

УДК 621.313.282.2

**СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СКВАЖИННОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ВИБРОИСТОЧНИКА**

А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов, А. А. Леуткин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru, Красный проспект, 54, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Разработан стенд, предназначенный для испытания и исследования скважинного импульсного виброисточника, содержащего электромагнитный ударный узел и силовые гидравлические элементы в условиях, имитирующих его работу в нефтяной скважине на глубинах более 1000 м с автоматическим контролем за давлением в системе. Выполненные исследования позволили довести ресурс безотказной непрерывной работы виброисточника в условиях скважины до 150 ч и выше; определить диапазоны регулирования энергии и частоты его ударов в зависимости от напряжения питания и рекомендовать желательную частоту его работы для обеспечения безопасности цементного камня обсадной колонны скважины. Получены номограммы, позволяющие установить зависимость максимальной продолжительности включения скважинного импульсного виброисточника от плотности тока в катушках и коэффициента теплоотдачи для поддержания теплового баланса молота при допустимых температурах нагрева электромагнитов.

Скважинный виброисточник, электромагнитный ударный двигатель, гидравлический силовой элемент, автоматическое отключение, система защиты, давление жидкости, ток, напряжение

DOI: 10.15372/FTPRPI20240312

EDN: ZDWYLN

Поддержание и форсирование темпов добычи углеводородов из месторождений на поздних стадиях разработки — одна из актуальных задач нефтегазовой промышленности. Для ее решения на промыслах применяются различные методы увеличения нефтеотдачи (МУН), из которых тепловые и гидродинамические остаются наиболее распространенными в мировой практике [1]. При этом большой объем дополнительной добычи обеспечивают физико-химические МУН, включающие виброволновое воздействие на нефтяные пласты с дневной поверхности или из скважины, а также их комбинации с другими методами [2 – 7].

В работах, посвященных технической реализации виброволновых МУН проведен сравнительный анализ энергоэффективности поверхностных и скважинных сейсмических источников по критериям потребляемой электроэнергии и амплитуды создаваемых колебаний породы на уровне нефтяного пласта и обоснована целесообразность создания скважинных виброисточников. Исчерпывающий обзор и анализ технологий и устройств для внутрискважинного вибровоздействия выполнен в [4, 6, 8], где представлена перспективность волновых МУН. Следует отметить, что многие технические решения и конструктивные исполнения скважинных вибро-

источников, несмотря на успешные теоретические и экспериментальные лабораторные результаты исследований, не находят практического применения на месторождениях. Важный сдерживающий фактор при создании скважинной вибротехники — крайне тяжелые условия эксплуатации. Установки испытывают воздействие динамических нагрузок, агрессивных сред, высокое внешнее давление, повышенные температуры. При этом они должны удовлетворять диаметральным габаритам скважины и сочетаться с технологическими процессами при проведении опытно-промысловых работ вновь разработанными скважинными установками. Для минимизации рисков возникновения аварий целесообразно во время лабораторных испытаний имитировать реальные условия эксплуатации: внутрискважинное давление жидкости, достигающее 10–15 МПа. Для традиционного скважинного нефтяного оборудования (установок электроприводных центробежных насосов, погружных электродвигателей, протекторов гидрозащиты, пакеров и т. д.) выпускаются специализированные испытательные стенды [9–11], однако их высокая стоимость, узкоспециализированное назначение, фиксированные габаритные размеры ограничивают возможность применения. В этой связи реализация стендовых испытаний виброисточников в условиях, приближенных к реальным, остается актуальной научно-технической проблемой.

Настоящая работа посвящена решению задач разработки стенда-имитатора обсадной колонны скважины для испытаний электро- и гидроприводных скважинных устройств диаметром до 125 мм и длиной до 6000 мм в среде неподвижной или циркулирующей жидкости под давлением до 15 МПа и проведению стендовых испытаний скважинного виброисточника на основе линейного электромагнитного ударного двигателя и гидравлических распорных силовых элементов [12, 13]. В ходе испытаний определены технические характеристики виброисточника в зависимости от напряжения питания катушек, выбран его режим работы и доведена до необходимого уровня длительность безотказной эксплуатации.

В ИГД СО РАН при финансовой поддержке АО “Сейстех” разработан и изготовлен лабораторный стенд (рис. 1), который включает толстостенную трубу 1, жестко зафиксированную на направляющем швеллере 2. В трубе 1 устанавливается исследуемое оборудование. В настоящей работе описаны испытания скважинного виброисточника 3 (СВИ). Открытые торцы трубы 1 герметизируются глухой нижней пробкой 4 и проходной верхней пробкой 6, которая связана с СВИ 3 посредством патрубка 5 (НКТ 73). Причем осевой канал в пробке 6 сообщен с полостью НКТ 5 и преобразователем давления в СВИ 3 для закачки рабочей жидкости в силовые элементы от ручного насоса высокого давления 15. С целью контроля за давлением в СВИ предусмотрены манометр 18 и датчик давления 17, связанный с блоком защиты по давлению 19. Электропитание СВИ подается от системы питания и управления (СПУ) 20. Кабельные линии вводятся в стенд через шесть герметичных контактов в верхней пробке 6, благодаря которым осуществляется электропитание силовых катушек электромагнитного молота и вывод сигналов от датчиков положения бойка (расположены на полюсах электромагнитного молота [12, 13] в корпусе виброисточника и на рис. 1 не показаны). Для имитации работы электроприборов в скважине на большой глубине в стенде предусмотрена возможность подключения регулируемых сопротивлений в электрические линии, что позволяет создавать в системе питания и управления номинальную или повышенную нагрузку на электромагнитные катушки СВИ.

К нижней части трубы 1 подведена система подачи воды в стенд. Она состоит из бака с водой 12, подкачивающего насоса низкого давления 11, насоса высокого давления 8, крана 9, манометра 10 и соединительных гидрوليний. К верхней части трубы 1 подключен сливной рукав высокого давления 13, который через кран 14 связан с баком 12.

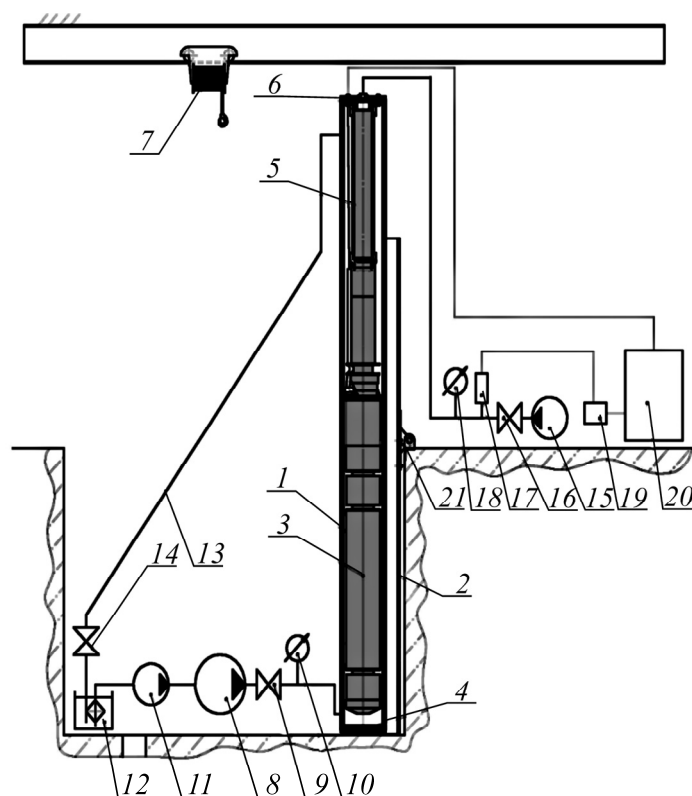


Рис. 1. Стенд для имитации работы СВИ в условиях скважины: 1 — труба 152×12; 2 — швеллер; 3 — СВИ; 4 — пробка нижняя; 5 — патрубок НКТ 73; 6 — пробка верхняя; 7 — кран-балка; 8 — насос высокого давления (автомойка) для закачки воды; 9 — кран; 10 — манометр; 11 — подкачивающий насос; 12 — бак; 13 — рукав высокого давления для слива воды; 14 — кран; 15 — ручной насос для закачки масла в СВИ; 16 — кран; 17 — датчик давления; 18 — манометр; 19 — блок защиты по давлению; 20 — система питания и управления; 21 — шарнирный кантователь

Система подачи воды позволяет:

- после монтажа и приведения в проектное вертикальное положение стенда произвести заполнение его водой без образования воздушных карманов;
- создавать статическое давление воды в стенде в диапазоне 0.1–15 МПа для проверки СВИ на герметичность при работе в условиях скважины;
- регулировать режим прокачки воды через стенд для имитации работы СВИ в нагнетательной скважине.

При штатной работе СВИ в стенде боек молота перемещается возвратно-поступательно под действием электромагнитных сил катушек и в конце каждого нижнего и верхнего хода наносит удары по плунжерам силовых элементов, которые внедряются в рабочую жидкость и создают в ней импульсы давления [12]. Пример осциллограмм рабочих процессов в СВИ приведен на рис. 2. В зоне 1 показана штатная работа СВИ, при этом рабочие токи и напряжение питания верхней и нижней катушек равны соответственно 26 и 22 А (кривая 2), 220 и 200 В (кривая 3). Рабочее давление в силовых элементах поддерживается на уровне $p_0 = 15$ МПа. На осциллограмме давления (кривая 1) видны чередующиеся импульсы давления, проникающие в напорную магистраль от нижнего и верхнего силовых элементов.

Для нормальной работы СВИ необходимо поддерживать давление в силовых элементах не менее $p_1 = 10$ МПа. Снижение давления влечет увеличение хода плунжера под действием удара бойка. При достижении критически низкого давления механическим ударным воздей-

ствиям подвергаются конструктивно сложные и дорогостоящие детали силовых элементов и молота. Во избежание их разрушения разработан и изготовлен блок защиты по давлению 19 (рис. 1), который при аварийной потере герметичности гидролиний силовых элементов автоматически отключает СВИ подачей сигнала на систему питания и управления 20. На рис. 2 приведены данные об аварии в зоне 2 в момент времени t_1 . Резкое снижение давления до p_1 привело к срабатыванию блока защиты в момент времени t_2 , при этом произошло автоматическое отключение питания электромагнитного молота в зоне 3.

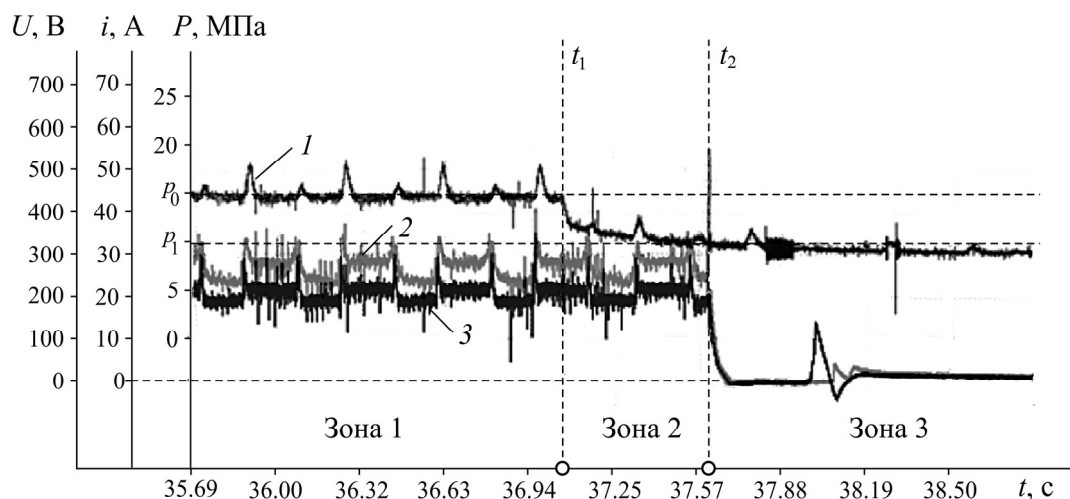


Рис. 2. Осциллограммы рабочих процессов в СВИ: 1 — давление в напорной магистрали силовых элементов; 2 — токи катушек молота; 3 — напряжение на катушках молота; t_1 — начало аварийного снижения давления; t_2 — момент срабатывания блока защиты; зона 1 — штатная работа СВИ; зона 2 — потеря герметичности силовых элементов; зона 3 — аварийное отключение

В ходе стендовых испытаний СВИ исследовалось влияние напряжения питания катушек молота на его интегральные динамические характеристики. Экспериментальные зависимости основных параметров ударного узла представлены на рис. 3. Предударная скорость боя молота определялась с помощью методики и оборудования, описанных в [12].

Рассматривался диапазон напряжений, в котором обеспечивались допустимые для длительной работы значения плотности тока ($4–10 \text{ А/мм}^2$). При равном напряжении питания катушек средний за цикл ток в верхней катушке в 1.3–1.5 раза больше, чем в нижней, в связи с меньшей скоростью движения бойка вверх, обусловленной преодолением силы тяжести (рис. 3а, б). По этой же причине энергия удара вверх на 20–40 % меньше, чем вниз (рис. 3г), причем с увеличением напряжения эта разница уменьшается за счет увеличения тяговых сил катушек в сравнении с неизменной силой тяжести бойка, равной 140 Н. Частота ударов (рис. 3д) и ударная мощность также увеличиваются пропорционально напряжению питания. Количество потребляемой за рабочий цикл электроэнергии связано с напряжением линейной зависимостью с большим углом наклона прямой, чем у графиков энергии удара (рис. 3в). Соответственно, коэффициент полезного действия молота с ростом напряжения уменьшается почти линейно (рис. 3е). Из полученных результатов видно, что по техническим характеристикам ударного узла невозможно определить диапазоны оптимальных или рациональных значений напряжения питания и тока в обмотках. Для выбора режимов работы следует руководствоваться критериями допустимых тепловых режимов обмотки.

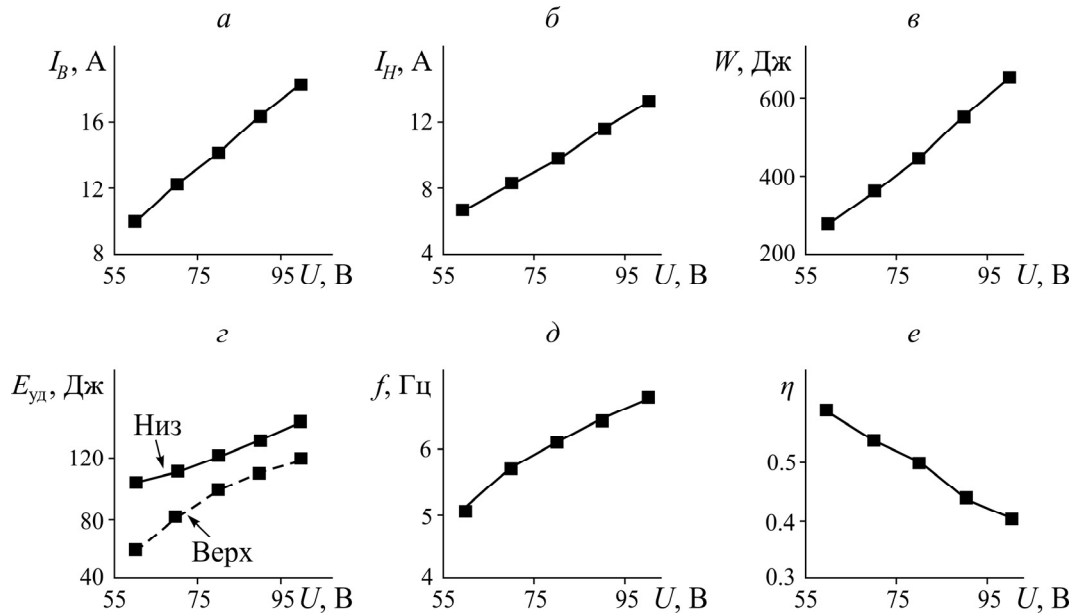


Рис. 3. Зависимости параметров СВИ от напряжения питания катушек: *а, б* — средний за цикл ток верхней и нижней катушек; *в* — количество потребляемой за цикл электроэнергии; *г* — энергия удара; *д* — частота ударов; *е* — КПД

Разработанный скважинный виброисточник предназначен для длительной непрерывной работы в скважине с поддержанием заданных технических параметров. Согласно рис. 3г, д, для повышения ударной мощности, а значит, энергии, передаваемой в горную породу, целесообразно увеличивать напряжение питания катушек. Однако при этом увеличивается температура нагрева молота. Уравнение теплового баланса электромагнита имеет вид:

$$i^2 S^2 R \frac{t_k}{t_{\text{ц}}} \text{ПВ}_m = \alpha F \Delta T,$$

где i — плотность тока в катушке, А/мм²; S — площадь поперечного сечения обмоточного провода, мм²; R — сопротивление электромагнита, Ом; t_k — длительность включения катушки за один рабочий цикл молота, с; $t_{\text{ц}}$ — длительность рабочего цикла, с; ПВ_m — продолжительность включения молота; α — коэффициент теплоотдачи поверхности электромагнита, Вт/(м²·°C); F — площадь поверхности, м²; ΔT — тепловой напор, °C.

Для поддержания теплового баланса при допустимых температурах нагрева обмоточного провода и компаунда в электромагнитных ударных системах задается продолжительность включения (ПВ) менее 1. Определение максимальной допустимой ПВ является нетривиальной задачей в связи со сложностью определения фактического коэффициента конвективной теплоотдачи. Для ее решения использованы результаты комплекса экспериментальных исследований тепловых процессов, частично описанных в работах [12, 13], в которых выявлены некоторые установившиеся тепловые режимы молота при разных его конструктивных исполнениях и параметрах работы. Характеристики этих режимов сведены в табл. 1. Для анализа следует рассматривать наиболее нагруженную верхнюю катушку, в которой действует больший ток в течение более длительного времени за рабочий цикл ($t_k / t_{\text{ц}} \geq 0.5$).

ТАБЛИЦА 1. Характеристики установившихся тепловых режимов молота

Конструкция молота	ПВ _м	$t_k / t_{ц}$	$i, \text{ A / мм}^2$	$i_3, \text{ A / мм}^2$
С демпфером	0.40	0.62	5.72	2.75
С двумя силовыми элементами	1.00	0.52	5.03	3.63
С демпфером	0.50	0.60	5.48	3.00
Без ограничения верхнего хода	0.30	0.75	8.23	3.98
Без ограничения верхнего хода	0.25	0.72	7.77	3.30
Без ограничения верхнего хода	0.30	0.74	7.80	3.67

Для комплексной обработки представленных данных и определения коэффициента теплоотдачи целесообразно использовать метод эквивалентного тока в катушке [14, 15]. Следовательно, вместо циклически действующего импульсного тока i необходимо рассматривать эквивалентный постоянный ток i_3 , при протекании которого в катушке выделяется равное количество тепла. Эквивалентный ток определяется как

$$i_3 = i \sqrt{\frac{t_k \text{ ПВ}_m}{t_{ц}}}$$

Значения установившихся температур обмотки при соответствующих им эквивалентных токах для описанных режимов работы представлены на рис. 5 точками.

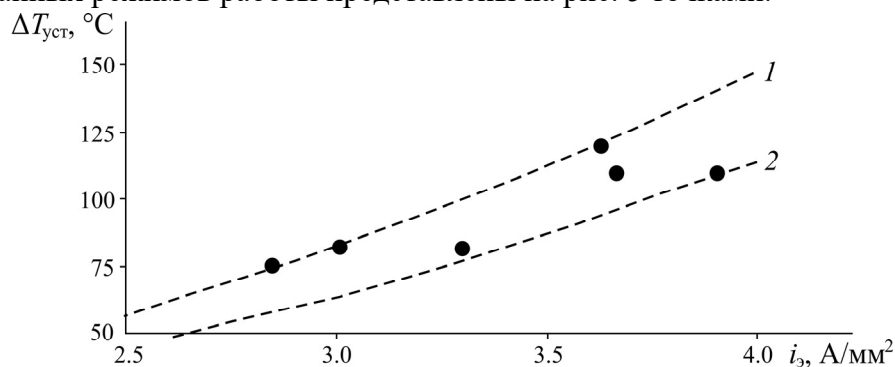


Рис. 4. Зависимость установившегося теплового напора от эквивалентного тока при $\alpha = 4$ (1); 5 (2)

Пунктирными линиями на рис. 4 показаны расчетные зависимости $\Delta T_{уст} = f(i_3)$ при $\alpha = 4$ и $\alpha = 5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$, из чего следует, что фактический коэффициент теплоотдачи катушек при естественном воздушном охлаждении находится в этом диапазоне. Полученный результат полезен для определения допустимых режимов работы молота в наиболее тяжелых температурных условиях. При реальной эксплуатации виброисточник расположен в среде подвижной или неподвижной жидкости, что способствует повышению коэффициента теплоотдачи.

С использованием традиционных компаундов на основе эпоксидной смолы с теплостойкостью 150 °С и обмоточных проводов типа ПЭТД-2 при температуре окружающей среды 30 °С допустимый тепловой напор ΔT_d равен 120 °С. Максимальная ПВ молота, при которой обеспечивается поддержание постоянной температуры, определяется из теплового баланса катушки

$$\text{ПВ}_{\text{max}} = \frac{\alpha F \Delta T_d}{i^2 S^2 R \frac{t_k}{t_{ц}}}$$

и при неизменной конструкции зависит только от плотности тока в обмотке и коэффициента теплоотдачи (рис. 5а).

С целью повышения ПВ в конструкции опытно-промышленного образца молота применены компаунд Силагерм 2113 с теплостойкостью до 300 °С и провод ПЭТД с температурным индексом 220 °С. При температуре окружающей среды 30 °С такое решение позволяет повысить тепловой напор до 190 °С. График максимальной ПВ показан на рис. 5б. Представленные зависимости используются для оперативного выбора безопасного ПВ виброисточника при его лабораторных и промысловых испытаниях с различными режимами питающего напряжения.

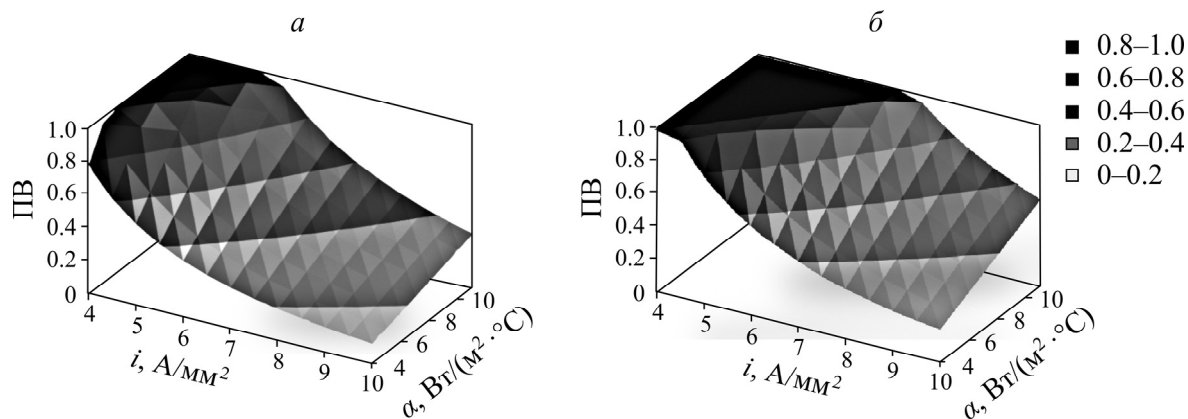


Рис. 5. Зависимости максимальной продолжительности включения от плотности тока и коэффициента теплоотдачи при допустимом тепловом напоре 120 (а) и 190 °С (б)

Одной из основных задач стендовых испытаний является отработка надежности динамически нагруженных элементов конструкции. К таким элементам относится боек молота (рис. 6), который выполнен в виде стержня с осевым отверстием для циркуляции воздуха при возвратно-поступательном движении в направляющей под действием электромагнитных сил катушек. В верхней и нижней части бойка расположены канавки под подшипники скольжения.

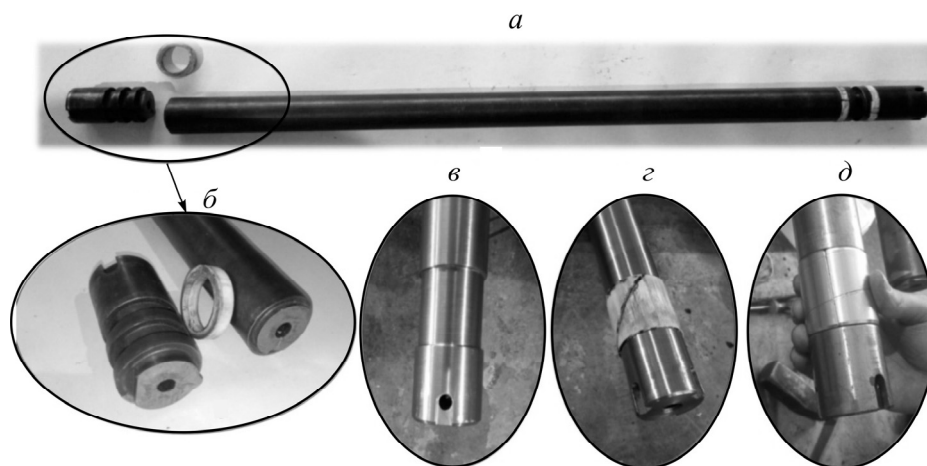


Рис. 6. Конструктивные особенности бойка: а — боек; б — разрушение; в — канавки нового бойка; г — фторопластовый подшипник; д — бронзовый подшипник

Изначально конструкция бойка (рис. 6а) снабжена шестью канавками типа “ласточкин хвост” под фторопластовые подшипники. Такая форма способствует удержанию подшипника в проектом положении при монтаже, а также препятствует его линейным деформациям за счет хладотекучести фторопласта при радиальных нагрузках в процессе работы. Боек выполнен из стали 40Х с объемной закалкой и отпуском при 200 °С с получением твердости поверхности 47-51 HRC для обеспечения износостойкости зоны контакта бойка с плунжером. Ресурс

бойка до разрушения составил 79.5 ч (1 млн циклов), при этом ошибка заключалась в стремлении получить высокую твердость. С повышением твердости и прочности заметно снизилась ударная вязкость примерно до КСЧ 29 Дж/см². Это привело к зарождению усталостной трещины по дну канавки под подшипник и к последующему разрушению (рис. 6б).

В следующей конструкции бойка канавки под подшипники выполнены значительно меньшей глубины с увеличенным радиусом галтелей по дну канавок (рис. 6в). Материал заменен на 35ХГСА. Испытания после нормализации показали отсутствие пластических деформаций торца бойка под действием ударов, поэтому необходимость закалки бойка с последующим отпуском перестала быть актуальной. Боек описанной конструкции имеет наработку более 500 часов (более 6 млн циклов) без признаков неисправностей.

Движение бойка молота в направляющей должно осуществляться с минимальным механическим сопротивлением. Пара трения “подшипник – направляющая” работает в условиях повышенных температур (до 150 °С и выше) и без возможности циркуляции смазочного материала. Высокими антифрикционными свойствами (коэффициент трения скольжения 0.04–0.08) и высокой теплостойкостью (до 260 °С) обладает фторопласт Ф-4. Малая износостойкость и хладотекучесть фторопласта ограничивает его ресурс до 35–40 ч (0.41–0.50 млн циклов). Подшипники из фторопласта представлены на рис. 6г.

С целью повышения износостойкости подшипники изготавливались из бронзы БрАЖ9-4 (рис. 6д). Коэффициент трения такого материала составляет 0.055–0.180 в зависимости от наличия смазки, которая наносится на подшипники однократно при монтаже бойка в направляющую. Испытания молота с бронзовыми подшипниками в течение более 200 ч показали износ подшипников менее 10 % от его толщины, что не влияет на рабочие характеристики молота.

В результате испытаний СВИ на описанном стенде и оптимизации его конструкции достигнут ресурс безотказной работы источника свыше 150 мото-часов, что обеспечивает возможность проведения опытно-промышленных работ.

ВЫВОДЫ

Разработан и изготовлен стенд-имитатор обсадной колонны скважины для испытаний надежности электрических и/или гидроприводных скважинных устройств диаметром до 125 мм и длиной до 6000 мм в среде неподвижной или циркулирующей жидкости под давлением до 15 МПа.

Определены технические характеристики скважинного виброисточника. В зависимости от напряжения питания энергия и частота ударов регулируются в диапазонах 60–150 Дж и 5–8 Гц соответственно. Выбор параметров необходимо осуществлять индивидуально для каждой скважины, при этом частота ударов не должна совпадать с частотой собственных колебаний колонны.

Выявлены зависимости максимальной продолжительности включения скважинного виброисточника от плотности тока в катушках и коэффициента теплоотдачи для обеспечения теплового баланса молота при допустимых температурах нагрева электромагнитов до 220 °С. Результаты исследования следует использовать в качестве номограмм при выборе режима работы скважинного виброисточника.

Достигнут ресурс безотказной работы виброисточника в условиях скважины свыше 150 мото-часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газизов А. А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2002. — 639 с.

2. Ганиев О. Р., Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е. Основы волновой механики продуктивных пластов // Докл. АН. — 2016. — Т. 466. — № 3. — С. 298–301.
3. Симкин Э. М., Кузнецов О. Л., Чилингар Г. В. Физические основы акустического и вибрационного воздействия на нефтяные и газовые коллекторы. — М.: Мир, 2000. — 246 с.
4. Дыбленко В. П., Марчуков Е. Ю., Туфанов И. А., Шарифуллин Р. Я., Евченко В. С. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. — М.: РАЕН. — 2012. — 338 с.
5. Кравцов Я. И., Марфин Е. А. Волновое воздействие на продуктивные пласты как универсальный способ повышения эффективности добычи тяжелых нефтей и природных битумов // Георесурсы. — 2011. — № 3. — С. 17–18.
6. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010. — 404 с.
7. Абдукамов О. А., Серебрякова Л. Н., Тастемиров А. Р. Опыт применения технологии воздействия ударно-волновой обработки на призабойную зону нагнетательных скважин на месторождениях Западного Казахстана // SOCAR Proceeding. — 2017. — № 1. — С. 62–69.
8. Симонов Б. Ф., Опарин В. Н., Кордубайло А. О., Востриков В. И. Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного виброисточника // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 180–189.
9. Камелин А. Автоматизированная система управления стендом тестирования погружного электродвигателя // Современные технологии автоматизации. — 2004. — № 3. — С. 52–55.
10. Пат. РФ 2 247222 С1. Стенд для испытания пакеров / Пындак В. И., Щербин А. В., Трохимчук М. В. // Оpubл. в БИ. — 2005. — № 6.
11. Пат. РФ 2638046 С1. Стенд для испытаний гидромеханических пакеров двухстороннего действия / Аксенов С. В. и др. // Оpubл. в БИ. — 2017. — № 35.
12. Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Нейман В. Ю., Полищук А. Е. Рабочие процессы в импульсном линейном электромагнитном приводе скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2018. — № 1 — С. 71–78.
13. Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Грачев А. Е., Леуткин А. А., Позднякова Е. М. Исследование тепловых процессов в электромагнитном ударном узле скважинного импульсного виброисточника // ФТПРПИ. — 2022. — № 6. — С. 141–149.
14. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники Т. 2. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 416 с.
15. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. — Л.: Атомиздат, 1986. — 255 с.

Поступила в редакцию 19/I 2024

После доработки 06/II 2024

Принята к публикации 17/V 2024