

Избор одговарајуће механичке методе

Анастасија Мирјанић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Избор одговарајуће механичке методе | Анастасија Мирјанић || 2024 ||

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008853>

Универзитет у Београду
Рударско-геолошки факултет



Завршни рад
Мастер академске студије

Избор одговарајуће механичке методе

Кандидат

Анастасија Мирјанић Р521/23

Ментор

Проф. др Душан Даниловић

Београд, септембар 2024.

Комисија:

1. Проф. Др. Душан Даниловић, ванредни професор, ментор

Рударско-геолошки факултет, Београд

2. Доц. Др. Мирослав Црногорац, доцент, члан

Рударско-геолошки факултет, Београд

3. Доц. Др. Александар Маџаревић, доцент, члан

Рударско-геолошки факултет, Београд

Датум одбране: _____

Резиме

Експлоатација нафте и гаса кључна је за задовољење глобалних енергетских потреба. Различите методе се користе за ефикасно вађење тих природних ресурса из земље. Механичке методе експлоатације, које укључују различите врсте пумпи и компресора, играју значајну улогу у овом процесу.

У нафтној индустрији, ефикасна експлоатација нафте и гаса зависи од избора одговарајуће технологије пумпања. Две од најраспрострањенијих технологија су дубинске пумпе са клипним шипкама (енгл. *Sucker rod pumps-SRP*) и електричне потапајуће пумпе (енгл. *Electrical submersible pump- ESP*).

Овај завршни рад ће пружити преглед механичких метода експлоатације, истражујући њихове технологије, предности и изазове, такође ће истражити техничке карактеристике, предности и недостатке ESP и SRP пумпи, како би се омогућило доношење информисаног избора за специфичне услове бушотина и како би се ближе објаснила студија случаја и разлози везани за замену ESP пумпе са SRP пумпом.

Кључне речи: *дубинске пумпе са клипним шипкама, замена, електрична потапајућа пумпа, производња, бушотина*

Садржај

1.	УВОД.....	1
2.	Дубинска пумпа са клипним шипкама (SRP).....	4
2.1	Компоненте система дубинске пумпе	5
2.2	Принцип рада дубинских пумпи са клипним шипкама	11
3.	Електрична потапајућа пумпа (ESP)	14
3.1	Анатомија ESP система.....	15
3.2	Принцип рада ESP система.....	23
4.	Избор механичке методе експлоатације: главне карактеристике и разлике између електричне потапајуће пумпе и дубинске пумпе	25
5.	Избор механичке методе експлоатације: могући разлози замене једне методе механичке експлоатације другом	27
6.	Студија случаја: избор одговарајуће механичке методе	29
6.1	Општи подаци о бушотини X-001.....	29
6.2	Опис проблематике.....	29
6.3	Задатак	31
6.4	Анализа рада електричне потапајуће пумпе (ESP) и дубинске пумпе (SRP) на бушотини X-001 помоћу програмских алата	32
6.5	Одговори на питања: Објашњење замене дубинске пумпе ESP пумпом и идентификација проблема ESP пуме на бушотини X-001	46
7.	ЗАКЉУЧАК.....	48
8.	Литература	49

1. УВОД

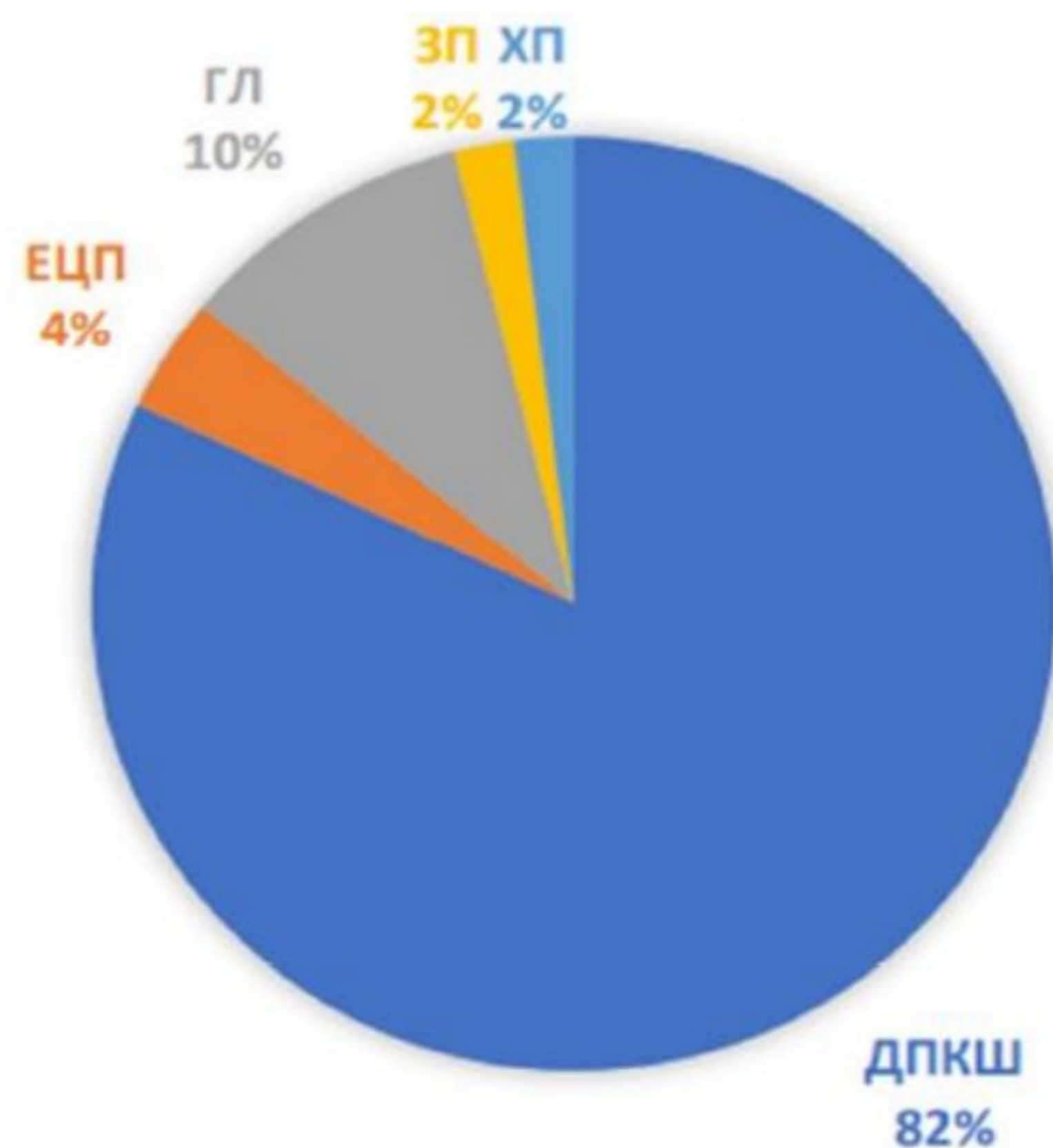
Са повећаном глобалном потражњом за енергијом и ограниченим новим резервама угљоводоника, одржавање постојећих нафтних бушотина постаје кључно за задовољење потреба тржишта. Механичка експлоатација игра виталну улогу у оптимизацији продуктивности исцрпљених бушотина и унапређењу производње у бушотинама које немају довољну лежишну енергију за изношење флуида на површину или да одрже економски одрживу производњу. (Flatern, 2015)

Када природна енергија лежишта није довољна да нафта или други флуиди стигну на површину, механичка експлоатација пружа решење. Ова метода подразумева коришћење вештачких средстава за повећање протока течности из бушотине. Основни принцип је додавање енергије унутар бушотине како би се створио потребан притисак на дну бушотине. Овим процесом се омогућава да лежиште производи нафту по жељеном нивоу. (Ugochukwu Pozurike Duru, 2021)

Иако постоји неколико метода механичке експлоатације, две главне категорије укључују систем пумпања и gas-lift. (Ladopoulos, 2020)

Што се тиче самих система пумпања, они обухватају дубинску пумпу (SRP), електричну потапајућу пумпу (ESP), вијчану пумпу (PCP), хидрауличне млазне пумпе (HJP) и плунжер пумпе (PP). (Ugochukwu Pozurike Duru, 2021) (Crnogoras, 2020)

На слици 1.1. процентуално је приказана примена механичких метода на глобалном нивоу, где дубинске пумпе са клипним шипкама имају учешће од 82%, гас лифт од 10% и дубинске електричне центрифугалне пумпе имају учешће од 4%. Хидрауличне и завојне пумпе су у примени заступљене са 2%. (Crnogoras, 2020)



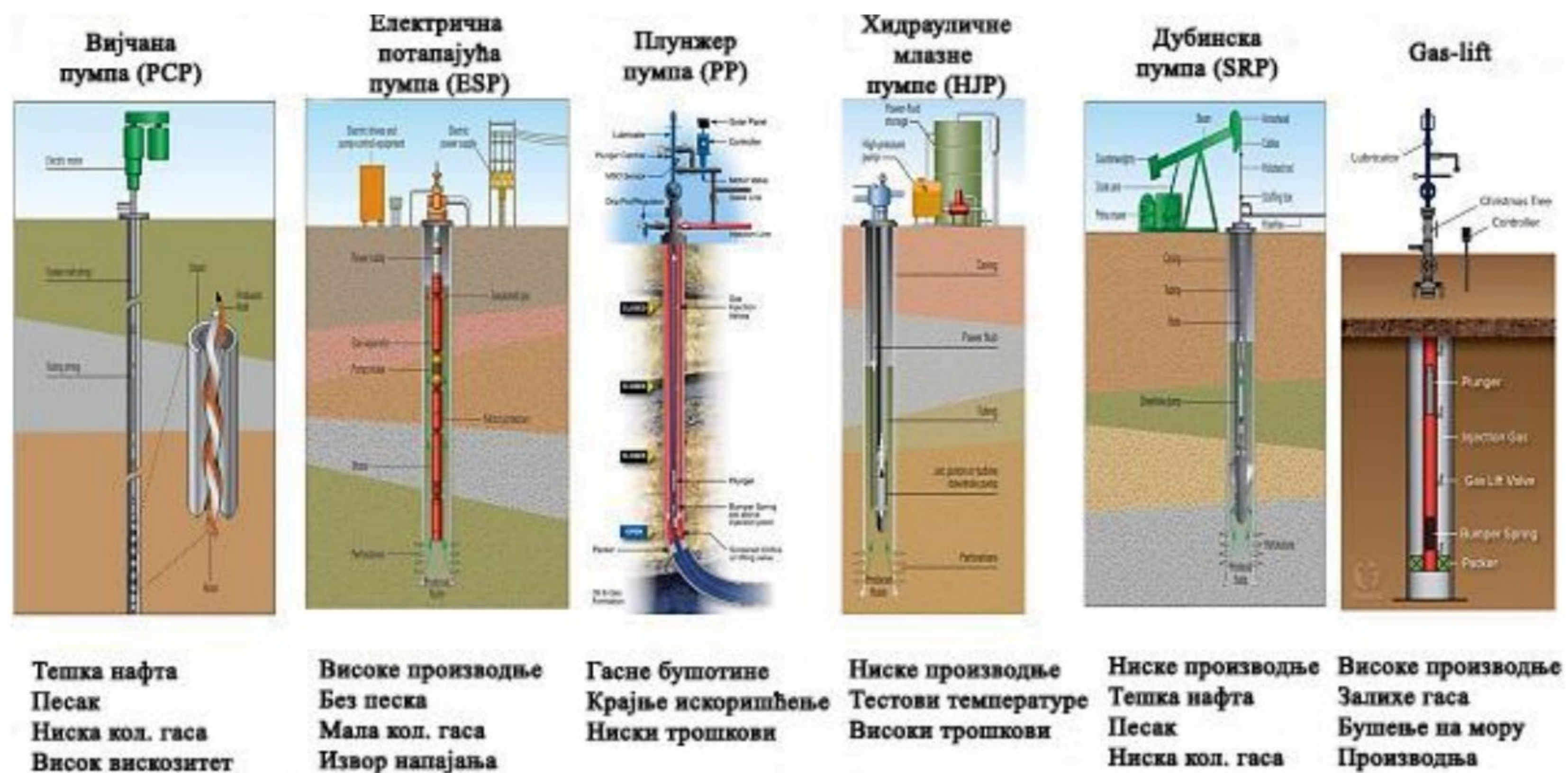
Слика 1.1 Заступљеност метода механичке експлоатације на глобалном нивоу (Crnogoras, 2020)

Механичка експлоатација има две основне сврхе:

1. **Побољшање производње у природно исцрпљеним бушотинама:** Овде се примењује за обнављање продуктивности бушотина које су изгубиле природни притисак и више не могу да производе на уобичајеном нивоу.
2. **Подршка и одржавање протока у активним бушотинама:** Чешће се користи за очување постојећег нивоа производње, осигуравајући да бушотина настави да функционише у оптималном и економски одрживом распону. (Okodi, 2017)

При избору система механичке експлоатације нафтних бушотина, инжењери морају узети у обзир бројне факторе, укључујући подземне услове, карактеристике резервоара, врсте флуида и оперативне аспекте. Одређивање најприкладнијег система зависи од различитих параметара као што су очекиване стопе производње, дубина лежишта, геометрија бушотине, конфигурација опремања и опрема на површини. Такође, важно је размотрити економске аспекте, укључујући трошкове опреме, инсталације и одржавања у односу на потенцијални поврат на инвестицију. (Akchay L. Pandit, 2015)

Када се утврди да је потребан систем механичке експлоатације, важно је изабрати врсту која најбоље одговара конкретним условима, као што је и приказано на слици 1.2. На пример, електричне потапајуће пумпе (ESP) и gas-lift системи су често погодни за бушотине на мору јер могу да подрже високе стопе производње и могу радити на великим дубинама. Ови системи су ефикасни у стабилним условима рада и пружају константну продуктивност. Са друге стране, системи са клипним пумпама (SRP) су обично најбољи избор за бушотине на копну. Иако захтевају више простора на површини, ове пумпе су поуздане, лако се одржавају и често представљају економичније решење у ситуацијама где је укупна цена инсталације и одржавања важан фактор. (Flatern, 2015) (Ugochukwu Iozurike Duru, 2021) (Akchay L. Pandit, 2015)



Слика 1.2. Највише коришћене механичке методе експлоатације и услови и подручја примене (Ugochukwu Iozurike Duru, 2021)

2. Дубинска пумпа са клипним шипкама (SRP)

Механички систем за производњу нафте дубинским пумпама са клипним шипкама (енгл. *Sucker rod pumps- SRP*) је најстарији и најзаступљенији начин подизања флуида из бушотина, користи се у више од 80% случајева широм света. Принцип рада дубинске пумпе заснива се на преносу енергије са површине до нивоа на којем је пумпа потопљена, помоћу механичког преноса преко клипних шипки. (Michael, 2022)

Током процеса извлачења нафте из бушотина дубинским пумпама са клипним шипкама, на подземне компоненте пумпе делују разне врсте сила:

- **Архимедова сила**, која смањује ефективну тежину клипних шипки;
- **Статичка сила која произлази из тежине клипних шипки**, узлазних цеви (тубинга) и стуба течности;
- **Еластична сила материјала клипних шипки и стуба течности**, услед њихове деформације под оптерећењем;
- **Силе инерције које се јављају током кретања** масе клипних шипки, клипа и стуба течности;
- **Силе трења**, које укључују:
 - Трење спојница клипних шипки о зидове тубинга и трење клипа о унутрашње зидове цилиндра дубинске пумпе;
 - Хидродинамичко трење између клипних шипки и течности;
 - Унутрашње трење у материјалу клипних шипки и тубинга, које се јавља услед њихове деформације при оптерећењу.

Величина сила при производњи нафте зависи од услова у бушотини и режима рада дубинских пумпи. Сила трења клипних шипки о зидове тубинга значајно је већа у закривљеним бушотинама у односу на вертикалне. Силе инерције се повећавају са већим бројем циклуса клипних шипки по минути. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Дубинске пумпе са клипним шипкама користе се у бушотинама дубине од 500 до 2500 метара, са капацитетом од 1 до 100 м³ течности дневно. Погодне

су за бушотине са ниским гасним фактором и стабилним продуктивним слојевима. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Због могућности рада при ниским лежишним притисцима, дубинске пумпе се често користе у бушотинама са нском продуктивношћу. Нископродуктивна бушотина је она која производи мале количине нафте или гаса и налази се у завршној фази свог економски исплативог животног циклуса. (Andrews, 2022)

У нашој пракси, овај систем заузима више од 50% бушотина, док 40% користи gas-lift, а 10% еруптивни систем. Предности су нижи почетни трошкови по бушотини, али су недостаци већи трошкови одржавања и чешћи ремонти (Michael, 2022). (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

2.1 Компоненте система дубинске пумпе

Систем дубинске пумпе (слика 2.1.) се састоји од:

1. Надземне опреме:

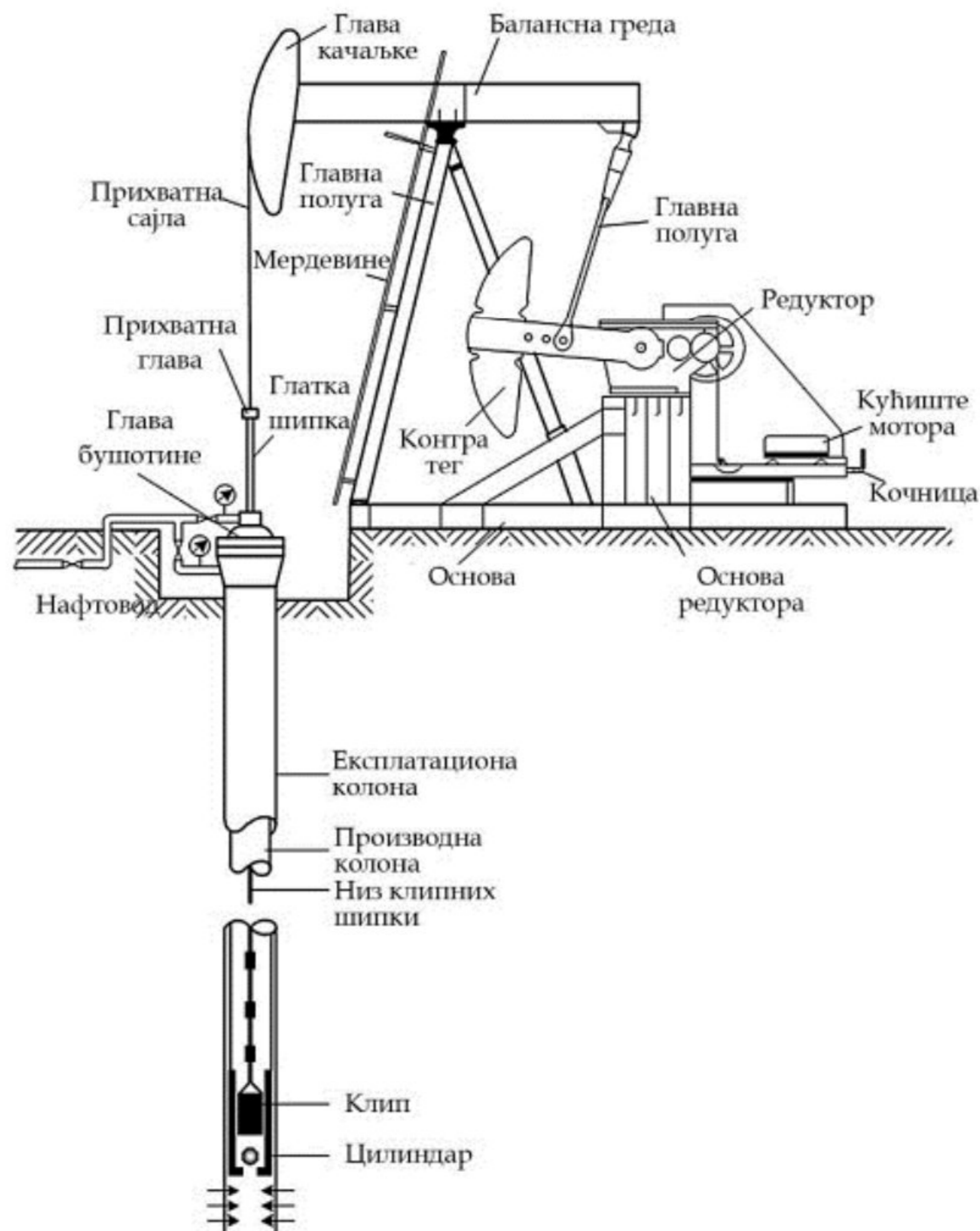
- Качаљка
- Редуктор
- Погонски мотор
- Глатка шипка
- Заптивна глава

2. Подземне опреме

- Пумпа
- Клипне шипке
- Тубинг

3. Додатна опрема

- Тубинг анкер
- Гасно сидро (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)



Слика 2.1. Делови дубинске пумпе (Срногорац, 2020)

Качаљка – Механизам који претвара ротационо кретање у осцилирајуће, омогућавајући клипним шипкама да се крећу горе-доле. Овај систем покреће рад пумпе и контролише њен радни циклус.

Редуктор – Смањује брзину ротације мотора и прилагођава је пумпи, омогућавајући ефикасно преношење енергије. Ово помаже у управљању брзином и моментом који је потребан за рад дубинске пумпе.

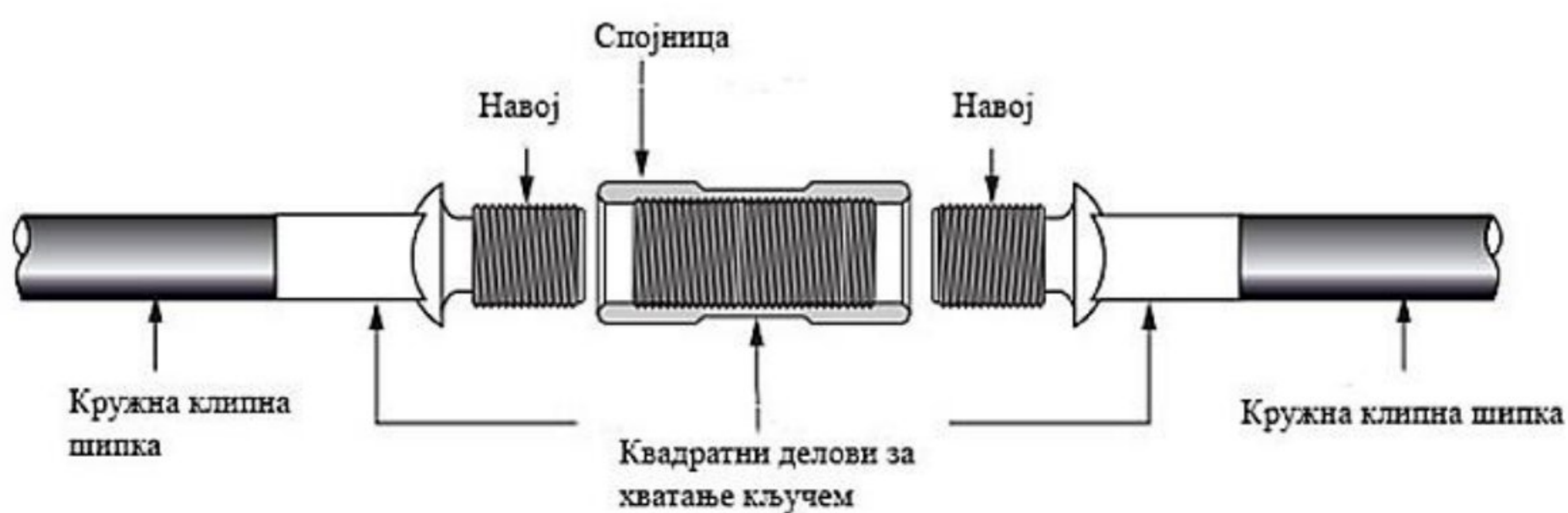
Погонски мотор – Обезбеђује енергију за целокупан систем, покрећући качаљку и остале делове пумпе. Мотор најчешће користи електричну енергију за одржавање континуираног рада.

Глатка шипка – Прецизно обрађена шипка која пролази кроз заптивну главу и преноси кретање са површинског механизма на клипне шипке. Њена глатка површина смањује трење и спречава хабање. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Заптивна глава – Поставља се на врх бушотине и служи за спречавање цурења флуида из бушотине. Заптива шипке и спречава губитак притиска у систему.

Пумпа – Главни део система који помоћу клипног механизма подиже течност из бушотине на површину. Њена конструкција укључује цилиндрице, клип и вентиле који регулишу проток течности.

Клипне шипке – Дугачке шипке које повезују површински механизам са клипом пумпе дубоко у бушотини. Њихово кретање омогућава пумпи да подиже течност из дубине. Слика 2.2. приказује спајање две клипне шипке помоћу спојница. (Andrews, 2022)

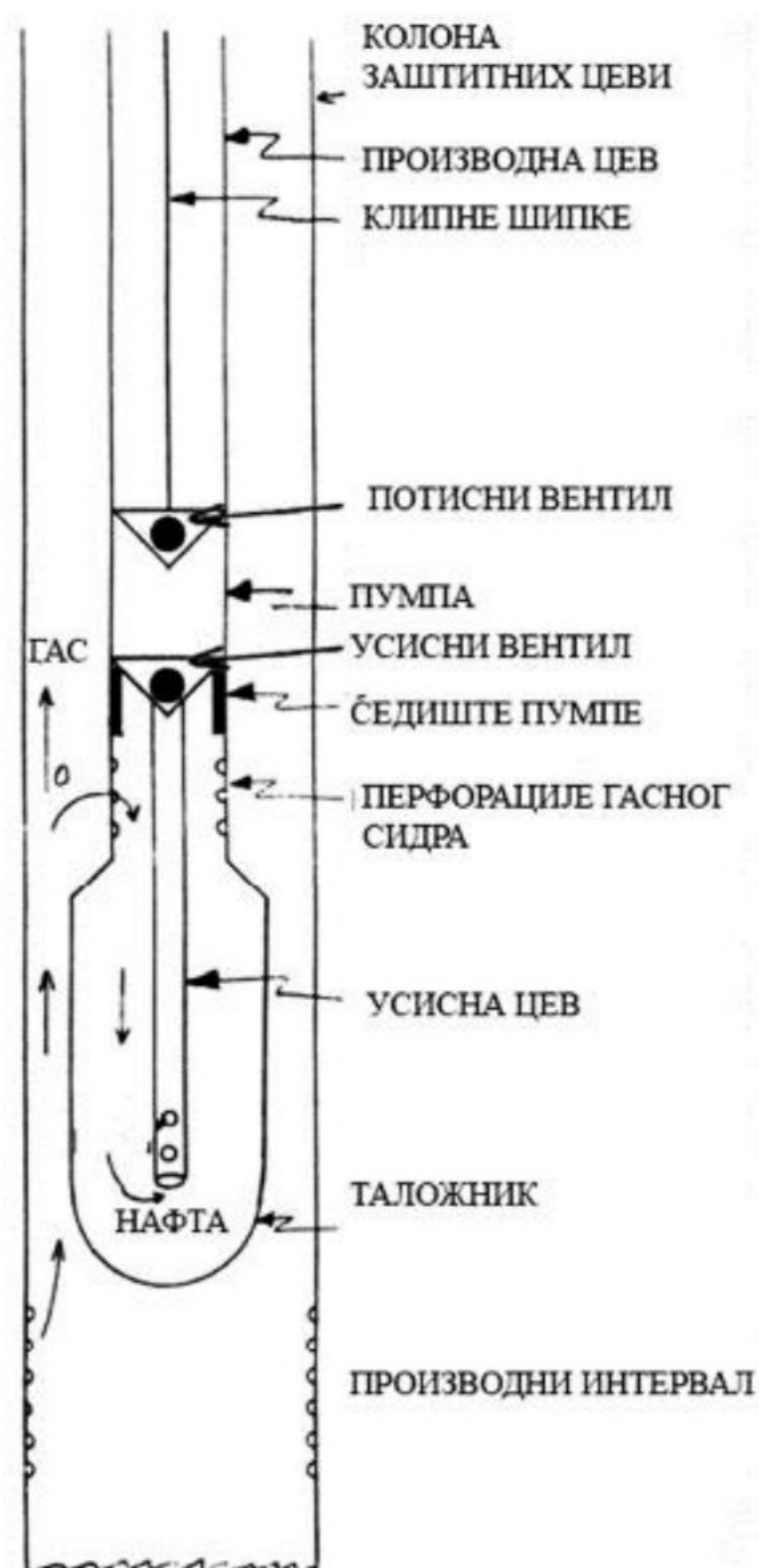


Слика 2.2. Скица спајања две клипне шипке помоћу спојница (Production Technology, 2005)

Тубинг – Цеви кроз које се произведена течност подиже из бушотине на површину. Тубинг обезбеђује сигуран и ефикасан пролаз флуида до површинских инсталација.

Тубинг анкер – Уређај који стабилизује тубинг и спречава његово кретање током пумпања. Помаже у одржавању правилног позиционирања тубинга у бушотини.

Гасно сидро – Уређај који служи за раздвајање гаса и течности у бушотини, спречавајући да гас уђе у пумпу. Ово побољшава ефикасност пумпања и смањује ризик од квара. (Sherif Fakher, 2021) На слици 2.3. је приказано гасно сидро.



Слика 2.3. Гасно сидро (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

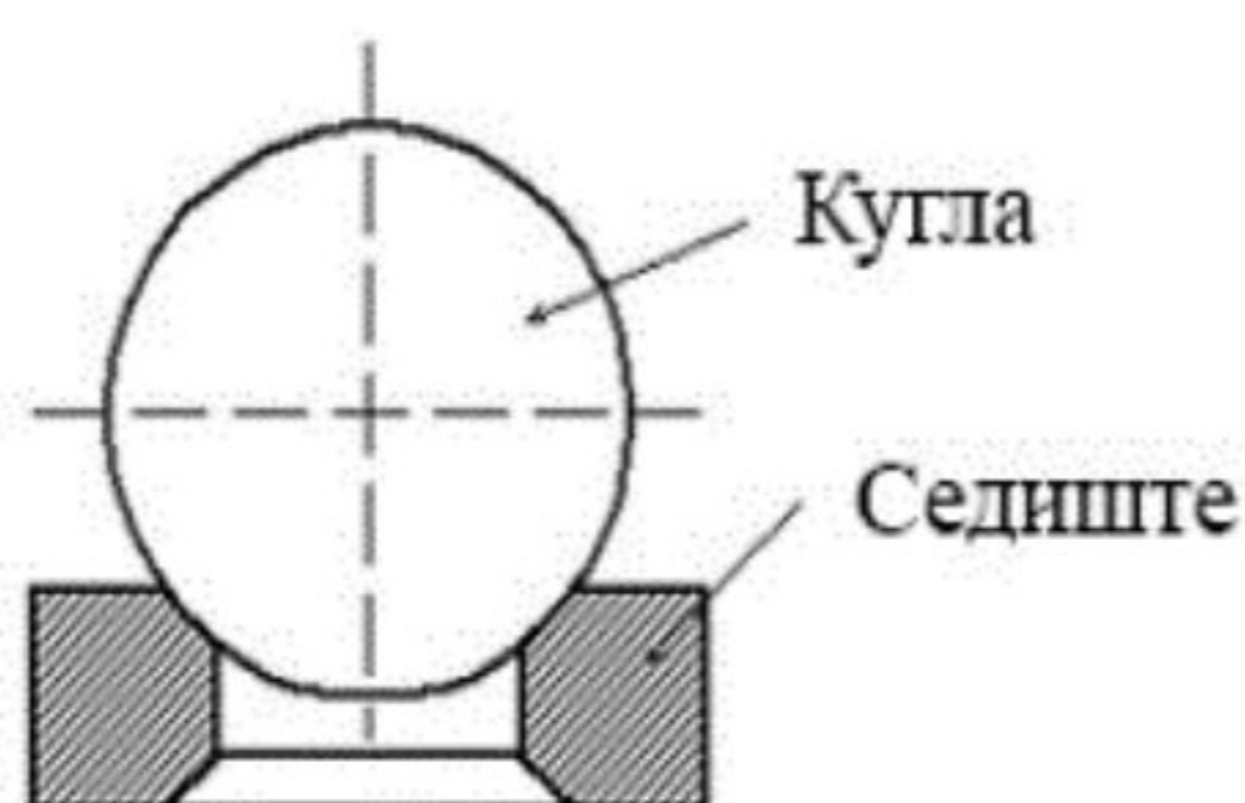
Дубинска пумпа (слика 2.4.) се састоји од неколико главних делова који омогућавају њен рад:

- **Цилиндар** – ово је главни део пумпе кроз који се клип креће горе-доле. Цилиндар обезбеђује простор у коме се пумпање течности одвија.
- **Клип** – клип се налази унутар цилиндра и његовим осцилирајућим кретањем горе-доле врши се подизање течности кроз систем. Клип је одговоран за стварање притиска који гура течност према површини.
- **Усисни вентил** – смештен је на доњем крају цилиндра и омогућава течности да уђе у пумпу током силазног хода клипа. Овај вентил се отвара под дејством разлике у притиску.

- **Излазни вентил** – налази се на доњем крају клипа и омогућава да се течност подигне током узлазног хода клипа. Када клип гура течност навише, овај вентил се отвара и омогућава да течност изађе из цилиндра у тубинг, а затим према површини. Изглед вентилског склоп пумпе приказан је на слици 2.5. API вентилски склопови су једноставни вентили који раде на принципу кугле и седишта. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)



Слика 2.4. Графички приказ дубинске тубинг пумпе (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)



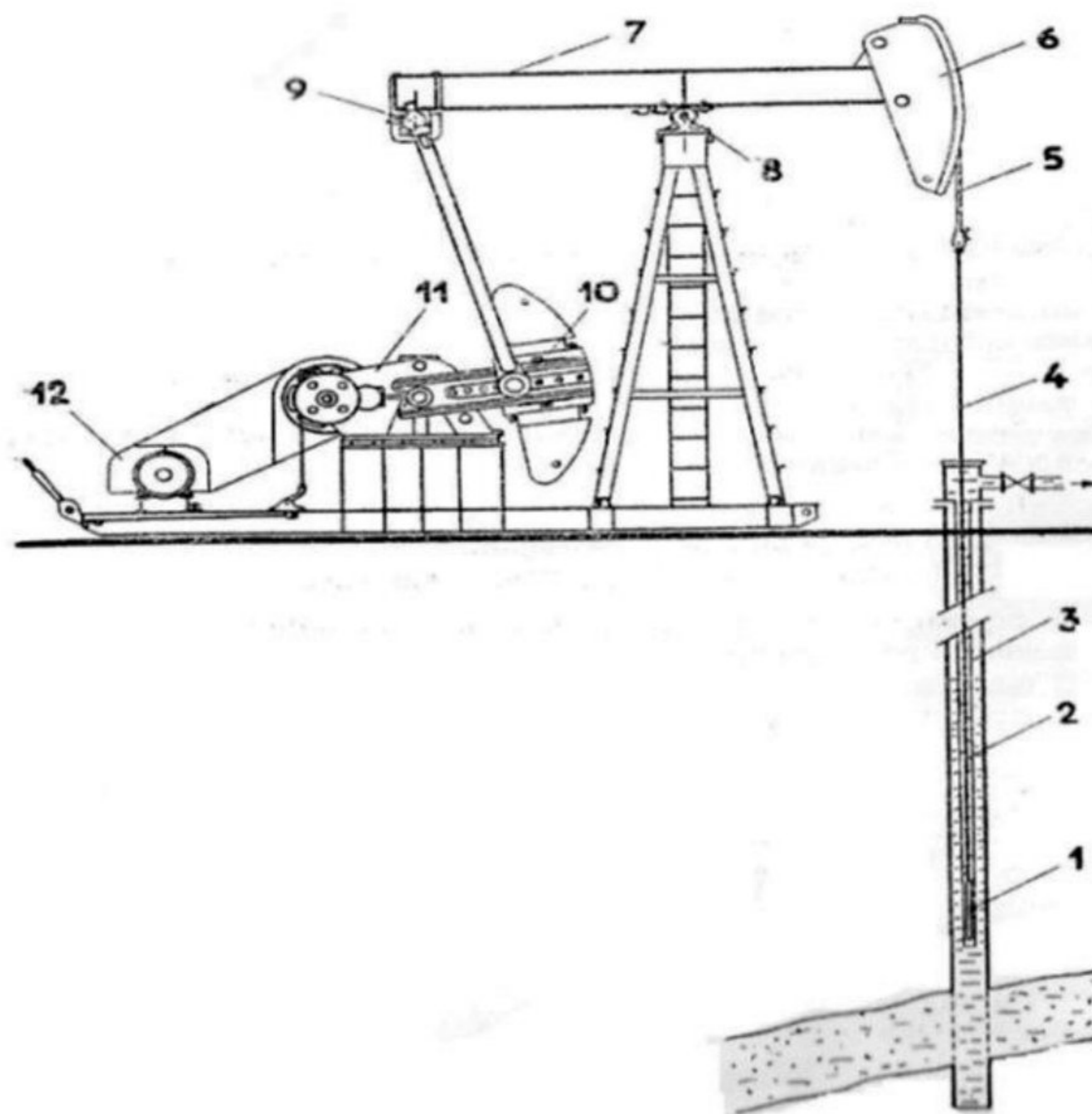
Слика 2.5. Вентилски склоп (Takacs, 2017)

Постоје три основне врсте дубинских пумпи:

- **Тубинг (tubing) пумпе** – ове пумпе се директно уграђују у тубинг и чине део трајне инсталације бушотине. Обично су већих димензија и погодне за бушотине са већим протоком. Тубинг пумпе су стабилне и дуготрајне, али њихово одржавање захтева вађење целокупног тубинга. (слика 2.4)
- **Усадне (insert) пумпе** – ове пумпе се могу уклонити из тубинга без потребе за вађењем целог цевовода, што олакшава одржавање и поправке. Њихова инсталација се врши тако што се убацују у већ постављени тубинг. Погодне су за бушотине које захтевају чешће поправке или контроле.
- **Кејзинг (casing) пумпе** – ове пумпе раде директно у производној колони (casing) бушотине. Користе се у посебним случајевима када није могуће користити тубинг. Casing пумпе омогућавају рад у условима где су други системи пумпања ограничени или непрактични. (Ljubisav Krsmanović, 2015)

Дубинске клипне пумпе могу имати цилиндар који је израђен из једног дела или из више секција (кошуљица), а разликују се по начину учвршћивања и врсти кретања клипа и цилиндра. Тубинг пумпе, иако једноставније и јефтиније за израду, пружају већу количину произведеног флуида, али су истовремено изложене већем оптерећењу. Insert пумпе, погодније за дубље бушотине и мању добит, лакше је одржавати јер се могу брзо вадити и поправљати. Најчешће коришћене у пракси су insert пумпе са учвршћеним цилиндром на врху, што омогућава боље заптивање и спречава накупљање песка и нечистоћа између цилиндра и узлазних цеви. (Ljubisav Krsmanović, 2015) (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

2.2 Принцип рада дубинских пумпи са клипним шипкама



Слика 2.6. Делови дубинске пумпе (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

На слици 2.6. приказани су делови дубинске пумпе на клипним шипкама.

Дубинска пумпа (1) је инсталирана на одређеној дубини у бушотини, унутар **тубинга** (3). Пумпа је повезана са **клипним шипкама** (2) и **глатком шипком** (4) помоћу **савитљивих ужади** (5), која су причвршћена за ”**коњску главу**” (6). Коњска глава је постављена на **балансну греду** (7). Балансна греда се ослања на носач греде преко **лежаја** (8), док се на задњем крају, путем лежаја (9), повезује с **погонском полугом**, која је прикључена на крак редуктора са теговима за роторно уравнотеживање (10). **Редуктор** (11) је спојен са **погонским мотором** (12) преко клинастих лежајева. Покретањем мотора, редуктор се активира, што затим, преко осовине покреће балансну греду. Балансна греда, померајући се, подиже и спушта глатку шипку и затим клипне шипке, на којима је монтиран клип дубинске пумпе. (Ljubisav Krsmanović, 2015) (Клипна пумпа, n.d.)

Принцип рада дубинске пумпе је заснован на једноставном механичком кретању, које користи клипне шипке за пумпање течности из подземних резервоара на површину. (Steve Breit, 2011)

Основни део овог система, клипна шипка је повезана са клипом унутар цилиндра пумпе смештеног у бушотини.

Рад дубинске пумпе одвија се у два основна корака: *силазни и узлазни ход клипа*. Током силазног хода, клипне шипке се крећу надоле, отварајући улазни вентил у пумпи. Ово омогућава флуиду из бушотине да уђе у цилиндар пумпе, јер разлика у притиску доводи до тога да течност попуњава простор у пумпи. Када се клипне шипке покрену навише, улазни вентил се затвара, а излазни вентил отвара, што омогућава гурање течности нагоре кроз тубинг према површини. Овај циклус се понавља, обезбеђујући да се течност континуирано пумпа према површини. (Flatern, 2015)

Варијације у оптерећењу које трпи глатка шипка током сваког циклуса пумпе бележи се помоћу инструмента званог **динамометар**. Овај уређај је опционални део опреме који служи за мерење промена у оптерећењу. Мерења се приказују на динаграфу (динамограму), који омогућава преглед и анализу рада пумпе. На основу тих података могу се открити проблеми у раду пумпе, као што су ненормалне осцилације у оптерећењу, што указује на потенцијалне кварове или потребу за одржавањем опреме.

Тако, динамометар омогућава дијагностику и праћење рада дубинске пумпе, што помаже у одржавању и откривању могућих проблема у раној фази. (Sherif Fakher, 2021)

Идеални динамограм је приказан на слици 2.5.



Слика 2.7. Идеални динамограм (Production Technology, 2005)

Стварни динамограм се значајно разликује од идеалног по свом облику, а у зависности од услова и режима рада пумпе може попримити различите форме. На основу њега можемо утврдити различите параметре као што су:

- стање и функција вентила;
- улазни притисак пумпе и висина подизања флуида;
- градијент притиска флуида у тубингу;
- ефикасност рада пумпе, посебно утицај слободног гаса;
- оштећења или пропуштања тубинга;
- кварови на пумпи, лом клипних шипки итд... (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

На слици 2.6. је графички приказан стварни дијаграм.



Слика 2.8. Стварни динамограм (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

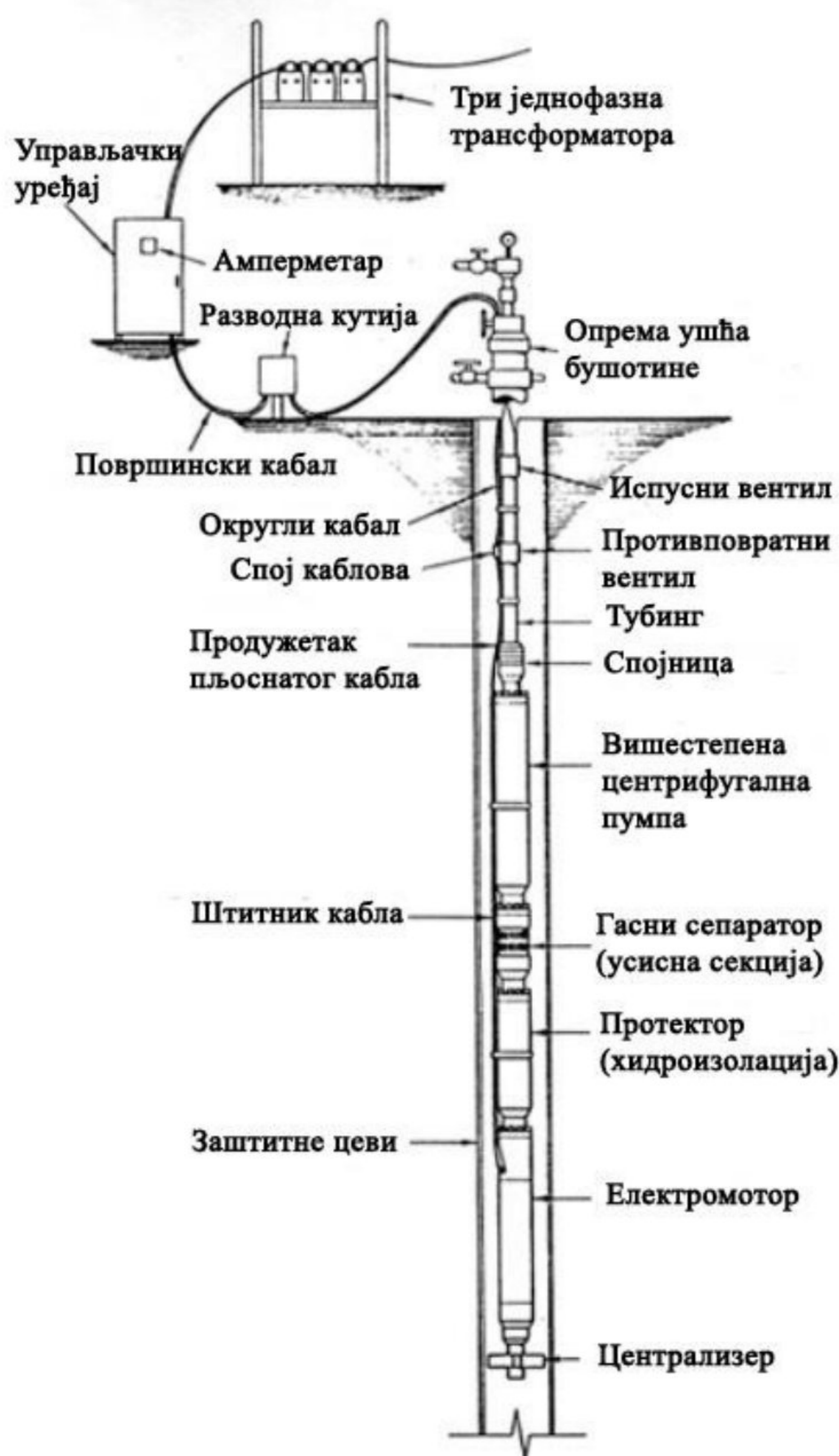
3. Електрична потапајућа пумпа (ESP)

Електрична потапајућа пумпа (енгл. *Electrical submersible pump- ESP*) представља један од најефикаснијих и најпоузданијих метода за подизање средњих до великих количина флуида из нафтних бушотина, што је чини веома раширеним избором у нафтној индустрији широм света. ESP системи су посебно погодни за бушотине које производе између 16 и 4 770 m³/d. (George Waters, 2015)

Овај систем се састоји од две главне компоненте. Прва је површински део, који обухвата **станицу управљања, трансформатор и електрични кабл** који води струју до бушотине. Други део је подземни, и састоји се од **мотора, пумпе, заптивног дела (хидроизолација) и гасног сепаратора**. Рад ESP-а је заснован на принципу индустријских електричних пумпи (електрична енергија се кроз каблове преноси до мотора унутар бушотине, где мотор покреће осовину која директно погони пумпу, подижући флуид на површину.) (Kimray, 2022)

Када је у питању дизајн ESP система, веома је важно узети у обзир спољашњи пречник компоненти у бушотини, који се обично креће од 88.9 до 254 mm , док дужина пумпе може варирати од 1 до 8,7 m. ESP системи се углавном користе у бушотинама са високим индексом продуктивности, а пречник цеви и брзина протока играју кључну улогу у израчунавању укупне динамичке висине пумпе (TDH), што утиче на укупан проток течности. (Riadh, 2018)

3.1 Анатомија ESP система



Слика 3.1. Систем електричне потапајуће пумпе (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Електрична потапајућа пумпа (ESP) је сложен систем који се састоји од неколико важних компоненти, од којих свака има своју улогу у процесу подизања течности из бушотине на површину. Као што видимо на слици 3.1. кључне компоненте које чине ESP систем су (слика 3.1):

Станица управљања

Станица управљања је главни контролни део који регулише рад ESP-а. Она надгледа рад пумпе, укључује и искључује систем, контролише проток

струје и врши надзор над електричним параметрима, како би се осигурао ефикасан и безбедан рад целокупног система. У станици управљања се смештају сервери, рачунари и опрема за надгледање и анализу података прикупљених са сензора, а оператори могу у реалном времену пратити рад система и вршити корекције када је то потребно. Произвођачи обично надгледају рад пумпи преко **SCADA система** (система за надзор и прикупљање података) који је такође део ове инфраструктуре. SCADA такође омогућава аутоматско прилагођавање система на основу унапред подешених параметара. (Kimray, 2022)

Трансформатор

Трансформатор је неопходан део система јер обезбеђује исправан напон за рад ESP-а. Његова улога је да трансформише електричну енергију са површине на потребан ниво напона, који ће потом бити испоручен пумпи и осталим подземним компонентама. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Разводна кутија

Разводна кутија представља спојну тачку између каблова који воде струју од трансформатора до пумпе. Ова кутија обезбеђује сигурност у дистрибуцији електричне енергије, као и заштиту од могућих електричних кварова.

Електрични-напојни кабл

Енергетски кабл (слика 3.2) служи за пренос електричне енергије од површинске опреме до пумпе дубоко у бушотини. Он је дизајниран да издржи екстремне услове, укључујући високе температуре и притиске у бушотини. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)



Слика 3.2. Скица електрични кабла (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

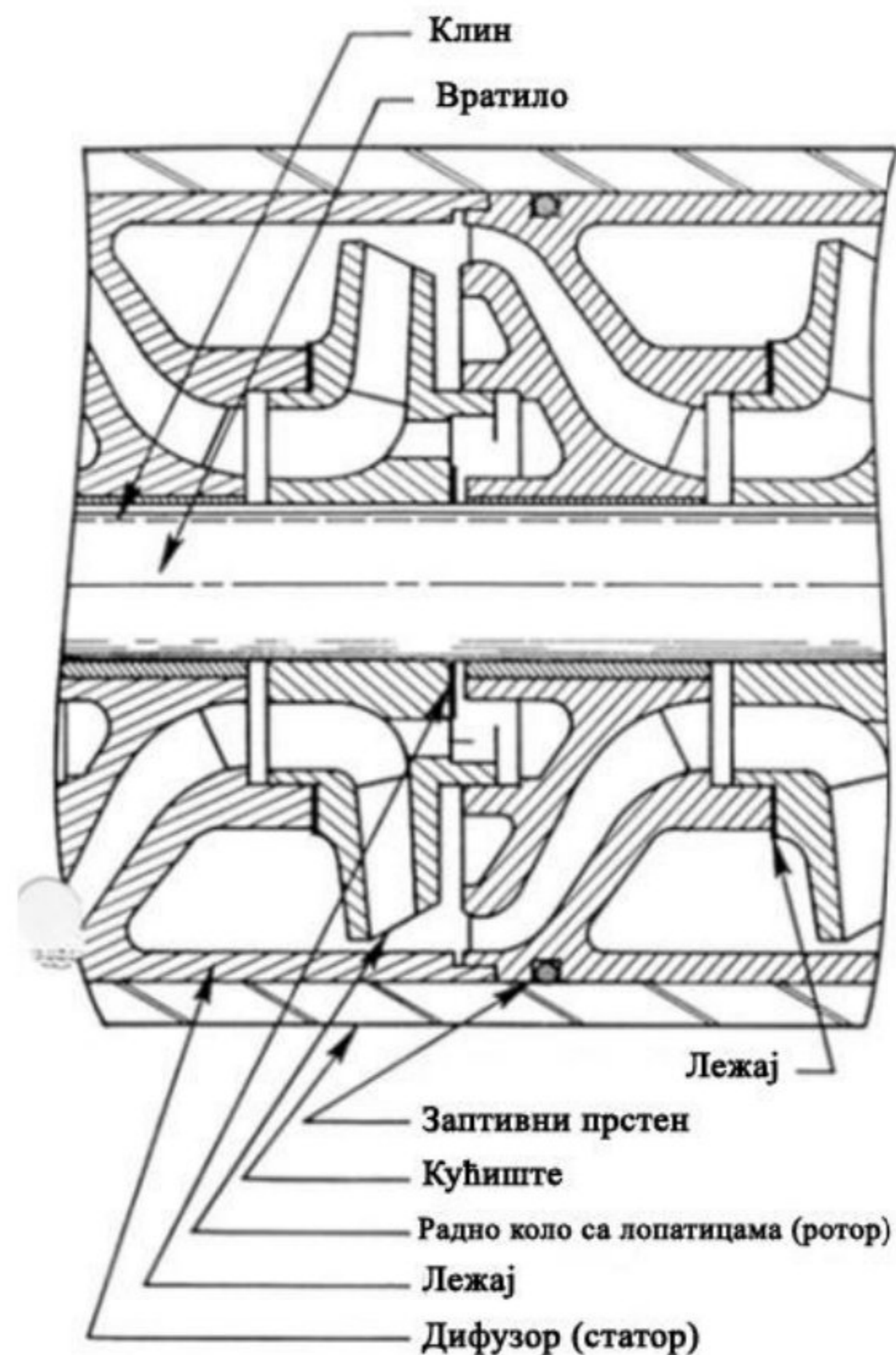
Циркулациона спојница

Циркулациона спојница повезује различите делове система и омогућава проток флуида кроз ESP систем. Такође, она обезбеђује сигуран проток флуида кроз цео систем, без губитка енергије или притиска.

РР вентил (Противповратни вентил)

Противповратни вентил је уређај који омогућава проток флуида само у једном смеру, спречавајући њихов повратак уназад. У системима као што су пумпе, овај вентил игра важну улогу у одржавању стабилности притиска и спречавању оштећења опреме услед повратног тока флуида. (Kimray, 2022)

Пумпа



Слика 3.3. Приказ једног степена вишестепене центрифугалне пумпе (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Пумпа је срце ESP система и њен задатак је да подиже флуид из бушотине на површину. То је вишестепенa центрифугална пумпа са више фаза, која повећава притисак течности кроз низ радних кола (ротора), чиме се омогућава транспорт до површине. Течност бива подвргнута великим центрифугалним силама које проистичу из велике брзине ротације ротора. Током овог процеса, течност губи кинетичку енергију у дифузору (статору), где се врши конверзија кинетичке у енергију притиска, чиме се подиже флуид на површину. (Такас, 2017) Графички приказ једног степена пумпе се налази на слици 3.3.

Што се тиче самих делова пумпе, она се састоји од **осовине, улаза у пумпу, дифузора(статора) и радног кола (ротора).**

Осовина повезује мотор са радним колом пумпе кроз хидроизолацију. Пројектована је тако да буде што ужег пречника, али са довољном чврстоћом да издржи оптерећења, што омогућава већем протоку течности кроз улаз пумпе.

Материјали за осовину се бирају у зависности од потреба за отпорношћу на корозију, ерозију и затезну снагу, као и од потребне снаге пумпе.

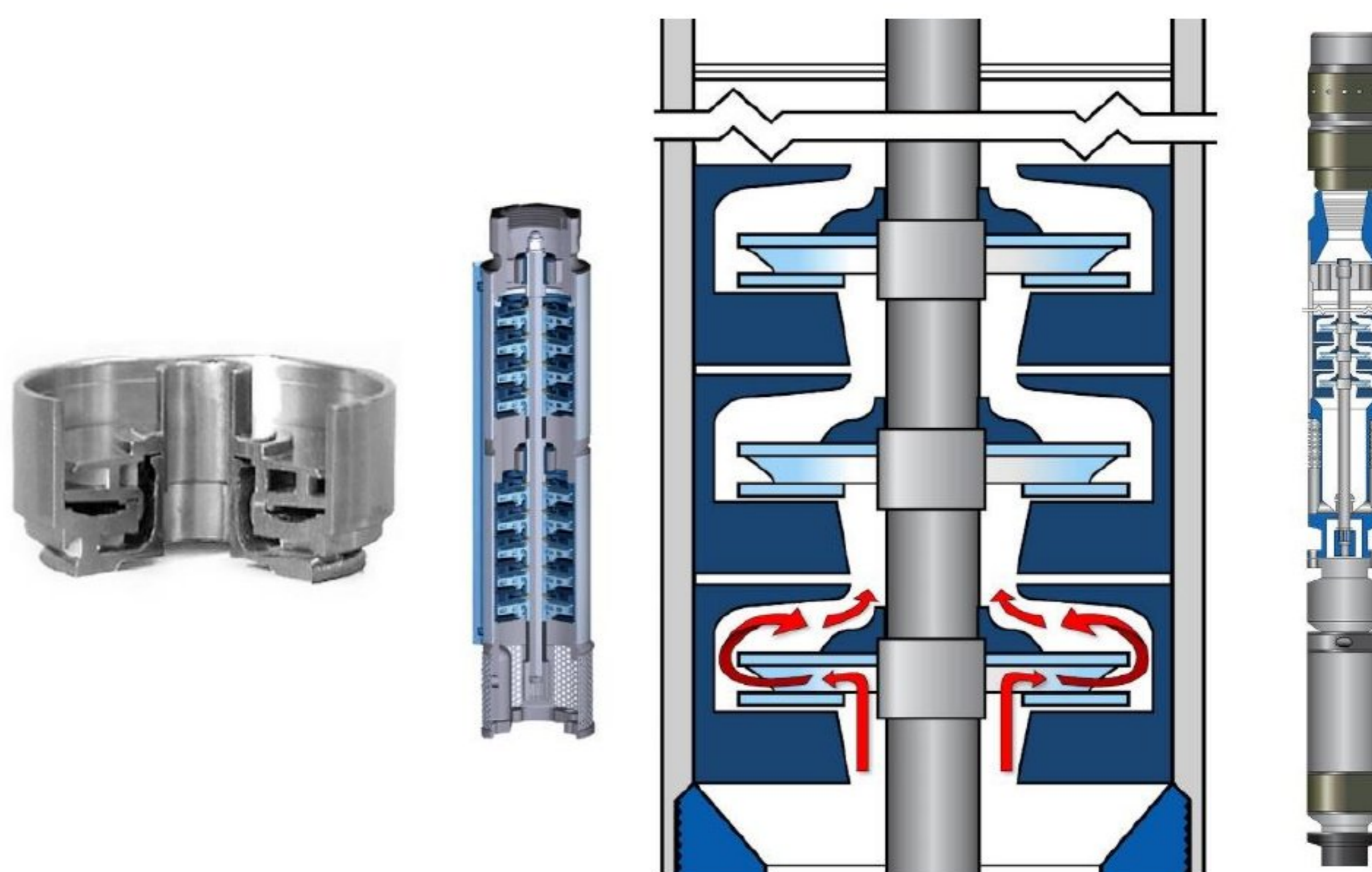
Усисни модул пумпе је место где бушотинска течност улази у потапајућу пумпу и затим бива усмерена ка импелерима. Тип улаза зависи од особина течности, нарочито односа гаса и течности (GLR):

- **Стандардни усисни модул:** Не врши раздвајање гаса и користи се у бушотинама са ниским нивоом гаса у односу на течност.
- **Усисни модул за реверзни проток (енгл. *reverse-flow pump intake*):** Користи се у бушотинама са већим односом гаса и течности. Течност пролази кроз сито, мењајући правац, што омогућава природно одвајање гаса од течности. Гас потом излази кроз прстенасти простор кућишта и достиже главу бушотине. (Kimray, 2022) (Takacs, 2017)
- **Усисни модул пумпе при ротационом протоку флуида (енгл. *rotary pump intake*) (гасни сепаратор):** Присуство гаса може смањити ефикасност пумпе и изазвати оштећења, самим тим овај део је јако кључан уколико имамо веће количине гаса у нафти. Примењује центрифугалну силу за одвајање слободног гаса из течности пре него она уђе у пумпу и тиме доприноси одржавању оптималног рада пумпе. Тежа течност се одваја од гаса у ротационој комори, при чему гас излази кроз посебне излазне отворе. (Takacs, 2017) Гасни сепаратор је приказан на слици 3.4.



Слика 3.4. Гасни сепаратор (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Центрифугална пумпа (слика 3.5.) је састављена од више степена који постепено повећавају притисак течности. Сваки степен обухвата **ротор** и **статор**. Течност пролази кроз ротор, чиме се њена брзина (кинетичка енергија) повећава, а затим улази у статор где се та енергија претвара у притисак (потенцијална енергија). (Kimray, 2022)



Слика 3.5. Ротор и статор центрифугалне пумпе (Kimray, 2022)

Овај процес се понавља кроз сваки степен пумпе све док не достигне потребан излазни притисак. Ротори имају важну улогу јер контролишу брзину протока течности. Ротори за радијални проток су дизајнирани за ниже брзине протока, док су ротори за мешовит проток прилагођени већим брзинама протока. (Такас, 2017). Ове две врсте ротора приказане су на слици 3.6.



Слика 3.6. Ротори за радијални и мешовити проток флуида (Kimray, 2022)

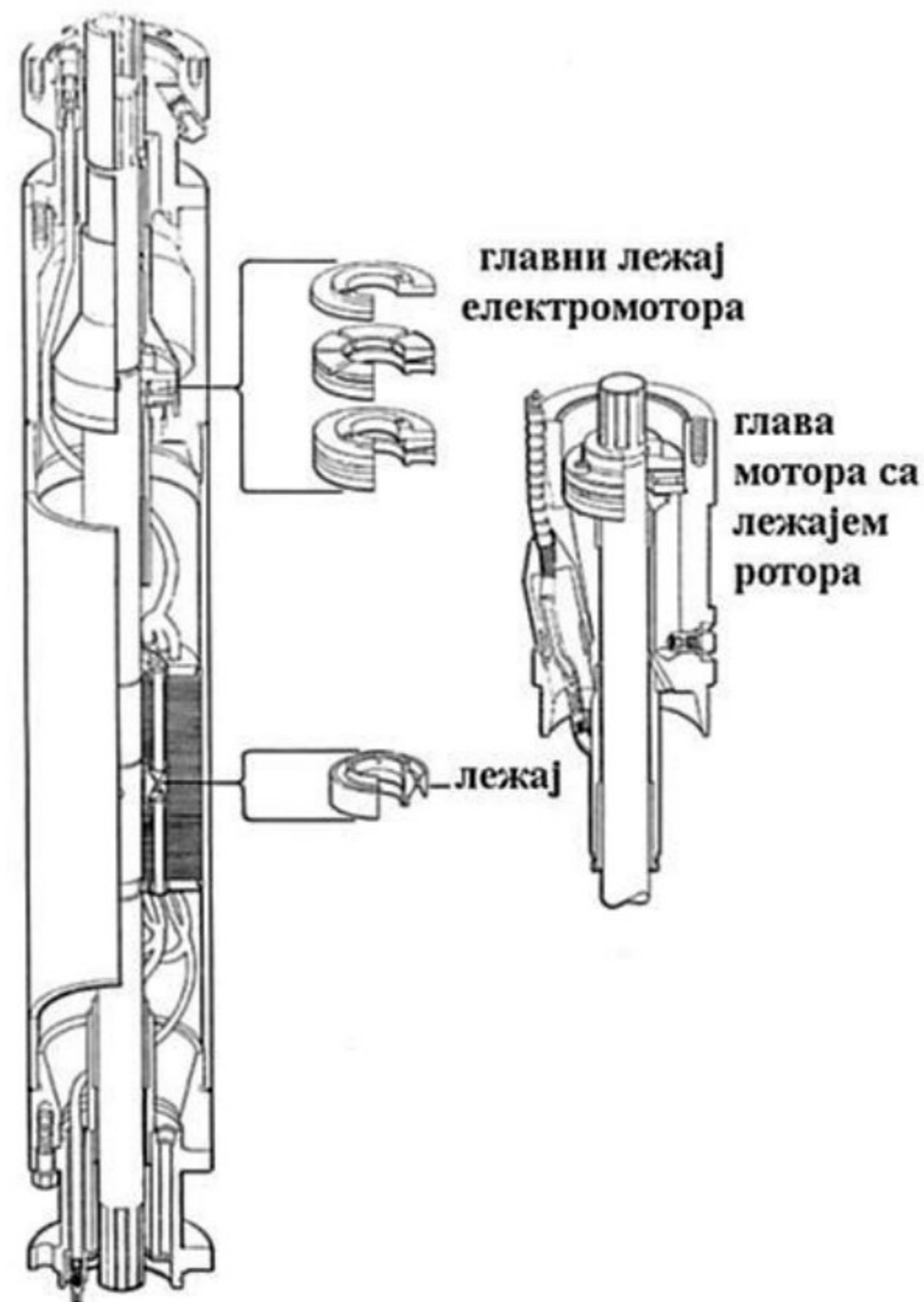
Протектор (Хидроизолација)

Протектор обезбеђује заштиту мотора од утицаја течности и спречава продор флуида у мотор. Такође, он регулише притисак и обезбеђује стабилност система током рада на различитим дубинама и притисцима. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006). Екстремне температуре и нечистоће су кључни фактори који доприносе раном отказивању мотора. ESP мотор, постављен дубоко у бушотини, мора бити потпуно херметички затворен и имати способност да одржи температуру стабилном. Ово захтева врхунску термичку изолацију како би се избегло прегревање и продужио његов радни век. (Steve Breit, 2011).

Мотор

Електрични мотор је кључни део ESP система, који омогућава пумпи да функционише. За покретање ESP пумпи користе се електрични мотори са наизменичном струјом. Овај подземни мотор директно покреће пумпу и ради

под изузетно тешким условима, као што су високи притисци и температуре у бушотини. (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006) Пример електромотора приказан је на слици 3.7.



Слика 3.7. Електромотор ESP система (Dr. sc. Marin Čikeš, 2006)

Дубински сензор (телеметрија)

Дубински сензор (слика 3.8) је важан за праћење перформанси и услова рада пумпе. Сензор омогућава мерење параметара као што су притисак, температура и брзина протока, што помаже у правовременом откривању потенцијалних проблема и оптимизацији рада целог система. Када сензор детектује вредности пумпе које су ван унапред дефинисаног опсега, он у реалном времену шаље упозорење оператору. Тада оператор може да изврши неопходне измене даљински, или се систем може аутоматски прилагодити путем површинског контролера како би се одржао оптималан рад пумпе. (Kimray, 2022)



Слика 3.8. Сензор (Kimray, 2022)

3.2 Принцип рада ESP система

У претходном поглављу смо набројали и описали функционисање сваког од елемената ESP система и такође графички приказали сликом 3.1. Ово поглавље је наставак на претходно па са тим у вези ред је приказати и сам принцип рада самог ESP система.

ESP пумпа ради на принципу комбиновања електричне и механичке енергије за подизање течности са великих дубина до површине. Њена ефикасност зависи од синхронизованог рада свих компоненти, од мотора на дну бушотине до површинских контролних система. (George Simonelli, 2017)

Рад ESP пумпе започиње на површини, где је постављена **станица за управљање**. Кроз ову станицу се подешавају параметри рада пумпе и прати њена ефикасност. **Трансформатор** игра важну улогу у подешавању напона, који се прилагођава да би одговарао потребама електричног мотора у бушотини.

Електрична енергија се преноси на подземни део система преко **електричног кабла**, који је прикачен на тубинг у бушотини. Овај кабл преноси електричну енергију од површинске опреме до мотора. На површини се такође налази и **разводна кутија**, која омогућава везу између површинске и подземне опреме и обезбеђује да електрична енергија безбедно стигне до мотора.

Унутар бушотине налази се **вишестепена центрифугална пумпа**. Ова пумпа је састављена од неколико ротора и статора. Када мотор покрене рад пумпе, течност из бушотине улази у пумпу кроз **усисни модул** и даље пролази кроз импелере. Импелери повећавају брзину флуида, а затим се кинетичка енергија течности претвара у притисак када флуид уђе у дифузоре.

Сепаратор гаса је још један важан део система, посебно у случајевима када бушотина производи мешавину течности и гаса. Сепаратор омогућава да се гас одвоји од течности пре него што она уђе у пумпу, јер присуство велике количине гаса може да смањи ефикасност рада пумпе.

Још једна кључна компонента је **протектор**, који штити мотор од уласка течности и осигурава његово хлађење током рада. Протектор је критичан за продужавање радног века мотора, јер спречава продор флуида у мотор, који може изазвати кварове.

Електрични мотор, који је смештен на дну пумпног система, покреће рад целе пумпе. Овај мотор је наизменично напајан струјом преко кабла који се протеже од површине до дубине. Он претвара електричну енергију у механичку снагу, која покреће осовину пумпе и на тај начин омогућава кретање ротора.

Осовина је повезана са пумпом и мотором и омогућава да се механичка снага преноси директно са мотора на пумпу. Она је дизајнирана тако да буде што мањег пречника, али довољно јака да поднесе оптерећење и напор при пумпању течности.

Када мотор започне са радом и активира пумпу, течност почиње да улази у пумпу кроз **усисни модул**. Ротори пумпе дају течности велику брзину, након чега она пролази кроз статоре где се брзина претвара у притисак. Овај процес се понавља у сваком следећем степену пумпе док течност не достигне потребан притисак за подизање на површину.

Течност, која је подигнута кроз цеви, затим пролази кроз **противповратни вентил**, који спречава враћање течности назад у пумпу када систем није активан.

На крају, када се флуид подигне до површине, он се прикупља и даље транспортује у системе за прераду или складиштење. (Takacs, 2017)

4. Избор механичке методе експлоатације: главне карактеристике и разлике између електричне потапајуће пумпе и дубинске пумпе

Електричне потапајуће пумпе (ESP) и дубинске пумпе (SRP) представљају два најчешћа метода механичке експлоатације флуида из бушотина. Ове две технологије играју кључну улогу у експлоатацији нафте, али се значајно разликују у свом принципу рада, продуктивности, отпорности на услове бушотине и трошковима одржавања.

У овом поглављу ће бити приказане главне разлике између ових пумпи као што су:

1. Принцип рада

Принцип рада **електричне потапајуће пумпе (ESP)** заснива се на центрифугалном систему. ESP користи роторе који се ротирају великом брзином и стварају центрифугалну силу, чиме подижу течност из бушотине до површине. Мотор пумпе је потопљен у флуида заједно са пумпом, што омогућава ефикасну конверзију енергије и подизање великих количина течности. ESP системи су познати по својој способности да обрађују велике протоке и захтевају стабилне услове бушотине, где је садржај слободног гаса низак, а флуид релативно чист.

Насупрот томе, **дубинска пумпа (SRP)** користи механички систем клипа и шипке. На површини се налази мотор који покреће клипне шипке, преносећи енергију дубоко у бушотину где се клип креће горе-доле, увлачећи и подижући течност ка површини. Систем дубинског пумпања је погоднији за бушотине са мањим протоком и вишим садржајем гаса или других честица у течности. Овај механизам је отпорнији на промене у условима бушотине и може радити у сложенијим срединама. (Okodi, 2017)

2. Продуктивност и отпорност на услове бушотине

ESP пумпе су дизајниране за бушотине са високим приносом течности. Оне могу подизати више од 400 m³/d, што их чини идеалним за бушотине са великим продуктивним капацитетом. Међутим, висока концентрација слободног гаса или песка у флуиду може негативно утицати на ефикасност ESP пумпи, јер гас ствара мехуриће који смањују притисак, док песак може оштетити радна кола односно роторе. Такође на ефикасност ове пумпе утиче и сама вискозност нафте односно јако вискозне парафинске нафте могу престављати проблем раду ESP пумпе. (Takacs, 2017)

Дубинске пумпе, с друге стране, имају нижу продуктивност, али су значајно отпорније на услове који могу оштетити ESP пумпе. Оне могу боље функционисати у срединама са већим садржајем слободног гаса, песка или вискозне течности, као и у бушотинама где се очекује присуство воде у великим количинама. Ова отпорност чини дубинске пумпе погоднијим за бушотине са променљивим или тежим условима. Такође, системи дубинске пумпе су прилагођени за бушотине са мањим и средњим количинама протока, где ESP пумпе не би биле економски исплативе. (Sherif Fakher, 2021)

3. Трошкови инсталације и одржавања

Једна од значајних разлика између ESP и дубинских пумпи јесте у трошковима инсталације и одржавања. **ESP пумпе** захтевају компликованију инсталацију и веће почетне трошкове. У случају квара, пумпа мора бити извучена на површину, што знатно повећава трошкове поправке и времена заустављања производње. Осим тога, систем ESP пумпи захтева специјализовану опрему за контролу и подешавање, што додатно компликује њихову употребу.

Насупрот томе, **дубинске пумпе** имају једноставнији дизајн и нижи трошкови одржавања. Већи део њихове опреме налази се на површини, што значи да је лакше доступна за одржавање и поправке. У случају квара, најчешће је могуће поправити систем без потребе за скупим операцијама извлачења пумпе из бушотине. (Akchay L. Pandit, 2015)

5. Избор механичке методе експлоатације: могући разлози замене једне методе механичке експлоатације другом

У овом поглављу биће наведени и образложени могући разлози замене једне методе механичке експлоатације другом, конкретно у овом случају могући разлози замене електричне потапајуће пумпе (ESP) дубинском пумпом (SRP).

У савременом управљању нафтним и гасним бушотинама, избор одговарајуће методе механичке експлоатације игра кључну улогу у оптимизацији производње и одржавању ефикасности. Прелазак са једног система на други може бити неопходан како би се оптимизовала продуктивност и смањили оперативни трошкови. Одлука о томе коју пумпу користити, или када заменити једну другом, зависи од специфичних услова бушотине, количине произведеног флуида, присуства гаса и воде, као и економских фактора.

Један од најчешћих разлога је **промена у условима бушотине**. Ако бушотина почне да производи већу количину гаса, песка или воде, **Дубинске пумпе** могу бити бољи избор због своје отпорности на такве услове. На пример, ако бушотина почне да производи већу количину воде, ESP пумпе могу изгубити ефикасност због повећаног притиска и хидрауличких проблема. У оваквим случајевима, прелазак на дубинску пумпу је логичан, јер овај систем боље подноси присуство воде и других нечистоћа. (Esmitech, 2024)

С друге стране, ако бушотина почне да производи веће количине флуида са ниским садржајем гаса, **ESP пумпе** постају пожељније због своје способности да транспортују велике количине флуида. Њихова већа продуктивност може значајно повећати укупну производњу бушотине.

Такође, **економски разлози** могу диктирати промену система. Ако одржавање ESP система постане сувише скупо или компликовано, оператер може прећи на дубинску пумпу како би смањио трошкове и поједноставио рад.

Дубинске пумпе су познате по свом робусном дизајну и могућности бржег решавања проблема. (Clegg, Vucaram, & N.W. Hein, 1993)

Што се тиче бушотина у Србији које користе механичке методе експлоатације, с обзиром на то да је производња флуида релативно мала и да се већина бушотина налази у завршној фази експлоатације, дубинске пумпе (SRP) представљају далеко погодније решење. У Нафтној Индустрији Србије (NIS), на бушотинама где се користе електричне потапајуће пумпе (ESP), често се прибегава пребацивању пумпи на повременни режим рада. Међутим, овај приступ није идеалан, јер ESP пумпе нису дизајниране за повремен рад и самим тим су склоније кваровима и смањењу ефикасности. Дубинске пумпе су много прилагођеније повременом режиму рада, јер њихов механички систем боље подноси прекиде у раду и прилагођава се специфичним условима бушотина са мањим приносом. У оваквим случајевима, дубинске пумпе не само да пружају већу поузданост, већ су и дугорочно исплативије за експлоатацију.

Када је реч о економском аспекту, дубинске пумпе имају још једну значајну предност. Нафтна Индустрија Србије већ поседује дубинске пумпе на клипним шипкама у свом власништву, такође и обучено особље за рад и поправку пумпи, што значи да коришћење постојеће опреме представља финансијски рационалнију опцију. За разлику од тога, ESP пумпе захтевају изнајмљивање и додатне трошкове, што чини њихову примену мање економичном.

6. Студија случаја: избор одговарајуће механичке методе

6.1 Општи подаци о бушотини X-001

Бушотина X-001 се налази у североисточном делу нафтног поља YY и у експлоатацији је од 1. јануара 2016. године. Од самог почетка, бушотина ради на лежишту Pz-1a, а отворени интервал перфорације налази се на дубини од 2070 до 2085 метара. У ову бушотину је инсталирана електрична потапајућа пумпа (ESP) модела 5-30-2100, која је смештена на дубини од 2029 метара. Након почетног фазног уређивања и прилагођавања параметара, бушотина је пуштена у континуални рад са стабилним параметрима рада.

Међутим, након одређеног времена рада у стабилном режиму, примећен је пад нивоа флуида у бушотини. Убрзо након тога, дошло је до два аутоматска заустављања пумпе због активације заштите од превисоке температуре, што је захтевало додатну анализу и интервенцију.

6.2 Опис проблематике

Анализом производних података установљено је да је бушотина одржавала стабилан ниво производње у распону од 18 до 19 м³ дневно, док се динамички ниво флуида кретао између 1400 и 1600 метара. Истовремено, температура ESP пумпе је била у опсегу од 130 до 140 °C. Ови подаци су указивали на стабилне услове рада све до одређеног тренутка.

Међутим, на производном профилу је примећен постепен пораст температуре и истовремено смањење динамичког нивоа флуида. Овај тренд је трајао све до 11. фебруара 2017. године, када је дошло до значајног повећања температуре пумпе и даљег пада нивоа флуида, што је резултирало аутоматским заустављањем ESP-а због превисоке температуре. Слична ситуација се поновила и 4. априла 2017. године, када је пумпа поново заустављена, након чега је бушотина морала бити искључена из производње ради даље анализе и интервенција.

Важна напомена

Тренутно је у складишту компаније доступна следећа опрема која може бити коришћена за санацију и поновно покретање бушотине:

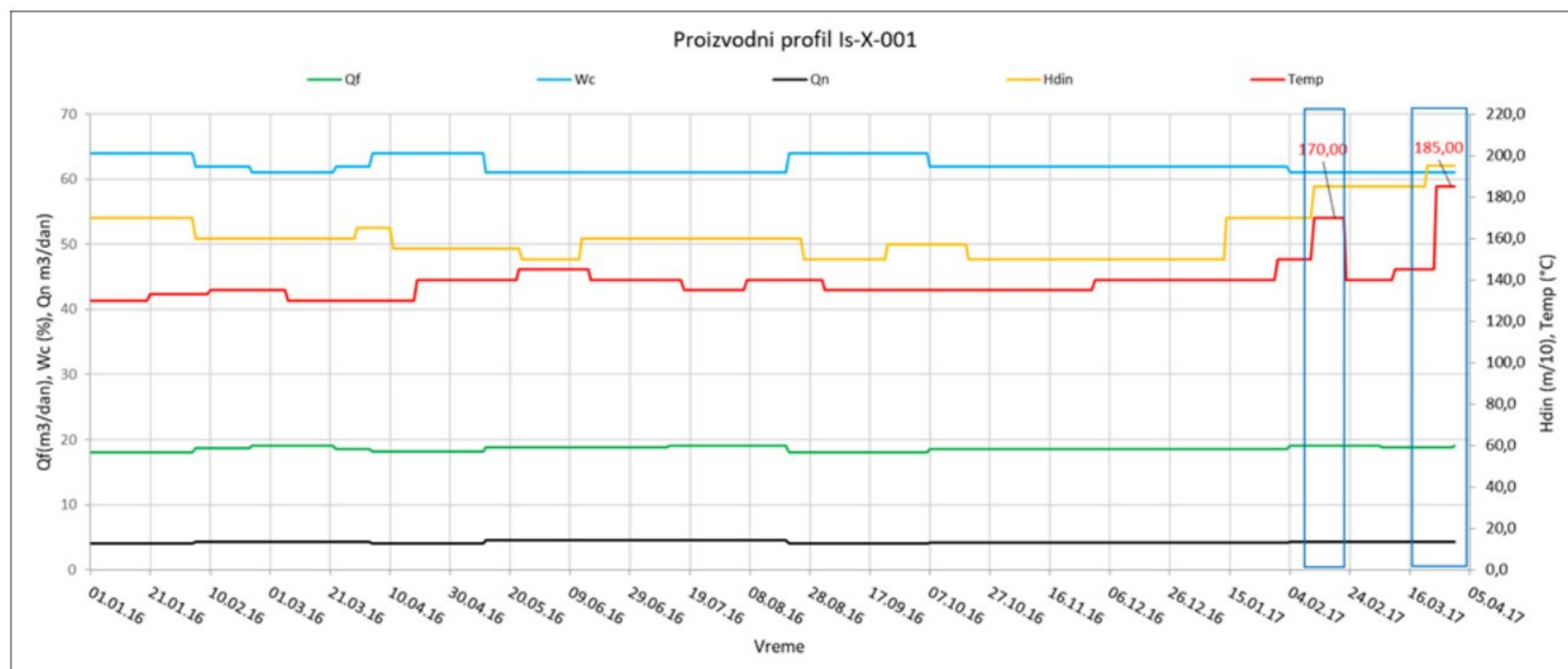
- Качаљка тежине 9 t и 12 t.
- Клипне шипке пречника 19 mm, 22 mm и 25 mm
- Тубинг пречника 73 mm

У табели 6.1. су приказане карактеристике ESP пумпе.

Табела 6.1. Карактеристике ESP пумпе

Габарит пумпе	5
Номинална производња (m^3/dan)	30
Напор који пумпа може да оствари (m)	2100
Дубина уградње (m)	2029
РЕМ (мотор) (kW)	32

На дијаграму на слици 6.1. видимо производни профил бушотине X-001 од почетка производње до искључења бушотине из производње.



Слика 6.1. Производни профил бушотине X-001

На дијаграму су приказане криве промене температуре, утока воде (заводњеност), количине флуида, количина нафте, динамичка

Из производног профила примећујемо унатно повећање температуре у два периода као што је и горе описано.

У табели 6.2. су приказани параметри рада бушотине и пумпе у периоду континуалног рада производње.

Табела 6.2. Параметри рада бушотине и пумпе и континуалном режима произвоње

Параметри рада ESP пумпе	
Датум	30.03.2017
Производња (Q_f) (m^3/dan)	18
Производња нафте (Q_t) (t/dan)	4
Заводњеност (%)	78
Потрошња струје (kW/dan)	805
Притисак на усису пумпе (bar)	23
Температура ($^{\circ}C$)	130

6.3 Задатак

У оквиру овог задатка, потребно је извршити детаљну анализу рада опреме у бушотини X-001 и одговорити на два кључна питања која ће помоћи у оптимизацији рада и решавању проблема са пумпом. Анализа ће обухватити испитивање тренутних услова рада и предлоге за унапређење експлоатације.

1. Одређивање методе експлоатације која ће омогућити континуиран рад и тренутну производњу

Прва фаза анализе подразумева идентификацију и примену методе експлоатације која ће осигурати континуиран рад бушотине и одржавање тренутне производње. У разматрање ће бити узет производни профил и саме карактеристике електричне потапајуће пумпе и дубинске пумпе.

2. Објашњење разлога због којих је дошло до прегрејавања ESP пумпе

Друго питање се односи на идентификацију узрока прегрејавања ESP пумпе. За овај део анализе биће потребан преглед температурних података и заводњености, такође из производног профила.

Уз помоћ ових података, биће могуће утврдити да ли су разлози за прегревање повезани са променама у условима рада, неисправностима у опреми или другим факторима који утичу на температуру пумпе. На основу ових налаза, предложићемо мере за решавање проблема и спречавање будућих прекида у раду.

6.4 Анализа рада електричне потапајуће пумпе (ESP) и дубинске пумпе (SRP) на бушотини X-001 помоћу програмских алата

Прово започињемо анализу система електричне потапајуће пумпе (ESP), карактеристике рада пумпе, радни опсег, стабилност рада и оно најбитније ефикасност пумпе.

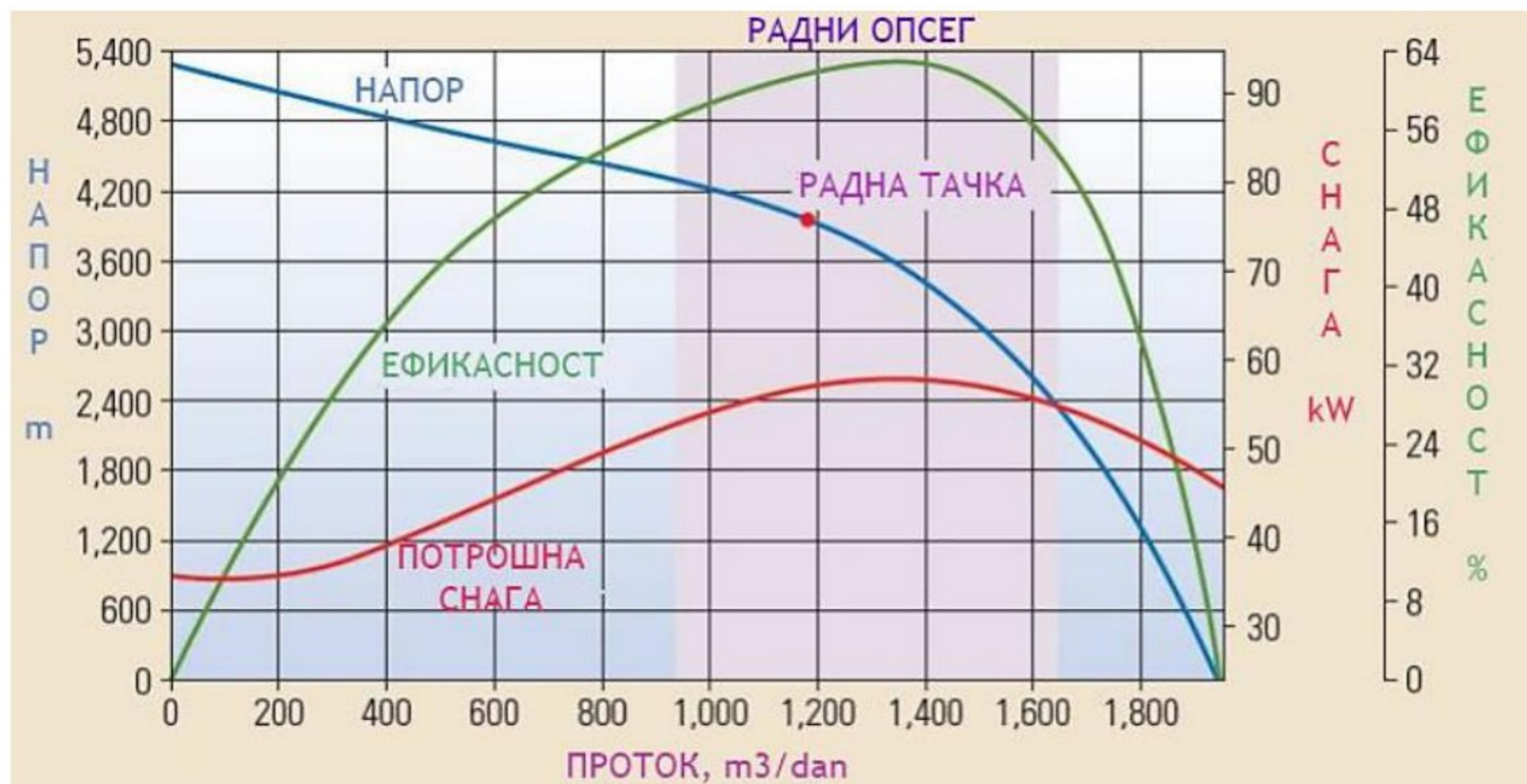
Тестирање центрифугалних пумпи се изводи при константној брзини ротације, током чега долази до варирања протока на излазу пумпе. При том процесу прате се неколико кључних параметара:

- Притисак на улазу и излазу из пумпе;
- Проток флуида;
- Снага потребна за рад пумпе.

На основу ових параметара израчунава се коефицијент корисног дејства пумпе, односно њена ефикасност. Овај коефицијент представља способност пумпе да механичку енергију, коју добија од мотора, претвори у хидрауличку снагу која је неопходна за транспорт флуида. (Tomljanović, 2019)

На графику карактеристике рада пумпе (слика 6.2.) приказане су основне перформансе пумпе, као што су радна зона, напор, потрошња енергије и коефицијент искоришћења. Све ове карактеристике су везане за једно радно коло пумпе, а укупне карактеристике пумпе се добијају као збир вредности у

зависности од броја радних кола у систему. На графику се јасно уочава да је највећи коефицијент корисног дејства постигнут у средишњем делу радне зоне пумпе, што представља оптималне услове рада и типичне каталожке вредности за одређени модел пумпе.



Слика 6.2. График карактеристике рада ESP пумпе (Fetoui, 2018)

Како би започели прорачун и анализу прво што је потребно су подаци бушотине наведени у поглављима 6.1. и 6.2. У табели 6.3. приказани су сумирани подаци бушотине потребни за прорачун.

Табела 6.3. Параметри потребни за прорачун

Подаци бушотине	
Производња (Q_f) (m^3/dan)	18
Производња нафте (Q_t) (t/dan)	4
Заводњеност (%)	78
Температура ($^{\circ}C$)	130
Притисак на тубингу (bar)	4
Притисак на кејзингу (bar)	13
Притисак у лежишту (bar)	80
Дубина пумпе (m)	2030
Горња дубина перфорације (m)	2070
Пречник тубинга (mm)	73

Анализа рада електричне потапајуће пумпе (ESP) је рађена у *софтверу Pengtools*.

За дневну производњу флуида од $18 \text{ m}^3/\text{d}$ вршимо прорачун у софтверу Pengtools.

На слици 6.3. приказани су општи резултати прорачуна. С обзиром да је пумпа уграђена на дубини од 2030 m, а динамички ниво флуида је на дубини од 850 m. Динамички притисак на дну бушотине је 77.2 atm, а притисак на усису пумпе има вредност од 73.6 atm. Такође притисак на излазу из пумпе износи 152.4 атм. Од укупно издвојеног гаса од 20 %, током производње, количина која је остала мешавини је 0.25 %. Од укупно издвојеног гаса, током производње, 99% је одстрањено у сепаратору гаса и кроз међупростор се креће до површине. Снага пумпе износи 5.67 kW.

Parameter	Name	Value	Units
Well flowing pressure	P_{wf}	77.2	atm
Pump intake pressure	PIP	73.6	atm
Pump discharge pressure	PDP	152.4	atm
Liquid flowrate at surface conditions	Q_{liq}	18	m^3/day
Mixture flowrate at intake	$Q_{mixture}$	23.5	m^3/day
Mixture flowrate at intake after separation	$Q_{mixture_sep}$	18.8	m^3/day
Gas into pump before separation	GIP_{before_sep}	20	%
Gas into pump after separation	GIP_{after_sep}	0.25	%
Total Dynamic Head	TDH	850	m
Breaking Horse Power	BHP	6.1	kW
Breaking Horse Power	BHP	8.19	hp

Слика 6.3. Општи резултати прорачуна извезени из софтвера Pengtools

Што се тиче уграђеног електромотора (слика 6.4.): снага 28 kW, напон 413 V и потрошња струје 59 A.

Type	Power, hp	Power, kW	Voltage	Amps
nominal	37.5	28	413	59

Слика 6.4. Перформансе уграђеног електромотора (Pengtools)

Максимална температура коју уграђени кабл може да поднесе је 96 °C а пад напона је 109.1 V (слика 6.5.)

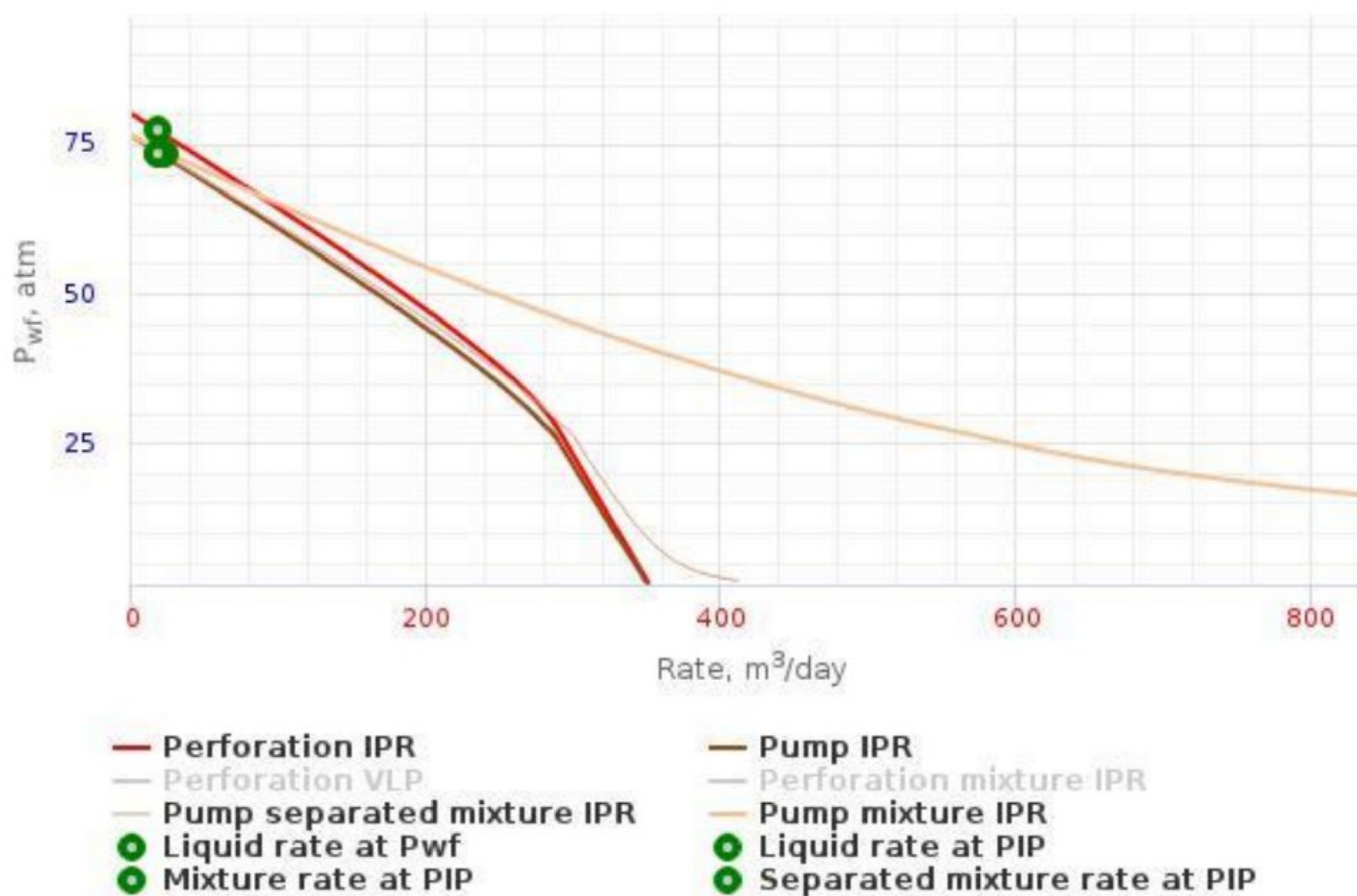
Main cable

#1 AWG CPNR Centrilift 34.5/-/2.51kg/m SOL 5kV

Main Vdrop - 109.1 V
Voltage Rating - 5000 V
Height - 34.5 mm
Width - mm
Size - AWG#1
Type - round
Conductor Design - SOLID
Max Temp - 96 C

На слици 6.5. представљене су две IPR криве:

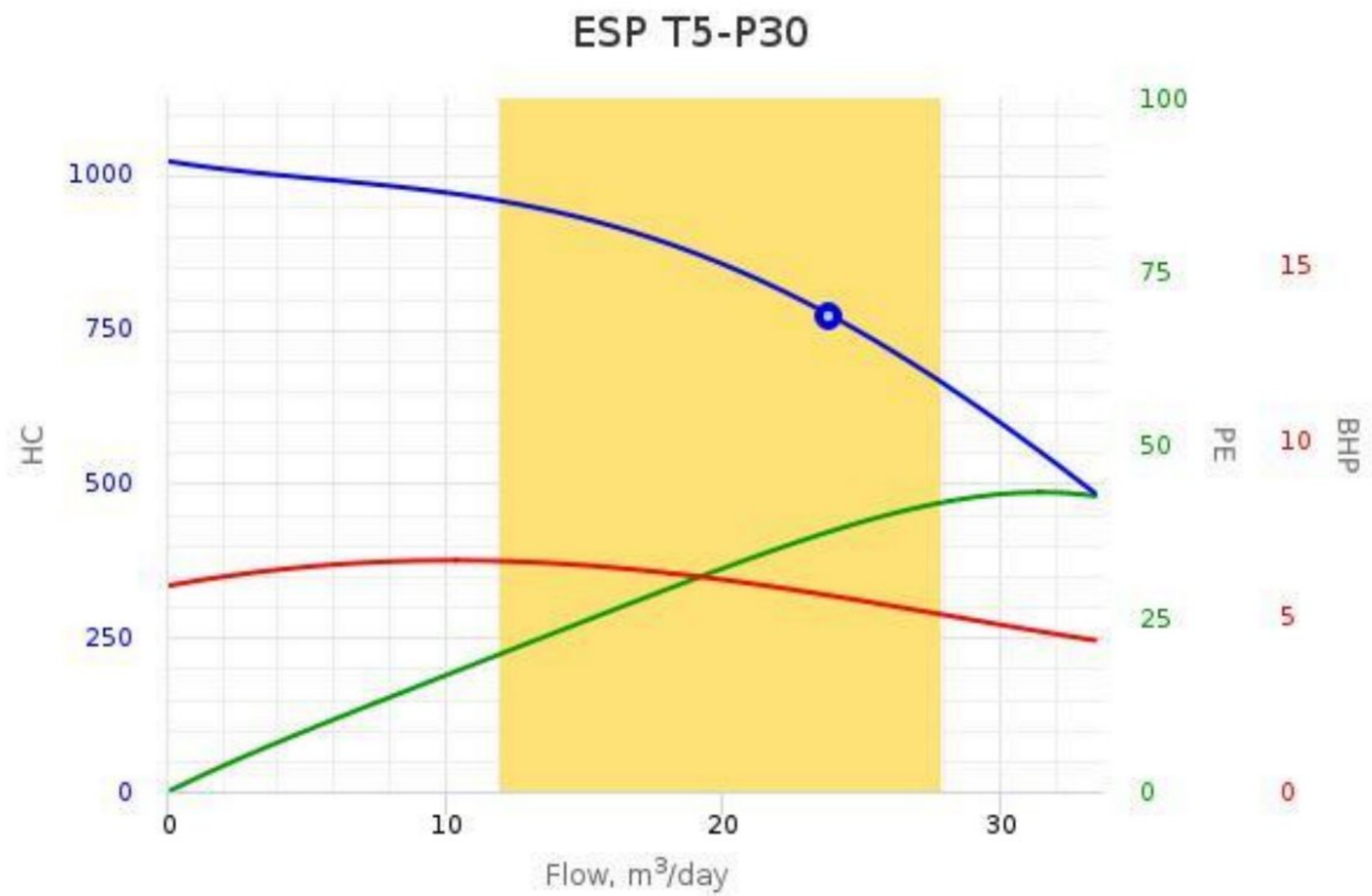
- црвена описује карактеристике утока флуида у бушотину
- браон крива описује карактеристике утока флуида у ESP пумпу.



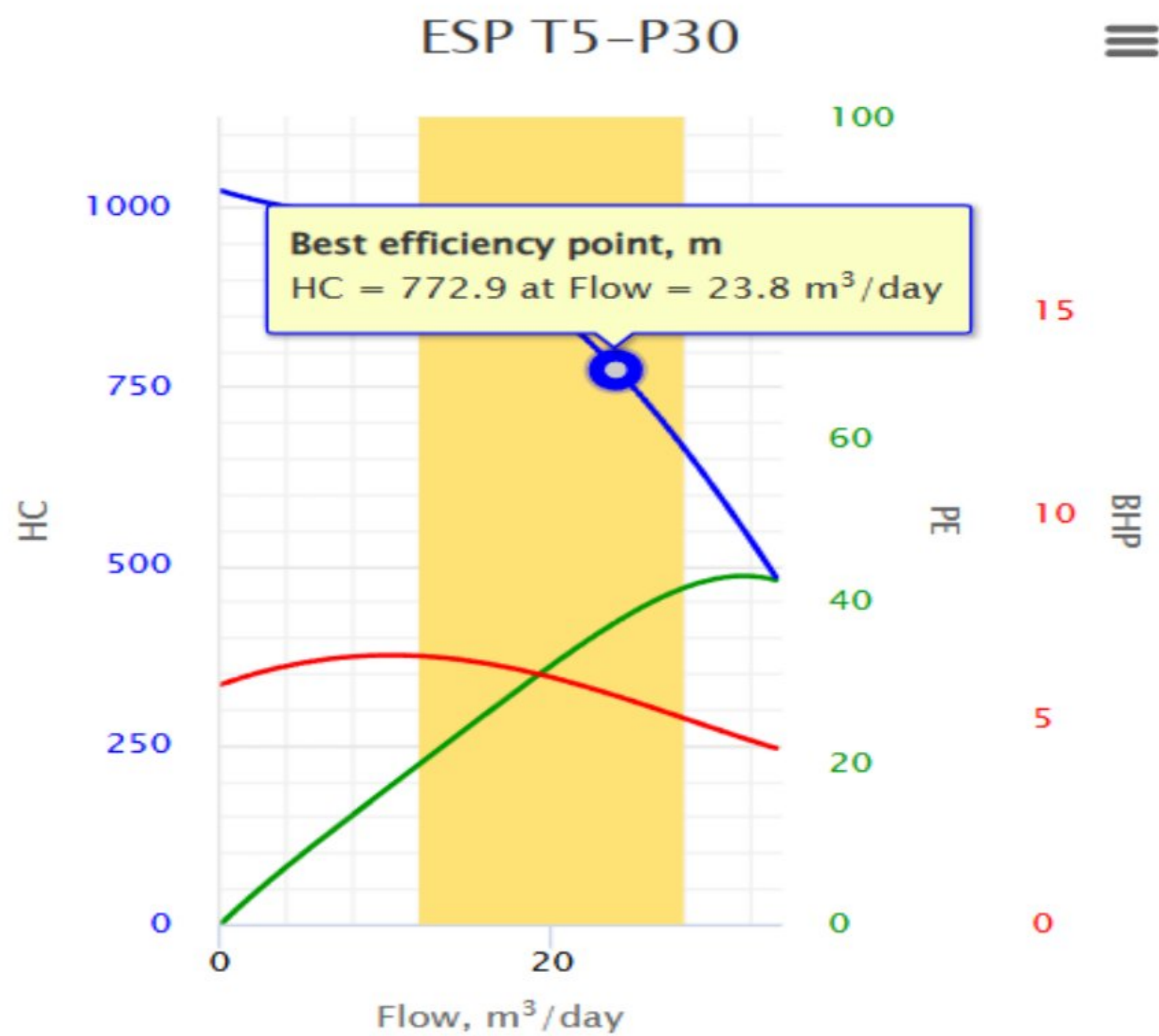
Слика 6.5 Крива карактеристике утока флуида у бушотину (Pengtools)

Примећује се да је оптимална производња флуида иста за притисак на усису пумпе од 73.6 atm и притисак на дну бушотине од 77.2 atm и износи 18 m³/dan.

На сликама 6.6 и 6.7 видимо дијаграм криве карактеристике рада ESP пумпе.



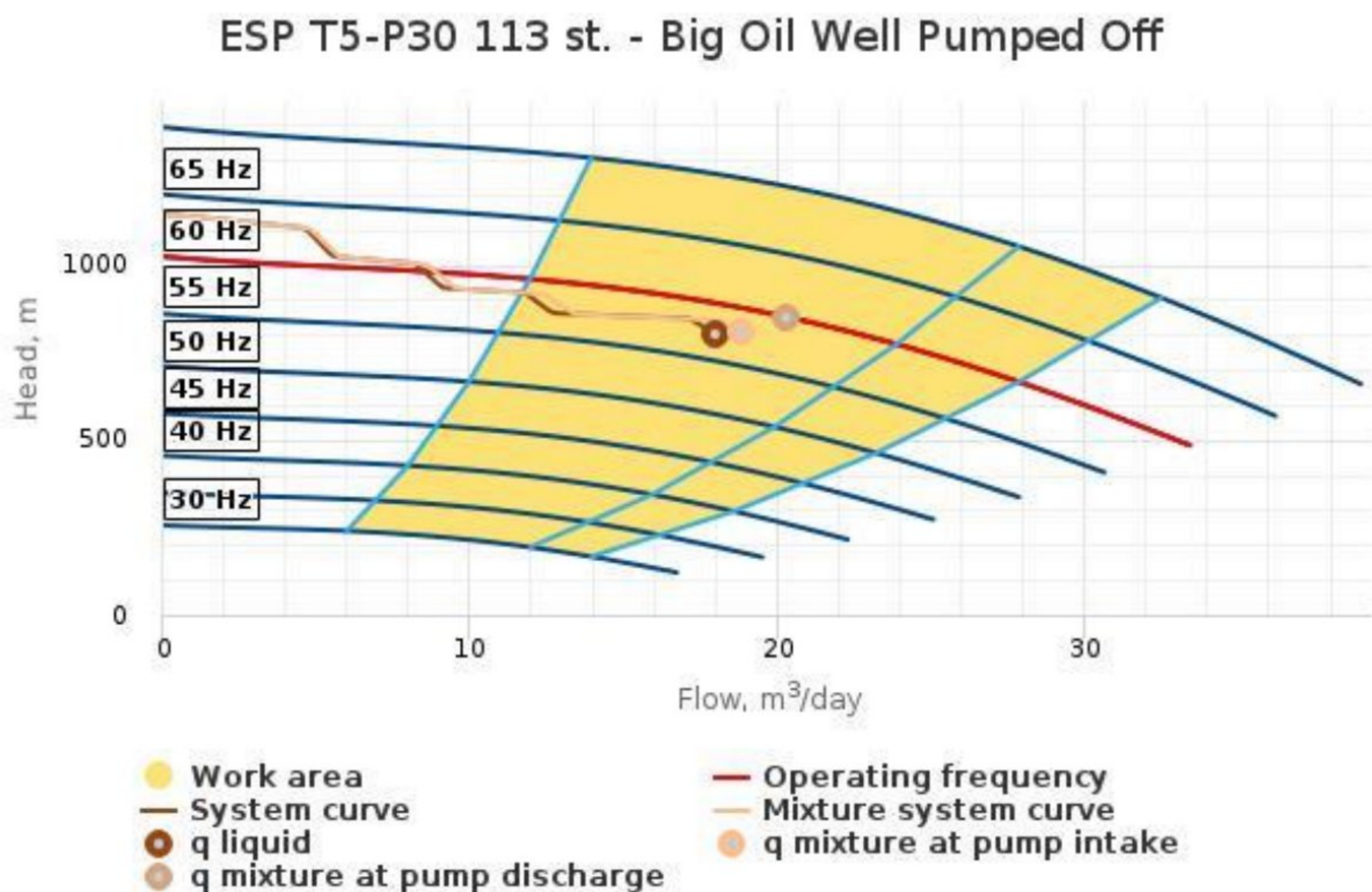
Слика 6.6. Крива карактеристике рада ESP (Pengtools)



Слика 6.7. Крива карактеристике рада ESP пумпе (Pengtools)

На сликама 6.6. и 6.7, које су исте само је на слици 6.7. приказана радна тачка пумпе и величине њених параметрара, увиђамо да проток кроз пумпу у радној тачки износи $23.8 \text{ m}^3/\text{d}$ што нам даље даје закључак да дневна производња флуида од $18 \text{ m}^3/\text{d}$ не задовољава дат критеријум односно да је знатно мања, самим тим је изабрана ESP пумпа прејака за дату производњу и да не постиже максималну ефикасност. Такође, вредност производње је мимо радног опсега и ову пумпу карактерише изразито нестабилан рад са хабањем радних кола и њиховим брзим трошењем.

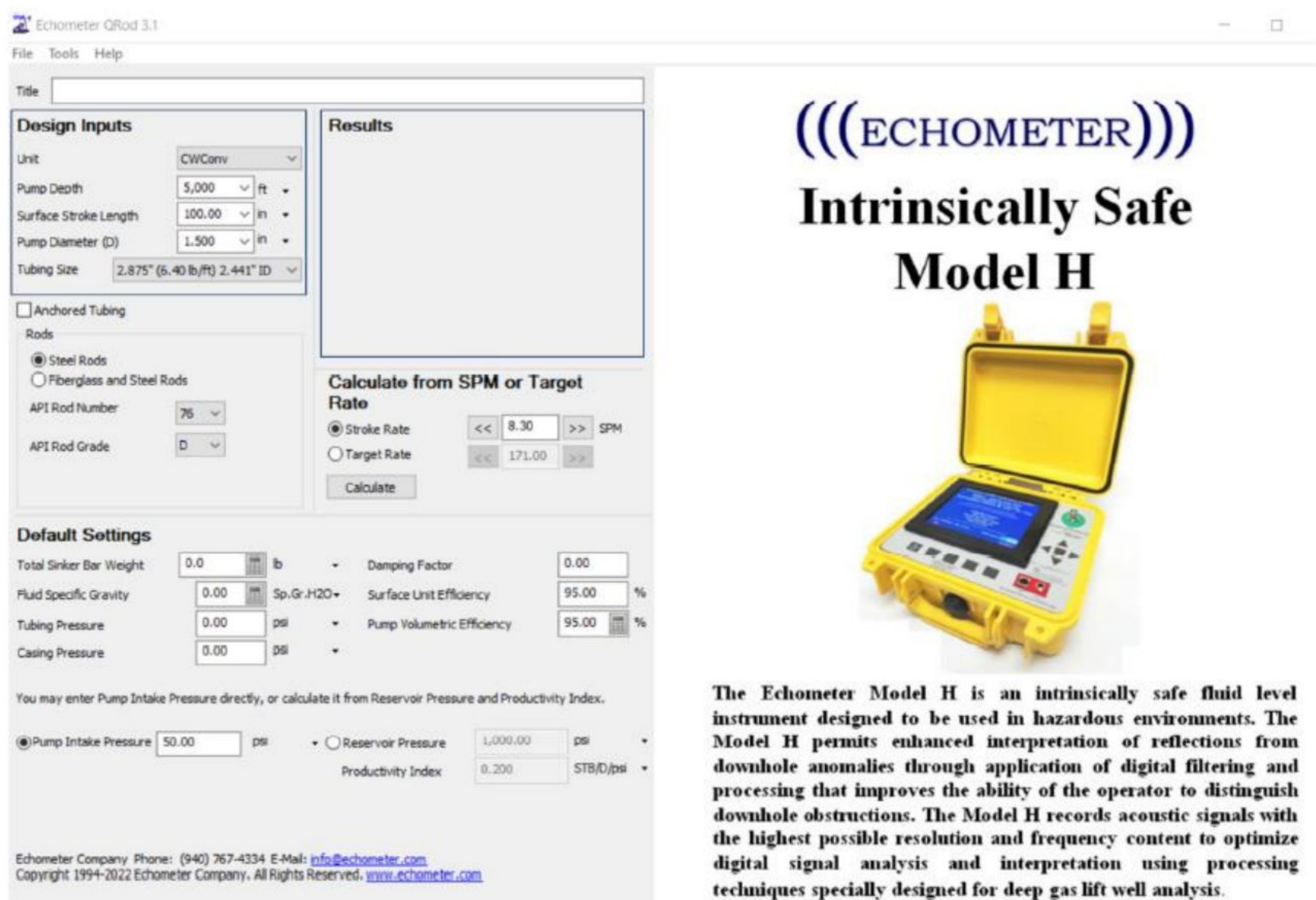
За центрифугалне пумпе је карактеристична зависност напора од количине протока флуида при различитим брзинама ротације радног кола, тј. различитим фреквенцијама. Са повећањем протока напор опада и обрнуто, већи напор на потису постиже се при мањим протоцима под условом да је фреквенција константна. За радну фреквенцију од 60 Hz и производњу флуида од $18 \text{ m}^3/\text{d}$ излазни напор је 1144 m (слика 6.8.)



Слика 6.8. Зависност фреквенције и напора од протока флуида (Pengtools)

На слици зависности фреквенције и напора од протока увиђа се врло нестабилан рад пумпе унутар радне зоне пумпе, а то је управо због производње мале количине флуида пумпом која може да ради са много већом количином флуида. Ово може довести до кавитације, прегревања пумпе, смањења ефикасности (што се и види из слике 6.6.) и повећано трошење енергије које доводи до повећања оперативних трошкова.

Даљу анализу и прорачун радимо за дубинску пумпу на клипним шипкама у *софтверу Qrod*.



Слика 6.9. Радна страна програмско пакета Qrod 3.1 (Echometer, 2015)

Слика 6.9. приказује кориснички интерфејс који се отвара након покретања програмског пакета QRod 3.1. Лева страна интерфејса садржи картице за уношење улазних података, као и картицу за приказ резултата. На десној страни, након што се унесу подаци и изврши прорачун, биће приказани одговарајући дијаграми. Ови дијаграми омогућавају визуелизацију важних параметара који су кључни за пројектовање.

У табели 6.1. приказани су параметри пумпања који представљају улазне податке за програмски пакет QRod 3.1. Ови параметри укључују дужину хода глатке шипке, број ходова, дубину уградње пумпе, врсту пумпе и пречник пумпе.

Табела 6.1. Улазни подаци за прорачун и анализу дубинске пумпе

Подаци бушотине	
Производња (Q_f) (m^3/dan)	18
Производња нафте (Q_t) (t/dan)	4
Заводњеност (%)	78
Динамички ниво (m)	1900
Притисак на тубингу (bar)	4
Притисак на кејзингу (bar)	13
Низ клипних шипки (mm)	19 i 22
Качалка (t)	12
Пречник тубинга (mm)	73
Пречник пумпе (mm)	38.1
Број ходова по минути	6.55
Притисак на усису пумпе (bar)	3.45

Након дефинисања параметара пумпања и специфичних карактеристика подземне опреме, врши се унос њихових вредности у софтверски алат QRod 3.1 ради пројектовања и анализе система дубинског пумпања клипним шипкама.

На слици 6.10. приказана је картица за унос основних параметара потребних за израчунавање. Ови улазни подаци укључују тип пумпе (конвенционална), дубину пумпе, дужину хода клипа, пречник пумпе и димензије тубинга. Такође, примећује се да тубинг није анкерисан.

Слика 6.10. Улазни подаци за прорачун (*Qrod 3.1*)

Следећи корак је одабир материјала од којег су клипне шипке израђене. Шипке могу бити направљене од челика или од комбинације челика и фибергласа.

Слика 6.11. приказује картицу у којој су изабране клипне шипке од челика. API број шипки је 76, док је квалитет челика означен као "D" према API стандарду.

Слика 6.11. Материјал, пречник и квалитет по API стандарду (*Qrod 3.1*)

Слика 6.11. приказује различите API бројеве клипних шипки, који могу бити 55, 65, 66, 75, 76, 77, 86, 87, 88, 97, 98, 99, 108 и 109. Ови бројеви се односе на пречник клипних шипки, при чему неки бројеви указују на шипке са два пречника и у том случају већи пречник је у горњем делу бушотине због већег напрезања на истезање, а мањи у доњем делу.

API бројеви попут 75, 86, 97 и 108 указују на шипке које имају три различита пречника у низу: највећи на врху бушотине, средњи у средини и најмањи на дну. API број у суштини одређује да ли се ради о шипкама са једним пречником или о степенчастом низу са више пречника.

АПИ број клипне шипке	mm =>						Пречник клипних шипки је исти на врху, у средини и на дну. Износи 16мм (5/8 in)
	32 1 1/4"	29 1 1/8"	25 1"	22 7/8"	19 3/4"	16 5/8"	
55						✓	Пречник на врху низа је 19 мм (3/4 in) док је пречник на дну 16 мм (5/8 in)
65					✓	✓	Пречник је исти на врху, у средини и на дну низа клипних шипки. Износи 19 мм (3/4 in)
66					✓		Пречник на врху је 22 мм (7/8 in), у средини 19 мм (3/4 in) и на дну 16мм (5/8 in)
75				✓	✓	✓	Пречник на врху низа је 22 мм (7/8 in) док је пречник на дну 19 мм (3/4 in)
76				✓	✓		Пречник је у свим деловима низа исти и износи 22 мм (7/8)
77				✓			Пречник је на врху низа 25 мм (1 in), у средини 22 мм (7/8 in) и на дну 19 мм (3/4 in)
86			✓	✓	✓		Пречник је на врху низа 25 мм (1 in) док је на дну низа 22 мм (7/8 in)
87			✓	✓			Пречник је свуда исти и износи 25 мм (1 in)
88			✓				Пречник на врху је 29 мм (1 1/8 in), у средини низа је 25 мм (1 in) док је на крају низа 22 мм (7/8 in)
97		✓	✓	✓			Пречник на врху низа износи 29 мм (1 1/8 in), а на дну низа 25 мм (1 in)
98		✓	✓				Пречник је у свим деловима низа исти и износи 29 мм (1 1/8 in)
99		✓					Пречник је на врху низа 32 мм (1 1/4 in), у средини низа 29 мм (1 1/8 in) док је на дну низа 25 мм (1 in)
108	✓	✓	✓				Пречник на врху низа је 32 мм (1 1/4 in) док је на дну низа 29 мм (1 1/8 in)
109	✓	✓					

Слика 6.12. Табела пречника према API стандарду (Echometer, 2015)

Након избора клипних шипки, неопходно је дефинисати релевантне податке везане за производни флуид, као и притиске у тубингу и међупростору, заједно са осталим параметрима везаним за пумпу. Слика 6.13. представља картицу у коју се уносе густина флуида (енгл. *Fluid Specific Gravity*), притисак у тубингу (енгл. *Tubing Pressure*), притисак у међупростору (енгл. *Casing Pressure*), фактор пригушења (енгл. *Damping Factor*), ефикасност површинске опреме (енгл. *Surface Unit Efficiency*) и запреминску ефикасност пумпе (енгл. *Pump Volumetric Efficiency*)

Default Settings

Total Sinker Bar Weight	<input type="text" value="0.0"/>	lb		Damping Factor	<input type="text" value="0.10"/>
Fluid Specific Gravity	<input type="text" value="1.00"/>	Sp.Gr.H2O	▼	Surface Unit Efficiency	<input type="text" value="95.00"/> %
Tubing Pressure	<input type="text" value="4.00"/>	bar	▼	Pump Volumetric Efficiency	<input type="text" value="95.00"/> %
Casing Pressure	<input type="text" value="13.00"/>	bar	▼		

Слика 6.13. Параметри пумпе, флуида, тубинга и кезинга (Qrod 3.1)

Да би се прорачун могао успешно извршити, неопходно је унети притисак на усису пумпе (енгл. *Pump Intake Pressure*). У случају да ова вредност

није доступна, може се заменити уносом података о притиску у лежишту (енгл. *Reservoir Pressure*) и индексу продуктивности (енгл. *Productivity Index*). Слика 6.14. илуструје картицу за унос ових параметара.

Слика 6.14. Картица за унос вредности притиска на усису (*Qrod 3.1*)

Последњи параметар неопходан за добијање резултата и динамички ажурираних дијаграма који омогућавају детаљну анализу рада система дубинског пумпања је број ходова по минути (енгл. *Strokes Per Minute*). Слика 6.15. приказује картицу у коју се уноси овај податак. Систем дубинског пумпања са клипним шипкама за бушотину X-001 пројектован је за 6.55 ходова по минути (табела 6.1).

Слика 6.15. Картица за унос броја ходова по минути (*Qrod 3.1*)

Резултати прорачуна су приказани на слици 6.16.

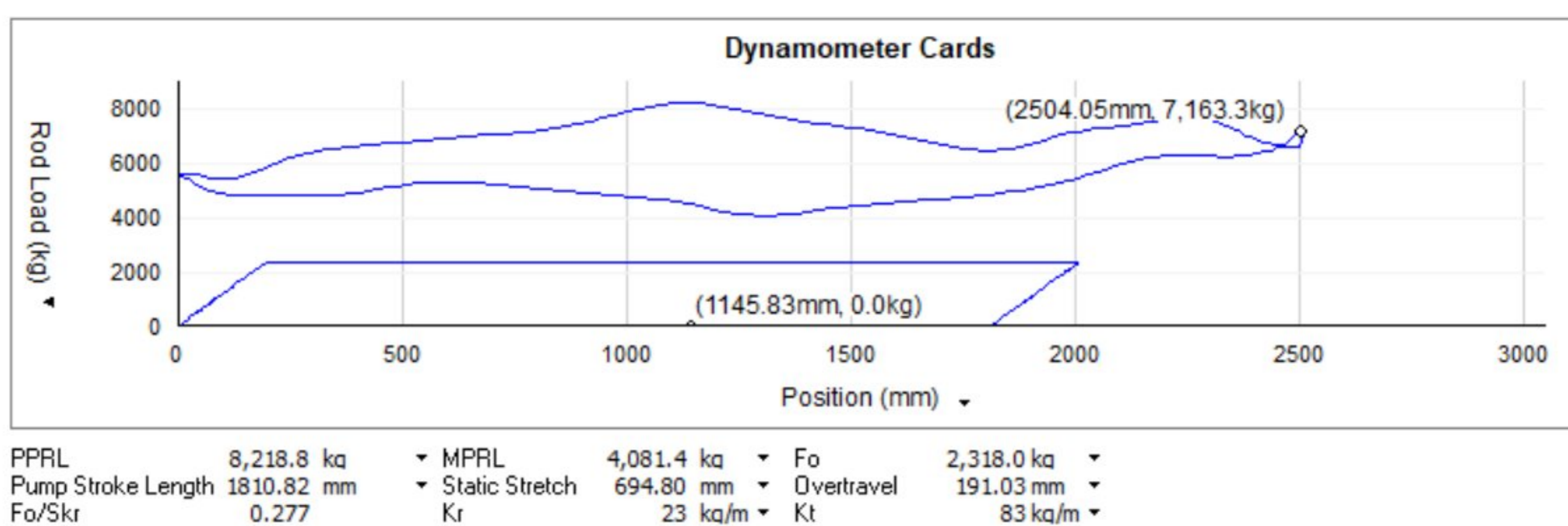
Results	
Rate (100% pump volumetric eff.)	19.5 m ³ /D ▼
Rate (95% pump volumetric eff.)	18.5 m ³ /D ▼
Rod Taper	34.0%, 66.0%
Top Steel Rod Loading	81.1%
Min API Unit Rating	320-200-99
Min NEMA D Motor Size	8.91 KW ▼
Polished Rod Power	5.26 KW ▼
TVLoad	7,211 kg ▼
SVLoad	4,893 kg ▼

Слика 6.16. Картица на којој су приказани резултати прорачуна дубинске пумпе (*Qrod 3.1*)

У случају идеалних услова, када је запреминска ефикасност пумпе 100% (енгл. *100% pump volumetric efficiency*), производња износи 19.5 m³/dan. Међутим, у реалним условима, конкретно у овом случају, запреминска ефикасност пумпе износи 95% (енгл. *95% pump volumetric efficiency*), што даје производњу од 18.5 m³/dan

Према API стандарду, потребна качаљка за овај систем има спецификацију 320 – 200 – 99. Снага електромотора (енгл. *Min NEMA D Motor Size – National Electrical Manufacturers Association*) за исправан рад система износи 8.91 kW. Оптерећење потисног вентила услед тежине произведеног флуида (енгл. *TV Load*) је 7 211 kg, док оптерећење уисног вентила услед исте тежине (енгл. *SV Load*) износи 4 893 kg.

Након целокупног прорачуна програмски пакет приказује резултате и у облику динамички ажурираних дијаграма. На слици 6.17. приказан је динамограм односно динамометарску картицу.



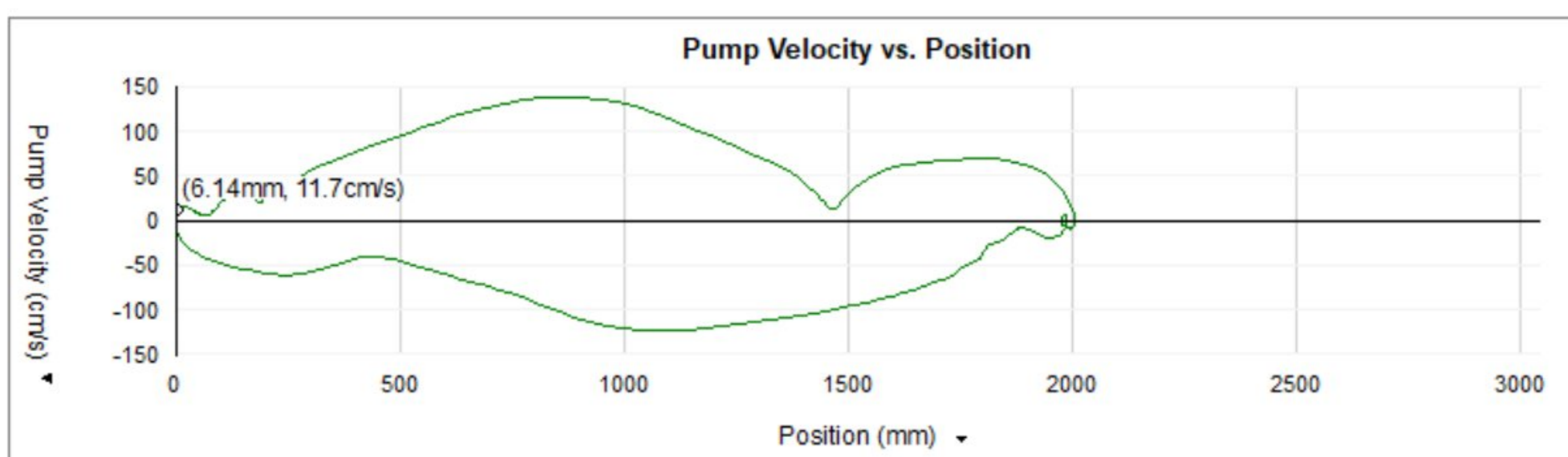
Слика 6.17. Динамограм дубинске пумпе (*Qrod 3.1*)

Испод динамограма налазе следећи прорачунати параметри и њихове вредности:

1. PPRL (енгл. *Peak Polished Rod Load*) – највеће оптерећење глатке шипке током једног хода. Износи 8 218.8 kg.
2. Pump Stroke Length – дужина коју пређе клип приликом једног хода. Износи 1 810.82 mm.

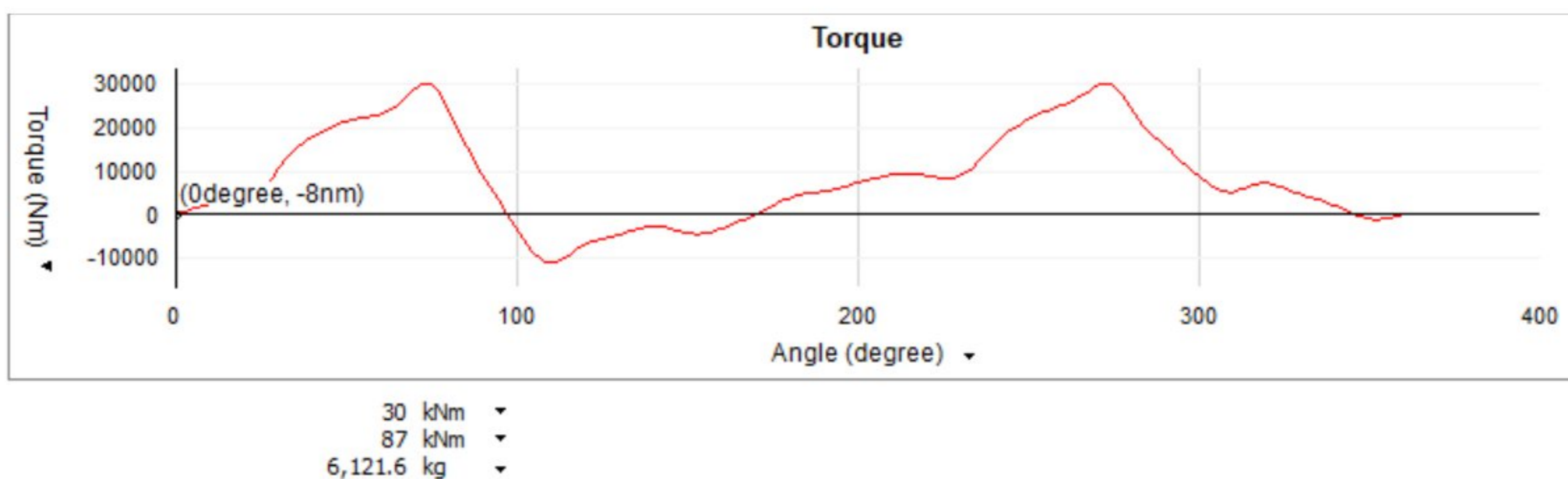
3. F_0/Skr (енгл. *Dimensionless sucker rod stretch load*) – бездимензионална вредност напрезања на истезање клипних шипки. Износи 0.277.
4. MPRL (енгл. *Minimum polished rod load*) – најмање оптерећење глатке шипке током једног хода. Износи 4 081.4 kg.
5. Static Stretch – статичко истезање клипних шипки (када нема кретања) које износи 694.80 mm.
6. Kr – параметар који представља оптерећење потребно за истезање низа клипних шипки за један m. Износи 23 kg/m
7. F_0 – статичко оптерећење стуба флуида на површину клипа. Износи 2 318 kg.
8. Overtravel – кретање вентила приликом отварања. Износи 191.03 mm.
9. Kt – параметар који представља оптерећење потребно за истезање неанкерисаног тубинга за један m. Износи 83 kg/m

Слика 6.18. приказује дијаграм зависности брзине пумпања и положаја глатке шипке. На апцисној оси се налази положај глатке шипке (mm) док се на ординатној оси налази брзина пумпања cm/s.



Слика 6.18. Картица дијаграма зависности брзине пумпања од положаја глатке шипке ($Q_{rod} 3.1$)

И последња картица приказује дијаграм зависности обртног момента и угла. На апцисној оси се налази угао (степен) док се на ординатној оси налази обртни момент (Nm) (слика 6.19).

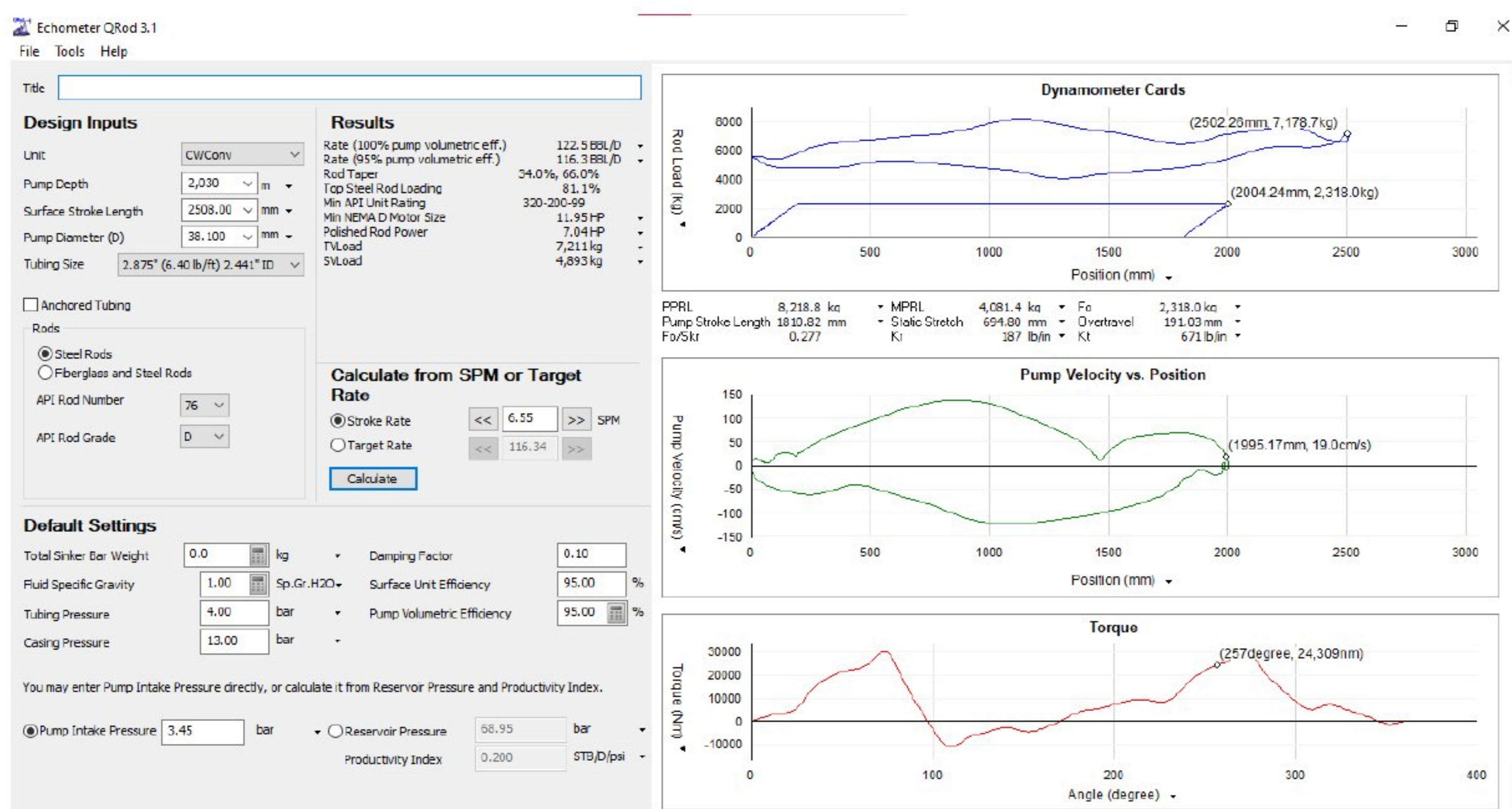


Слика 6.19. Картица зависности обртног момента и угла (Qrod 3.1)

Испод дијаграма зависности обртног момента и угла (Слика 5.10.) налазе се следећи прорачунати параметри и њихове вредности:

1. Peak GearBox Torque – излазни обртни момент који редуктор обезбеђује. Износи 30 kNm.
2. Counter Balance Moment – максимални теоретски обртни момент. Износи 87 kNm.
3. Counter Balance Effect – ефекат максималног теоретског обртног момента. Износи 6 121.6 kg.

На крају целокупан прорачун у програмском пакету Qrod 3.1 за дубонску пумпу са клипним шипкама за бушотину X-001 приказан је на слици 6.20.



Слика 6.20. Целокупан прорачун дубинске пумпе са клипним шипкама (Qrod 3.1)

6.5 Одговори на питања: Објашњење замене дубинске пумпе ESP пумпом и идентификација проблема ESP пуме на бушотини X-001

Након анализе обе методе механичке експлоатације потребно је одговорити на питања из задатка:

1. Одредити методу експлоатације која ће омогућити континуирани рад и тренутну производњу.
2. Објаснити разлог због кога је дошло до прегревања ESP пумпе.

Одговор на питање број 1

У циљу побољшања ефикасности производње на бушотини X-001, компанија је донела одлуку да изврши замену методе експлоатације увођењем Дубинске Пумпе (SRP). У складу са специфичним условима бушотине, уграђен је двоструки низ клишних шипки (19 мм и 22 мм) и каљанка од 12 тона, што је неопходно због дубине уграђивања која износи 2090 метара. Ова конфигурација је пажљиво одабрана како би се обезбедила оптимална функционалност и поузданост SRP система на овој значајној дубини.

Процес доношења одлуке о замени методе експлоатације обухватио је детаљну анализу тренутног стања бушотине и свеобухватну процену могућих решења за наставак производње. На основу резултата ове анализе, изабрана је најбоља могућа конфигурација која ће осигурати континуиран рад и максималну ефикасност система. Овим кораком, компанија је усмерава на повећање продуктивности и смањење ризика од могућих прекида у производњи, што ће позитивно утицати на укупне резултате и успех пројекта. Конкретни разлози замене ESP пумпе дубинском детаљније ће бити објашњени у питању број 2 где говоримо о самој проблематици функционисања ESP система која управо и доводи до овог корака.

Одговор на питање број 2

Анализом параметара рада пумпе и бушотине утврђено је да је дошло до значајног смањења утока флуида у бушотину. Основни узрок прегревања ESP пумпе је рад са недовољним дотоком из слоја, што је резултирало смањеним протоком флуида око пумпе и самим тим, смањеним хлађењем мотора. За мотор PEM од 32 kW потребан је доток од 23.8 m³/dan, док је дневна производња била недовољна, крећући се у опсегу од 18-19 m³/dan.

Овакав радни режим указује на потребу преласка на повременни рад, што, иако може привремено ублажити проблем, није трајно решење. У оваквим условима, дубинска пумпа је показала значајно боље перформансе у поређењу са ESP пумпом.

Из резултата прорачуна дубинске пумпе са клипним шипкама у програмском пакету Qrod 3.1, уочава се изузетна стабилност рада при специфичним условима бушотине и параметрима флуида. Ови подаци потврђују да дубинска пумпа пружа поуздано и ефикасно функционисање, што је од кључног значаја за оптимизацију производње у сложеним и захтевним условима. Стабилност рада, коју потврђују резултати прорачуна, указује на њену способност да успешно подноси варијације у условима рада и флуидима, обезбеђујући континуирану продуктивност и минимизирање ризика од прекида у производњи.

Један од кључних аспеката у разматрању избора пумпи је и економска оправданост. Као што сам истакла у поглављу 5, већина компанија у пракси већ поседује дубинске пумпе, док се ESP пумпе углавном изнајмљују, што са економског аспекта представља мање повољан избор. Због тога, употреба дубинске пумпе представља економски и технички оправданију опцију, јер нуди боље резултате, већу стабилност и смањене дугорочне трошкове.

7. ЗАКЉУЧАК

На основу анализе стања бушотине и параметара рада пумпе, одлучено је да се ESP пумпа замени дубинском пумпом (SRP). Узрок прегревања ESP пумпе је недовољан доток флуида из слоја, што је смањило проток и хлађење мотора. Дневна производња флуида, од 18-19 m³/дан, била је испод потребних 23.8 m³/дан.

Промена на дубинску пумпу показала се као боље решење, јер пружа боље перформансе и стабилност у поређењу са ESP пумпом, која се углавном изнајмљује, што је економски неповољно. Коришћење дубинске пумпе ће побољшати ефикасност, продуктивност и смањити ризик од прекида у производњи.

Избор између дубинских пумпи са клипним шипкама (SRP) и електричних потапајућих пумпи (ESP) зависи од специфичних захтева нафтне бушотине. Дубинске пумпе (SRP) пружају флексибилност и отпорност у изазовним условима, као што су високи притисци и агресивне хемикалије, што их чини погодним за сложена окружења. Насупрот томе, електричне потапајуће пумпе (ESP) нуде високу ефикасност и стабилност у константнијим условима рада, обезбеђујући константну продуктивност и лакше одржавање. Избор пумпе треба да се базира на условима рада, економским аспектима и потреби за дугорочном поузданошћу.

8. Литература

- Akchay L. Pandit, I. Y.-A. (2015). Economic Comparison Between ESP and Rod Pump for Same Rate Wells. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Nusa Dua, Bali, Indonesia: Society of Petroleum Engineers.
- Andrews, K. (2022, June 2). *How a Pump Jack Works to Bring Oil to the Surface*. Преузето са Kimray: <https://kimray.com/training/how-pump-jack-works-bring-oil-surface>
- Clegg, J., Bucaram, S., & N.W. Hein, J. (1993). Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods(includes associated papers 28645 and 29092). *Journal of petroleum technology*, 1128–1167.
- Crnogorac, M. (2020). *Optimizacija izbora mehaničke metode eksploatacije naftnih*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet.
- Dr. sc. Marin Čikeš, prof. dr. Mirko Zelić (2006). *Tehnologija proizvodnje nafte dubinskim crpkama*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-Geološko-Naftni fakultet.
- Echometer. (2015). *QRod Help and User Guide*. Преузето са Echometer: <https://echometer.com/Support/Quick-Refs>
- Esmitech. (2024, July 16). *The Critical Role of Electric Submersible Pumps in the Oil and Gas Industry*. Преузето са Esmitech: <https://www.esimtech.com/the-critical-role-of-electric-submersible-pumps-in-the-oil-and-gas-industry.html>
- Fetoui, I. (2018). *ESP Design – Hand Calculations*. Преузето са Production technology: <https://production-technology.org/esp-design-hand-calculations/>
- Flatern, R. v. (2015, September 9). *The Defining Series: Artificial Lift*. Преузето са SLB: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-artificial-lift>
- George Simonelli, S. S. (2017). Operating Parameters of Electrical Submersible Pump Simulation Using Excel. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology* , 3890-3896.

- George Waters, D. N. (2015, January 1). *The Defining Series: Electrical Submersible Pumps*. Преузето са SLB: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-esp>
- Kimray. (2022). *How Does an Electric Submersible Pump (ESP) Work?* Преузето са Kimray: <https://kimray.com/training/how-does-electric-submersible-pump-esp-work>
- Klipna pumpa*. (.). Преузето са PDFCoffee: <https://pdfcoffee.com/klipna-pumpa-pdf-free.html>
- Ladopoulos, E. G. (2020). Is ESP Artificial Lift the most Convenient Method for Oil & Gas Well Development ? What will be Next ? *Universal Journal of Hydraulics* 8, 1-14.
- Ljubisav Krsmanović, A. G. (2015). *Turbomašine i pumpe*. Beograd: Mašinski fakultet.
- Michael, A. (2022, June 9). *Brownfield IOR: Selecting the Appropriate Artificial Lift Method*. Преузето са The Way Ahead: <https://jpt.spe.org/twa/brownfield-ior-selecting-the-appropriate-artificial-lift-method>
- Okodi, E. (2017). *A Comparative study of electrical submersible and sucker-rod pumps for production optimization*. Преузето са Academia.edu: https://www.academia.edu/38869119/A_COMPARATIVE_STUDY_OF_ELECTRICAL_SUBMERSIBLE_AND_SUCKER_ROD_PUMPS_FOR_PRODUCTION_OPTIMIZATION
- Production Technology*. (2005). Edinburgh: Heriot Watt University.
- Riadh, J. (2018). *Artificial Lift System- Design, Optimization and Cost Estimation*. Tunisia: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès.
- Sherif Fakher, A. K. (2021). A comprehensive review of sucker rod pumps' components, diagnostics, mathematical models, and common failures and mitigations. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 11, 3815-3839.

- Steve Breit, N. F. (2011, December 17). *Electric Submersible Pumps in the Oil and Gas Industry*. Прейзето ca Pumps and systems: https://www.pumpsandsystems.com/electric-submersible-pumps-oil-and-gas-industry?oly_enc_id=6233H7701001C6A
- Takacs, G. (2017). *Electrical Submersible pumps manual 2nd Edition*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Tomljanović, L. (2019). *Proračun električne uronjive crpke numeričkim*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Ugochukwu Ilozurike Duru, O. I. (2021). Evaluating Lift Systems for Oil Wells Using Integrated. *Journal of Petroleum Engineering & Technology*, 32-48.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ ЗАВРШНОГ РАДА

Име и презиме студента Анастасија Мирјанић

Број индекса Р521/23

Изјављујем

да је завршни рад под насловом

"Избор одговарајуће механичке методе"

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да завршни рад у целини ни у деловима није био предложен за стицање друге дипломе на студијским програмима Рударско-геолошког факултета или других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА
О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ЗАВРШНОГ РАДА

Име (име родитеља) и презиме студента Анастасија (Данило) Мирјанић

Број индекса Р521/23

Студијски програм Инжењерство нафте и гаса

Наслов рада "Избор одговарајуће механичке методе"

Ментор Проф. др. Душан Даниловић

Изјављујем да је штампана верзија мог завршног рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради одлагања у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити у електронском каталогу и у публикацијама Рударско-геолошког факултета.

У Београду, _____

Потпис студента

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ ЗАВРШНОГ РАДА

Овлашћујем библиотеку Рударско-геолошког факултета да у Дигитални репозиторијум унесе мој завршни рад под насловом:

"Избор одговарајуће механичке методе"

који је моје ауторско дело.

Завршни рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Мој завршни рад одложен у Дигиталном репозиторијуму Рударско-геолошког факултета је (*заокружити једну од две опције*):

I. редуковано доступан кроз наслов завршног рада и резиме рада са кључним речима;

II. јавно доступан у отвореном приступу, тако да га могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се уз сагласност ментора одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве.)

У Београду, _____

Потпис ментора

Потпис студента

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
 2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
 3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
 4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
 5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
 6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.
-