

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.23.05

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СКВАЖИННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ВИБРОИСТОЧНИКА

**А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов**

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

Развитие волнового метода интенсификации добычи полезных ископаемых и технологии межскважинного сейсмического просвечивания обуславливает потребность в скважинных источниках упругих колебаний. Разработан электромагнитный импульсный виброисточник с гидромеханическим силовым элементом для закрепления в скважине и передачи импульса в породу и электромагнитным ударным узлом для генерации импульса давления. Представлены результаты экспериментальных исследований рабочих процессов в виброисточнике, выполненном по трем конструктивным схемам. Рассмотрены особенности рабочих циклов. Получены зависимости основных параметров виброисточника от напряжения питания, сформулированы рекомендации по их практическому применению.

*Скважинный виброисточник, конструктивная схема, сравнительный анализ, межскважинное сейсмическое просвечивание, метод увеличения нефтеотдачи, электромагнитный линейный двигатель, энергия удара, силовой элемент, импульс давления*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200517

---

Из-за перехода большинства крупных нефтегазовых месторождений мира и России на поздней стадии разработки в эксплуатацию вовлекаются залежи сложного строения, увеличивается плотность бурения, развиваются нетрадиционные технологии, способствующие повышению степени извлечения углеводородов из нефтяных пластов [1]. На небольших месторождениях со сложным контуром существует проблема низкой результативности бурения, обусловленная недостаточной точностью данных поверхностной сейсморазведки о мощности и пространственной конфигурации коллекторов. Для получения полных сведений о структуре и размерах залежей с конца XX в. начали интенсивно развиваться технологии межскважинного сейсмического просвечивания [2]. В комплект аппаратной базы для разработки технологии входит скважинный сейсмический источник. В направлении инженерной геофизики на рынке представлено множество отработанных технических решений скважинных виброисточников производства Geotomographie (Германия), PASI (Италия), “ГЕОДЕВАЙС” (Россия) и др. [3].

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90028.

Однако такие устройства ограничены глубиной эксплуатации в пределах 150 м и не удовлетворяют требованиям нефтегазовой отрасли, где в настоящее время для создания скважинных сейсмосигналов при проведении работ по вертикальному сейсмическому профилированию применяются экспериментальные и мелкосерийные взрывные и электроразрядные установки [4]. Требуется создать глубинные скважинные источники высокоамплитудных упругих колебаний.

Актуальная задача нефтегазовой отрасли — повышение коэффициента извлечения нефти из крупных месторождений в поздних стадиях разработки. Активно разрабатываются и внедряются методы увеличения нефтеотдачи, многообразие которых обусловлено сложностью физических и химических процессов, протекающих в нефтяном пласте, и геологическими особенностями месторождений. В настоящее время распространены химические, термические и физические методы увеличения нефтеотдачи [5–7]. Наиболее перспективен метод объемной виброволновой обработки нефтяных пластов скважинными виброисточниками из-за малых экономических затрат и возможности комбинации с другими методами увеличения нефтеотдачи. Важные результаты в направлении виброволнового метода достигнуты в Shlumberger Cambridge Research (Великобритания), НПП “Ойл-Инжиниринг” (Россия), ИГД СО РАН и др. [8–10], но необходимо усовершенствовать существующие и создавать новые более энергоэффективные, безопасные, надежные скважинные виброисточники.

В Институте горного дела СО РАН разрабатывается скважинный виброисточник на основе линейного электромагнитного привода ударного действия и гидромеханического распорного силового элемента. Установлены основные зависимости рабочих параметров электромагнитного ударного узла от конструктивных и геометрических характеристик [11]. Проведены лабораторные и полевые исследования излучающей способности прототипа виброисточника [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованы рабочие процессы и определены границы энергетических параметров виброисточника, выполненного по конструктивным схемам: с неограниченным обратным ходом ударника (схема I, рис. 1); с демпфером, ограничивающим обратный ход ударника (схема II); с двумя силовыми элементами (схема III). Проведен сравнительный анализ и установлены области рационального практического применения виброисточников.

Спроектирован и изготовлен лабораторный стенд, включающий фрагмент обсадной трубы 1, жестко связанный с неподвижной металлоконструкцией стенда (рис. 1). В трубе 1 размещен силовой элемент 2 (СЭ), состоящий из корпуса 3, эластичной камеры 4 и раздвижных пуансонов 5. Внутренняя полость камеры 4 отверстием в корпусе 3 связана с плунжерным насосом высокого давления 6 и датчиком гидравлического давления марки DMP 334 фирмы BDSensors (ДД1). В верхней части корпуса 3 смонтирован плунжер 7 с уплотнениями 8. К корпусу 3 СЭ присоединен корпус 9 электромагнитного ударного узла 10 (ЭУУ), в котором установлена направляющая гильза 11. На эту гильзу намотаны нижняя (прямого хода) 12 и верхняя (обратного хода) 13 катушки. В гильзе 11 со скользящей посадкой смонтирован ферромагнитный ударник 14, нижний торец которого воздействует на плунжер 7 СЭ 2. Катушки 12, 13 подключены к электрической сети через блок питания и управления (БПУ), снабженный датчиками силы тока ЛАН 25-NP фирмы LEM. Измерительное оборудование стенда подключено к осциллографу PicoScope 442 с возможностью визуализации и записи измеряемых величин на персональный компьютер. К верхнему торцу корпуса 9 в зависимости от конструктивной схемы присоединяется: крышка 15 с осевым отверстием для свободного прохождения ударника 14 (схема I); глу-

хая крышка 16 с упругим демпфером 17 (схема II); перевернутый СЭ 18 с аналогичной СЭ 2 конструкции, снабженный датчиком давления ДД2 и связанный гидравлически с насосом 6 (схема III).

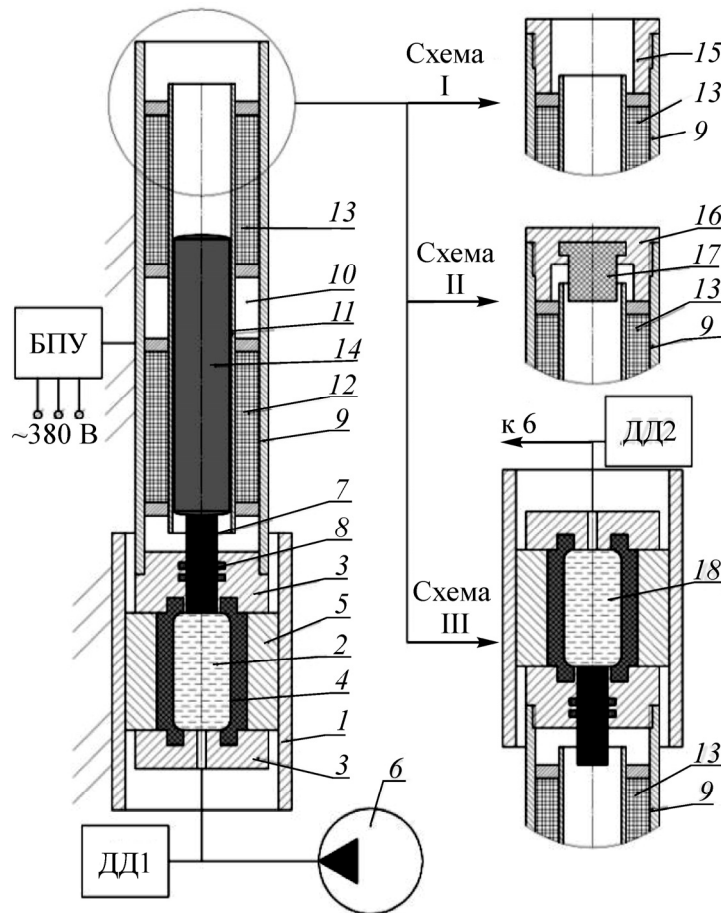


Рис. 1. Стенд для исследования конструктивных схем виброисточника: схема I — со свободным выбегом; схема II — с демпфером; схема III — с двумя СЭ; 1 — обсадная труба; 2 — СЭ; 3 — корпус СЭ; 4 — камера; 5 — пуансон; 6 — насос; 7 — плунжер; 8 — уплотнение; 9 — корпус ЭУУ; 10 — ЭУУ; 11 — гильза; 12 — нижняя катушка; 13 — верхняя катушка; 14 — ударник; 15, 16 — крышка; 17 — демпфер; 18 — верхний СЭ

Перед началом работы виброисточника насосом 6 рабочая жидкость закачивается в эластичную камеру 4, которая расширяется и воздействует на пуансоны 5, раздвигая их до упора в стенки обсадной трубы 1. Давление в камере 4 увеличивается до уровня 17–20 МПа, после чего насос 6 отсекается, а статическое давление в камере 4 остается постоянным.

Виброисточник по конструктивной схеме I работает следующим образом. БПУ подает питание на верхнюю катушку 13. Электромагнитная сила катушки 13 превышает силу тяжести ударника 14, и последний начинает ускоренное движение вверх. При прохождении верхнего торца ударника мимо верхнего полюса катушки 13 БПУ отключает катушку 13 и включает катушку 12. Ударник по инерции продолжает движение вверх, и его нижний торец покидает зону действия катушки 12, а по ее обмотке протекает холостой ток. Происходит гравитационное торможение ударника. Тормозной путь ударника ограничен массой и кинетической энергией, накопленной верхней катушкой. После остановки ударника в верхней мертвой точке начинается разгон вниз под действием силы тяжести до момента внедрения нижнего торца ударника

в рабочую зону нижней катушки 12. С этого момента разгон ударника осуществляется силой тяжести и электромагнитной силой нижней катушки. При прохождении нижнего торца ударника мимо нижнего полюса катушки 12 БПУ отключает катушку 12 и включает катушку 13. Ударник по инерции продолжает движение вниз и наносит удар по плунжеру 7 СЭ 2, который внедряется в полость камеры 4, создавая в ней импульс гидравлического давления. После останова ударника 14 в нижней мертвой точке рабочий цикл повторяется.

Виброисточник по конструктивной схеме II работает следующим образом. БПУ включает верхнюю катушку 13. Ударник 14 ускоренно движется вверх. При прохождении мимо полюса катушки 13 БПУ переключает катушки. Ударник, двигаясь по инерции, наносит удар демпферу 17, останавливается и начинает движение вниз с начальной скоростью, равной произведению предударной скорости и коэффициента восстановления демпфера. Так как демпфер установлен над катушкой 13, нижний торец ударника при ударе по демпферу находится в зоне действия нижней катушки 12. Движение вниз осуществляется под действием силы тяжести и электромагнитной силы до прохождения ударника мимо нижнего полюса катушки 12. Далее БПУ переключает катушки, ударник по инерции воздействует на плунжер 7 СЭ, и рабочий цикл повторяется.

Виброисточник по конструктивной схеме III работает аналогично схеме II. Вместо удара по демпферу 17 в конце верхнего хода ударника происходит импульсное воздействие на плунжер верхнего СЭ 18, схожего по конструкции с нижним СЭ 2. В результате виброисточник за один рабочий цикл генерирует два сейсмоимпульса.

Проводилась запись рабочих токов и напряжений в катушках 12, 13, фиксировались скорости ударника 14 при ударе и импульсы гидравлического давления в СЭ 2 и СЭ 18 датчиками ДД1, ДД2. Осуществлена аналитическая обработка результатов измерений для получения энергии удара, потребляемой энергии и коэффициента полезного действия (КПД) виброисточника. КПД — отношение энергии удара ударника 14 по штоку 7 к электроэнергии, потребляемой за рабочий цикл катушками 12, 13. В схеме III учитывается, что за один рабочий цикл ударник 14 совершает два удара (вниз и вверх). КПД определяется отношением арифметической суммы энергий верхнего и нижнего удара к потребляемой за цикл энергии.

Осциллограммы рабочих токов в верхней 13 и нижней 12 катушках при напряжении питания 100 В в одном рабочем цикле для виброисточника по схемам приведены на рис. 2.

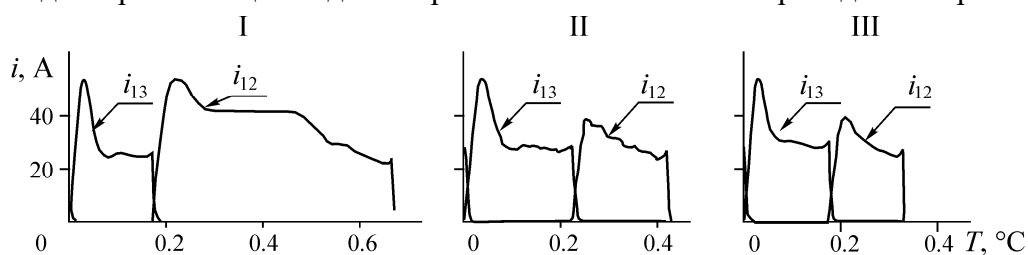


Рис. 2. Осциллограммы рабочих токов  $i$  для виброисточника по конструктивным схемам I–III

Для виброисточника на рис. 2 осциллограммы тока в верхней катушке подобны и близки по значениям. Разные начальные скорости ударника при обратном ходе и компрессионно-вакуумные эффекты обуславливают различие токов в верхней катушке не более 10–15 % по длительности включения и среднему значению тока за время работы катушки.

Осциллограммы токов нижней катушки 12 для виброисточника по схемам II, III подобны, что обусловлено равенством тормозных путей ударника при движении вверх. Для схемы II характерна большая длительность включения катушки (на 17–23 %). Коэффициент восстановле-

ния СЭ больше демпфера. На осциллограмме для схемы II заметна ступенчатость функции тока, прослеживается повышенная вибрация динамической системы вследствие большей жесткости демпфера по сравнению с СЭ.

Осциллограмма тока нижней катушки 12 для виброисточника по схеме I отличается затяжным участком холостого тока (рис. 2а, участок 0.28–0.47 с), в этот интервал времени ударник находится вне зоны действия катушки 12, совершая гравитационное торможение и начальный разгон. Наличие участка холостого тока ведет к увеличению потерь электроэнергии на нагрев обмотки.

По результатам измерения токов и напряжений в катушках, предупредной скорости ударника и импульсов давления в СЭ построены зависимости основных рабочих параметров виброисточника от напряжения питания ЭУУ (рис. 3).

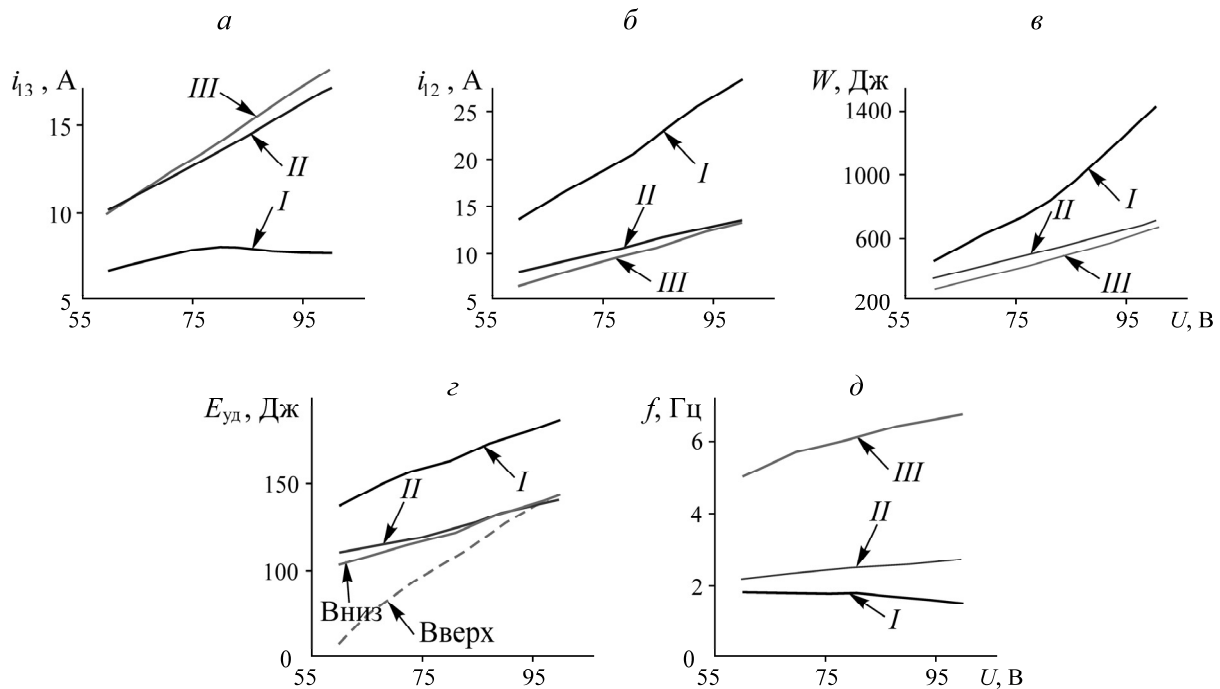


Рис. 3. Зависимости параметров ЭУУ от напряжения питания катушек для конструктивных схем I–III: а — средний за рабочий цикл ток верхней катушки 13 ( $i_{13}$ ); б — средний за цикл ток нижней катушки 12 ( $i_{12}$ ); в — количество потребляемой за цикл электроэнергии  $W$ ; з — энергия удара  $E_{уд}$ ; д — частота ударов  $f$

На рис. 3з кривые “вниз” и “вверх” — кинетическая энергия ударника в моменты касания нижнего и верхнего СЭ. Средний за цикл ток в верхней 13 (рис. 3а) и нижней 12 (рис. 3б) катушках для конструктивных схем II и III отличается на 10–15% из-за разных коэффициентов восстановления СЭ и демпфера. Средний за цикл ток в верхней катушке в 1.25–1.45 раза больше, чем в нижней. Плотность тока в обмотках не превышает  $4 \text{ А/мм}^2$ , что позволяет осуществлять работу виброисточника при длительных режимах включения. Для конструктивной схемы I средний ток за цикл в нижней катушке (рис. 3б) в 2.1–3.5 раза превышает средний ток верхней (рис. 3а). Плотность тока в обмотке нижней катушки находится в пределах  $3.5\text{--}6.5 \text{ А/мм}^2$ , поэтому работа проводится лишь в повторно-кратковременных режимах.

Количество электроэнергии, потребляемой за рабочий цикл, для схем II, III одинаково и увеличивается линейно с ростом напряжения питания катушек (рис. 3в). Виброисточник по конструктивной схеме I в том же диапазоне напряжений потребляет в 1.4–2.0 раза больше энергии.

Кинетическая энергия ударника 14 в момент касания плунжера 7 нижнего СЭ для всех конструктивных схем растет пропорционально напряжению питания (рис. 3з). Для схем II, III (кривые “вниз”) энергии удара равны. Энергия удара для схемы I в 1.2–1.3 раза больше, чем для схем II, III, при равном напряжении питания. Отличительная особенность схемы III — наличие над ЭУУ второго СЭ 18. В результате движение ударника 14 вверх или вниз кончается ударом по плунжеру СЭ, который преобразуется в сейсмосигнал. Энергия удара вверх (рис. 3з, кривая “вверх”) с ростом напряжения увеличивается более интенсивно и при напряжении 100 В сравнивается с энергией удара вниз. Это обуславливает возможность генерации в двух СЭ равных по амплитуде импульсов давления и сейсмических сигналов.

С ростом напряжения питания катушек частота ударов (рис. 3д) для схемы I снижается на 15 % из-за увеличения тормозного пути ударника при движении вверх. Для схем II, III частота повышается пропорционально напряжению. В схеме III за рабочий цикл ударник совершает два удара с большим коэффициентом восстановления вверх. Частота ударов для схемы III в 2.4–2.5 раза больше, чем для схемы II. На основании зависимостей энергии удара и потребляемой энергии от напряжения питания ЭУУ рассчитан КПД виброисточника (рис. 4а). Методом прямых измерений установлена зависимость импульсов давления в СЭ от напряжения питания ЭУУ (рис. 4б).

Для всех конструктивных схем I–III с увеличением напряжения питания КПД линейно уменьшается (рис. 4а). Минимальной энергоэффективностью обладает схема I вследствие протекания больших холостых токов в нижней катушке во время торможения ударника вверх. За счет ограничения хода ударника демпфером в схеме II КПД повысилось на 10–50 %. Большему напряжению питания соответствует большая разность КПД, что связано с увеличением тормозного пути ударника и более интенсивным ростом энергопотребления в схеме I. В конструктивной схеме III из-за использования двух СЭ КПД возросло в 1.8–2.2 раза по сравнению со схемой II. Виброисточник по схемам II, III рациональнее применять для длительных режимов работы (недели, месяцы), а по схеме I — для единичных воздействий или кратковременных режимов работы (до нескольких часов).

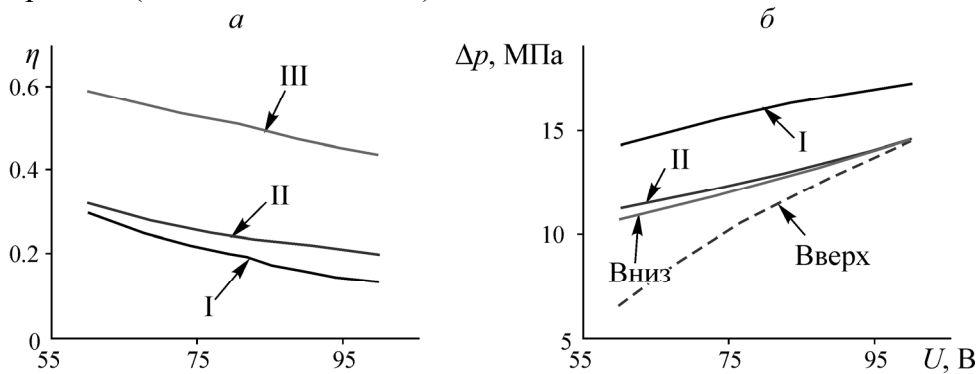


Рис. 4. Зависимость параметров виброисточника от напряжения питания катушек ЭУУ для конструктивных схем I–III: а — КПД; б — импульсы гидравлического давления в СЭ

Импульсы давления в СЭ прямо пропорциональны энергии удара по плунжеру СЭ, что подтверждается подобием кривых  $\Delta p(U)$  и  $E_{уд}(U)$  (рис. 4б). Максимальные импульсы давления (18 МПа) достигаются в конструктивной схеме а. Импульсы давления в нижнем СЭ для схем II, III равны между собой и снижены на 18–22 % по сравнению со схемой I. Для схемы III импульс давления в верхнем СЭ при напряжении 100 В становится равным импульсу в нижнем СЭ.

Виброисточник по схеме I можно использовать для генерации единичных или низкочастотных высокоамплитудных сейсмических сигналов, что определяет перспективы в области скважинной сейсморазведки: межскважинного сейсмического просвечивания в вертикальных

и наклонных скважинах (с зенитным углом до  $20-25^\circ$ ). Нерациональность применения виброисточника по схеме I в скважинах с зенитным углом  $>20^\circ$  и в горизонтальных скважинах обусловлена тем, что торможение в верхней зоне и начальный разгон ударника осуществляются проекцией силы тяжести на ось движения. Увеличение зенитного угла скважины ведет к увеличению тормозного пути ударника и длины устройства.

В результате ограничения тормозного пути в конструктивной схеме II ударник в момент остановки в верхней мертвой точке не покидает зону действия нижней катушки. Можно применять виброисточник в скважинах с большим зенитным углом и горизонтальных скважинах.

Виброисточник по схеме III вследствие наибольшей энергоэффективности рабочего цикла рационально использовать для длительного воздействия на нефтяные пласты с целью интенсификации углеводородоотдачи. Как и в схеме II, обратный ход ударника ограничен, поэтому он всегда находится в зоне действия электромагнитных сил. Виброисточник может работать в скважинах с любым зенитным углом. Напряжение питания ЭУУ следует задавать 100 В и более для обеспечения режима равных импульсов в верхнем и нижнем СЭ.

### ВЫВОДЫ

Комплекс экспериментальных исследований рабочих процессов в скважинном электромагнитном импульсном виброисточнике, выполненном по трем конструктивным схемам, позволяет установить диапазоны технических характеристик виброисточника и перспективы промышленного применения. Виброисточнику с неограниченным обратным ходом ударника соответствует: энергия удара 140–185 Дж (с возможностью увеличения до 300 Дж за счет роста массы ударника); частота импульсов 1.5–1.8 Гц и КПД 0.13–0.30. Из технических характеристик и конструктивных особенностей следует перспективность применения для сейсморазведки в вертикальных скважинах.

Виброисточник с ограниченным обратным ходом ударника имеет энергию удара 110–140 Дж, частоту импульсов 2.2–2.7 Гц и КПД 0.20–0.32. В данной конструкции ударник не покидает зоны действия электромагнитных сил, это обуславливает возможность применения в наклонных и горизонтальных скважинах. Виброисточник с двумя силовыми элементами обеспечивает энергию удара 105–145 Дж (вниз), 60–140 Дж (вверх). Наличие второго силового элемента, взаимодействующего с обсадной колонной, увеличивает частоту импульсов до 5.1–6.8 Гц и КПД до 0.44–0.59. Конструкция может использоваться в вертикальных, наклонных и горизонтальных скважинах и наиболее перспективна для реализации виброволнового метода увеличения нефтеотдачи пластов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Ленский В. А., Адиев А. Я., Иркабаев Д. Р., Шарова Т. Н. Скважинная сейсморазведка: цели, задачи, геологическая эффективность // Технологии сейсморазведки. — 2014. — № 2. — С. 117–124.
3. Ошкин А. Н., Ермаков Р. Ю., Рагозин Н. А., Игнатьев В. И. Межскважинное сейсмическое просвечивание — опыт, методология, аппаратура // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2016. — № 3. — С. 37–47.
4. Yu G., Chen Y. Z., Wang X. M., Zhang O. H., Li Y. P., Zhao B. Y., Wu J. J., and Greer J. Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline, *The Leading Edge*, 2016, Vol. 35, No 7. — P. 615–619. doi.org/10.1190/tle35070615.1.

5. **Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N.** Status of polymer-flooding technology, *J. Canadian Petroleum Technology*, 2015, Vol. 54, No 2. — P. 116–126. doi.org/10.2118/174541-PA.
6. **Bera A. and Babadagli T.** Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review. *Applied Energy*, 2015. Vol. 151. — P. 206–226. doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.031
7. **Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A., and Norouzbeigi R.** Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery, *J. Natural Gas Sci. and Eng.*, 2015, Vol. 26. — P. 1294–1305. doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.037.
8. **Ганиев О. Р., Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е., Устенко И. Г.** Основы волноводной механики продуктивных пластов // *ДАН*. — 2016. — Т. 466. — № 3. — С. 298–301. DOI: 10.7868/S0869565216030105.
9. **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. — 344 с.
10. **Курленя М. В., Пеньковский В. И., Савченко А. В., Евстигнеев Д. С., Корсакова Н. К.** Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения // *ФТПРПИ*. — 2018. — № 3. — С. 62–71. DOI: 10.15372/FTPRPI20180307.
11. **Simonov B. F., Kordubailo A. O., Neiman V. Y., and Polishchuk A. E.** Processes in linear pulse electromagnetic motors of downhole vibration generators, *J. Min. Sci.*, 2018, No 1. — P. 61–68. DOI: 10.1134/S1062739118013353.
12. **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. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-180-189.

*Поступила в редакцию 22/V 2020*

*После доработки 28/VIII 2020*

*Принята к публикации 11/IX 2020*