

УДК 622.24:54.07

## РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БУРОВОГО НАСОСА F-1300

Петрочук А.А., Бурухина О.В.

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет», Саратов,  
e-mail: lesha.petrochuk@yandex.ru

В данной статье рассмотрены особенности работы бурового насоса в математической модели и работы бурового насоса во время бурения. Целью данной статьи является проведение статистического анализа работы бурового насоса по математической модели и работы насоса во время бурения. Для разработки и дальнейшей апробации математической модели бурового насоса использовался буровой насос F-1300, который активно применяется при бурении скважин. Для моделирования работы насоса использовался специальный программный пакет, который учитывает различные параметры, такие как скорость прокачки бурового насоса, индекс очистки скважины, режим течения раствора и реологические свойства используемого бурового раствора. Данный программный пакет использует одна из крупнейших компаний, которая оказывает нефтесервисные услуги в области бурения и строительства скважин. Работа насоса, которая рассчитана по модели, и реальная скорость прокачки раствора насосом различается. Эти отличия обусловлены изменениями параметров во время бурения. Актуальность анализа заключается в том, что по отличиям производительности насоса во время бурения в сравнении с моделью можно определить изменяющиеся условия бурения и оптимизировать очистку скважины. Получаемые результаты моделирования применяются при строительстве скважин.

**Ключевые слова:** буровой насос, буровой раствор, модель, производительность, скорость прокачки, индекс очистки скважины

## DEVELOPMENT AND TESTING OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE F-1300 DRILLING PUMP

Petrochuk A.A., Burukhina O.V.

Saratov State University, Saratov, e-mail: lesha.petrochuk@yandex.ru

This article considers the peculiarities of the drilling pump operation in the mathematical model and the drilling pump operation during drilling. The purpose of this article is to conduct a statistical analysis of the operation of the drilling pump in the mathematical model and the operation of the pump during drilling. For the development and further testing of the mathematical model of the drilling pump the drilling pump F-1300, which is actively used in drilling wells, was used. For modeling of the pump operation a special software package was used, which takes into account various parameters such as pumping speed of the drilling pump, well cleaning index, mud flow regime and rheological properties of the drilling mud used. This software package is used by one of the largest companies that provides oilfield services in the field of drilling and well construction. The pump operation, which is calculated according to the model, and the actual speed of mud pumping by the pump differ. These differences are caused by changes in parameters during drilling. The relevance of the analysis is that the differences in pump performance during drilling compared to the model can be used to determine changing drilling conditions and optimize well cleanup. The resulting modelling results are applied to well construction.

**Keywords:** drilling pump, drilling mud, model, performance, pumping rate, well cleaning index

В статье рассматривается работа бурового насоса при его моделировании и работа бурового насоса во время бурения. Ранее авторами были разработаны математические модели центробежных насосов [1, с. 48–51], отпарных колонн [2, с. 25–28], а также аварийных ситуаций на производстве [3, с. 134–138].

Буровые насосы – это оборудование, устанавливаемое на самоходные и стационарные буровые установки, где насос предназначен для подачи бурового раствора в скважину, а раствор нужен для охлаждения бурильного инструмента и для выноса породы с забоя [4, с. 2, 15]. Качество очистки скважины от шлама (скорость и степень очистки) зависит от скорости восходящего потока, которая определяется производительностью насосов [5, с. 112].

Целью данного исследования является проведение статистического анализа работы бурового насоса по математической модели и работы насоса во время бурения.

### Материалы и методы исследования

Одним из часто используемых насосов является буровой насос F-1300. Это трехплунжерный насос с поршнем однократно-го действия.

Данный насос имеет характеристики, которые представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, буровой насос F-1300 имеет мощность 1300 л.с., предназначен для нагнетания бурового раствора в пласт под высоким давлением, при бурении, цементировании скважин или выполнении капитальных ремонтов скважин [6]. Данный насос широко применяется при буре-

нии скважин, имеет следующие особенности конструкции:

- обладает увеличенной длиной хода поршня, что дает возможность работы на низких скоростях, что способствует снижению износа деталей в напорном отделе насоса;

- в отделе привода насоса существует двойная система смазки, это принудительная и смазка разбрызгиванием;

- конструкция бурового насоса была усовершенствована и имеет высокую устойчивость к износу, что обеспечивает стабильную бесперебойность в работе;

- главные составляющие гидравлического цилиндра, нагнетательный и всасывающий клапаны, компоненты напорной части – взаимозаменяемы;

- высокая износоустойчивость напорной части намного повышает работоспособность этого трехцилиндрового насоса;

- техническое и профилактическое обслуживание легко проводить благодаря автономной конструкции бурового насоса [6].

Таблица 1

Характеристики насоса F-1300

Максимальный диаметр×длина хода, мм	180×304,8
Ходов в минуту, ход/мин	120
Номинальная мощность	956 кВт
Мощность	1300 л.с.
Линии всасывания, мм	304,8
Выпускной канал, мм	127
Масса, кг	24572

Производительность насоса рассчитывается по следующей формуле:

$$V = (ВД_{\text{штулки}}^2 \times L \times КПД) / 25,9, \quad (1)$$

где  $V$  – производительность насоса, л/ход;

$L$  – длина хода поршня, дюйм;

$ВД_{\text{штулки}}$  – внутренний диаметр штулки, дюйм [4, с. 2, 9].

Далее для вычисления производительности насоса в л/мин производят следующее действие:

$$V_{\text{произв. насоса}} = V \times b, \quad (2)$$

где  $V_{\text{произв. насоса}}$  – производительность насоса, л/мин;

$V$  – производительность насоса, л/ход;

$b$  – количество ходов насоса, ход/мин [4, с. 2, 9].

Было проведено сравнение проектной работы данного насоса F-1300 с его реальной работой при строительстве скважины в Европейской части России.

Рассмотрена проектная работа насоса при бурении следующих интервалов: направление, кондуктор, эксплуатационная колонна и хвостовик. Характеристикой, которая рассчитывается при бурении скважины, является производительность насоса  $Q$ (л/с). Расчет модели работы бурового насоса произведен с использованием специализированного программного пакета, который использует одна из крупнейших нефтесервисных компаний в мире [4, с. 5, 36].

В программу в качестве исходных данных вводятся следующие показатели: тип раствора; плотность раствора; глубина скважины; зенитный угол – это угол между осью скважины и вертикалью; диаметр ствола скважины; коэффициент кавернозности скважины – отношение суммарного объема каверн к соответствующему видимому объему горной породы; диаметр и толщина обсадной колонны; скорость проходки; давление; показания с вискозиметра Фанна.

Программой подбирается такая скорость прокачки бурового раствора через насос, чтобы промывочная жидкость обеспечивала эффективную очистку ствола скважины. Для каждого интервала берется определенная скорость прокачки бурового раствора, ввиду особенности строения скважины. Скорость прокачки бурового раствора через насос для разных интервалов бурения по программе промывки рассчитывается программой. Также программой определяется индекс очистки скважины, который бывает очень хороший, хороший, плохой, очень плохой. Если индекс находится в зоне «плохой» и «очень плохой», то подбирается другая скорость прокачки бурового раствора насосом.

Программа позволяет рассчитывать индекс очистки скважины исходя из множества базы данных, физических законов и законов гидродинамики. Производительность насоса рассчитывается исходя из скорости осаждения частиц, которые подчиняются закону Стокса:

$$V_{\text{осаж}} = 138 \frac{(\rho_{\text{част}} - \rho_{\text{раств}}) d_{\text{част}}^2}{\mu}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{част}}^2$  – диаметр частицы, см;

$\rho_{\text{част}}$  – плотность частицы, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{раств}}$  – плотность раствора, г/см<sup>3</sup>;

$\mu$  – вязкость раствора, сП;

$V_{\text{осаж}}$  – скорость осаждения, см/с [7, с. 95].

А само осаждение определяется тремя механизмами осаждения: свободное, степенное и осаждение с эффектом Бойкота. Вынос шлама определяется скоростью выноса. Скорость выноса = скорость потока в затрубье – скорость осаждения [8, с. 17].

Таблица 2

Параметры бурения скважины

Параметр Интервал	Значение			
	Направление	Кондуктор	Эксплуатационная колонна	Хвостовик
Глубина по стволу, м	170	300	2215	2465
Зенитный угол, град	0	0	58	86
Плотность раствора, г/см <sup>3</sup>	1,14	1,14	1,33	1,05
Скорость проходки, м/ч	10	16	15	10
Эквивалентная циркуляционная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,161/1,170	1,196/1,204	1,440/1,446	1,607/1,612
Скорость в затрубном пространстве, м/с	2	2	2	2
Давление, бар	65	92	170	194
Производительность насосов, л/с	55	55	36	12
Индекс очистки скважины	Хорошая очистка	Хорошая очистка	Хорошая очистка	Хорошая очистка

Также вынос шлама определяется режимом течения раствора в затрубном пространстве, которые бывают пробковый, ламинарный и турбулентный. Режим течения определяется критерием Рейнольдса:

$$Re = (vdp) / \mu, \quad (4)$$

где d – диаметр затрубного пространства, м;

Re ≤ 2100 – ламинарный;

Re ≥ 2100 – турбулентный [9, с. 154].

Выбор режима ограничивает природа пород, которые могут подвергаться эрозии и разрушаться. В программе учитываются данные факторы. Слишком высокая скорость течения раствора может привести к повышению давления, приводящего к гидроразрыву пласта.

В программе учитывается реология раствора. Программное обеспечение исследует широкий спектр реологических свойств, полученных из большой базы полевых данных, и рекомендует реологические свойства, соответствующие назначению в пределах ограничения скважин. Также программой учитывается зависимость температуры в скважине от глубины и времени и, как следствие, влияние на давление, плотность, реологию и прочность геля.

Рассмотрены все интервалы бурения скважины. Были внесены в программу данные из программы промывки для интервалов «Направление», «Кондуктор», «Эксплуатационная колонна» и «Хвостовик». Значение скорости прокачки бурового раствора при бурении скважины оценивалось 1 раз в день, при этом бурение скважины проводилось в течение 30 дней: «Направление» 4 дня, «Кондуктор» 8 дней, «Эксплуатационная колонна» 13 дней, «Хвостовик» 5 дней.

Скорость прокачки бурового раствора для различных интервалов колебалась около проектного значения. Отклонения скорости прокачки БР (буровой раствор) объясняются изменением условий во время бурения. Были внесены в программу данные из программы промывки для интервалов, представленных в табл. 2. Программа рассчитала оптимальные варианты производительности насосов при бурении, при которых обеспечивается оптимальная очистка скважины.

#### Результаты исследования и их обсуждение

По табл. 2 видно, что рассчитанные варианты прокачки бурового раствора насосом для названных интервалов бурения позволяют эффективно очищать скважину.

Для интервалов «Направление» и «Кондуктор» оптимальная производительность насоса составила 55 л/с, расчетный индекс очистки находится в зоне «хороший». Для интервала «Эксплуатационная колонна» оптимальная производительность насоса составила 36 л/с, расчетный индекс очистки находится в зоне «хороший». Для интервала «Хвостовик» оптимальная производительность насоса составила 12 л/с, расчетный индекс очистки находится в зоне «хороший».

Проведен сравнительный анализ расчетных данных специализированной программы расхода бурового раствора с полученными данными при бурении скважины. Сравнительная характеристика представлена в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительная характеристика работы насоса для разных интервалов

Интервал	Скорость прокачки БР по программе промывки, л/с	Скорость прокачки БР на скважине, л/с
Направление	55	44-58
Кондуктор	55	48-59
Эксплуатационная колонна	36	35-47
Хвостовик	12	11-17

Как видно из табл. 3, проектные расчеты носят предварительный характер и могут отличаться от фактических значений как в большую, так и в меньшую сторону, исходя из фактических условий бурения, ввиду большого количества факторов неопределенности, данные по которым невозможно получить и вложить их в какие-либо математические модели.

Различия реальных данных по скорости прокачки бурового раствора насосом F-1300 от программы промывки обуславливаются изменениями параметров бурения. Увеличение прокачки бурового раствора обуславливается необходимостью увеличения эффективного выноса шлама из ствола скважины – это обеспечивается турбулентным режимом течения раствора. Уменьшение прокачки промывочной жидкости обуславливается тем, что при прохождении инструмента через эрозионные пласты – ламинарный поток обеспечивает равномерное течение раствора, не разрушая пласты. Увеличение скорости прокачки раствора при прохождении через чувствительные к эрозии отложения может привести к поглощению, а затем и к ГНВП. Таким образом, буровой насос должен обеспечивать возможность простого и быстрого регулирования подачи и напора в зависимости от параметров технологического режима бурения [10].

Снижение скорости прокачки, как это видно для интервалов «Направление» и «Кондуктор», обуславливается тем, что раствор проходит через чувствительные к эрозии отложения и имеет достаточную вязкость, чтобы обеспечить эффективную очистку раствора и не разрушить скважину. Увеличение скорости прокачки раствора повышает эффективность очистки скважины, особенно это важно при бурении угловых интервалов, которым является «Эксплуатационная колонна», потому что при малых скоростях и ламинарном течении раствора образуется шламовая подушка, которая значительно затрудняет очистку скважины. Образование шламовой подушки обуславливало необходимость увеличить производительность насоса [6].

### Заключение

В статье рассмотрены особенности работы бурового насоса, а именно проведен анализ работы бурового насоса при использовании математической модели насоса и работа бурового насоса во время бурения. Для создания математической модели работы бурового насоса использовался специализированный программный пакет.

Таким образом, в статье показано, что производительность работы бурового насоса, которая получена при моделировании, отличается от реального режима работы насоса, которая обуславливается различными факторами. Программа помогает рассчитывать эффективную очистку скважины.

### Список литературы

1. Грачева Ю.А., Кривонос А.А., Никифоров И.А., Бурухина О.В. Разработка математической модели центробежного насоса для работы в составе компьютерного тренажерного комплекса // Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. 2019. № 8. С. 48–51.
2. Головина Н.С., Бурухина О.В. Разработка математической модели узла отпарной колонны установки гидрокрекинга для работы в составе компьютерного тренажерного комплекса // Нанотехнологии: наука и производство. 2023. № 4. С. 25–28.
3. Панкратов И.С., Кривонос А.А., Бурухина О.В., Никифоров И.А. Моделирование аварийных ситуаций на тренажерном комплексе производства ароматических углеводородов // Современные проблемы и пути их решения в науке, производстве и образовании. 2019. № 8. С. 134–138.
4. Руководство по буровым растворам для инженеров-технологов / MiSwaco, 2009. 1000 с.
5. Ананьев А.Н. Учебное пособие для инженеров по буровым растворам. Волгоград: Интернешнл Касп Флоидз, 2000. 176 с.
6. Буровой насос F-1300 [Электронный ресурс]. URL: <http://snabresurs.com/catalog/burovye-nasosy/burovoy-nasos-f-1300/> (дата обращения: 22.03.2024).
7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Альянс, 2004. 753 с.
8. Федусенко И.В. Коллоидная химия буровых растворов. Саратов: Саратовский государственный университет, 2018. 54 с.
9. Бабаян Э.В., Мойса Н.Ю. Буровые растворы. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 332 с.
10. Волков А.С., Ермакова В.И. Буровые геологоразведочные насосы. М.: Недра, 1978. 205 с.