар (абс. давление); выходной сигнал: 4-20 мА, 0-10 V, 0.5-4.5V, 1-5V, 1-6V; конструктивное исполнение: компактное, IP 65, IP 67);
- ультразвуковой расходомер ТЮФ -2000М;

Результаты выполненных замеров будут сведены в таблицу 5.

Таблица 5.1 Факторы экспериментов

Натуральные значения параметров	Факторы	Нижний уровень фактора - 1	Нулевое значение фактора 0	Верхний уровень фактора 1	Интервал 1
X_1	Подача Q_0 , м ³ /ч				
X_2	Давление в подпорной магистрали, МПа				

X ₃	Внутренний диаметр сопла d_o , мм				
X ₄	Диаметр входа камеры смещения d_m , мм				
X ₅	Длина камеры смещения, мм				
X ₆	Длина камеры конфузора, мм.				

Р

еа
ль
но
й
зад
ач

ей экспериментальных исследований является определение оптимальных параметров и геометрических размеров струйного насоса. Метод исследований - экспериментальный, параметр оптимизации - подпор Δh на выходе устройства в зависимости от изменяющихся параметров.

Задача оптимизации решалась методами теории планирования экспериментов. Интервалы варьирования определены по формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{x_i^B - x_i^H}{2} \quad (4.4)$$

где ε_n - натуральное значение интервала варьирования фактора; x_i^B, x_i^H - значения фактора на верхнем и нижнем уровне.

Для оценки влияния каждого из представленных выше факторов на выход процесса проведена группа экспериментов с определяющим контрастом $I = X_1 X_2 X_3 X_5 = X_1 X_2 X_4 X_6 = X_3 X_4 X_5 X_6$.

В таблице 2 представлена матрица планирования экспериментов, которые проводились для создания математической модели процесса активации потока воды в подводящей камере насоса. В нее включены основные параметры процесса: подача $Q(X_1)$, расстояние до входа в камеру смещения $L_1(X_2)$, **внутренний** диаметр сопла $d_o(X_3)$, диаметр камеры смещения $d_{kc}(X_4)$, длина камеры смещения $L_2(X_5)$, длина камеры конфузора (X_6).

Прикладной результат разработки в значении струйных устройств будет вытекать из результатов исследований, приведенных в таблице 2. Выход процесса на Δh_{cp} будет определяться сочетанием значений факторов и важно здесь не абсолютное значение подпора, а тенденция к его росту. Максимальное

значение выхода процесса наблюдается в том случае, когда все факторы находятся в эксперименте на верхнем уровне, В этом заключается основной смысл прикладного результата. Повышать эффективность установки можно по этому пути,

Таблица 5.2 Матрица планирования экспериментов

Опыты	Кодирование значений факторов						Выход процесса
	$X_1()$	$X_2()$	$X_3()$	$X_4()$	$X_5()$	$X_6()$	Δh_{cp}
1	1	+1	+1	+1	-1	-1	
2	-1	-1	-1	-1	+1	-1	
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
4	-1	-1	+1	+1	+1	+1	
5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	
6	+1	-1	-1	+1	+1	+1	
7	-1	+1	-1	+1	+1	+1	
8	+1	-1	-1	-1	-1	+1	
9	+1	+1	-1	+1	-1	-1	
10	-1	+1	-1	-1	-1	-1	
11	-1	-1	+1	-1	+1	+1	
12	+1	-1	+1	-1	+1	-1	
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	
14	+1	+1	-1	-1	+1	-1	
15	-1	+1	-1	-1	-1	+1	
16	+1	-1	+1	+1	-1	-1	

Полученные данные будут использованы для построения математической модели вида:

$$\Delta h = b_a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_6 x_6, \quad (4.5)$$

где b_a - остаточный член в уравнении регрессии, характеризующий средний выход процесса;

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ - коэффициенты регрессии, показывающие степень влияния факторов на выход процесса.

Коэффициенты регрессии определились по формуле:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_B x_{m, n} \quad (4.6)$$

где N — число вариантов в матрице планирования;

y_B - выход процесса в соответствующем эксперименте;

x_m - значения уровней факторов в соответствующем эксперименте.

По результатам вычисления значений коэффициентов будет построена ранжировочная кривая (рисунок 3), соответствующая уравнению:

$$\Delta h = b_a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6, \quad (4.7)$$

которая позволяет оценить предварительное влияние (в пределах изученного интервала варьирования) каждого фактора на величину подпора Δh . Она оценивается знаком и абсолютной величиной коэффициента регрессии данного фактора.

Ранжировочная кривая позволяет определить направление дальнейших исследований по улуч

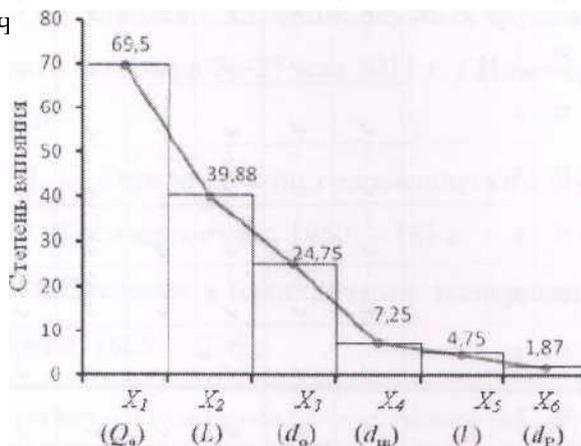
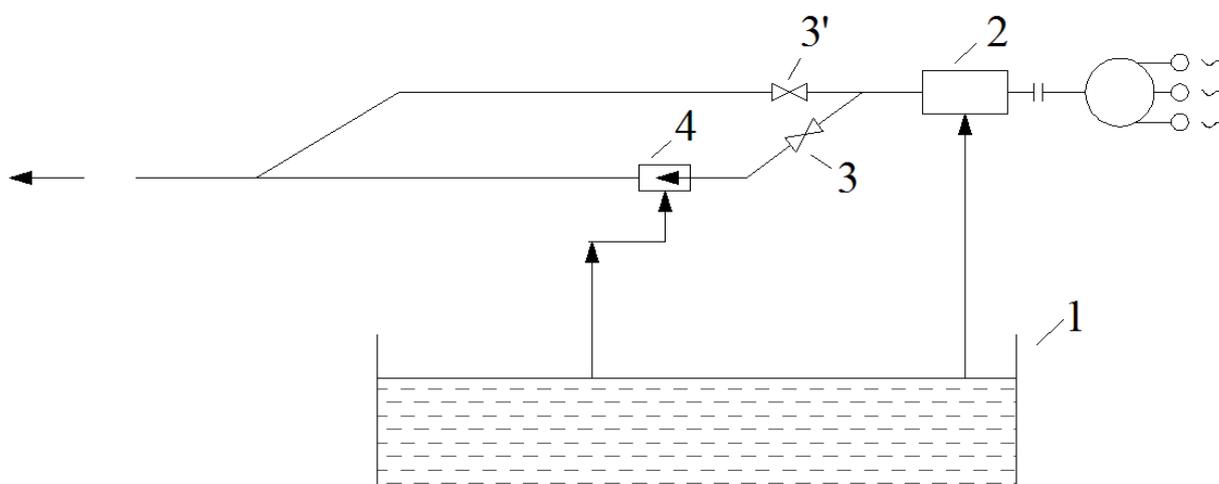


Рисунок 5.1 Образец ранжировочной кривой факторов

6. Некоторые результаты предварительных лабораторных экспериментов

Для предварительной оценки эффективности тандемной насосной установки был проведен лабораторный эксперимент по испытанию струйного насоса. На рисунке 6.1 приведена схема обвязки электроцентробежного и струйного насосов, образующих конструкцию гибридного насоса с большим диапазоном регулирования подачи жидкости. Конструкция струйного насоса позволяет оперативно менять положение высоконапорного сопла относительно диффузора, а также легко заменять ее на сопла различной конфигурации [3].



- 1 – емкость с жидкостью; 2 – электроцентробежный насос; 3, 3' – запорные вентили;
4 – струйный насос

Рисунок 6.1 Схема обвязки электроцентробежного и струйного насосов

Такая насосная установка имеет три основных режима работы:

- с подачей раствора менее производительности ЭЦН;
- с подачей равной производительности ЭЦН;
- с подачей превосходящей производительность ЭЦН.

При работе *на первом режиме* часть жидкости с выкида насоса можно сбрасывать в отстойник (на рисунке не показан).

При работе *на втором режиме* задвижка 3' открыта, а задвижка 3 на подаче к струйному аппарату закрыта. Насос работает в обычном режиме с номинальной подачей.

При работе *в третьем режиме* перекрывается задвижка 3', а задвижка 3 открывается. При этом в действие вступает струйный аппарат 4. Для обеспечения его быстрого срабатывания на линии их забора с отстойника

жидкости установлены обратные клапаны, которые предотвращают сброс жидкости из трубопроводов при отключении струйных насосов от линии подачи насоса.

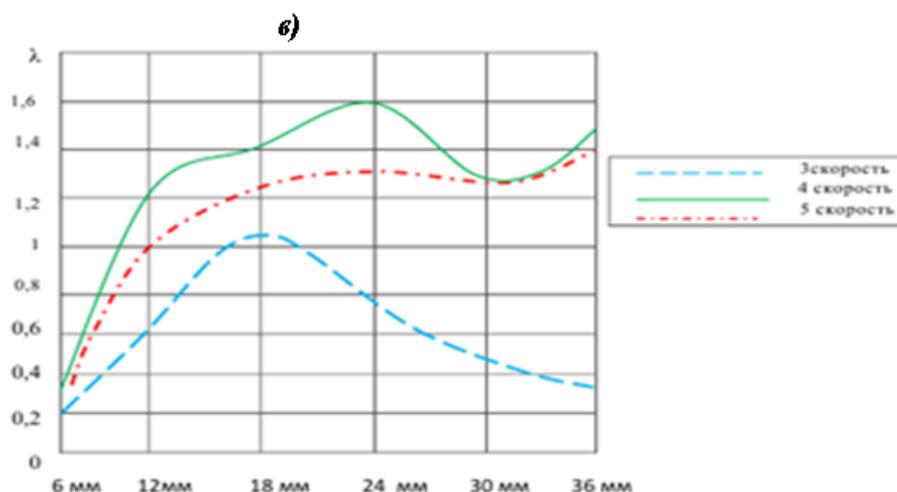
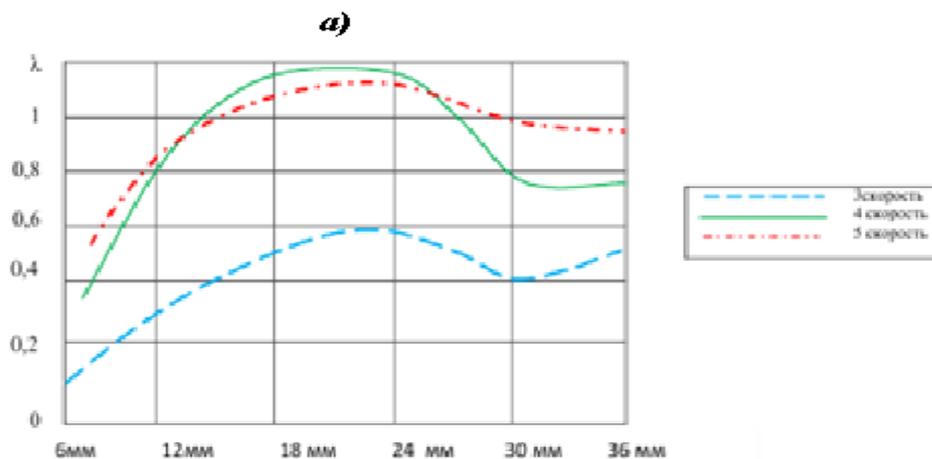
Во время проведения эксперимента расстояние выходного торца сопла до уреза входного канала диффузора изменялось в пределах 0 – 36мм с шагом 6мм, а подача рабочей жидкости менялась в диапазоне от 1 до 4,5 м³/ч с шагом 1,5м³/ч. Таким образом скорость вылета струи воды из сопла соответственно составляла 10,806; 18,870 и 32,258 м/с. Каждый шаг эксперимента дублировался троекратно для последующего усреднения результатов.

Оценка эффективности работы струйного насоса осуществлялась по значению коэффициента эжекции, определяемому по равенству [4,5]:

$$(6.1) \quad \lambda \approx Q_{\text{э}} / Q_{\text{н}}$$

где λ – коэффициент эжекции; $Q_{\text{э}}$ – объем эжектируемой жидкости; $Q_{\text{н}}$ – подача насоса.

Некоторые результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке *а* и *в*.



а- сопло с крестовым сечением; б- сопло с круглым сечением; в – сопло с тремя отверстиями

Рисунок 6.2 Графики влияния формы сечения и расстояния сопла от входной кромки диффузора на коэффициент эжекции

6.1 Анализ результатов эксперимента

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- на коэффициент эжекции оказывает существенное влияние конструкция выходного канала сопла. Максимальные значения получены при использовании сопла с тремя отверстиями. При этом создаются наиболее благоприятные условия смещения жидкостей за счет развитой поверхности высоконапорной струи. При увеличении количества отверстий до пяти λ снижается за счет образования на вылете практически одной сплошной струи;

- на эффективность работы струйного насоса заметное воздействие оказывает расстояние от выходного уреза сопла до уреза входного канала диффузора. Причем на всех режимах по мере роста скорости вылета рабочего потока λ имеет четко выраженный максимум, соответствующий оптимальному расстоянию;

- увеличение скорости вылета струи более 20 м/с дает эффект только в случае использования сопла с одним центральным отверстием (см. рисунок 6.2.б), но при этом $\lambda < 1$, тогда как при других конструкциях сопел $\lambda > 1$ при скорости истечения около 20 м/с (см. рисунок а и в);

- повышение коэффициента эжекции осуществляется практически линейно, что может быть использовано для разработки конструкций комбинированных насосов с плавным изменением подачи.

Таким образом, комбинирование струйных аппаратов с ЭЦН позволяет повысить эффективность процесса подачи жидкости за счет возможности варьирования подачи насосной установки в широких пределах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По материалам сбора, анализа и обобщения данных по технологии ПСВ при добыче урана и применяемого глубинно-насосного оборудования определены факторы влияющие на эффективность, надежность и ресурс работы глубиннонасосного оборудования.

Для создания действующей модели разработана методика расчета основных элементов и узлов модели струйного насоса в комбинации с погружным электроцентробежным. В результате расчетно-экспериментальных исследований и расчетного моделирования режимов работы комбинированной насосной установки с применением программного комплекса MAPLE определены рациональные параметры струйного насоса, обеспечивающие высокие эксплуатационные показатели, диапазон режимов, при которых есть вероятность кавитации жидкости в его элементах. В результате расчетного моделирования установлено, что КПД струйного насоса может составлять 33%, что достаточно высоко, при коэффициенте эжекции 1,35.

Для проверки достоверности расчетной модели разработана и изготовлена конструкция струйного насоса для состыковки с ЭЦН.

Разработан и изготовлен стенд для исследования характеристик погружных тандемных установок с комплектом КИП и регистрирующей аппаратуры для съема основных параметров установки.

Проведены лабораторные исследования по оценке работоспособности и эффективности комбинированной насосной установки, которые показали принципиальную возможность их применения на откачных скважинах в технологии подземного скважинного выщелачивания урана.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Петров Н.Н., Берикболов Б.Р., Аубакиров Х.В. и др. Урановые месторождения Казахстана: (экзогенные) // – 2-е изд. – Алматы, 2008. – 320 с.
2. Геотехнология металлов// Язиков В.Г., Рогов Е.И., Забазнов В.Д. и др. –Алматы, 2005. – 392 с.
3. Маркелов С.В. Физико-химические основы геотехнологии: учебное пособие. – М. : МГТУ, 2002. – 47 с.
4. Насосы Grundfos (Грюндфос). <http://stoky.kz/c/t/35/nasosy-grundfos-gryundfos.html>.
5. Смольников, С.В. и др. Методы защиты насосного оборудования для добычи нефти от механических примесей. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2010.– 41 с.
6. Шмидт, А.А. Повышение эффективности эксплуатации скважин, осложненных содержанием мехпримесей в продукции: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2007. – 25 с.
7. Латыпов, Б. М. Техническое обеспечение устойчивости работы штанговой винтовой насосной установки в малодебитных скважинах, осложненных пескопроявлением: автореф. дисс. ... канд.техн.наук. – Уфа, 2014. – 133 с.
8. Казаков, Д.П. Повышение эффективности эксплуатации скважин электроцентробежными насосами после гидравлического разрыва пласта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2010. – 26 с.
9. Шашкин, М.А. Применяемые в ТПП «Лангепаснефтегаз» методы защиты для снижения негативного влияния механических примесей на работу ГНО // Инженерная практика. 2010, № 2. С. 26 - 31.
10. Султанов Б.З., Орекешев С.С. Вопросы выноса песка в процессе эксплуатации нефтяных скважин // Электронный журнал «Нефтегазовое дело», 2005. - http://www.ogbus.ru/authors/Sultanov_1.pdf. – 13 с.
11. Султанов Б.З., Орекешев С.С. Проблемы добычи и внутрипромыслового транспорта нефти с высоким содержанием песка // Новоселовские чтения: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2004. – С. 45-47.
12. Соколов Е.Я., Зингер Н.Л. Струйные аппараты, М. : Энергоатомиздат, 1989.
13. Тищенко И.Т., Гумерский Х.Х., Марьенко В.П. Струйные насосы для добычи нефти. М. : Нефть и газ, 1996.
14. Вербицкий В.С., Грехов И.В., Деньгаев А.В. и др. Промысловые исследования насосно-эжекторных систем «Тандем» в ОАО «Юганскнефтегаз» //Нефтяное хозяйство. 2005г. <http://naukarus.com/promyslovyie-issledovaniya-nasosno-ezhektornyh-sistem-tandem-v-oao-yuganskneftegaz>
15. Дроздов А.Н., Вербицкий В.С., Деньгаев А.В. и др. Погружные насосы и насосно-эжекторные системы – новые возможности в

- нефтегазодобыче, нефтеотдаче и нефтегазосборе // Вестник НК «ЮКОС». – 2004. – № 10. – С. 3–9.
16. United States Patent № US 9, 027,654 B2 «Valve with shuttle». Inventor: Lawrence Osborne. Date of patent: may 12, 2015
17. Инструкция по управлению процессом гидроструйной эксплуатации скважин с использованием блока распределения, измерения и фильтрации//БРИФ-1-100-20-700-1-6-1-1. ОАО «ТНК-Нягань», 2012 г.
18. Патент США № US 9, 027,654 B2
19. Шерстюк А.Н., Анникова Ю.Н., Ермолаева Т.А. и др. Режим работы погружного центробежного насоса для добычи нефти // Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2005. - №8. - С.18-20.
20. Шерстюк А.Н., Петрова СВ., Хамидов Ш.М. Критерий эффективности ступени погружного нефтяного насоса// Химическое и нефтегазовое машиностроение – 2005. – X³. – 32 с.
21. Каменев, П.Н. Гидроэлеваторы в строительстве. – М. : Стройиздат, 1970. – 172 с.
22. Берман Л. Д., Ефимочкин Г.И. Методика расчета водоструйного эжектора. - Теплоэнергетика, 1964. - №8. С. 92-95.
23. Помазкова, З.С. Расчет струйных насосов к установкам для нефтяных скважин. – М. : ЦБТИ, 1961. – 66 с.
24. Шамаков Н.П., Дядин А.Н., Лабинский А.Ю. Двухфазные струйные аппараты. - Л. : Судостроение, 1989. – 240 с.
25. Берман Л. Д., Ефимочкин Г.И. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов. - Теплоэнергетика, 1964. - №7. С. 44-48.
26. Особенности насосной добычи нефти на месторождениях Западной Сибири / Уразаков К.Р., Багаутдинов Н.Я., Атнабаев З.М. и др. - М. : ВНИИОЭНГ, 1997. – 56 с.
27. Дроздов А.Н., Демьянова Л.А. Исследование работы струйного аппарата при различных длинах камеры смешения и эжектировании струей жидкости газожидкостной смеси// Нефтепромысловое дело, 1994. - №6. - С.4-7.
28. Дроздов А.Н., Мохов М.А., Осичева Л.В. Характеристики струйного аппарата с многоствольным соплом при откачке жидкости и газа// Нефтепромысловое дело, 1999. - №1. - С.25-26.
29. Cunningham, R.G. Jet Pump Theory and Performance with Fluids of High Viscosity. Proc. ASME (1957) 79. 1807-20.
30. Атнабаев, З.М. Совершенствование эксплуатации скважин установками электроцентробежных насосов с эжекторами на месторождениях Западной Сибири. Диссертация// - Уфа, 2007. – 106 с

Приложение А

Оттески опубликованных работ по теме диссертации

**ДӘСТҮРЛІ ПРОБЛЕМАЛАРДЫҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ
ШЕШІМДЕРІ: ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
СӘТБАЕВ ОҚУЛАРЫНЫҢ**

ЕҢБЕКТЕРІ

II Том

ТРУДЫ

**САТПАЕВСКИХ ЧТЕНИЙ
ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ТРАДИЦИОННЫХ ПРО-
БЛЕМ: ИНЖЕНЕРИЯ И ТЕХНОЛОГИИ**

Том II

PROCEEDINGS

**SATPAYEV'S READINGS
INNOVATIVE SOLUTIONS TO TRADITIONAL PROBLEMS:
ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

II volume

Алматы 2018 Almaty

1. Проектным предприятиям и поставщикам техники полнее учитывать требования потребителя;
2. Выявить отсутствие нужных моделей в выпускаемой линейке по грузоподъемности, вместимости кузова, мощности привода, скорости, тормозным характеристикам;
3. Учитывать изменение потребности в сырье и автосамосвалах при проектировании транспортных систем, в т.ч. с учётом развития горных работ;
4. Выполнять сравнение автомобильного транспорта с другими видами транспорта.

Литературы:

1. Карьерная техника ПО «БЕЛАЗ»: Справочник/Под ред. П.Л. Мариева, К.Ю. Анистратова.-М.:ООО «КА Технокомплект», 2005.
2. Коптев В.Ю. Обоснование выбора транспортных машин горных предприятий. Горная техника, Изд. Дом «Славутич», 2012г.-с.58-61.
3. Коптев В.Ю. Выбор наиболее эффективной модели карьерного автосамосвала /II Международная научно-практическая конференция «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении» / 16-17 апреля 2014, НМСУ «Горный», С-Пб, 2014. Т1, с.152-155
4. Котиков Ю.Г. Основы теории транспортных систем.- СПбГАСУ, СПб. 2000. Справочник по эксплуатационным характеристикам Caterpillar. CaterpillarInc., Пеория, шт. Иллинойс, США., вып. 42. 2012.
5. Кулешов А. А., Мариев П. Л., Егоров А. Н., Зырянов И. В. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы. СПб., 2004.

Ө.Е.Утегенова

Карьерлік самосвалдың тиімді үлгісін таңдау негіздемесі

Түйіндемесі. Бұл жұмыс мақсат самосвалдың таңдауында дөңгелекте арналған. Самосвал автомобильлік таңдаудың заманулы едістері мен тәсілдері қарастырылады және тиімділікті бағалаудың жаңа өлшемі ұсынылады.
Түйін сөздер: тиімділік, тау-кен борты, модель таңдау.

A.Utegenova

Justification of the choice of effective model of career dump

Summary. This work is devoted to justify the selection of career dump. Examines the current methods and approaches for the selection of the dump, and a new criterion for evaluating effectiveness.
Keywords: efficiency, mining dump truck, model selection.

УДК 621.527

А. Утянов, Е. Сарыбаев, С. Токтамбасова
 Научный руководитель – Б.А. Мырзахметов, профессор
 Казахский национальный исследовательский технический университет
 имени К.И.Сатпаева, Казахстан г. Алматы
myrzakhmetov_ba@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТКАЧКИ ПРОДУКТИВНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ПОДЗЕМНОМ СКВАЖИННОМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ НА ОСНОВЕ ОПЫТА СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ

Аннотация: На основании анализа проблем и практического опыта применения струйных насосных установок в нефтяной промышленности при скважинной добыче нефти с высоким содержанием механических примесей рассмотрены наиболее перспективные их компоновки с точки зрения их применения при откачке продуктивных растворов при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания. Показаны принципиальные возможности и варианты применения таких установок.

Ключевые слова: струйный насос, инжектор, сопло, диффузор, скважина, добыча нефти, добыча урана, тандемный насос, электроцентробежный насос.

Метод подземного выщелачивания некоторых полезных ископаемых получил широкое распространение, в частности, при добыче урана. При этом, технология откачки продуктивного раствора предусматривает применение погружных скважинных насосов, преимущественно, электроцентробежных. Как показал длительный опыт их применения на практике, они не обеспечивают достаточной надежности и ресурса работы.

Одним из неблагоприятных факторов эксплуатации скважинного насосного оборудования (СНО) на месторождениях является высокое содержание механических примесей в откачиваемой жидкости. Высокое содержание механических примесей, в частности песка, является одним из самых частых осложнений при откачке раствора. К примеру, более 30% всех отказов погружных насосов на месторождениях происходят именно из-за высокого пескопроявления. Все это приводит к росту накладных расходов на их обслуживание и ремонт, а также росту простоев скважин для проведения подземного ремонта по замене насоса [1,2,3].

Поэтому остро назрела необходимость совершенствования конструктивных и эксплуатационных параметров существующих, или поиска альтернативных способов добычи щелочных растворов. Для этого имеет смысл обратиться к большому опыту нефтедобывающих компаний, работа которых проводится в более осложненных условиях (большие глубины, высокая вязкость, повышенное содержание мехпримесей и газа и т.д.). На основании результатов различных исследований для борьбы с пескопроявлениями рекомендуются и успешно применяются как технологические, так и технические мероприятия [1,2,3].

В связи с этим в последние годы возрос интерес к разработке новых конструкций струйных насосов (СН) и их применению в технологических процессах и практике скважинной добычи жидкостей (особенно из малодобитных скважин). Особенно это преимущество струйных насосов проявляется в осложненных условиях эксплуатации, например, при добыче пластовой жидкости с большим содержанием механических примесей, коррозионно-активных веществ и из наклонно-направленных скважин. К их преимуществам относятся также простота конструкций, отсутствие движущихся деталей, высокая надежность, малые габариты, большая производительность [4].

Имеющиеся наработки и опыт применения струйных насосов в нефтяной промышленности с успехом могут быть применены и в уранодобывающей промышленности. К примеру, в нефтяной промышленности имеются ряд успешных разработок тандемных насосных установок для различных условий эксплуатации и апробированные на практике [4,5,6]. Однако, для применения струйных насосов для добычи раствора урана в классическом виде, имеются некоторые ограничения – нежелательность применения в качестве эжектирующей жидкости воды во избежание разубоживания раствора, трудности с монтажом двухрядного лифтового подъемника. Поэтому наиболее предпочтительным является применение в качестве высоконапорного иного агента кроме воды, который может быть легко отделен в последующем от раствора.

Во-первых, этим агентом может быть воздух. Во втором случае, этим агентом может быть непосредственно сам добываемый скважинный раствор. Воздух более предпочтителен с точки зрения простоты и безопасности применения компрессорных установок. В этом случае насосная установка будет представлять газоструйный инжектор. При работе такой установки может проявиться двойной эффект, когда газирование раствора в лифтовой трубе обеспечит необходимую разность плотностей и дополнительную подъемную силу (см. рисунок 1).

Во втором случае может быть применен известный своей эффективностью струйный насос, в котором часть добываемой скважинной жидкости будет служить эжектирующей. Схема пакерной гидроструйной насосной установки с наземным высоконапорным насосом приведена на рисунке 2 [5,6].

В обоих случаях подача высоконапорного агента (воздуха или жидкого раствора) осуществляется с наземных установок через НКТ или межтрубное пространство.

В первом варианте компримированный газ или воздух от наземной станции подается по насосно-компрессорной трубе в струйный насос, а смешанная с пластовой жидкостью раствор поднимается по межтрубному пространству на дневную поверхность. В последующем, происходит удаление газа в сепараторе.

Для повышения эффективности работы уже применяемых на месторождениях погружных скважинных электронасосов наиболее предпочтительным, на наш взгляд, является применение tandemных установок типа «УЭЦН + СН», которые с успехом были апробированы в нефтяной промышленности [4,6].

Это дает возможность увеличения отбора продукции из скважин, повышение КПД установки за счет прироста производительности установки, упрощение конструкции и повышение ее надежности за счет исключения варианта двухрядного подъемника, отпадает необходимость специальной подготовки рабочей жидкости и обслуживания поверхностного оборудования, отпадает необходимость в пакере.

Другим немаловажным преимуществом является автоматическая подстройка tandemных установок при изменении условий эксплуатации скважин (изменение пластового давления, свойств продукции, продуктивности скважин и др.), так как у ЭЦН и струйного насоса имеется прямая зависимость «напор - подача».

Применение tandemной установки позволяет увеличить суммарную подачу скважинной жидкости, что позволяет существенно расширить диапазон регулирования режима работы ЭЦН или использовать насос с меньшей подачей. Принципиальная компоновка tandemной насосной установки, включающая в себя ЭЦН+СН показана на рисунке 4.

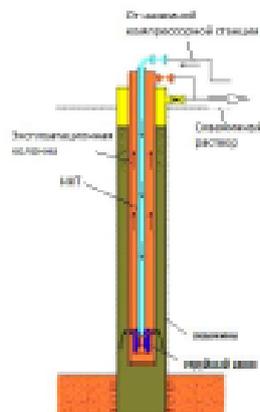


Рисунок 1 – Принципиальная схема газоструйного инжектора (струйного насоса) с наземным приводом

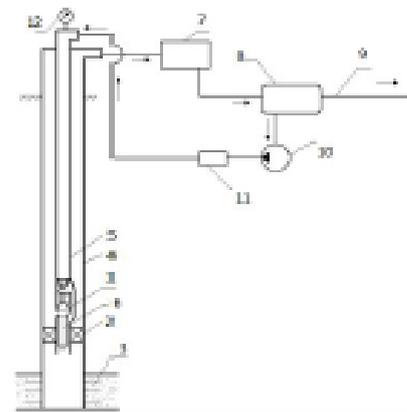


Рисунок 2 – Схема пакерной гидроструйной насосной установки

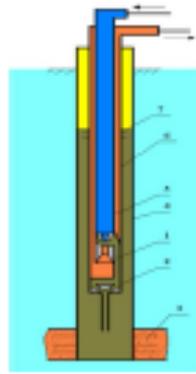


Рисунок 3 – Схема беспакерной гидроструйной насосной установки



Рисунок 4 – Принципиальная схема тандемной насосной установки «ЭЦН + СН»

Важно и то, что струйные насосы устойчиво работают при любом объемном расходе и содержании фаз в приемной камере или перед входом в нее. При повышенном содержании мехпримесей в скважинной жидкости часть ее будет проходить через СН, минуя ЭЦН, что также способствует повышению его ресурса работы.

Выводы. Таким образом, успехи разработки новых, более совершенных конструкций струйных насосов, а также практика их применения в нефтяной промышленности позволяют ставить вопрос их широкого применения и в уранодобывающей промышленности, где скважинные условия более всего подходят для этого - малые, по сравнению с нефтяными, глубины скважин и малая вязкость добываемого раствора. Выбор того или иного способа откачки продуктивного раствора будет определяться конкретными скважинными условиями.

Литературы:

1. Смольников С.В. и др. Методы защиты насосного оборудования для добычи нефти от механических примесей. Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. 41 с.
2. Шмидт А.А. Повышение эффективности эксплуатации скважин, осложненных содержанием мехпримесей в продукции: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2007. 25 с.
3. Султанов Б.З., Орекашев С.С. Вопросы выноса песка в процессе эксплуатации нефтяных скважин // Электронный журнал "Нефтегазовое дело", 2005. - http://www.ogbus.ru/authors/Sultanov_1.pdf - 13с.
4. Тищенко И.Т., Гумерский Х.Х., Марьенко В.П. Струйные насосы для добычи нефти. М.: Нефть и газ, 1996.
5. Вербилкий В.С., Грехов И.В., Деньгаев А.В. и др. Промысловые исследования насосно-эжекторных систем «Тандем» в ОАО «Юганскнефтегаз»//Нефтяное хозяйство. 2005г. <http://naukarus.com/promyslovyye-issledovaniya-nasosno-ezhektornyh-sistem-tandem-v-oao-yuganskneftegaz>
6. Дроздов А.Н., Вербилкий В.С., Деньгаев А.В. и др. Погружные насосы и насосно-эжекторные системы – новые возможности в нефтегазодобыче, нефтеотдаче и нефтегазосборе // Вестник НК «ЮКОС». – 2004. – № 10. – С. 3–9.

А. Утянов, Е. Сарыбаев, С. Токтамысова

Мұндай ұшғымаларың ендіру тәжірибесі негізінде жер асты ұшғымаларың ұшғымалы шаймаллау кезінде өнімді ерітінділерді айдаудың тиімділігін арттыру

Түбіндеме. Механикалық қоспалардың көп мөлшері бар ұшғымалы мұнай ендірісі жағдайында мұнай өнеркәсібінің реактивті сорғы қондырғыларың шаймаллаудағы проблемаларды жеңе практикалық тәжірибемі негізге ала отырып, жер асты ұшғымалы шаймаллау едісімен ұрақты ендіруде өнімді ерітінділерді қолдаму кезінде ең перспективалық әдрәстәру оларды қолдаму тұрғысынан қарастырылады. Мұндай қондырғылардың негізгі мұрақилдіктері мен қолдамыту түрлері көрсетіледі.

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – КЛЮЧ К УСПЕШНОМУ РЕШЕНИЮ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В РУДНОМ И НЕФТЕГАЗОВОМ
СЕКТОРАХ ЭКОНОМИКИ РК**

СӘТБАЕВ ОҚУЛАРЫНЫҢ

ЕҢБЕКТЕРІ

I Том

ТРУДЫ

САТПАЕВСКИХ ЧТЕНИЙ

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – КЛЮЧ К УСПЕШНОМУ РЕШЕНИЮ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В РУДНОМ И НЕФТЕГАЗОВОМ
СЕКТОРАХ ЭКОНОМИКИ РК**

Том I

PROCEEDINGS

SATPAYEV'S READINGS

**INNOVATIVE TECHNOLOGIES ARE THE KEY TO SUCCESSFUL SOLVING
FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS IN THE ORE AND OIL AND GAS
SECTORS OF THE ECONOMY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

I volume

Алматы 2019 Almaty

Утянов А., Бейсенов Б., Сарыбаев Е.

Научный руководитель – *Б.А. Мырзахметов, профессор кафедры ТМиО
НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им.
К.И.Сатпаева»*

*г.Алматы, ул.Сатпаева 22, Республика Казахстан
myrzakhmetov_ba@mail.ru*

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТАНДЕМНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Аннотация: *Статья посвящена обсуждению особенностей конструктивного исполнения стенда для исследования характеристик жидкостно-струйных аппаратов. Предложена принципиальная схема стенда. Описана аппаратная часть для измерения расходных составляющих рабочей и инжектируемой жидкости и давления. Представлены формы напорно-энергетических характеристик условного струйного аппарата.*

Ключевые слова: *стенд, опорный, струйный, аппарат, насос, трубопровод, бак.*

Для успешной реализации этих процессов необходимо знать действительные напорные и энергетические характеристики жидкостно-газовых эжекторов. К настоящему времени имеется довольно большое число опубликованных исследований в этом направлении [1–6], однако многие особенности работы струйных аппаратов для технологий эксплуатации таких систем остаются неясными.

В связи с этим в КазНТУ им.К.И.Сатпаева был разработан экспериментальный стенд для исследования характеристик различных жидкостных эжекторов. Экспериментальная установка (рис.1) содержит бак 1 для жидкости, полочный гравитационный сепаратор 5, опорный электроцентробежный насос 2, электроцентробежный насос 4, исследуемый струйный аппарат 3, систему распределительных трубопроводов, регулировочных вентилей и задвижек – 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, а также контрольно-измерительную аппаратуру. Последняя включает в себя расходомеры жидкости (13,14,15), датчики давления и температуры.

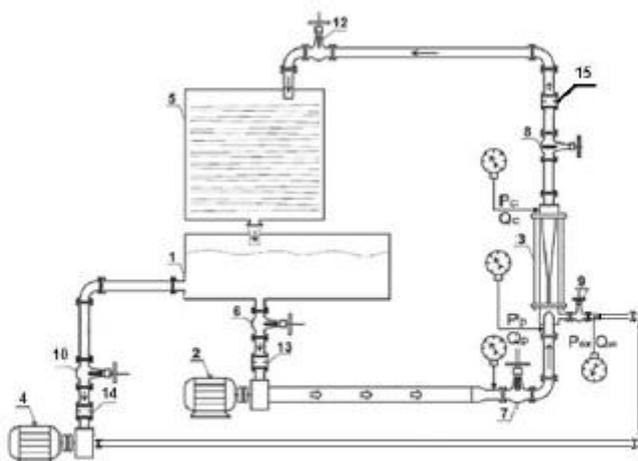


Рисунок 1 - Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования характеристик струйных аппаратов

Также в состав экспериментальной установки включен напорный центробежный регулируемый насос (4) для создания избыточного давления воды в приемной камере струйного аппарата. Жидкость из бака 1 поступает на прием подпорного насоса 2. Далее рабочая жидкость поступает в сопло струйного аппарата 3 и инжектирует жидкость, подаваемую из бака 1 под давлением 0,15...0,2 МПа (рис. 2).

Для определения расхода рабочей жидкости (Q_p), нагнетаемой в сопло и расход инжектируемой (Q_{inj}), расходной составляющей использован ультразвуковой расходомер TUF-2000M разработанный для измерений скорости движения жидкости в закрытых трубопроводах.

Расходомер TUF-2000M использует два приёмных датчика, которые оба функционируют как ультразвуковой передатчик и приёмник. Эти устройства крепятся на внешней стороне герметичного трубопровода на установленном расстоянии друг от друга. Датчики (преобразователи) могут быть установлены методом V (V-метод), когда звук пересекает трубопровод дважды, или W методом (W-метод), когда звук пересекает трубопровод четырежды, или Z методом (Z-метод), когда преобразователи устанавливаются на трубопроводе в точности один напротив другого и звук пересекает трубу единожды.

а)

б)

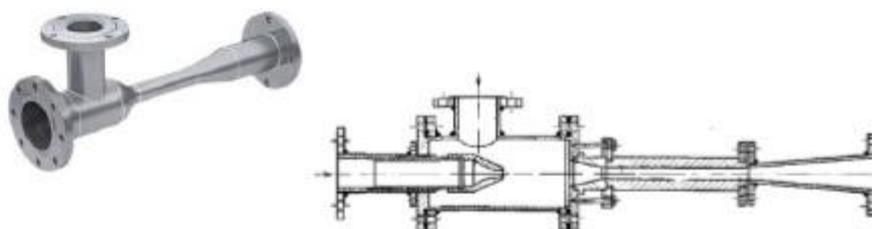


Рисунок 2 – Струйный насос (а) и разрез разборной модели струйного аппарата (б)

Тарировку расходомера воды определяем по перепаду давлений на сопле Вентури, устанавливаемой в линии сброса. Предельная относительная погрешность измерения расхода воды соплом Вентури составляет 1,56%.



Рисунок 3 - Ультразвуковой расходомер TUF-2000M.

Давления перед рабочим соплом струйного аппарата (P_p), на выходе из его диффузора (P_c) и в приемной камере эжектора ($P_{вх}$) измеряются цифровыми и манометрическими датчиками давления. Различные по подаче и давлению режимы работы создаются посредством регулирующих задвижек и вентиляей.

На основе полученных данных будут рассчитываться параметры, характеризующие эффективность работы струйного аппарата такие как:

- относительный перепад давления

$$\frac{dP_c}{dP_p} = \frac{P_c - P_{ex}}{P_p - P_{ex}} \quad (1)$$

- коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{ex} \cdot U_{II}}{P_p - P_c} \cdot \ln \frac{P_c}{P_{ex}} \quad (2)$$

- коэффициент инжекции жидкости

$$U_{ж} = \frac{Q_{II}}{Q_p} \quad (3)$$

Затем для каждой конструкции струйного аппарата будут построены графики зависимости относительного перепада давления dP_c/dP_p и коэффициента полезного действия КПД от коэффициента инжекции струи.

При проведении подобных экспериментов необходимо учитывать, что давление жидкости в промышленных трубопроводах значительно выше атмосферного. Поэтому будут проведены эксперименты, когда в приемную камеру струйного аппарата вода будет подаваться под давлением 0,2...0,3 МПа.

На рис.4 представлены напорно-энергетические характеристики условного струйного аппарата при подаче воды в приемную камеру под давлением.

Как показали результаты моделирования, создание дополнительного подпора в приемной камере струйного аппарата должно приводит к значительному росту его инжектирующей способности и КПД и расширению напорной характеристики струйного аппарата в область более высоких значений коэффициента инжекции.

Полученные характеристики могут быть использованы в методике подбора струйных аппаратов (в составе тандемных установок) к скважинам различного назначения

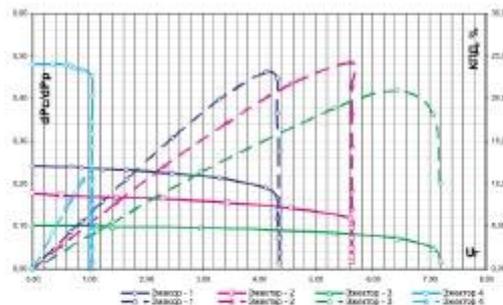


Рисунок 4 - Напорно-энергетические характеристики условного струйного аппарата

Литературы:

Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М. Энергоатомиздат, 1989. – 352с.

1. Солдатов А.М., Тимофеев А.И., Соколов Н.В. Расчет высоконапорного жидкостно-газового эжектора для приготовления двухфазных смесей. - В сб.: Нефтепромысловое дело. Бурение нефтяных и газовых скважин, добыча нефти, вып.2 - Куйбышев.: КПТИ, 1975. - с.143 - 149.

2. Детков В.П. Аэрированные суспензии для цементирования скважин. - М.: Недра, 1991. - 175 с.
3. Донец К.Г. Гидроприводные струйные компрессорные установки. - М.: Недра, 1990. - 174 с.
4. Дроздов А.Н. Обобщение характеристик жидкостно-газовых эжекторов. - Экспресс-информация, сер. Техника и технология добычи нефти и обустройство нефтяных месторождений. - М.: ВНИИОЭНГ, 1991, №9, с.18 - 22.
5. Технология и техника водогазового воздействия на нефтяные пласты / Дроздов А.Н., Егоров Ю.А., Телков В.П. и др. - Территория нефтегаз, 2006, № 2, с. 54-59, No 3, с. 48-51. - 2004. - №3.

А. Утянов, Б. Бейсенов, Е. Сарыбаев

Тандемді сорғы агрегаттарының сипаттамаларын зерттеуге арналған стенд

Аннотация. Мақала сұйық-ағынды аппараттардың сипаттамаларын зерттеу үшін стендті конструктивті орындау ерекшеліктерін талқылауға арналған. Стендтің принциптік схемасы ұсынылды. Жұмыс және инжекторланатын сұйықтың және қысымның Шығыс құрамдастарын өлшеуге арналған аппаратуралық бөлік сипатталған. Шартты ағыс аппаратының қысым-энергетикалық сипаттамаларының түрлері ұсынылған.

Түйін сөздер: стенд, тірек, ағын, аппарат, сорғы, құбыр, резервуар.

A Utyanov, B Muzahmetov, B Beisenov, E Sarybaev
Stand for research of characteristics of tandem pumping units

Abstract. The article discusses the features of the design of the stand for the study of the characteristics of liquid-jet devices. A schematic diagram of the stand is proposed. The instrument part for measuring the flow components of the working and injected fluid and pressure is described. The forms of pressure-energy characteristics of the conventional jet apparatus are presented.

Keywords: stand, retaining, jet, apparatus, pump, pipeline, tank.

УДК 669

Хайруллаев Н.Б., докторант

Абен Е.Х., кандидат технических наук, лектор,
Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, Казахстан, г. Алматы
khayrullaev.n@gmail

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛА

Аннотация: В работе сделан краткий анализ технических решений для повышения эффективности подземного скважинного выщелачивания воздействием тепловой энергии и их недостатки. В результате лабораторных экспериментов получена зависимость изменения во времени содержания условного металла в выщелачивающем растворе от температуры реакции. Установлено, что максимальные скорости выщелачивания наблюдаются в первоначальный момент взаимодействия серной кислоты с условным металлом. Для времени реакции 1 минута (60с) при температурах 35⁰, 50⁰ и 75⁰, эти значения составляют 0,0205 г/л, 0,0337 г/л и 0,0553 г/л. Т.е. увеличение температуры реакции с 35⁰С на 15⁰ приводит к росту скорости реакции в 1,64 раза, а на 40⁰ – в 2,7 раза. Если время реакции возрастет до 5 минут, то количество условного металла в растворе поднимается до 4 г/л и более, а содержание кислоты уменьшается с 10 г/л до 2,35 г/л. Скорость реакции, относящаяся к 5 минутам взаимодействия, будет расти в 1,084 раз (на 8,4%) при 50⁰С и в 1,218 раз (на 21,8%) при 75⁰С.

Ключевые слова: Подземное скважинное выщелачивание, время реакции, скорость выщелачивания, температура реакции, серная кислота, условный металл

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
(наименование вида работы)

Утянова Азамата Нурдаулетовиа
(Ф.И.О. обучающегося)

6М072400 – Технологические машины и оборудование
(шифр и наименование специальности)

На тему: Исследование и совершенствование эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок

Выполнено:

- а) графическая часть на 22 листах
б) пояснительная записка на 52 страницах

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности технологии откачки продуктивных растворов при подземном скважинном выщелачивании с применением комбинированных струйных насосных установок. Для этого на кафедре ТМиО был собран стенд для исследования параметров комбинированных струйных установок. Магистрант принимал активное участие в монтаже стенда, КИПиА и исследовании параметров работы струйной насосной установки, позволяющей имитировать реальные условия эксплуатации.

Определены факторы, влияющие на эффективность работы глубинно насосного оборудования, подобрана методика расчета основных элементов и узлов модели струйного насоса в комбинации с погружным электроцентробежным. При расчетно-экспериментальном моделировании применялся программный комплекс MAPLE, который предполагается использовать в дальнейшем.

В работе нет обоснования экономической эффективности применения тандем насосов в сравнении с погружными насосами, которые применяются в существующей технологии. Не ясно, на сколько эффективно схема, работающая на нефтяных скважинах будет так же хорошо работать и на откачных скважинах при подъеме продуктивного раствора при ПСВ.

Оценка работы

Работа выполнена с учетом норм и требований к написанию и оформлению работы, может быть допущена к защите и заслуживает оценки «хорошо».

Рецензент

Старший методист Филиала «Казakhstanский ядерный университет» ТОО «ИВТ»,
канд. техн. наук, доцент
(должность, ученая степень, звание)

Граф А.Ю. Ф. И.О.

(подпись)
« 2019 г.

Протокол анализа Отчета подобия Научным руководителем

Заявляю, что я ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Утянов Азамат Нурдаулетович

Название: Исследование и совершенствование эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок

Координатор: Бейбит Мырзахметов

Коэффициент подобия 1: 38,9

Коэффициент подобия 2: 12,7

Тревога: 12

После анализа Отчета подобия констатирую следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, признаю работу самостоятельной и допускаю ее к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, не допускаю работу к защите.

Обоснование:

По результатам проверки координации подсобных 1 и 2 не превышают допустимых значений, а обнаруженные в работе недостатки являются доброуведомленными в связи с тем, что работа выполняется самостоятельно.

29.05.2019

Дата



Подпись Научного руководителя

Протокол анализа Отчета подобия

заведующего кафедрой / начальника структурного подразделения

Заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения заявляет, что ознакомился(-ась) с Полным отчетом подобия, который был сгенерирован Системой выявления и предотвращения плагиата в отношении работы:

Автор: Утянов Азамат Нурдаулетович

Название: Исследование и совершенствование эксплуатационно-технических характеристик погружных тандемных насосных установок

Координатор: Бейбит Мырзахметов

Коэффициент подобия 1:38,9

Коэффициент подобия 2:12,7

Тревога:12

После анализа отчета подобия заведующий кафедрой / начальник структурного подразделения констатирует следующее:

- обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата. В связи с чем, работа признается самостоятельной и допускается к защите;
- обнаруженные в работе заимствования не обладают признаками плагиата, но их чрезмерное количество вызывает сомнения в отношении ценности работы по существу и отсутствием самостоятельности ее автора. В связи с чем, работа должна быть вновь отредактирована с целью ограничения заимствований;
- обнаруженные в работе заимствования являются недобросовестными и обладают признаками плагиата, или в ней содержатся преднамеренные искажения текста, указывающие на попытки сокрытия недобросовестных заимствований. В связи с чем, работа не допускается к защите.

Обоснование:

Обнаруженные в работе заимствования являются добросовестными и не обладают признаками плагиата.

29.05.19

Дата

Подпись заведующего кафедрой /

начальника структурного подразделения

