

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 550.834

СКВАЖИННЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЗОНУ ПОРОДНОГО МАССИВА

**С. В. Сердюков, Л. А. Рыбалкин, П. А. Дергач,
А. С. Сердюков, А. В. Азаров**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Разработан скважинный вибрационный источник дебалансного типа с пневматическим приводом для воздействия на призабойную зону породного массива в сейсмическом диапазоне частот. Источник модульного типа состоит из генератора колебаний с механизмом автоматического ступенчатого регулирования статического момента, прижимного узла и встроенного пневмоударного устройства для перемещения оборудования в необсаженных скважинах. Приведены результаты испытаний экспериментального образца источника, амплитудно-частотная характеристика и спектральный состав излучаемого им сигнала.

Скважинный сейсмический источник, вибрационное воздействие, породный массив, сейсмические колебания, спектральный состав

Сейсмическое воздействие на породный массив применяют для повышения проницаемости и флюидоотдачи горных пород путем их обработки упругими колебаниями низкой частоты. В скважинных технологиях добычи нефти и газа, дегазации угольных пластов, подземного выщелачивания цветных металлов основным объектом сейсмического воздействия является призабойная зона эксплуатационных скважин, гидродинамические свойства которой существенно влияют на их добычные возможности. Удельная мощность сейсмического излучения, зависящая от типа скважинного источника и его характеристик, относится к главным факторам, определяющим успешность работ.

Экспериментальными исследованиями установлено, что для значимого повышения проницаемости призабойной зоны по газу и жидкости частота воздействия должна быть 100–300 Гц, интенсивность — не ниже 0.01 Вт/м^2 , продолжительность — от 4–5 ч [1, 2]. Численные исследования ближней зоны излучения различных источников [3, 4] показали, что необходимые значения указанных параметров обеспечивает дебалансный вибратор с амплитудой вибротяговой силы 10–20 кН и более [3]. Экспериментальный образец такого вибрационного источника с пнев-

матическим приводом для шахтных условий создан в ходе выполнения проекта Федеральной целевой программы РФ “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”. В настоящей статье рассмотрены конструкция этого источника и результаты его испытаний в грунтах и крепких породах.

СКВАЖИННЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Внешний вид скважинного вибрационного источника и функциональная схема технических средств сейсмического воздействия на призабойную зону породного массива приведены соответственно на рис. 1, 2.



Рис. 1. Внешний вид скважинного вибрационного источника: 1 — дебалансный генератор упругих колебаний с пневматическим приводом; 2 — прижимное электромеханическое устройство

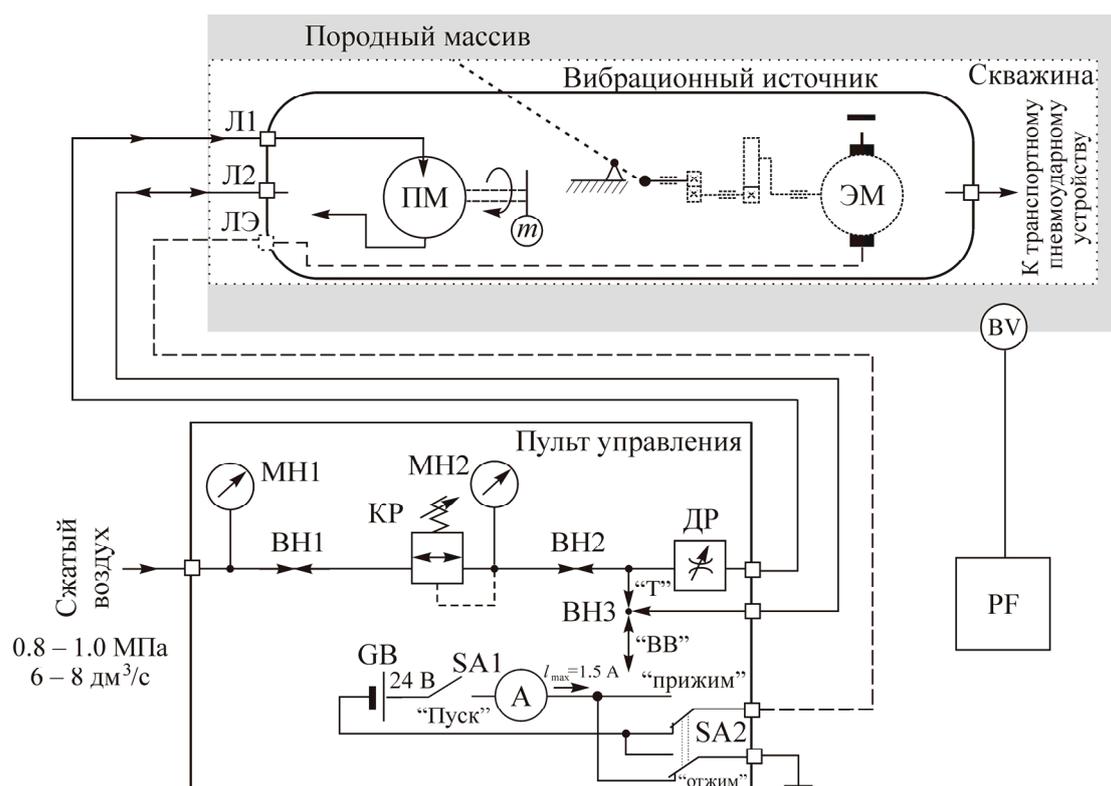


Рис. 2. Функциональная схема технических средств сейсмического воздействия на призабойную зону породного массива: МН1, МН2 — манометры; ВН1 – ВН3 — вентили; КР — клапан; ДР — дроссель; GB — электрическая батарея; SA1, SA2 — переключатели; ПМ — пневматический мотор; m — дебаланс; ЭМ — электродвигатель; А — амперметр; PF — частотомер; BV — геофон

Вибрационный источник состоит из дебалансного генератора упругих колебаний 1 с пневматическим приводом и прижимного электромеханического устройства 2 (см. рис. 1). В конструкцию источника заложена возможность его совместной работы с пневмоударным устройством

вом, предназначенным для транспортирования оборудования в скважине [5]. В состав технических средств также входят пульт управления, шланги подачи воздуха Л1 и Л2, электрический кабель-трос ЛЭ, частотомер РF, геофон ВV (см. рис. 2), устанавливаемый около устья скважины. Геофон используется для контроля работы источника.

В транспортном положении вентиль ВНЗ установлен в положение “Т” и сжатый воздух подается в вибрационный источник одновременно по шлангам Л1 и Л2 (рис. 2). При этом давления на входе и выходе мотора ПМ равны и пневматический привод дебалансного генератора бездействует. Воздух из корпуса вибрационного источника поступает в пневмоударное устройство, которое перемещает оборудование вглубь скважины [5].

В режиме сейсмического воздействия вентиль ВНЗ включен в положение “ВВ” и сжатый воздух по шлангу Л1 поступает на вход ПМ, а по шлангу Л2 сбрасывается из корпуса источника в атмосферу. Частоту вибрации контролируют по показаниям частотомера РF, на вход которого подаются сигналы геофона ВV, регистрирующего скорость смещения породного массива. Управление частотой осуществляется за счет регулирования давления и подачи воздуха соответственно клапаном КР и дросселем ДР (рис. 2).

Пневматический привод. Тип и мощность пневматического привода дебалансного генератора выбраны нами исходя из интенсивности сейсмического воздействия в 0.01 Вт/м^2 . Если радиус зоны вибрационного воздействия ограничить 10 м, то мощность сейсмического излучения должна составлять не менее 12 Вт. Известно, что в горных породах коэффициент полезного действия (КПД) сейсмических излучателей не превышает 5–10 % [6]. Для получения требуемого потока сейсмической энергии полезная мощность привода должна быть 120–240 Вт, не ниже. Такую мощность в ограниченных габаритах скважины обеспечивает объемный пневматический привод на основе ротационных пластинчатых моторов с полиамидными пластинами, антифрикционным наполнителем и никелевым покрытием рабочей поверхности статора, КПД которых 40–50 %. [7]. Он долговечен и надежен, способен переносить длительные перегрузки без нагрева. В вибрационном источнике установлен мотор РНР (Ober, Италия) со следующими параметрами: выходная мощность до 570 Вт, максимальная частота вращения без нагрузки 316 об/с, максимальная частота вращения при мощности 570 Вт 183 об/с, подача газа (входной расход) при нормальных условиях и давлении 0.62 МПа до 13.8 л/с, момент на валу 0.8 Н·м, масса 1.1 кг, диаметр 50 мм.

Расчет диаметра проходного сечения d воздушного шланга, обеспечивающего требуемые давление и подачу воздуха в пневмомотор, выполнен по формуле Веймаута для простого газопровода [8]:

$$d = \left[\frac{aV^2 \rho_a^2 z R_a T L}{P_1^2 - P_2^2} \right]^{3/16}, \quad (1)$$

где V — объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$; T — его температура, К; ρ_a — плотность при нормальных условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$; P_1, P_2 — давление на входе и выходе воздушного шланга соответственно, Па; $z = 0.93$ — коэффициент сжимаемости; $a = 0.01525 \text{ м}^{1/3}$; $R_a = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ — газовая постоянная воздуха. Для достижения предельных эксплуатационных характеристик мотора РНР при длине шлангов 50–150 м их диаметр в соответствии с (1) должен быть не менее 11–13 мм. В экспериментальном образце оборудования применены шланги длиной 50 м с проходным сечением 15 мм.

Дебалансный генератор. Амплитуда вибротяговой силы F генератора колебаний зависит от вращения дебаланса:

$$F = mr(2\pi f)^2, \quad (2)$$

где m — масса дебаланса, m ; r — его эксцентриситет, m ; f — частота вращения дебаланса (частота сейсмических колебаний), Гц. Для получения приемлемой амплитудно-частотной характеристики вибротяговой силы в диапазоне частот 100–300 Гц необходимо регулировать кинетический момент дебалансного вибратора mr . Из-за ограничения нагрузки на подшипниковые узлы и стенки необсаженной скважины максимальное значение вибротяговой силы в разработанном источнике ограничено 15 кН. Если кинетический момент дебалансного генератора не регулировать, то при снижении частоты колебаний с 300 до 100 Гц амплитуда вибротяговой силы в соответствии с (2) уменьшается в 9 раз. Это ведет к падению интенсивности воздействия ниже допустимого предела и существенному сужению эффективного частотного диапазона работы источника. Для решения этой проблемы генератор колебаний выполнен по схеме двух дебалансов. Один из них массой m_1 имеет постоянный эксцентриситет r_1 , а эксцентриситет другого массой $m_2 < m_1$ может меняться в диапазоне от r_2 до r_3 (рис. 3). Смещение дебаланса вдоль радиуса скважины происходит под действием инерционной силы пошагово на частотах f_i , когда эта сила превышает силу сцепления $F_r(f_i)$ дебаланса m_2 с осью, на которой он закреплен.

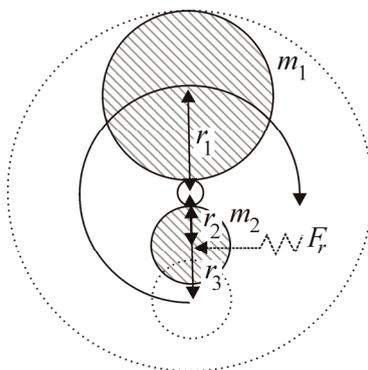


Рис. 3. Схема генератора колебаний вибрационного скважинного источника: m_1 — основной дебаланс; m_2 — вспомогательный

Прижимное устройство. Обязательным элементом вибрационного источника является прижимное устройство, обеспечивающее его контакт со стенкой скважины и передачу сейсмических колебаний в породный массив. Такое устройство должно перекрывать номинальное значение диаметра скважины не менее чем в 2 раза. Это связано с тем, что диаметр необсаженных скважин, особенно в угольных пластах, сильно отклоняется от планового значения. По данным работы [9], фактический диаметр горизонтальных дегазационных скважин, пробуренных на диаметр 98 мм, составляет от 84 до 180 мм и сильно меняется вдоль скважины, особенно вблизи ее устья на удалении до 10–20 м от него. Поэтому якорные системы, обладающие малым запасом по диаметру скважин, например клиновые механизмы, неприменимы. В разработанном источнике установлено рычажное прижимное устройство, аналогичное тем, что используются в сейсмических приборах, предназначенных для вертикального сейсмического профилирования скважин. Устройство содержит реверсивный электродвигатель постоянного тока ЭМ (рис. 2), вращение которого через многоступенчатый понижающий планетарный редуктор и винтовую пару преобразуется в движение рычага, который выдвигается и прижимает вибрационный источник к стенке скважины. Напряжение питания прижимного устройства составляет 24 В, ток потребления — не более 1.5 А. Оно работоспособно в скважинах диаметром до 240 мм. Контроль силы прижима осуществляется по показаниям амперметра из состава пульта управления (см. рис. 2).

Основные характеристики разработанных технических средств сейсмического воздействия:

- работа в необсаженных скважинах диаметром 89–122 мм и углом наклона от –90 до +90 град;
- максимальный диаметр скважин 240 мм;
- амплитуда вибротяговой силы до 15 кН;
- максимальная частота воздействия в монолитных крепких породах не менее 150 Гц;
- давление воздуха до 0.8 МПа;
- подача воздуха до 13.8 л/с;
- длина вибротрягивающего модуля 1430 мм;
- масса 16 кг.

ИСПЫТАНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ИСТОЧНИКА

Испытания проведены в глинистом грунте и монолитных горных породах. В первом случае источник был установлен на глубине 3 м в вертикальной обсаженной скважине диаметром 180 мм. Скважина пробурена в приповерхностном слое рыхлого суглинка плотностью (ρ) 1300 кг/м³, мощностью 5–6 м, залегающего на плотных влажных суглинках плотностью 1550 кг/м³ и мощностью несколько десятков метров. В ходе экспериментов установлено, что скорость продольных сейсмических волн (V_p) в приповерхностном слое составляет 300 м/с, в подстилающих породах — 1350 м/с. Регистрацию сейсмических колебаний осуществляли геофонами GS20-DX (ООО “ОЙО-Гео лимитед”, г. Октябрьский), размещенными вдоль линейного профиля длиной 145 м с шагом 5 м. Запись сигналов выполняли аппаратурой РОСА-А (СНИИГиМС, г. Новосибирск). Давление воздуха в пневматическом приводе источника меняли от 0.4 до 0.7 МПа. Получено, что частота первой гармоники сейсмических колебаний грунта зависит от давления воздуха в пневматическом приводе и составляет 35–36 Гц при 0.7 МПа, 30–31 Гц при 0.6 МПа и 24–26 Гц при давлении воздуха 0.4–0.5 МПа. Мощности привода не хватает, чтобы в условиях эксперимента довести вращение дебалансов генератора до частоты более чем 36 об/с. Основная причина — высокая реактивная нагрузка вибрационного источника в такой среде [7].

На рис. 4 представлены спектры потока сейсмической энергии в нескольких пунктах наблюдений при давлении воздуха в пневматическом приводе источника 0.7 МПа. Поток энергии (интенсивность сейсмического воздействия) оценивали по формуле $\Phi = \frac{\rho V_p (X'_0)^2}{2}$, где X'_0 — амплитуда скорости смещения горных пород в вибрационном поле. Значение X'_0 рассчитывали по выходным сигналам геофонов с помощью методики, приведенной в [10].

Согласно рис. 4, интенсивность сейсмического воздействия быстро падает с удалением от источника. Поток сейсмической энергии на основном тоне колебаний при увеличении расстояния от 1 до 5 м уменьшается на два порядка (рис. 4а, б). Мощность высших гармоник колебаний снижается еще сильнее, и на расстоянии в 20–30 м и более они ничтожно малы (рис. 4в, г). Обогащение спектра высшими гармониками, наблюдаемое вблизи источника, может быть связано с конструкцией прижимного устройства источника, которое в скважине большого диаметра (180 мм в эксперименте) не исключает колебаний вибратора вдоль ее окружности. С одной стороны, это плохо, поскольку увеличивает реактивную нагрузку источника и снижает частоту вращения дебаланса, а с другой — хорошо, так как ведет к интенсивному излучению высших гармоник (рис. 4а), появление которых в спектре колебаний горных пород расширяет диапазон многочастотного сейсмического воздействия на призабойную зону породного массива до 110–180 Гц (рис. 4а, б). Суммарный поток сейсмической энергии в грунте на частотах до 250 Гц на удалении

1 м от источника равен 8.8 Вт/м^2 , на 5 м — 0.033 Вт/м^2 , на 30 м — 0.46 мВт/м^2 . Радиус вибрационного воздействия интенсивностью более 0.01 Вт/м^2 составил около 7 м. Если учитывать только основной тон колебаний частотой 35–36 Гц, то радиус воздействия источника в грунте не превышает 3–4 м.

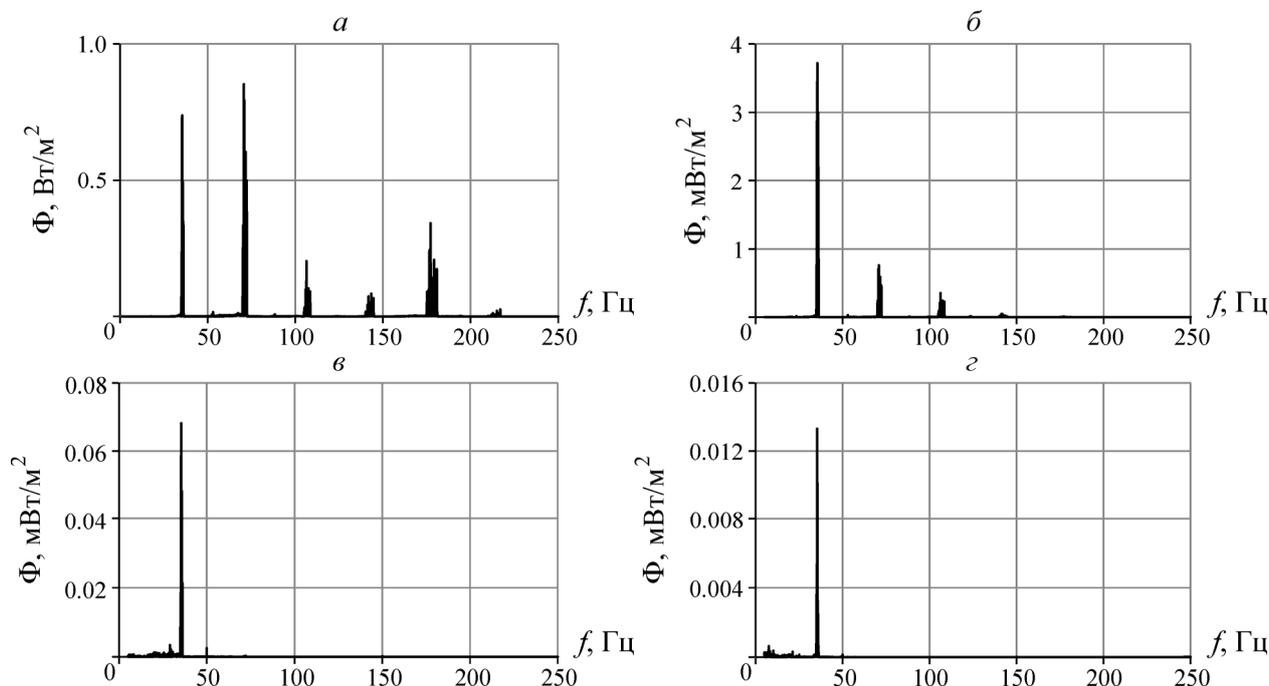


Рис. 4. Спектры потока сейсмической энергии (интенсивности сейсмического воздействия) при давлении воздуха в пневмоприводе 0.7 МПа на различных расстояниях r от источника: a — 1 м; $б$ — 5; $в$ — 30; $г$ — 65 м

Испытания источника в монолитных горных породах проводились в горизонтальных необсаженных скважинах диаметром 105 мм, пробуренных в борту карьера. Давление на входе пневматического привода источника в экспериментах изменяли от 0.6 до 0.8 МПа. На рис. 5 приведены выходной сигнал геофона и амплитудный спектр колебаний призабойной зоны породного массива на удалении 0.5 м от источника при давлении воздуха в его приводе 0.8 МПа.

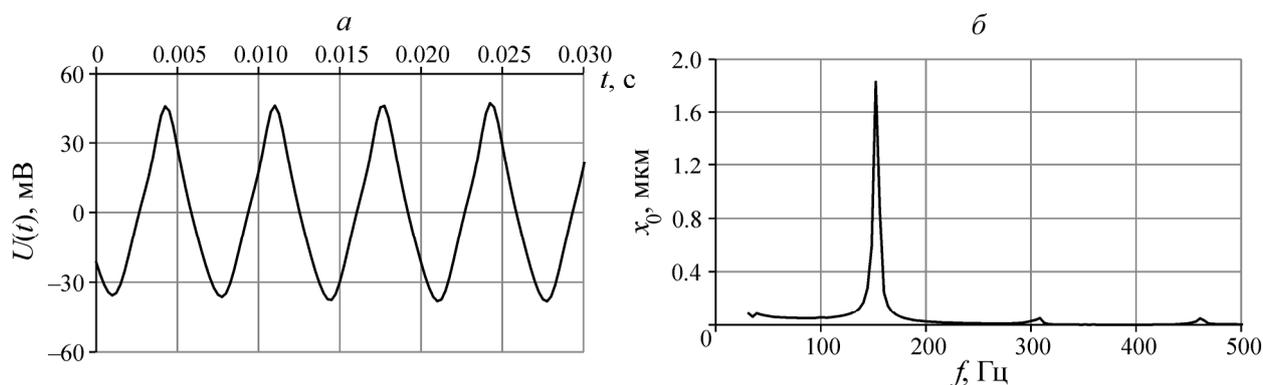


Рис. 5. Выходной сигнал геофона (a) и амплитудный спектр ($б$) смещения призабойной зоны массива в сейсмическом поле ($r=0.5$ м)

Сигнал близок по форме к синусоиде (рис. 5а). Амплитуды второй и третьей гармоник сейсмических колебаний не превышают 3 % от амплитуды основного тона частотой 152–156

Гц (рис. 5б). Поток сейсмической энергии в этой полосе частот в пункте наблюдений составил 19.2 Вт/м^2 , радиус воздействия интенсивностью более 0.01 Вт/м оценен в 12 м.

Были проведены также испытания работы источника в виброударном режиме при ослабленном прижиме к стенкам скважины (рис. 6).

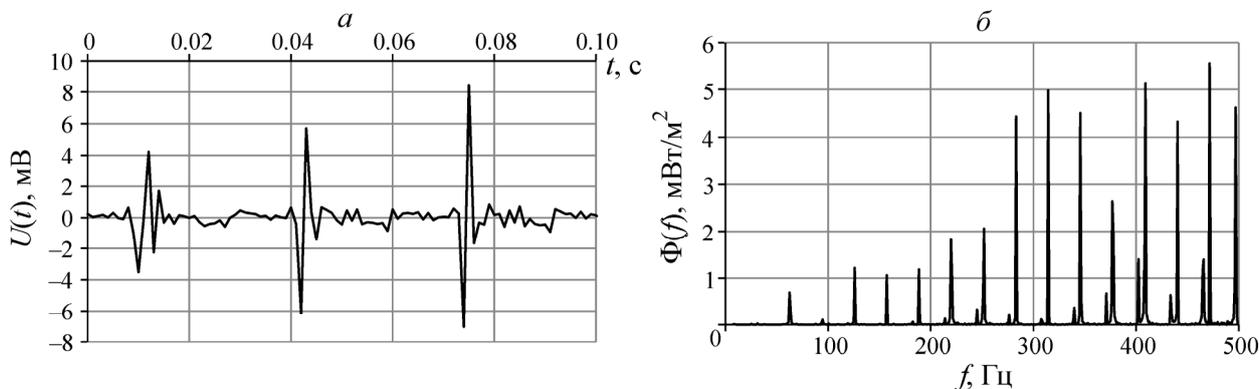


Рис. 6. Выходной сигнал геофона (а) и амплитудный спектр (б) смещения призабойной зоны породного массива вблизи источника ($r = 1 \text{ м}$) при его работе в виброударном режиме

По форме сейсмический сигнал представляет собой в виброударном режиме последовательность импульсов с частотой следования около 40 Гц (рис. 6а). Спектр колебаний содержит большое количество гармоник в полосе частот до 500 Гц, в том числе 15 гармоник с интенсивностью воздействия более 1 мВт/м^2 (рис. 6б). Суммарный поток сейсмической энергии в полосе частот 0–500 Гц составляет на удалении 1 м от источника 67 мВт/м^2 , что в 50–70 раз меньше, чем при работе источника в гармоническом режиме (рис. 5б). Несмотря на низкую эффективность виброударного режима, он может применяться для обработки малого объема породного массива на удалении 1.5–2 м от источника в случаях, когда требуется повысить частоту сейсмического воздействия до 300–500 Гц. Для определения оптимального частотного диапазона вибрационной обработки планируется в дальнейшем исследовать ее влияние на проницаемость горных пород в ближней зоне излучения разработанного источника.

ВЫВОДЫ

Разработанный вибрационный источник с пневматическим приводом, электромеханическом прижимным устройством и дебалансным генератором с автоматическим регулированием кинетического момента позволили проводить сейсмическое воздействие в необсаженных скважинах диаметром до 240 мм с амплитудой вибротяговой силы до 15 кН.

Источник обеспечивает выполнение сейсмического воздействия на призабойную зону массива монолитных горных пород в гармоническом режиме на частотах до 150–160 Гц с интенсивностью свыше 0.01 Вт/м^2 на удалении от источника до 12 м.

В виброударном режиме поток генерируемой источником сейсмической энергии в 50–70 раз меньше, чем при его работе в гармоническом режиме. Виброударный режим создает сейсмическое воздействие с суммарной интенсивностью более 0.01 Вт/м^2 в полосе частот 300–500 Гц на удалении до 1.5–2 м от источника.

В рыхлых грунтах разработанный источник излучает сейсмический сигнал, спектр которого обогащен интенсивными высшими гармониками, за счет которых диапазон многочастотной обработки призабойной зоны породного массива на удалении 3–4 м расширен до 110–180 Гц. Радиус воздействия на грунт вибрационными колебаниями основного тона частотой 30–40 Гц и интенсивностью более 0.01 Вт/м^2 составляет 7 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Westermarck R., Brett J. F.** Enhanced oil recovery with downhole vibration stimulation in Osage County. Final Report DOE Contract Number DE-FG26-00BC1519, Oklahoma: Oil & Gas Consultants International, Inc., 2003. — 181 p.
2. **Курленя М. В., Сердюков С. В.** Определение области вибросейсмического воздействия на месторождение нефти с дневной поверхности // ФТПРПИ. — 1999. — № 4. — С. 4–11.
3. **Сказка В. В., Сердюков С. В., Курленя М. В.** Анализ ближней зоны излучения скважинного дебалансного вибросейсмического источника // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 33–40.
4. **Сказка В. В., Сердюков С. В., Ерохин Г. Н., Сердюков А. С.** Анализ ближней зоны излучения сейсмического источника действующего вдоль оси скважины // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 70–78.
5. **Тимонин В. В., Кондратенко А. С.** Система транспортирования технологического и измерительного оборудования в необсаженных скважинах // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 187–193.
6. **Чичинин И. С.** Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984. — 224 с.
7. **Борзов В. М., Ивлев В. И.** Повышение эксплуатационных характеристик пластинчатого пневмомотора за счет использования конструкционных материалов с улучшенными свойствами // Вестник науч.-техн. развития. — 2009. — № 9(25). — С. 2–6.
8. **Чухарева Н. В.** Расчет простых и сложных газопроводов. — Томск: Изд-во ТПУ, 2010. — 13 с.
9. **Mills K., Jeffrey R., Black D. et al.** Developing methods for placing sand-propped hydraulic fractures for gas drainage in the bulli seam, In: Underground Coal Operators' Conference, July 7–8, 2006, Wollongong, Australia, 2006. — P. 190–199.
10. **Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В.** Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 3–11.

Поступила в редакцию 5/VIII 2016