

Научная статья / Original research article

УДК 622.279.7

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-67-76>

EDN: TEGAHG



Стендовое моделирование процесса глушения скважины

**А. Н. Коротченко^{1*}, В. П. Овчинников², А. А. Кислицин³, Г. А. Шлеин²,
С. Н. Бастриков², А. А. Коротченко⁴**

¹ООО «ИнТех», Тюмень, Российская Федерация

²Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

³Тюменский государственный университет, Тюмень, Российская Федерация

⁴Физико-математическая школа, Тюмень, Российская Федерация

*dir@intechol.com

Аннотация. Глушение скважины — сложный процесс, требующий точного технического и математического подхода. Процесс глушения влияет на добычные параметры скважины. В статье рассматривается исследование операции глушения скважины, которое позволяет понять протекающие в ней процессы. Представлено описание и результаты испытаний на стенде мобильного программно-аппаратного комплекса глушения скважин — МПАК ГС, который предоставляет возможность смоделировать процесс закачивания жидкости в кольцевое и трубное сечение, тем самым имитируя процессы глушения в скважине прямой и обратной промывкой. Стенд позволяет визуально следить за каждым шагом процесса, проходящего внутри модельной скважины. Полученные данные, в цифровом формате, и математические зависимости представлены в виде графиков зависимости показаний давлений на различных датчиках скважины от переменных параметров. Полученные и доказанные зависимости могут быть использованы для дальнейшего создания математической модели гидравлической программы глушения скважин.

Ключевые слова: моделирование процесса глушения скважины прямой промывкой, математическое описание физических процессов в скважине, графические зависимости давлений от переменных параметров

Для цитирования: Коротченко А. Н., Овчинников В. П., Кислицин А. А., Шлеин Г. А., Бастриков С. Н., Коротченко А. А. Стендовое моделирование процесса глушения скважины. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(4):67–76. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-67-76> EDN: TEGAHG

Bench modeling of the well killing process

**Andrey N. Korotchenko^{1*}, Vasily P. Ovchinnikov², Anatoly A. Kislitsyn³,
Gennady A. Shlein², Sergey N. Bastrikov², Anastasia A. Korotchenko⁴**

¹Intech LLC, Tyumen, Russian Federation

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

³University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

⁴Physics and Mathematics School, Tyumen, Russian Federation

*dir@intechol.com

Abstract. Well killing is a complex process that requires accurate technical and mathematical approaches. The well killing process impacts well production performance. This article examines well-killing operations to enhance our understanding of the processes occurring within a well. We describe the design and test results of the mobile software and hardware well killing complex (MPAK GS). MPAK GS is capable of simulating fluid injection through the annular and tubing sections and can replicate well-killing operations using both forward and reverse circulation. This setup enables visual monitoring of each stage of the process inside the model well. We recorded the obtained data in digital form and used them to establish mathematical relationships between pressure measurements at various points in the well and the operating parameters. The obtained and proven dependencies can be used to develop a mathematical model of the hydraulic well-killing program.

Keywords: modeling of the well-damping process by direct flushing, mathematical description of physical processes in the well, and graphical dependencies of pressures on variable parameters

For citation: Korotchenko A. N., Ovchinnikov V. P., Kislitsyn A. A., Shlein G. A., Bastrikov S. N., Korotchenko A. A. Bench modeling of the well killing process. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(4):67–76 (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-67-76>

Введение

Глушение — процесс создания в скважине достаточного гидростатического давления выше пластового. Известно, что с помощью математического аппарата можно описать любой сложный физический процесс, основываясь на входных и выходных параметрах. Сегодня математическое моделирование и обоснование экспериментальных зависимостей физических процессов, протекающих в скважине в процессе ее глушения, является актуальной задачей для нефтесервисных компаний. Стенд мобильного программно-аппаратного комплекса глушения скважин (МПАК ГС) в точности повторяет реальную установку МПАК ГС. В статье описаны экспериментальные зависимости, полученные в ходе моделирования процесса глушения скважины на стенде мобильного программно-аппаратного комплекса глушения скважин МПАК ГС при прямой промывке [1]. Макет скважины рассматривается в качестве совокупности динамических и статических параметров. Динамические параметры — показания манометров, фиксирующих показания давлений и время, те, которые меняются во время проведения одной серии испытаний. Статические параметры — частота оборотов насоса, проходное сечение (степень открытия дросселя), которые будут меняться дискретно и плотность раствора, которая будет увеличиваться за счет увеличения концентрации соли, те, которые остаются неизменными на протяжении одной серии испытаний. Но мы будем их изменять самостоятельно в ходе эксперимента. Систематизировав полученные значения, мы вывели графическую зависимость давлений от плотности раствора, частоты оборотов насоса и времени.

Объект и методы исследования

Глушение прямым способом (через НКТ), с выходом через затрубное пространство и дроссель на стенде. Общий вид стенда и гидравлическая схема представлены на рисунках 1 и 2.

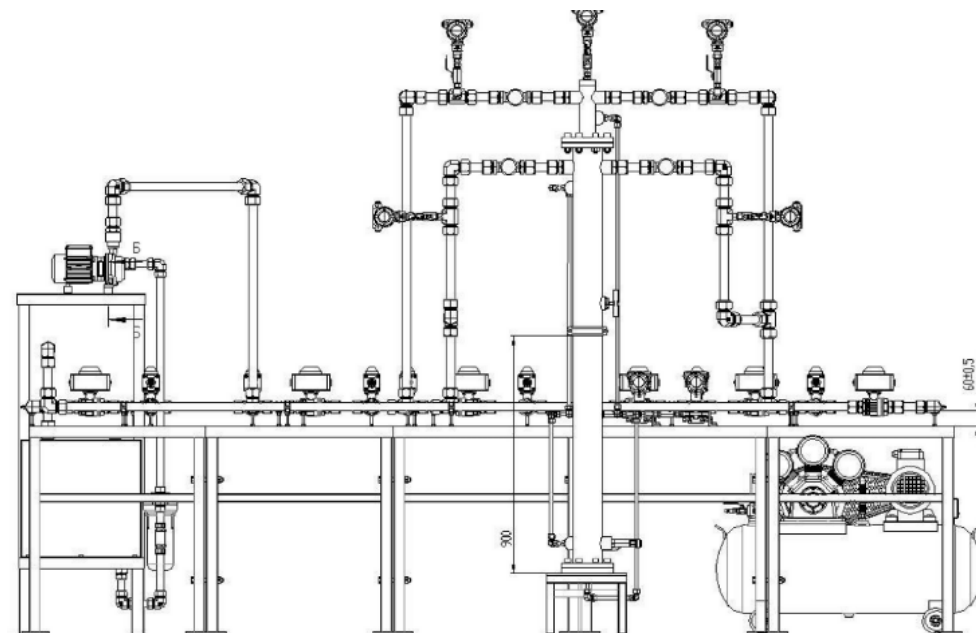


Рис. 1. Общий вид стенда
Fig. 1. General view of the test bench

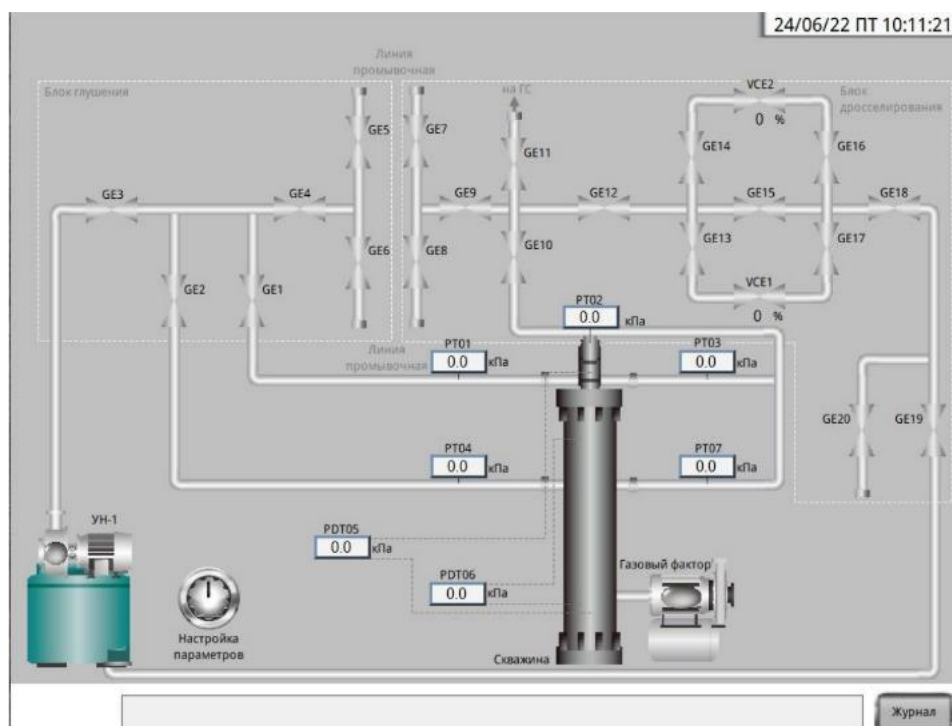


Рис. 2. Гидравлическая схема на главном экране управления
Fig. 2. Hydraulic diagram on the main control screen

При глушении скважины прямым способом поток жидкости глушения направляется следующим образом. Из расходной емкости (бака) жидкость глушения поступает в приемную линию насосного агрегата УН1. По нагнетательной линии насосного агрегата жидкость направляется на вход блока глушения. Жидкость по блоку глушения проходит через задвижки GE3 и GE1 к выходу из блока по линии высокого давления до трубного пространства фонтанной арматуры.

Жидкость, пройдя скважину, направляется от затрубной линии фонтанной арматуры по линии высокого давления на прием блока дросселирования БД1 (рис. 2) [2].

Работа насоса УН-1 (рис. 2) осуществляется с помощью вращающегося рабочего колеса центробежного типа, всасывающего воду из источника и нагнетающего ее под давлением с помощью асинхронного электродвигателя. Управление и регулирование происходит с помощью преобразователя частоты переменного тока. Выходная частота — это параметр, который показывает, сколько колебаний переменного тока (в герцах, Гц) формируется на выходе устройства. Эксперименты проводились в двух режимах выходных частот 35 и 40 Гц эквивалентны прокачиванию 0,7581 л/сек и 0,8664 л/сек соответственно.

Показания давлений на входе, стояке и выходе, разница давлений между стояком и забоем, выходом и забоем фиксируются при разных плотностях раствора (1000; 1050; 1100 кг/м³) [3] и частотах оборотов насоса (35 Гц; 40 Гц). См. Расположение датчиков (рис. 2).

Было проведено 6 опытов. В каждом опыте постоянными параметрами являлись частота оборотов насоса и плотность раствора, переменными параметрами — давление и проходное сечение (степень открытия дросселя). Проходное сечение регулируется степенью открытия дросселя, которое дискретно уменьшалось сначала с шагом 10 до 15 %, а далее с шагом 1 % до прекращения появления пузырей (то есть воздуха в трубе) посредством главного экрана управления. Показания датчиков давлений в зависимости от проходного сечения и времени фиксировались и заносились в таблицы Excel, по которым далее строились графики зависимости давлений от проходного сечения и времени для каждого значения плотности и частоты оборотов насоса. После проведения всех испытаний также построили зависимости давления от проходного сечения и времени отдельно для датчиков, фиксирующих показания на входе, выходе и разницу между выходом и забоем, стояком и забоем. На графиках степень открытия проходного сечения (красная кривая) отложена на левой шкале, а показания давления отложены на правой шкале.

Результаты

Рассмотрим более подробно графики зависимостей при плотности 1,05 г/см³ и частотах оборотов насоса 35 и 40 Гц (рис. 3 и 4).

Отметим, что вначале разница между давлениями на входе и выходе существенна, но с закрытием дросселя она практически исчезает — два графика накладываются друг на друга и становятся одной линией. Также на этом этапе прекращается и появление пузырей, что свидетельствует об успешном глушении скважины.

Заметим, что в начале график давления на выходе и давления на стояке совпадают, это показывает отсутствие разницы давлений. С уменьшением проходного сечения, появляется разница, а именно — давление на выходе становится больше, чем на стояке, что свидетельствует о появлении противодействия для предотвращения газонефтеводопроявления и соответственно об успешном глушении скважины.

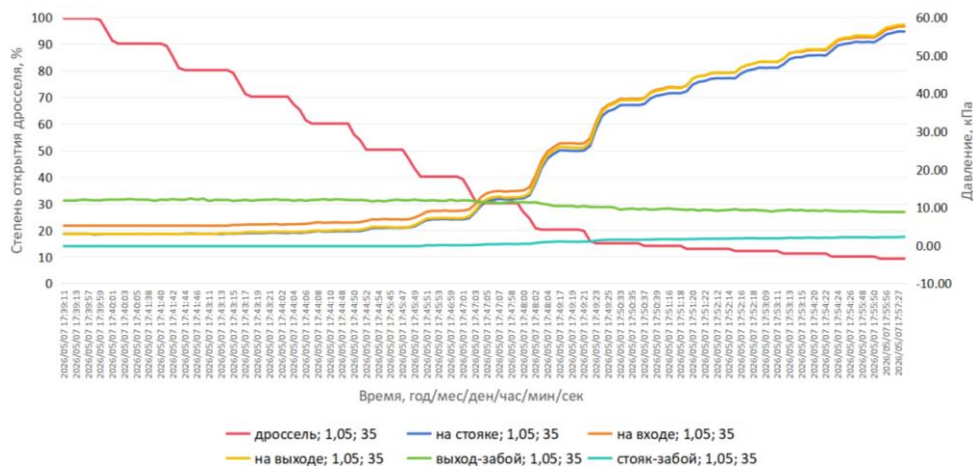


Рис. 3. Показания давлений при $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$ частоте оборотов насоса 35 Гц
Fig. 3. Pressure measurements at a fluid density of $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$ and a pump speed of 35 Hz

В конце зафиксированы эти же показания большей величины при большей частоте оборотов насоса.

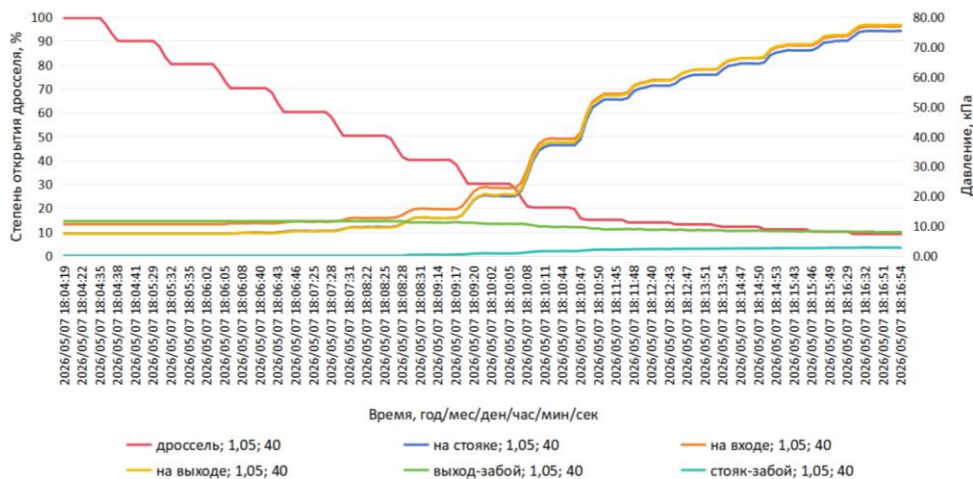


Рис. 4. Показания давлений при $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$ частоте оборотов насоса 40 Гц
Fig. 4. Pressure measurements at a fluid density of $\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$ and a pump speed of 40 Hz

Разница показаний давлений между стояком и забоем растёт (см. рис. 5). При одинаковой плотности разница давлений больше при большей частоте оборотов насоса. При одинаковой частоте оборотов насоса разница давлений больше при меньшей плотности.

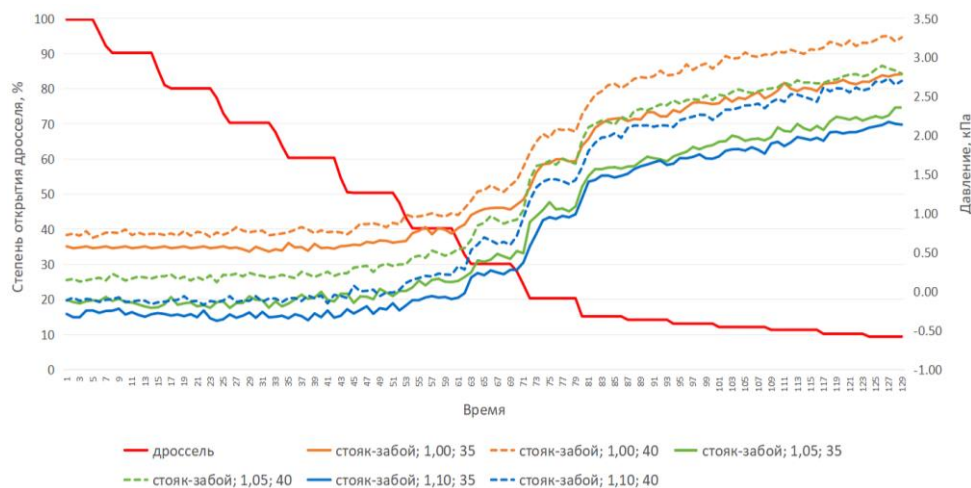


Рис. 5. Разница давлений между стояком и забоем.
Fig. 5. Pressure difference between the standpipe and the bottomhole.

Разница показаний давлений между выходом и забоем уменьшается (см. рис. 6). При одинаковой плотности разница давлений больше при меньшей частоте оборотов насоса. При одинаковой частоте оборотов насоса разница давлений больше при большей плотности.

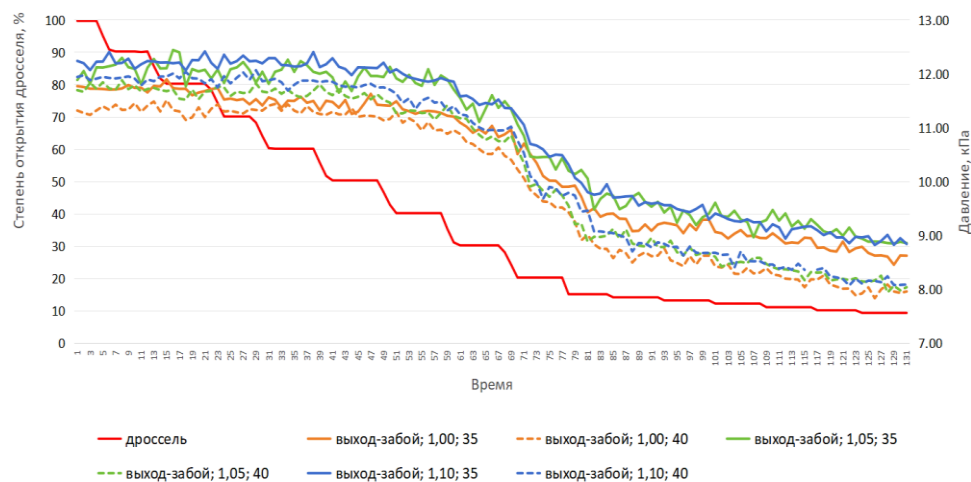


Рис. 6. Разница давлений между выходом и забоем
Fig.6. Pressure difference between the outlet and the bottomhole

Давления на входе и выходе растут (рис. 7 и 8). При одинаковой плотности давление больше при большей частоте оборотов насоса. При одинаковой частоте оборотов насоса давление больше при большей плотности.

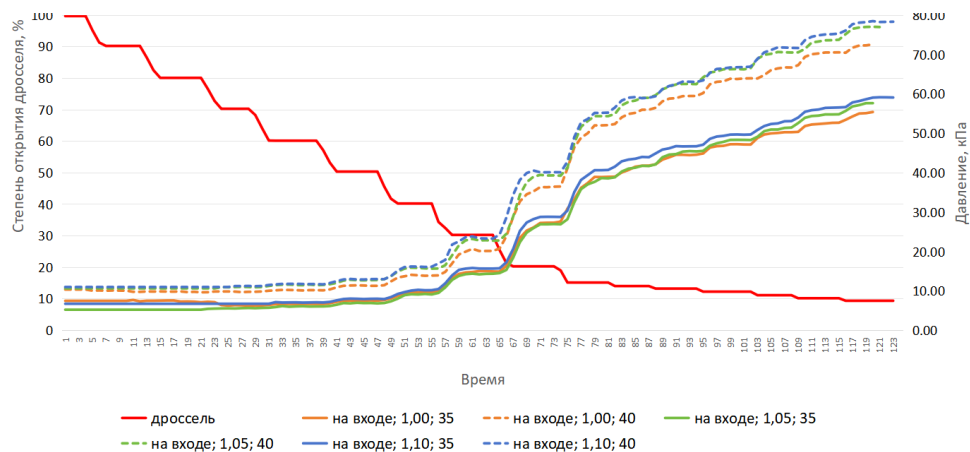


Рис. 7. Показания давлений на входе
Fig. 7. Inlet pressure measurements

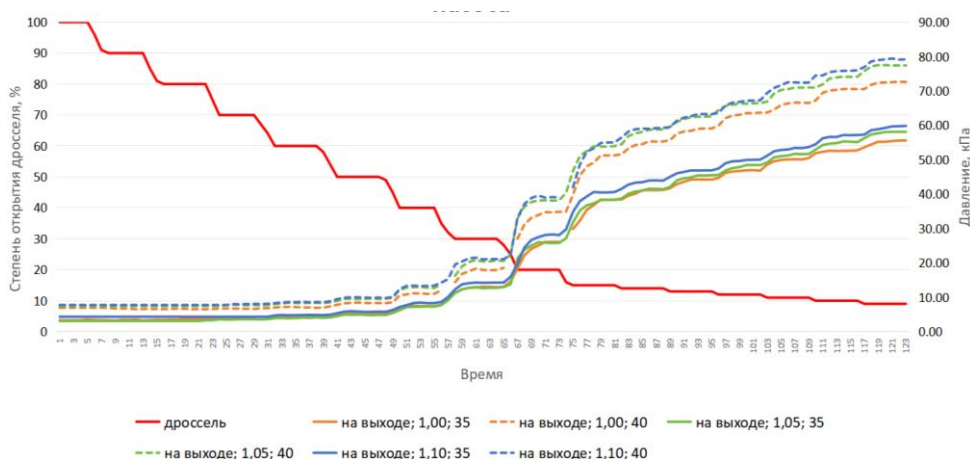


Рис. 8. Показания давления на выходе
Fig. 8. Outlet pressure measurements

Обсуждение

В качестве основной формулы, связывающей потери давления P (Па) с осредненной по сечению трубы скоростью v (м/с) потока жидкости, принята формула Дарси — Вейсбаха

$$P = \lambda \frac{v^2 l \rho}{2d}, \quad (1)$$

где l — длина трубы; ρ — плотность жидкости; d — внутренний диаметр трубы для НКТ, или диаметральный зазор для кольцевого пространства между НКТ и обсадной колонной; λ — коэффициент гидравлического сопротивления [2].

Коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывается по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \sqrt[4]{\frac{K}{d} + \frac{68,5}{Re}}, \quad (2)$$

где K — коэффициент эквивалентной шероховатости, Re — число Рейнольдса.

Число Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (3)$$

где μ — абсолютная (динамическая) вязкость (см. табл. 1).

Была измерена вязкость каждого раствора при помощи вискозиметра через кинетическую вязкость и время поднятия пузырей при помощи секундомера (табл. 1).

Табл. 1. Измеренные показания вязкости

Table 1. Measured viscosity values

Плотность, [кг/м ³]	Кинематическая вязкость, [м ² /с]	Динамическая вязкость, [Па*с] ([Пуаз*10])	Время поднятия пузырей, [сек]	Давление на забое при прямой про- мывке, [кПа]
1 000	0,000757	0,757	5,80	30136,57
1 050	0,000761	0,761	6,88	31634,4
1 100	0,000850	0,850	7,06	33131,93

Выводы

Проведены эксперименты и сняты показания давлений при разных плотностях и параметрах работы насоса. Данные давлений при прямой промывке систематизированы в виде таблиц Excel. Выведены графические зависимости давлений от плотности, частоты оборотов насоса, времени и степени открытия дросселя. Полученные эмпирические сведения, описанные математическими зависимостями, позволят более точно контролировать процессы, протекающие в скважине, свести к минимуму ошибки, приводящие к возникновению различных осложнений и аварийных ситуаций при закачивании жидкостей в скважину [3].

Вклад авторов

Коротченко А. Н.: формулирование идеи, цели, гипотезы исследования; проведение исследования; написание статьи.

Овчинников В. П.: анализ материалов; научное редактирование.

Кислицын А. А.: разработка методологии; научное редактирование.

Шлеин Г. А.: анализ материалов; теоретический анализ данных; научное редактирование.

Бастриков С. Н.: теоретический анализ данных; научное редактирование.

Коротченко А. А.: ассистирование исследования; написание статьи.

Authors' contributions

Korotchenko Andrey N.: formulation of idea, aim, and hypothesis; study; writing.

Ovchinnikov Vasily P.: analysis of materials; scientific editing

Kislitsyn Anatoly A.: methodology; scientific editing.

Shlein Gennady A.: analysis of materials; theoretical data analysis; scientific editing.

Bastrikov Sergey N.: theoretical data analysis; scientific editing.

Korotchenko Anastasia A.: study assistance; writing.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Список источников

1. Руководство по эксплуатации лабораторного макета МПАК «ГС» (имитационный стенд). Тюмень: ООО «ИнТех»; 2022.
2. Коротченко А. Н., Кислицын А. А., Ларин С. В., Розенбергер Е. Б. Аппаратно-методический комплекс для оптимизации и контроля технологических процессов закачивания раствора в скважину при проведении геолого-технических мероприятий. *Бурение и нефть*. 2017;(12);40–45.
3. Коротченко А. Н., Расамажин Н. И., Ходосовский В. Л. Контроль и регистрация параметров закачиваемых жидкостей при ТКРС. *Бурение и нефть*. 2013;(9);52–53.

References

1. Operating manual for the MPAC “GS” laboratory mock-up (simulation stand). (n.d.). Tyumen: LLC «InTech»; 2022. (In Russ.).
2. Korotchenko, A. N., Kislitsyn, A. A., Larin, S. V., Rozenberger, E. B. Hardware-methodical complex for optimization and control of technological processes of pumping a solution into a well during geological and technical measures. *Burenie i Neft'*. 2017;(12);40–45. (In Russ.).
3. Korotchenko, A. N., Rasamagin, N. I., Khodosovskiy, V. L. Control and registration of pumped liquids' parameters during operating and big repairs of wells. *Burenie i Neft'*. 2013;(9);52–53. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Коротченко Андрей Николаевич, директор ООО «ИнТех», г. Тюмень, dir@intechpol.com, SPIN-код: 1288-9473, AuthorID: 1175535

Овчинников Василий Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геотехники, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, ovchinnikovvp@tyuiu.ru, SPIN-код: 7668-7475, AuthorID: 582643

Кислицын Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, kislicyn@utmn.ru, SPIN-код: 2320-8976, AuthorID: 250684 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3863-0510>

Шлеин Геннадий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, shleinga@tyuiu.ru, AuthorID: 802481

Бастриков Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, bastrikovsn@tyuiu.ru SPIN-код: 4369-0650, AuthorID: 790630

Коротченко Анастасия Андреевна, ученица, Физико-математическая школа, г. Тюмень, korotchenkonastya10@yandex.ru

Andrey N. Korotchenko, Director of Intech LLC, dir@intechpol.com, SPIN-код: 1288-9473, AuthorID: 1175535

Vasily P. Ovchinnikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Geotechnics, Industrial University of Tyumen, ovchinnikovvp@tyuiu.ru, SPIN-код: 7668-7475, AuthorID: 582643

Anatoly A. Kislicyn, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, University of Tyumen, kislicyn@utmn.ru, SPIN-код: 2320-8976, AuthorID: 250684 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3863-0510>

Gennady A. Shlein, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, shleinga@tyuiu.ru, AuthorID: 802481

Sergey N. Bastrikov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at the Department of Drilling Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, bastrikovsn@tyuiu.ru, SPIN-код: 4369-0650, AuthorID: 790630

Anastasia A. Korotchenko, Student of the Physics and Mathematics School of the Tyumen Region, korotchenkonastya10@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 08.06.2026

Поступила после рецензирования / Revised 07.07.2026

Принята к публикации / Accepted 09.07.2026