

На правах рукописи

Кадочников Вячеслав Григорьевич



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
ОЧИСТКИ НАКЛОННО НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИН
ОТ ШЛАМА ПРИ РОТОРНОМ БУРЕНИИ**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Двойников Михаил Владимирович

Официальные оппоненты:

Хузина Лилия Булатовна

доктор технических наук, доцент, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт», кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, заведующий кафедрой;

Мелехин Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра нефтегазовые технологии, доцент;

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.


Защита диссертации состоится **18 июля 2023 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 мая 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



БЛИНОВ

Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ежегодно доля наклонно направленного (НН) бурения во всем мире возрастает и составляет на сегодняшний день более 85% всего объема строительства нефтегазовых скважин. Это обусловлено освоением труднодоступных и глубоко залегающих коллекторов, доступ к которым возможен лишь через протяженные скважины сложных траекторий, имеющих большое количество участков изменения зенитного и азимутального углов. При проводке таких скважин повышается вероятность возникновения осложнений и аварий, которые в большинстве случаев связаны с некачественной очисткой от выбуренной горной породы (шлама).

Анализ результатов роторного бурения НН скважин показал, что проводка сложно построенных проектных профилей (отходы от вертикали более 3000 м) в местах зенитного угла от 50 до 75 градусов в 25 - 30 % случаев осложняется скоплением шлама на нижней стенке скважины, образованием уступов и желобов, обуславливающих образование «шламовых подушек». Формирование ствола НН скважины в условиях неустойчивых горных пород может сопровождаться осыпями и обвалами последних.

Увеличение количества шлама приводит в последствие к затяжкам и посадкам бурильного инструмента, а также неконтролируемости его напряженно-деформированного состояния (НДС). Недостаточный контроль НДС бурильного инструмента и параметров бурения, с учётом гидродинамики промывки скважины и свойств бурового раствора (БР), приводит к недохождению осевой нагрузки на долото до забоя, а также к отворотам и изломам элементов компоновки бурильной колонны (БК). Проблема шламонакопления также является причиной увеличения эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) в кольцевом пространстве (КП) скважины, что негативно сказывается на фильтрационно-ёмкостных свойствах продуктивного пласта.

Применение в составе БК технических средств (турбулизаторов, циркуляционных переводников и др.), повышающих эффективность очистки скважины, не позволяет

получить нужного эффекта, ввиду сложности траектории и невозможности применения большого количества устройств.

Увеличение частоты вращения БК и скорости течения БР, а также повышение его вязкости (периодическое использование вязких пачек) не всегда обеспечивают повышение качества очистки от шлама, образовавшегося в результате осыпей, обвалов стенок и высоких скоростей бурения скважины.

Разработка технологии гидромеханической очистки НН скважин искусственным введением БК в продольную потерю устойчивости и образованием требуемого количества контролируемых полуволн с учетом их длины, а также свойств БР, гидродинамики промывки и зенитного угла позволит обеспечить качественную очистку от шлама при роторном бурении.

Степень разработанности темы исследования

Научный вклад в решение задач, связанных очисткой скважин от выбуренной породы внесли множество как отечественных, так и зарубежных ученых.

Весьма значительный вклад в исследования очистки скважин в разное время внесли Ангелопуло О.К., Булатов А.И., Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Леонов Е.Г., Лихущин А.М., Рябченко В.И., Рязанов Я.А., Соловьев Н.В., Уляшева Н.М., Хузина Л.Б., Шарафутдинов З.З., Amanna B., Bridges S., Darly G.S.G., Gray J.R., Katende A., Makovey N., Ytrehus D. и др.

Исследования устойчивости и НДС БК связаны с именами Барский И.Л., Беляева В.М., Быкова И.Ю., Гуляева В.И., Заикина С.Ф., Кирсанова А.И., Лукьянова В.Т., А.Е. Сарояна, Юнина Е.К., Dawson R., Lubinski A., Miska S., Mitchell R., Paslay P., Wang P., Gao D. и др.

Предшествующие исследования теории качественной очистки НН скважин от выбуренной породы не рассматривают возможность искусственного введения БК в продольный изгиб и мониторинг её поведения в зонах скопления шлама. С учетом действующих норм и правил осуществления процесса бурения потеря устойчивости БК является недопустимой. Однако имеющиеся современные автоматизированные системы мониторинга наземных и скважинных технических средств и технологий проводки позволяют применить

полученные изыскания диссертации как начало нового нестандартного подхода в реализации эффективного бурения сложно построенных профилей НН скважин.

Объект исследования – очистка наклонно направленных скважин от шлама при роторном бурении.

Предмет исследования – влияние режимных параметров и контролируемого продольного изгиба бурильной колонны на очистку наклонно направленных скважин от шлама.

Цель работы – повышение эффективности роторного бурения за счет гидромеханической очистки наклонно направленных скважин от шлама.

Идея работы заключается в улучшении качества очистки наклонных участков профилей скважин от выбуренной горной породы за счёт создания гидромеханического воздействия на скопления шлама в местах застойных зон продольно изогнутой частью БК с регулируемой длиной и количеством полуолн в момент продольной потери устойчивости с учётом режимных параметров роторного бурения и физико-механических свойств бурового раствора.

Основные задачи исследования:

1. Научное обоснование необходимости и целесообразности использования при роторном бурении управляемого продольного изгиба БК для повышения качества очистки наклонных и горизонтальных участков скважины.

2. Разработка экспериментального стенда для моделирования процесса промывки НН скважин с обеспечением регулирования по длине полуолн БК и частоты ее вращения, с варьирующимися режимами течения, физико-механическими свойствами БР и дисперсностью шлама.

3. Разработка методики исследования влияния продольного изгиба БК и режимных параметров бурения на очистку наклонных участков скважин при роторном бурении.

4. Теоретические и экспериментальные исследования влияния зенитного угла скважины, расхода и свойств БР, частоты вращения и НДС БК на качество очистки НН скважин от шлама, и разработка математических моделей на основе результатов исследований.

Научная новизна работы:

1. На основе экспериментальных исследований выявлен эффект безосадочного витания частиц выбуренной горной породы, возникающий за счёт воздействия продольно изогнутой частью БК на скопления шлама, с контролируемым её напряженно-деформированным состоянием и режимными параметрами роторного бурения, позволяющий улучшить качество очистки наклонно направленных скважин.

2. Разработаны математические модели, позволяющие определить изменение качества очистки скважины от шлама при роторном бурении, в зависимости от свойств БР и скорости его течения в КП, частоты вращения, количества и длин полуволн БК с учётом зенитного угла скважины.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретически обоснована возможность создания условий безосадочного витания частиц шлама в потоке БР, за счет искусственного введения вращающейся БК в продольную потерю устойчивости с контролируемым количеством её длин и полуволн, обеспечивающая качественную очистку застойных зон от шлама при роторном бурении наклонно направленных скважин.

2. Разработанный экспериментальный стенд, методика исследований и математические модели, характеризующие качество очистки НН скважин от шлама в зависимости от зенитного угла, расхода и свойств БР, частоты вращения и количества полуволн БК являются основой для создания бурового инструмента, а именно бурильной трубы, являющейся дифференциальной измерительной системой на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР).

3. Результаты диссертационного исследования используются в филиале ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмень при составлении проектно-нормативной документации на бурение наклонно направленных скважин.

4. Разработанный стенд и методика проведения исследований влияния изгиба БК и режимных параметров бурения на качество очистки наклонно направленных скважин от шлама используются в Горном университете при проведении практических и лабораторных занятий у студентов нефтегазового направления.

Методология и методы исследования

В работе используются аналитические методы исследования, планирование экспериментов, натурное и вычислительное моделирование, методы математической статистики, а также корреляционно-регрессионный и дисперсионный анализы результатов экспериментов. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществляется с применением ПО «Statistica 13».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Целенаправленное введение бурильной колонны в продольную потерю устойчивости с созданием контролируемого синусоидального изгиба с управляемой длиной и количеством полуволн бурильной колонны позволяет повысить качество очистки наклонных участков скважины от выбуренной горной породы от 10 до 36 % без изменения расхода и свойств БР в процессе роторного бурения скважин.

2. Разработанные математические модели, учитывающие зенитный угол скважины, расход БР, частоту вращения и синусоидальный изгиб БК, позволяют определить режимные параметры роторного бурения, обеспечивающие качественную очистку наклонных участков профилей скважин от шлама.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность защищаемых положений, выводов и рекомендаций определяется современным уровнем аналитических и большим объемом экспериментальных лабораторных исследований с использованием высокоточного современного оборудования, воспроизводимостью полученных экспериментальных данных, точностью методов математического анализа и моделирования, а также апробацией полученных результатов на всероссийских и международных конференциях.

Апробация диссертационной работы проведена на 8 научно-технических мероприятиях с докладами: 57 Международная научная конференция. (г. Краков, Польша, 2016 г.); II и III Международные научно – практические конференции «Бурение скважин в осложненных условиях» (г. Санкт-Петербург, 2017 и 2018 гг.); Международная научно-практическая конференция «Technologies of

hydrocarbon field development» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); 62 International scientific conference (г. София, Болгария, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Экологически безопасные буровые растворы и технологические жидкости – основа устойчивого развития ТЭК» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.), XVI International contest forum of students and young researchers «Topical issues of rational use of natural resources» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.).

Личный вклад автора. Проведен обзор и анализ современного состояния науки и техники в области очистки НН скважин от шлама, контроля и оперативного управления параметрами бурения, потери устойчивости БК при НДС инструмента в скважине. Разработан экспериментальный стенд и методика исследований, позволяющие смоделировать процесс транспорта шлама и проанализировать качество очистки скважин от выбуренной горной породы, скопившейся на нижней стенке ствола скважины. Проведена статистическая обработка и интерпретация результатов, представлены выводы и рекомендации.

Публикации по работе. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 140 наименований и 4 приложений. Диссертация изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 140 рисунков и 45 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность главному специалисту лаборатории Сооружения скважин НЦ «Арктика» Юртаеву С.Л. за консультирование при конструировании

экспериментального стенда, и доценту кафедры бурения скважин к.т.н. Мерзлякову М.Ю. за консультирование при обработке результатов экспериментальных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ основных видов вращательного бурения НН скважин; анализ факторов, влияющих на образование застойных шламовых зон и вынос шлама из наклонной скважины, анализ основных свойств и моделей промывочных жидкостей; анализ методов контроля забойного давления в скважине; анализ результатов исследований влияния вращения и эксцентриситета БК в скважине на вынос шлама; анализ технических средств повышения качества очистки наклонно направленных скважин от шлама; анализ лабораторных стендов, применяемых для исследования процесса очистки скважин.

Во второй главе представлены методы и методика проведения экспериментальных исследований влияния параметров бурения и продольного изгиба БК на качество очистки НН скважин от шлама; представлены материалы и оборудование, применяющиеся при разработке экспериментального стенда; результаты планирования 2-х серий многофакторных и многоуровневых экспериментов (4 фактора, 3 уровня) по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ $N = 3^4$); представлена методика анализа полученных результатов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния параметров бурения и изгиба БК на качество очистки НН скважин; представлена статистическая обработка результатов экспериментальных исследований с применением ПО «Statistica 13».

В четвёртой главе представлены технико-технологические решения, направленные на реализацию гидромеханического способа очистки НН скважин вращающейся БК с управляемым продольным изгибом.

Основные результаты выполненных исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

1. Целенаправленное введение бурильной колонны в продольную потерю устойчивости с созданием контролируемого синусоидального изгиба с управляемой длиной и количеством полуволн бурильной колонны позволяет повысить качество очистки наклонных участков скважины от выбуренной горной породы от 10 до 36 % без изменения расхода и свойств БР в процессе роторного бурения скважин.

Для научного обоснования эффективности и целесообразности использования продольного изгиба БК совместно с регулированием параметров бурения, обеспечивающих улучшение очистки скважин от шлама, разработан экспериментальный стенд, методология и методы проведения исследований.

Экспериментальный стенд (Рисунок 1) является замкнутой системой циркуляции. Технические характеристики стенда приведены в таблице 1. Входные данные для проведения экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристики экспериментального стенда

Параметр	Ед. изм.	Значение
Геометрические характеристики		
Размер основания (станины)	мм	2700 x 300
Диаметр скважины	мм	74
Диаметр БК	мм	40
Длина скважины, БК	мм	2000
Зенитный угол	градус	0 – 90
Ситовой блок: - сито 1 - ячейка	мм	0,5 x 0,5
- сито 2 - ячейка	мм	1,0 x 1,0
- сито 3 - ячейка	мм	2,0 x 2,0
Характеристики оборудования и измерительных устройств		
Частота вращения привода (диапазон)	об/мин	0 ÷ 600
Производительность насоса (max)	л/мин	258
Лазерный тахометр (диапазон)	об/мин	2,5 ÷ 99 999
Ультразвуковой расходомер (диапазон)	м/с	0,03 ÷ 12,2
Электронные весы (диапазон)	г	5 ÷ 40 000

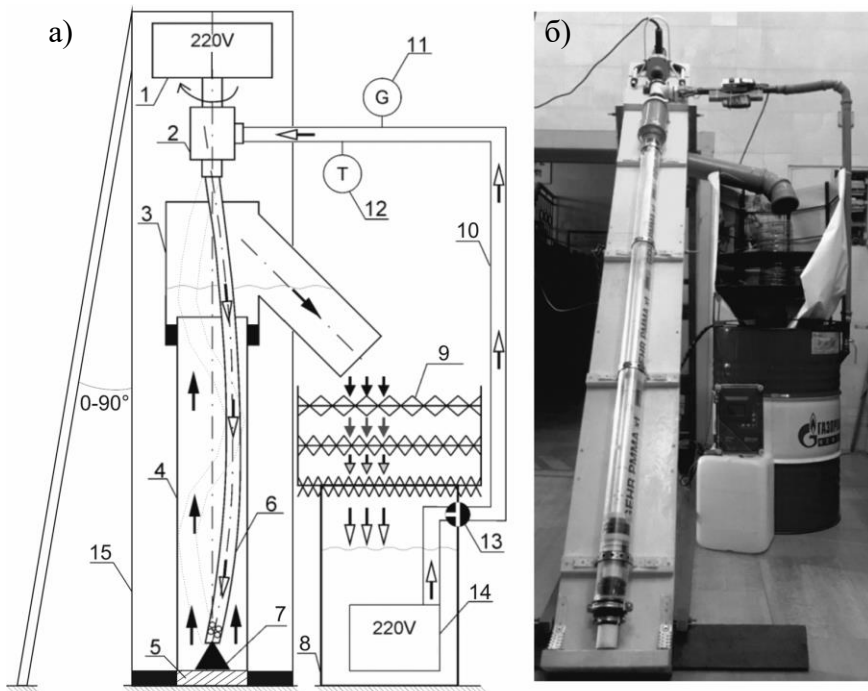


Рисунок 1 – Схема (а) и фотография (б) экспериментального стенда:
 1 - привод, 2 - вертлюг, 3 - оборудование устья, 4 - труба
 «скважина», 5 - заглушка, 6 - бурильная колонна, 7 - опорный конус,
 8 – ёмкость для БР, 9 - блок ситовой очистки, 10 - нагнетательная
 линия, 11 – ультразвуковой расходомер, 12 - лазерный тахометр, 13 -
 регулятор расхода БР, 14 – насос, 15 - основание.

Эксперименты проводятся по следующему алгоритму. Экспериментальный стенд устанавливается на определенный угол относительно основания 15. Регулировка величины зенитного угла определяется критическими углами в скважинах, в интервалах застойных шламовых зон от 45° до 70° с учётом геологических условий и траектории профиля. БК 6 с выбранным количеством полуволен (прямая труба L_0 без полуволен, труба с 1-й полуволенной $L_1=1,8$ м труба с 3-мя полуволами $L_3=0,6$ м) устанавливается на опорный конус 7 в трубу 4 «скважина». Привод 1 присоединяется к вертлюгу 2.

Таблица 2 – Входные данные экспериментов

Параметр	Единицы измерения	Значения	
		№ серии экспериментов	
		1	2
Q – расход БР	$\cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ (л/мин)	1,25 (75); 1,45 (87); 1,67 (100)	0,83 (50); 1,05 (63); 1,25 (75)
n – частота вращения БК	с^{-1} (об/мин)	0,83 (50); 1,67 (100); 2,50 (150)	0,83 (50); 1,67 (100); 2,50 (150)
Li – кол-во полуволин БК	шт.	0; 1; 3	0; 1; 3
α – зенитный угол	градус	35; 55; 70	35; 55; 70
Фракция шлама	мм	1,0 ÷ 2,0	
Реологическая модель		Ньютон	Гершель-Балкли
ρ – плотность	$\text{кг}/\text{м}^3$	1001	1035
$PV(\eta)$ - вязкость	$\text{мПа}\cdot\text{с}$	0,941 (η)	40,283 (PV)
YP - ДНС	Па	-	16,92
T - температура	$^{\circ}\text{C}$	23	23

Шлам массой $m = 1,5$ кг фракции от 1,0 до 2,0 мм засыпается в КП между трубами 4 и 6 через оборудование устья 3. Насос 14 погружается в емкость для БР 8, подсоединяется к регулятору расхода 13, после чего осуществляется подача БР с расходом Q л/мин. Значение расхода БР отображается на дисплее блока управления акустического расходомера 11, расположенного на открытом участке нагнетательной линии 10. Привод 1 осуществляет вращение БК с частотой n об/мин сразу после момента начала движения первой частицы шлама. Значение частоты вращения БК отображается на дисплее лазерного тахометра 12. Время, отведённое на 1 опыт, в рамках серии эксперимента $t = 120$ с. За это время происходит очистка «скважины» от шлама, аккумулирующегося на ситах соответствующей фракции в блоке очистки 9. По истечении времени, выключается насос и привод, сита извлекаются и очищаются от шлама, который взвешивается на электронных весах. Смена БК с разным количеством и длинами полуволин осуществляется путём отсоединения от вертлюга с

последующим извлечением из «скважины». После проведения серии экспериментов №1, БР утилизируется, осуществляется полная промывка циркуляционной системы в течение 10 минут, в ёмкости приготавливается другой тип БР и проводится серия экспериментов №2.

В качестве БР для серии экспериментов №1 используется техническая вода (ньютоновская жидкость – БР №1), а для серии экспериментов №2 используется жидкость на водной основе с добавлением модифицированного КМЦ «Quelyd» (псевдопластичная жидкость – БР №2).

Помимо сравнения количественных экспериментальных данных, отражающих влияние параметров бурения и баклинга БК на вынос шлама из скважины (результаты взвешивания), оценить процесс транспортирования шлама на наклонно-направленных участках было возможно визуально (Рисунок 2), ввиду прозрачности стендовой трубы «скважина».

При проведении серии экспериментов №1 установлено повышение эффективности выноса шлама до значений в 8 раз, при максимальном расходе БР, частоте вращения $n = 0,83 \div 2,50 \text{ с}^{-1}$ и наличии 3-х полуволн БК, в сравнении с прямой БК и БК с 1-й полуволной. При проведении серии экспериментов №2 и использовании в качестве БР псевдопластичной жидкости, при прочих равных условиях, установлено увеличение выноса шлама до 36%.

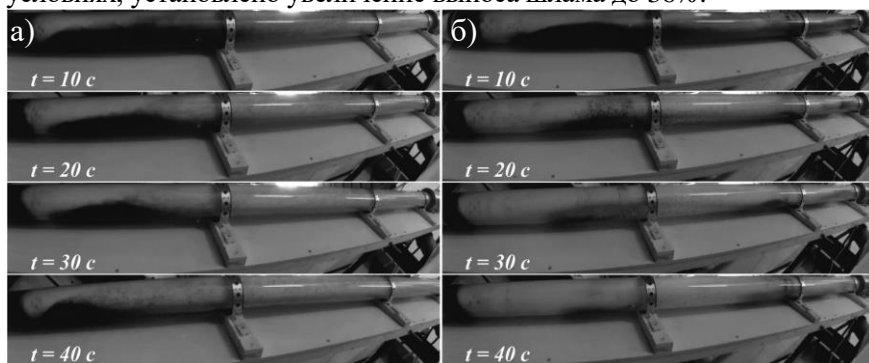


Рисунок 2 – Временной коллаж фотографий опытов через каждые 10 с после начала эксперимента с БР № 2 при $\alpha = 70^\circ$, $Q = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, вращении с частотой $n = 1,67 \text{ с}^{-1}$ прямой БК L_0 (а) и БК с 3-мя полуволнами L_3 (б).

Важно отметить, что без изменения частоты вращения БК, расхода и вязкости БР, наличие 3-х полуволн на рассматриваемом участке позволяет создать гидромеханическое воздействие на осевший шлам и наблюдать эффект безосадочного витания частиц горной породы, что приводит к значительному улучшению качества очистки скважины.

На основе защищаемого положения 1 разработан концепт бурильных труб, реализация которого позволит осуществить гидромеханическую технологию очистки НН скважин от шлама при роторном бурении.

Реализация гидромеханического способа очистки НН скважин осуществляется с помощью контроля и регулирования искусственно создаваемого баклинга БК. На данный момент в мире не существует ни промышленных, ни экспериментальных бурильных труб, способных помимо своих основных функций выполнять роль устройства, измеряющего деформации.

В качестве концептуального решения предлагается изготовить и включить в состав БК специальные секции труб, в которых монтируются датчики деформации на основе оптической волоконной брэгговской решётки (ВБР), позволяющие измерить деформацию, перемещение, температуру, давление, угол наклона, а также ускорение и вибрации (Рисунок 3).

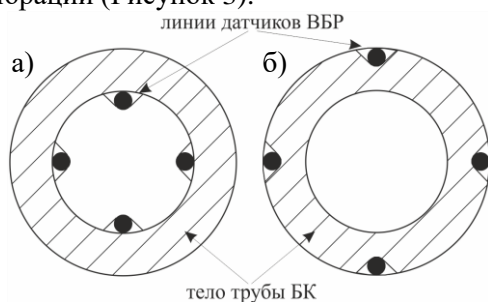


Рисунок 3 – Концептуальная схема расположения датчиков деформации ВБР в теле труб БК на внутренней стенке (а) и в наружной стенке (б).

Датчики, жестко закреплённые в подготовленном канале стенке бурильных труб с внутренней (Рисунок 3,а) или наружной (Рисунок 3,б) сторон, образуют «гирлянду» – квазираспределенную

дифференциальную измерительную систему, обеспечивающую мониторинг деформаций по телу труб.

Включая в состав БК секции бурильных труб с датчиками ВБР, оператор может контролировать место потери устойчивости и количество полуволен БК посредством регулирования осевой нагрузки на долото. В режиме реального времени на экране пульта управления отображается пространственная форма БК в скважине с учетом геометрии ствола и параметров бурения.

2. Разработанные математические модели, учитывающие зенитный угол скважины, расход БР, частоту вращения и синусоидальный изгиб БК, позволяют определить режимные параметры роторного бурения, обеспечивающие качественную очистку наклонных участков профилей скважин от шлама.

Экспериментальные данные, отражающие влияние баклинга БК при частоте вращения $n = 2,5 \text{ с}^{-1}$, а также зенитного угла, расхода, технологических и реологических свойств БР на качество очистки скважин представлены в форме гистограмм, удобных для сравнения (Рисунок 4).

Анализ результатов экспериментов показал, что с увеличением плотности с 1001 до 1035 кг/м^3 , вязкости с 0,941 до $40,283 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ и ДНС с 0 до 16,92 Па, при промывке с постоянным расходом БР $Q = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и варьировании частоты вращения БК $n = 0,83 \div 2,50 \text{ с}^{-1}$, наличие от 1-й до 3-х полуволен БК улучшает вынос шлама из скважины в 4 - 13 раз (Рисунок 5).

В некоторых случаях, когда ньютоновская жидкость не позволила транспортировать шлам к устью скважины и вынос шлама равнялся нулю, псевдопластичная жидкость показала отличные результаты, что подтверждает большую значимость реологических свойств БР, как одного из ключевых факторов при очистке НН скважин от разрушенной горной породы.

По результатам двух серий экспериментов на разных типах БР, соответствующих ньютоновской и псевдопластичной жидкостям, получены 2 эмпирические математические модели, описывающие изменение качества очистки скважины от частиц шлама в зависимости от варьируемых факторов: зенитного угла, расхода БР,

частоты вращения и количества полуволен БК со 100% эксцентриситетом.

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований, интерпретируются как на плоскости, в двумерном пространстве, так и в трёхмерном пространстве, в виде поверхностей, в зависимости от количества фиксированных переменных. Для каждого случая интерпретации были установлены зависимости (Рисунок 6, Таблица 3).

Анализируя полученные математические зависимости, представленные в таблице 3, можно заметить, что коэффициент регрессии b_{12} , характеризующий силу влияния факторов друг на друга, при прямой БК $b_{12} = 0,0112$; при 1-й полувольне $b_{12} = 0,0449$; при 3-х полуволнах $b_{12} = 0,8348$. Это позволяет сделать заключение об увеличении взаимного влияния факторов частоты вращения БК и расхода БР друг на друга, в результате потери устойчивости БК с последующим приобретением синусоидальной формы.

Благодаря полученным математическим зависимостям представляется возможным оценить влияние баклинга БК, частоты вращения и расхода БР на процесс транспортирования шлама, а также спрогнозировать изменения качества очистки скважины.

На рисунке 7 представлена выборка математических зависимостей на примере экспериментов с БР № 2 с зенитным углом $\alpha = 35^\circ$. Анализируя математические зависимости (таблица 4) можно заметить, что коэффициент b_{12} , характеризующий силу влияния факторов друг на друга, равен: при прямой БК $b_{12} = 0,4850$; при 1-й полувольне $b_{12} = 0,4966$; при 3-х полуволнах $b_{12} = 0,5556$. Это позволяет сделать заключение о незначительном увеличении взаимного влияния факторов частоты вращения БК и расхода БР друг на друга при формировании синусоидальной формы БК.

Анализ нормальности распределения данных, корреляционный анализ методом Спирмана, множественная регрессия, анализ остатков множественной регрессии и оценка приемлемости полученных моделей по дисперсионному анализу *ANOVA* проводятся с применением ПО «Statistica 13». Согласно полученным данным, коэффициенты детерминации для серии экспериментов №1 и №2 равняются $R^2 = 0,61$ и $R^2 = 0,72$, соответственно, а уровни значимости

p -value в обоих случаях гораздо меньше 0,05 (p -value $\ni 0,000 \dots < 0,05$), что говорит об адекватности и приемлемости полученных моделей.

Для реализации регулируемого баклинга и контроля НДС БК разработан способ контроля осевой нагрузки на долото при бурении наклонно направленных скважин винтовым забойным двигателем (Патент № 2646651 РФ), в основе которого лежит управление механической скоростью бурения, частотой вращения, шагом винтовой линии и перемещением БК, в результате потери её устойчивости.

Разработанные эмпирические модели, способ контроля фактической осевой нагрузки на долото с учётом НДС бурового инструмента и концепт бурильных труб с датчиками деформации ВБР являются основой для создания алгоритма оперативного контроля и управления параметрами бурения НН скважин (Рисунок 8).

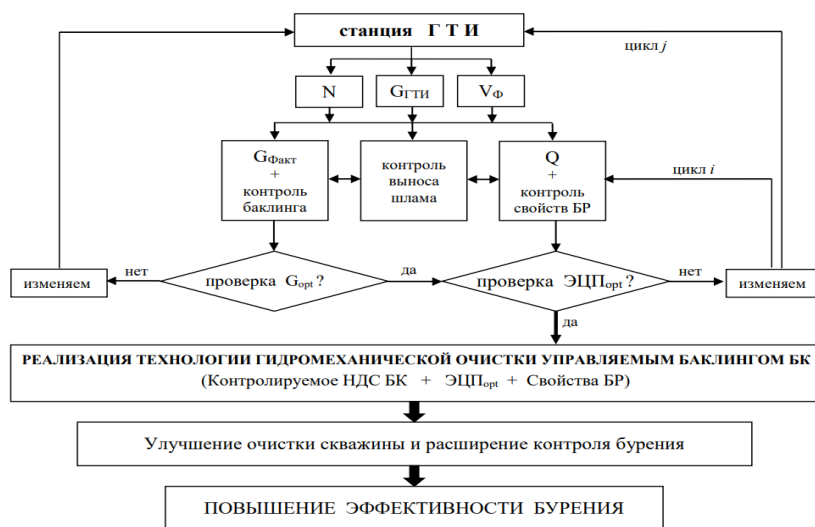


Рисунок 8 – Алгоритм оперативного контроля и управления параметрами бурения (условные обозначения: ГТИ – данные со станции геолого-технологических исследований; n – частота вращения бурового инструмента, c^{-1} ; $G_{ГТИ}$ – осевая нагрузка на долото по данным ГТИ, кг; $V_{Ф}$ – скорость бурения по данным ГТИ, м/ч; Q – расход БР, m^3/c ; $G_{Ф}$ – фактическая осевая нагрузка на долото, кг; орт $G_{Ф}$ – проверка оптимальности фактической нагрузки на долото; орт ЭЦП – проверка оптимальности ЭЦП БР).

По получаемым со станции ГТИ данным об осевой нагрузке на долото и механической скорости бурения определяется фактическая осевая нагрузка, согласно разработанному способу, доходящая до забоя, с учетом НДС БК при имеющемся значении частоты вращения БК. Механическая скорость с учетом определенной фактической нагрузки на долото используется при расчете гидравлической программы, позволяющей контролировать ЭЦП, поддерживая оптимальный расход БР. В случае увеличения давления в КП и возрастания момента на устье, что свидетельствует о зашламовании скважины, оператор вводит часть БК, оснащенной датчиками деформации на основе ВБР, в управляемый баклинг. Контролируя количество и длину полуволен БК на требуемом интервале скважины, создается гидромеханическое воздействие на застоявшиеся слои шлама. Контроль и управление НДС БК осуществляется одновременно с контролем ЭЦП, свойств БР и количества шлама на ситах.

Результаты диссертационного исследования используются в филиале ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени при составлении проектно-нормативной документации на бурение наклонно направленных скважин.

Применение технико-технологических решений мониторинга НДС и пространственного положения БК, параметров бурения и свойств БР, позволяет повысить эффективность роторного бурения, а именно, осуществить гидромеханическую очистку НН скважин бурильной колонной, находящейся в управляемом изгибе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Научно обоснованы необходимость и целесообразность использования технологии гидромеханической очистки от шлама при роторном бурении НН скважин за счёт применения контролируемого продольного изгиба БК совместно с регулированием режимных параметров бурения.

2. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий моделировать очистку НН скважин и провести анализ её качества при варьировании расхода БР, частоты вращения БК, с обеспечением регулируемого эксцентричного расположения труб в результате

продольного изгиба, различных физико-механических свойств БР и дисперсности шлама.

3. Разработана методика проведения исследований влияния продольного изгиба БК и параметров бурения на очистку НН скважин от шлама, обеспечивающая наблюдение эффекта безосаточного витания частиц горной породы при сохранении режимных параметров и физико-механических свойств БР.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны 2 математические модели, позволяющие определить изменение качества очистки скважины от шлама в зависимости от зенитного угла скважины, расхода БР, частоты вращения и наличия полуволн БК. Установлено, что увеличение количества полуволн от 1 до 3 обеспечивает повышение эффективности выноса шлама до 8 раз (БР № 1) и до 36 % (БР № 2) при зенитном угле от 35 до 70° без изменения объемного расхода и реологических свойств БР.

Перспективами дальнейшего развития темы диссертации следует считать разработку бурового инструмента (бурильных труб), содержащего распределенную дифференциальную измерительную систему, состоящую из датчиков деформации на основе оптоволоконной решетки Брэгга, позволяющую контролировать пространственную форму БК и осуществлять гидромеханическое воздействие на шлам в местах застойных шламовых зон.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Двойников, М.В. Программно-информационное сопровождение строительства скважин арктического шельфа / М.В. Двойников, **В.Г. Кадочников**, А.А. Куншин // Инженер-нефтяник. – 2017. – №1. – С. 23-28.

2. Кадочников, В.Г. Оперативный контроль и управление параметрами бурения наклонно направленных скважин / **В.Г. Кадочников**, М.В. Двойников, П.А. Блинов, В.А. Мнацаканов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – №12. – С. 5-12. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-12-5-12.

3. Кадочников, В.Г. Влияние пространственной формы бурильной колонны на вынос шлама в наклонно-направленных скважинах / **В.Г. Кадочников**, М.В. Двойников, П.А. Блинов // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2020. – №2. – С. 12-19.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

4. Kadochnikov, V.G. Development of technology for hydromechanical breakdown of mud plugs and improvement of well cleaning by controlled buckling of the drill string / **V.G. Kadochnikov**, M.V. Dvoynikov // Applied Sciences (Switzerland). – 2022. – №12. P.6460. DOI: 10.3390/app12136460.

Публикации в прочих изданиях:

5. Кадочников, В.Г. Оперативный контроль и управление параметрами бурения / **В.Г. Кадочников**, М.В. Двойников // Бурение скважин в осложненных условиях: Материалы II Международной научно – практической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. – 2017. С. 28-29.

6. Кадочников, В.Г. Оперативный контроль и управление параметрами бурения наклонно направленных скважин / **В.Г. Кадочников**, М.В. Двойников // Бурение скважин в осложненных условиях: Материалы III Международной научно – практической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет. – 2018. С. 50-52.

7. Kadochnikov, V.G. Influence of the drill string spatial form on transport of cuttings in directional wells / **V.G. Kadochnikov**, M.V. Dvoynikov // Materials of XVI International forum-contest of students and young researchers «Topical issues of rational use of natural resources». – 2020. – Vol. 1. – PP. 86-87.

Патент:

8. Патент № 2646651 Российская Федерация, МПК E21B 44/02 (2006.01). Способ контроля осевой нагрузки на долото при бурении наклонно направленных скважин винтовыми забойными двигателями: № 2646651: заявл. 2017102840 : опубл. 06.03.2018 / М.В. Двойников, П.А. Блинов, **В.Г. Кадочников**; заявитель СПбГУ. – 10 с.: ил.

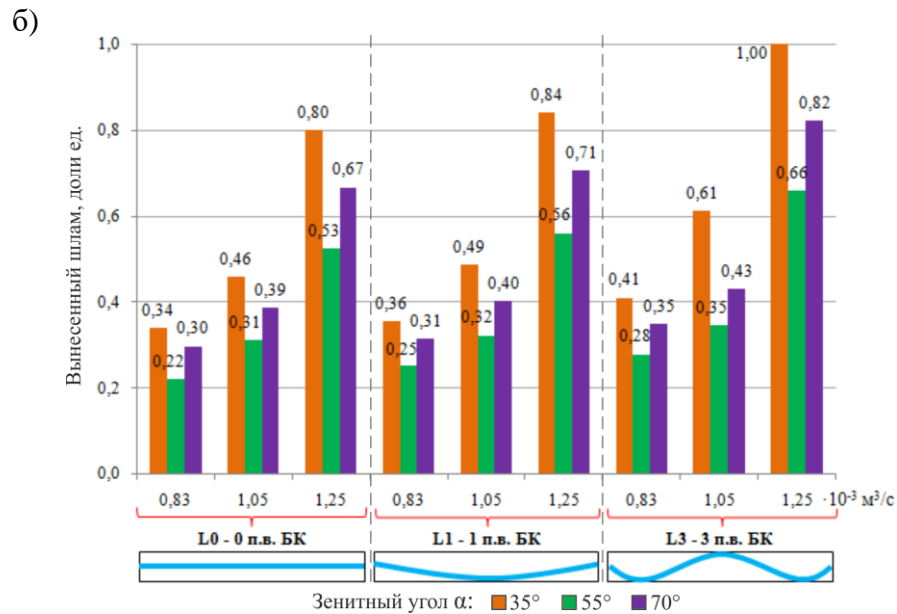
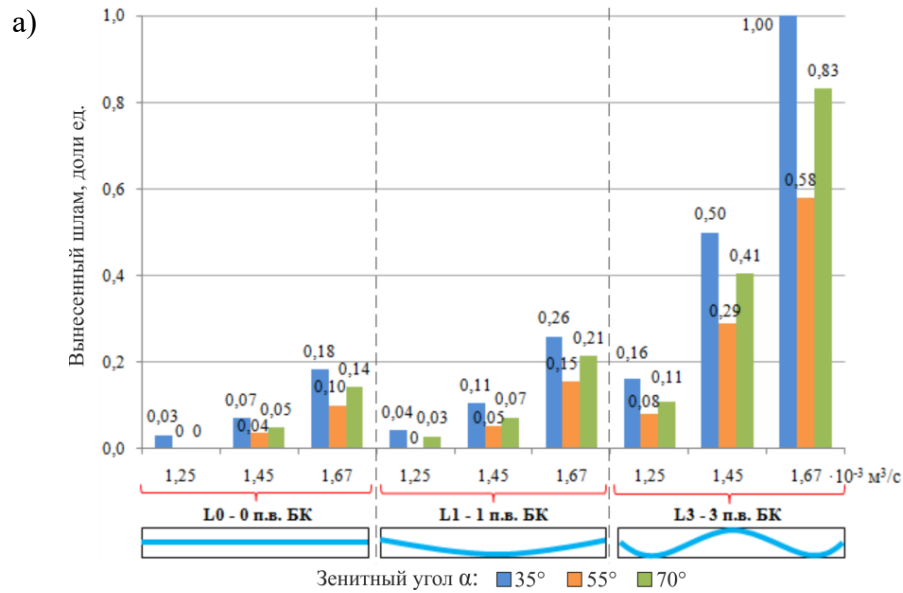


Рисунок 4 – Вынесенный шлам БР №1 (а) и БР №2 (б) в зависимости от синусоидального баклинга БК, зенитного угла, расхода и свойств БР при постоянной частоте вращения $n = 2,5 \text{ с}^{-1}$

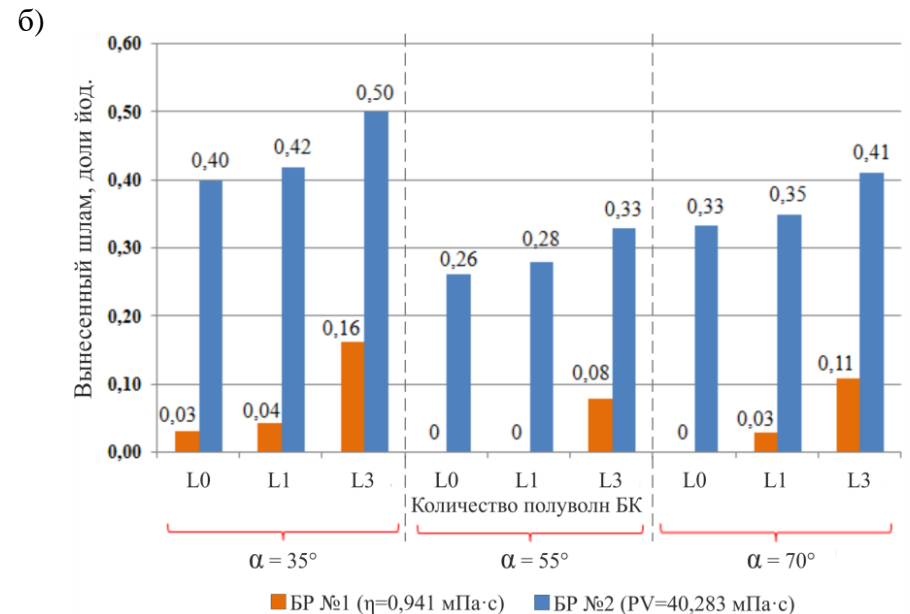
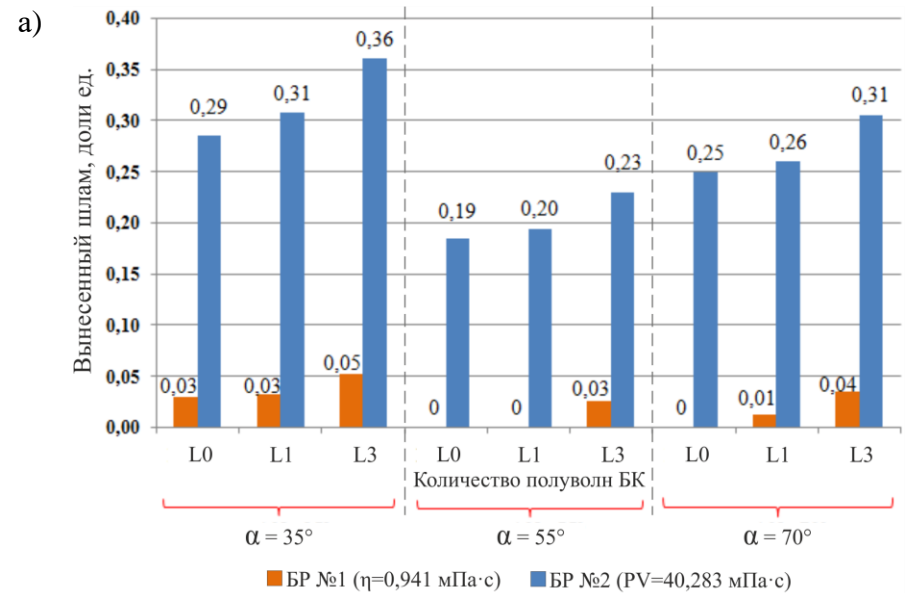


Рисунок 5 – Сравнение качества очистки от шлама ньютоновской и псевдопластичной жидкостями с постоянным расходом БР, при различных зенитных углах, наличии баклинга БК и частоте вращения $n = 1,67 \text{ с}^{-1}$ (а) и $n = 2,50 \text{ с}^{-1}$ (б).

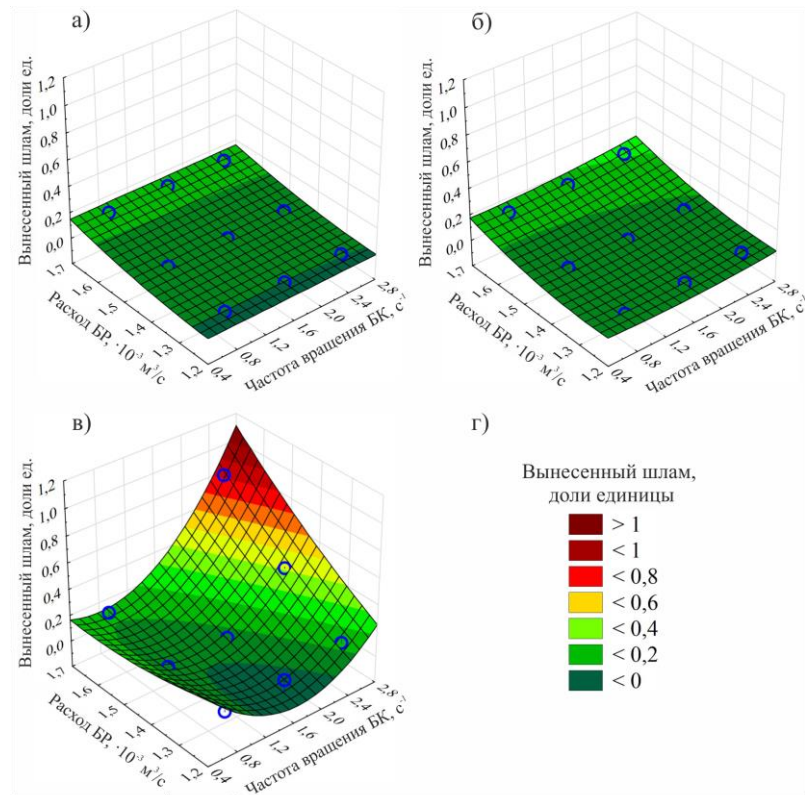


Рисунок 6 – Зависимости количества вынесенного шлама (доли ед.) от расхода БР №1, частоты вращения n и количества полуволен БК L_n : без полуволен L_0 (а); с 1-ой полуволенной L_1 (б) и с 3-мя полуволнами L_3 (в), при зенитном угле $\alpha = const = 70^\circ$; легенда (г).

Таблица 3 – Математические зависимости к рисунку 6

Рис. 6	Математические зависимости (выборка из модели №1)	Кол-во полуволен БК		X	Y	Const.
		L_n	n			
а)	$Z=0,678 - 0,0148x - 1,1825y + 0,0005x^2 + 0,0112xy + 0,5119y^2$	L_0	0	Частота вращения БК, c^{-1}	Расход БР, $\cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	Зенитный угол $\alpha = 70^\circ$
б)	$Z=1,3531 - 0,0889x - 2,0947y + 0,014x^2 + 0,0449xy + 0,8247y^2$	L_1	1			
в)	$Z=3,0149 - 1,8193x - 3,0061y + 0,2478x^2 + 0,8348xy + 0,824y^2$	L_3	3			

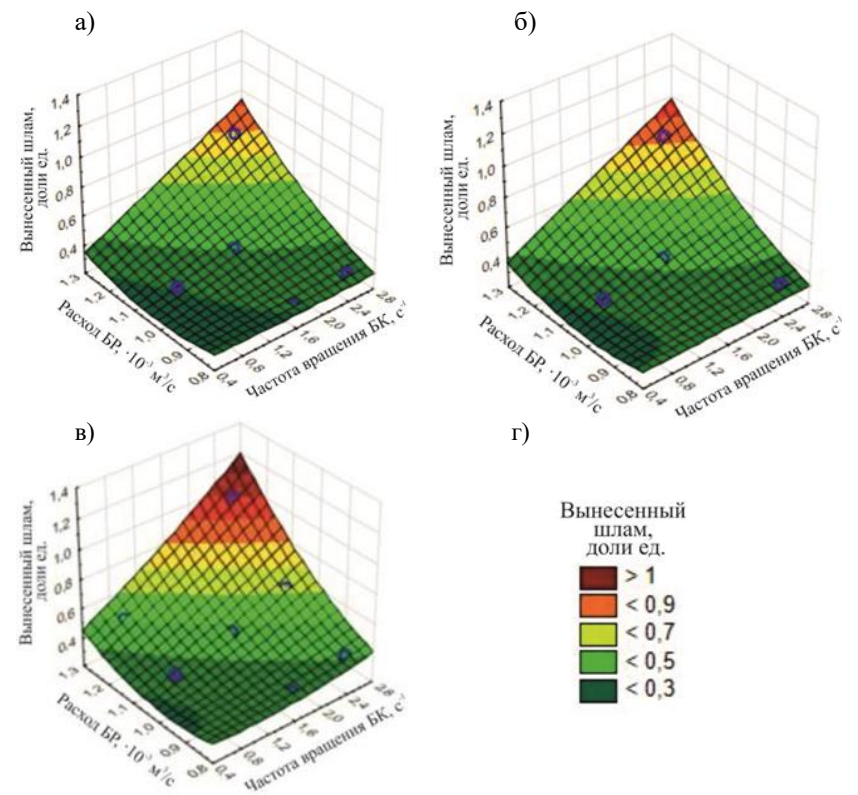


Рисунок 7 – Зависимости количества вынесенного шлама (доли ед.) от расхода БР № 2, частоты вращения n и количества полуволен БК L_n : без полуволен L_0 (а); с 1-ой полуволенной L_1 (б) и с 3-мя полуволнами L_3 (в), при зенитном угле $\alpha = const = 35^\circ$; легенда (г).

Таблица 4 – Математические зависимости к рисунку 7

Рис. 7	Математические зависимости (выборка из модели №2)	Кол-во полуволен БК		X	Y	Const.
		L_n	n			
а)	$Z=1,6344 - 0,4076x - 2,5974y + 0,0064x^2 + 0,485xy + 1,1829y^2$	L_0	0	Частота вращения БК, c^{-1}	Расход БР, $\cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	Зенитный угол $\alpha = 35^\circ$
б)	$Z=1,6777 - 0,3893x - 2,7225y - 0,001x^2 + 0,4966xy + 1,2594y^2$	L_1	1			
в)	$Z=1,9734 - 0,4863x - 3,3084y + 0,023x^2 + 0,5556xy + 1,588y^2$	L_3	3			