

Точность вибрационного излучения.

Новые возможности контроля

- Циммерман В.В., НТЦ, ПАО "ГЕОТЕК Сейсморазведка", г. Тюмень
- Закариев Ю.Ш., ЗАО НПЦ "ГеоСейсКонтроль", г. Москва
- Зозуля А.П., НТЦ, ПАО "ГЕОТЕК Сейсморазведка", г. Тюмень

Учет нагрузочных характеристик грунта при контроле качества работы вибрационных источников позволяет выявлять дополнительные факторы, влияющие на точность излучения. Приводится обоснование, разработанный инструмент, опыт его использования и полученные результаты. Акцентируется внимание на одном из них, выявившем принципиальный недостаток конструкции современных вибраторов.

Введение

Корреляционный метод вибрационной сейсморазведки требует строгого соответствия излучаемой сейсмической волны исходному (опорному) свип-сигналу. Отклонения и посторонние составляющие в ней ухудшают как разрешающую способность, так и глубинность исследования. Задача реализации точного излучения оказалась непростой и сохраняет свою актуальность по сей день.

Точность излучения в историческом аспекте

Вибрационный метод сейсморазведки ("Вибросейс") был задуман как гибкий, управляемый инструмент и его разработчики изначально имели чёткие представления о том, какими параметрами излучаемой волны следует управлять, для чего это делать и как. В классическом понимании процесс управления состоит в определении текущего значения управляемой характеристики, определении величины отклонения её от заданного значения и внесение необходимой корректирующей поправки в управляющий сигнал. Техническая реализация не вызвала принципиальных проблем. Кроме одной: не ясно было, как получить текущие значения и откуда их взять, если процесс волнообразования пространственно протяжённый и происходит

глубоко под землёй? Не бурить же каждый раз глубокую измерительную скважину на очередной точке излучения?

Эта принципиально неразрешимая задача заставила несколько поступиться исходным принципом, и вместо недоступной излучаемой волны вынужденно ограничиться управлением вполне доступного и послушного излучающего механизма.

По ходу пришлось решить ещё одну принципиальную задачу – определиться с тем, каким образом контролировать излучающий механизм, а именно, какой из его выходных сигналов считать наиболее соответствующим излучаемой сейсмической волне. Выбирать предстояло из двух вариантов: очевидно напрашивающейся виброскорости излучающей плиты (считай – движения поверхности сейсмической среды в точке излучения) или же теоретически обоснованное вибрационное усилие, воздействующее на её поверхность. Ко всеобщему удовлетворению победил научный подход и было рекомендовано контролировать вибрационное усилие, сигнал более удобный для измерения и обработки.

Выработанный в то время набор параметров контроля работы вибратора (усилие, фаза, искажения) и их критерии, сохранились до настоящего времени практически в неизменном виде. С тем лишь отличием, что точность их обеспе-

чения достигла заоблачных высот благодаря успехам электроники.

Важно отметить, что уже на этом начальном этапе представилась возможность оценить последствия замены прямого измерения характеристик излучаемой волны косвенной оценкой их через работу вибратора. Проведённые прямые эксперименты показали, что ни один из сигналов вибратора: ни виброскорость, ни вибрационное усилие - не имели точного совпадения с излучаемой волной. Различия были существенны и не предсказуемы. В частности, фазовые смещения могли плавать в пределах до ± 90 градусов. Этому обстоятельству первоначально не придали особого значения (ведь иного варианта всё равно нет), а впоследствии и не вспоминали о нём вовсе (работает – ну и хорошо). Мы же сделаем акцент на этом обстоятельстве, поскольку для нас оно является ключевым:

В процессе вибрационного излучения мы контролируем не саму излучаемую волну, а лишь работу излучающего механизма. Формирование сейсмической волны происходит где-то дальше и этот процесс нам не понятен и неподконтролен.

Но почему же "процесс не понятен", если к тому времени уже существовала довольно развитая теория излучения с поверхности упругого полупространства, которая могла учитывать даже слоистость её структуры? К сожалению, эта теория оказалась слишком далёкой от действительности и не прошла проверку практикой. В этом пришлось убедиться при попытке адаптировать к ней динамику электрогидравлического вибратора в рамках задачи поиска оптимальной его конструкции для сейсмического применения.

Теоретические выводы упорно не подтверждались практикой. Работы не дали положительных результатов, но дополнили представление о вибрационном излучении новым пониманием. Оказалось, что вибратор ощущает под собой не сейсмическую среду со всеми её отражающими горизонтами, а нечто другое, некую переходную зону, которая вместе с вибратором участвует в образовании сейсмической волны [2]. Иными словами, попытка точного описания процесса вибрационного излучения не удалась, а задача предстала в ещё более сложном виде.

А дальше – больше. Выяснилось, что и переходная зона не является главным фигурантом в этом процессе, поскольку было замечено, что ощущаемая вибратором нагрузка радикальным образом изменяется даже при перемещении его на незначительные расстояния, сопоставимые с размером излучающей плиты. То есть вибратор взаимодействует вовсе не с переходной зоной, размеры которой исчисляются длинами волн, а с грунтом, находящимся непосредственно под ним. И ощущает он нагрузку, не имеющую к сейсмике вовсе никакого отношения. Кроме того, выяснилось, что и конструкция излучающей плиты тоже вносит свой вклад в величину ощущаемой вибратором нагрузки в тех случаях, когда ей приходится взаимодействовать с неровной поверхностью [4]. То есть в рассмотрение потребовалось включить ещё и фактор рельефа поверхности. Но и это ещё не всё...

В общем оказалось, что на процесс вибрационного излучения влияет гораздо больше факторов, чем изначально предполагалось. А взаимосвязь между излучателем и создаваемой им сейсмической волной стала ещё неопределённой и недоступной.

Гипотеза

Представим зону формирования сейсмической волны, точнее всё то, что расположено от излучающей плиты вибратора до полного формирования сейсмической волны, со всеми многочисленными её факторам, как некий "чёрный ящик" с комплексной передаточной функцией $W(p)$. К входу его приложено вибрационное усилие от вибратора $GF(p)$, а на выходе – сформировавшаяся сейсмическая волна $V(p)$:

$$V(p) = GF(p) * W(p)$$

Вход этого "чёрного ящика" будет характеризоваться неким входным импедансом $Z(p)$, описывающим величину нагрузки, которую будет создавать этот "чёрный ящик" для вибратора. Вибратор, кстати, в состоянии собственными средствами измерять величину этой нагрузки. Очевидно, что и передаточная функция $W(p)$, и импеданс $Z(p)$ как-то связаны между собой через общие параметры "чёрного ящика". Мы не знаем, как точно. И мы не будем ставить перед собой задачу выяснить эту взаимосвязь. Ограничимся лишь понимаем того, что они взаимосвязаны. Это даёт нам основание полагать, что изменение входного импеданса $Z(p)$ является признаком каких-то изменений, происходящих в "чёрном ящике", что неизбежно должно отразиться и на его передаточной функции $W(p)$ и, соответственно, на изменении характеристик излучаемой волны $V(p)$.

Ранее, оценивая качество излучения только по характеристикам создаваемого вибрационного усилия, игнорируя при этом величину нагрузки, которую ощущает под собой вибратор, мы упускали из виду многочисленные искажающие факторы. Контролируя поведение

нагрузки, мы можем выявлять их. На некоторые из них мы в состоянии повлиять, ради повышения точности излучения. Ну а с остальными, независимыми и неподвластными нам факторами, по-прежнему придётся мириться.

Новый инструмент

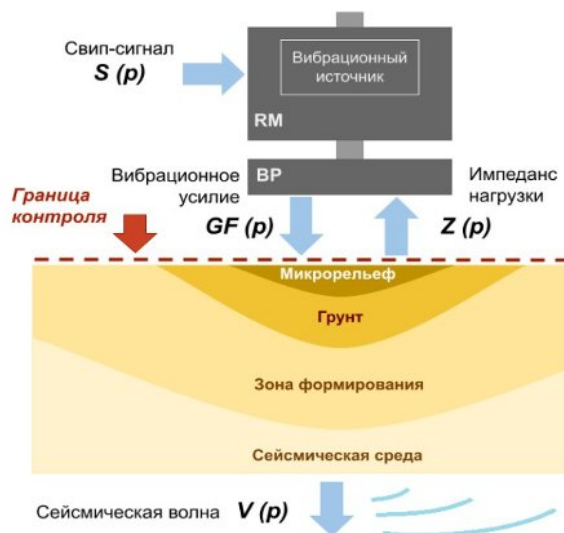
Так в чём же проблема? Характеристики ощущаемой вибратором нагрузки легко вычисляются его электроникой и давно уже входят в состав отчёта вибратора о произведённом излучении наряду с традиционными оценками. Но вот как их использовать – никто не поясняет. Да и много ли информации можно получить от пары цифр?

Поэтому был найден другой, более эффективный инструмент оценки нагрузки – графический. Простой, наглядный и очень информативный. Это график фазового сдвига между сигналами ускорений реактивной массы [RM] и излучающей плиты вибратора [BP].

Для всей полосы частот график умещается в диапазон от 0 до минус 180 градусов и показан на Рис. 1.

Разумеется, график даёт косвенную оценку, но она отлично справляется со

▼ Рис. 1. Вибрационное излучение.



своей задачей. Критерии интерпретации графика:

- Большая величина фазы – слабая нагрузка, малая величина фазы – большая нагрузка.

Действительно, предельное значение -180 градусов может быть достигнуто лишь в том случае, если вибратор вообще не взаимодействует с нагрузкой. Тогда реактивная масса и излучающая плита вибратора колеблются в противофазе друг с другом.

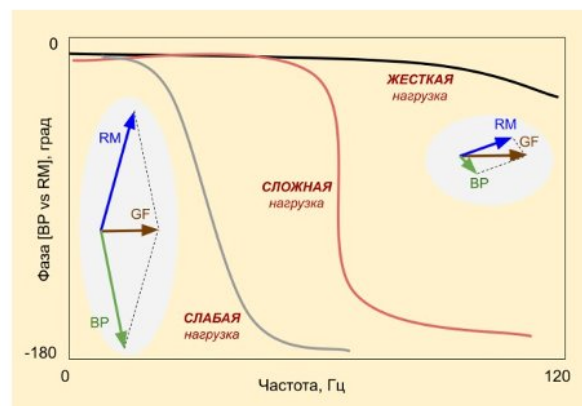
С другой стороны, при работе на плотном, жёстком основании фазовый сдвиг стремится к нулю. Как это не кажется странным, но это действительно так: при работе вибратора на плотном грунте реактивная масса и излучающая плита колеблются синфазно.

- Отклонение графика от классической (теоретической) формы свидетельствует о сложной нагрузке с наличием дополнительных искажающих факторов.

Таковыми искажающими факторами могут быть или неровность поверхности, или непрочный грунт, или посторонние предметы под плитой, или нестабильность контакта плиты с поверхностью грунта.

- Чем больше фазовый сдвиг – тем тяжелее работать вибратору.

Этот критерий становится понятным, если принять во внимание, что величина усилия воздействия на грунт [GF] определяется как векторная сумма усилий, приложенных реактивной массе [RM] и излучающей плите [BP], а величины усилий пропорциональны ускорениям этих элементов. При увеличении угла между слагаемыми векторами для сохранения той же величины суммы потребуется увеличивать их амплитуду. А одно из этих слагаемых – усилие [RM] – это ни что иное, как исходное усилие,



▲ Рис. 2. Косвенная характеристика нагрузочных свойств грунта: фазовый сдвиг между ускорениями RM и BP.

развиваемое вибрационным механизмом вибратора.

Практическое применение

Какие же новые возможности предоставляет нам этот инструмент в аспекте контроля точности излучения? Из опыта использования его при подготовке виброкомплексов к производственным работам, а также при супервайзерском их контроле (инструмент включён в программно-методический комплекс [6]), можно отметить следующее.

- Оценка условий работы на точке излучения.

Потребность в этом возникает, например, при диагностике причин плохого поведения вибратора. Ведь он может плохо работать как по причине своего технического состояния, так и по причине того, что, будучи вполне исправным, он просто попал в плохие условия работы. Одного взгляда на график достаточно, чтобы понять ситуацию.

- Оценка условий работы на профиле.

Собрав статистику по характеристикам нагрузки по всей площади можно дать оценку условиям работы на ней. В начале это может пригодиться при выборе параметров режима работы (например, величины мощности излучения, диапазона частот, количества накоплений), а

по окончании работ – для обоснования качества полученного материала. Вопросы возникают серьёзные, поэтому объективные оценки будут весьма полезны. Особенно для исполнителей работ.

- *Выбор контрольных точек для сверок.*

Текущий контроль за техническим состоянием вибраторов в ходе профильных работ осуществляется с помощью периодически проводимых проверок (сверок). Для большей достоверности их следует проводить на "хороших" точках, чтобы исключить ненужное в данном случае влияние неблагоприятных условий работы. График служит хорошим индикатором при поиске таких точек.

- *Оценка устойчивости грунта под действием вибрационной нагрузки.*

При работе на площадях со сложными поверхностными условиями, например, зимой или на сельхоз полях, практикуется проведение предварительного уплотнительного воздействия на каждой новой рабочей точке. Прямое наблюдение за поведением грунта под воздействием вибрации, позволит однозначно определить необходимость (или ненужность) предварительного уплотнения.

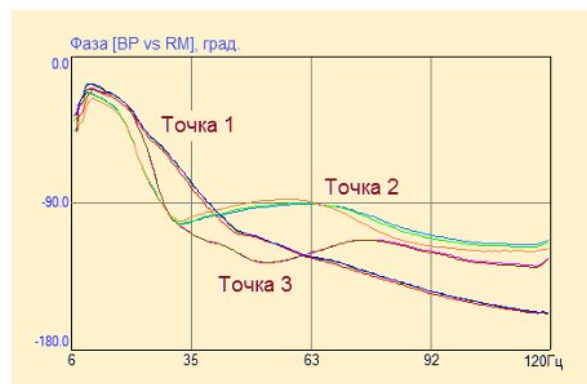
Аналогично и при выборе количества накоплений на одной рабочей точке. Характер поведения грунтов под действием вибрационной нагрузки и их вибрационная устойчивость могут быть различными. Тот же снег, например, при одних погодных условиях уплотняется, а при других, наоборот, рассыпается, вылетая из-под плиты, как песок. Наблюдение за поведением нагрузки покажет виброустойчивость грунта, поможет определиться с первоначальным режимом накопления, а также, в случае изменения ситуации, позволит своевременно скорректировать его.

Новые знания

Наблюдение за поведением нагрузочных свойств грунта расширило представление о процессе вибрационного излучения. Отметим здесь лишь два момента, наиболее интересных и имеющих практическое значение.

- *Величина и характер разброса нагрузочных свойств грунта по профилю.*

В основном, кроме особых ситуаций, изменение нагрузочных свойств связано с изменением условий контакта плиты с поверхностью грунта. Они могут изменяться радикальным образом даже при незначительном перемещении вибратора. Но, при работе на одной точке, они остаются стабильными, повторяя в деталях характерные особенности. Вот пример характеристик, полученных на трёх различных точках, с тремя излучениями на каждой точке:

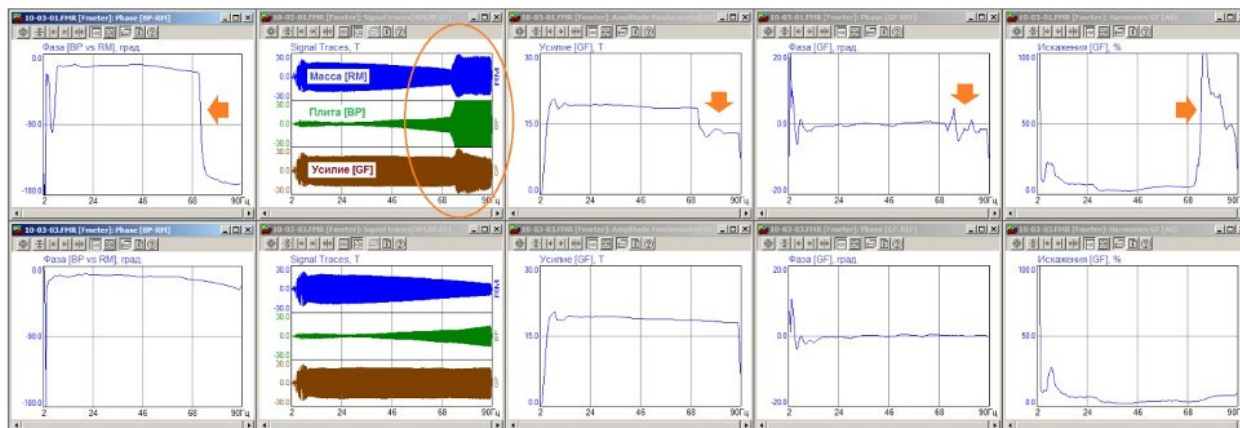


▲ Рис. 3. Характеристики нагрузки грунта на соседних точках.

Это обстоятельство следует учитывать при планировании различного рода сравнительных экспериментов. Переезд на новое место изменит условия работы, и сопоставление результатов станет некорректным.

- *Нестабильность контакта плиты с поверхностью грунта*

Это явление настолько же интересно, насколько и важно с практической точки зрения. Собственно, это наиболее яркий пример использования представляемого инструмента.



▲ Рис. 4. Проявление нарушения контакта плиты с поверхностью грунта. "Nomad 65 Neo" + "VE-464".

Заключается явление в том, что, начиная с 80 ± 20 Гц (в зависимости от условий работы), вибратор вдруг начинает "плохо" работать, иногда даже срываясь в неуправляемую вибрацию.

Как правило электронике удаётся удерживать ситуацию под контролем и единственными свидетелями происшествия остаются лишь повышенный уровень нелинейных искажений, слегка возросшая фазовая ошибка и, иногда, снижение усилия. Зачастую для штатной системы контроля качества излучения они остаются незамеченными.

Явление было замечено давно. Но оно не привлекало особого внимания и списывалось, как обычно, на сложные условия на профиле, на неисправности вибратора и даже на недостатки его конструкции. Всё это имело под собой некоторые основания, но это не объясня-

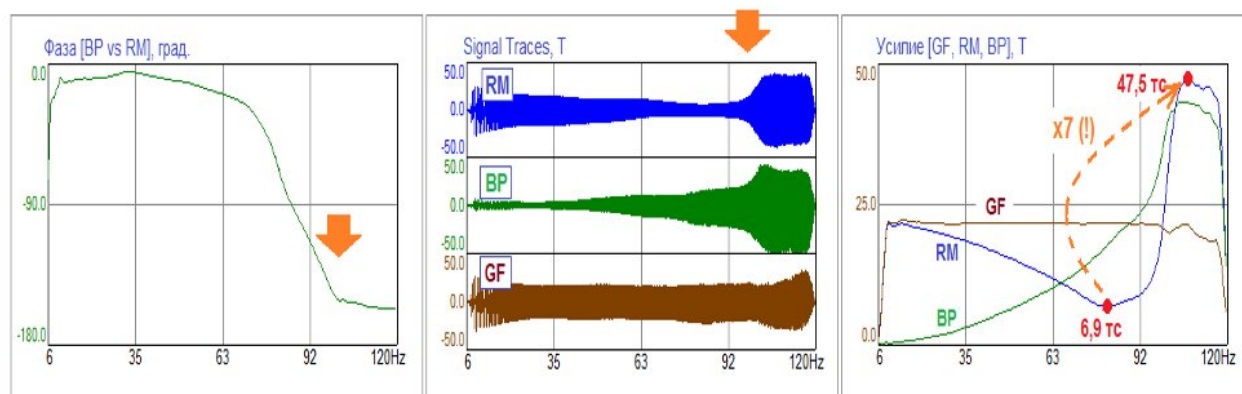
ло само явление. Со временем сбои стали замечать и у новых вибраторов, работающих, к тому же, в идеальных условиях.

Вот свежий и очень наглядный пример. Вибратор "Nomad 65 Neo" (выпуск – декабрь 2019), оснащенный электроникой VE-464 последней модификации. Работа на Севере. Условия работы идеальные – равнина, равномерно покрытая плотным снегом. На рис. 4 приведены характеристики излучения со сбоем и, для сравнения, нормального излучения.

Характеристика нагрузочных свойств грунта показывает, что в районе 70 Гц происходит лавинообразный процесс, приводящий к практически полному пропаданию нагрузки.

Трассы сигналов усилий показывают резкое увеличение мощности вибратора в момент срыва. При этом результирующее

▼ Рис. 5. Проявление нарушения контакта плиты с поверхностью грунта. "AHV-IV Commander PLS-364" + "GDS-II".



усилие воздействия на грунт принудительно снижается электроникой на 5-6 тонн из-за установленных в ней пороговых ограничений. Фазовая характеристика становится неравномерной, хотя и вписывается в традиционные допуски. А вот нелинейные искажения возрастают запредельно.

После нескольких воздействий на этой точке вибратор как ни в чём не бывало демонстрировал идеальную работу.

Другой пример. Вибратор "АНV-IV Commander PLS-364" (декабрь 2018), оснащенный электроникой "GDS-II". Работа на Севере в аналогичных условиях.

В отличие от предыдущего случая здесь были отключены ограничения в электронике. Поэтому вибратору, чтобы сохранить на выходе заданное ему усилие 22 тонны при резко упавшей нагрузке, позволено было работать на пределе своих возможностей, доведя при этом исходное усилие чуть ли не до 50 тонн.

Вызывает смущение то обстоятельство, что всё это происходит с новыми брендовыми вибраторами последних модификаций. И невольно возникает подозрение, что конструкторы не догадываются о происходящем, не замечают эту проблему. В то время, как ситуация только обостряется.

Для понимания механизма этого явления необходимо иметь в виду следующее:

- Чтобы излучающая плита не отрывалась от поверхности грунта в процессе излучения, она принудительно прижимается к нему статическим усилием, превышающим по величине амплитуду расчётного вибрационного усилия. Рельеф грунта и упругость конструкции плиты допускают частичную потерю контакта. Потеря контакта приводит к снижению величины нагрузки.

- В излучающей системе "вибратор – грунт" в районе 240Гц имеется высокочастотный резонанс, в образовании которого участвуют масса излучающей плиты и упругость грунта [3-5]. Этот резонанс

усиливает гармоники, частоты которых попадают на этот резонанс. При хорошо прижатой плите добротность резонанса низкая, при потере контакта – возрастает.

- Электроника вибратора имеет систему стабилизации выходного усилия (Force Control), которая заставляет вибратор работать мощнее, если по каким-то причинам вибрационное усилие начинает падать.

Последовательность развития событий после запуска вибратора такая:

1) Вибратор нормально запускается и работает. Частота свип-сигнала приближается к 80Гц, когда на высокочастотный резонанс попадает его третья гармоника. В силу нелинейной природы электрогидравлического вибратора она всегда присутствует в его выходном сигнале [3]. Если контакт с поверхностью плотный, то гармоника практически не усиливается и вибратор отрабатывает излучение без проблем. Если контакт неплотный, то гармоника возрастает, и форма сигнала искажается.

2) Искажение формы сигнала может отразиться на качестве контакта и спровоцировать частичную его потерю. Вибратор при этом почувствует снижение нагрузки и отреагирует на это увеличением мощности. Амплитуда колебаний возрастёт, что дополнительно ухудшит качество контакта и усугубит проблему.

3) Возникает лавинообразный процесс, в результате которого нагрузка вибратора снижается, а мощность вибратора возрастает. Возрастает до тех пор, пока не упрётся в ограничения.

4) Дальнейшее развитие ситуации будет зависеть от поведения грунта: излучение или вернётся в норму, или работа продолжится в условиях перегрузки, нестабильная, с высоким содержанием широкополосных шумов и искажений. Явный брак и помеха другим.

5) Ну и, если вернуться к началу статьи, с изменением нагрузки одновременно произойдут и изменения характеристик зоны формирования сейсмичес-

кой волны. То есть волна приобретёт дополнительные искажения даже в том случае, если электроника вибратора будет в состоянии удерживать в норме параметры вибрационного усилия и уложится во все допуски.

Есть предположение, что усугубление данной проблемы в зоне контакта связано с радикальным увеличением жёсткости плиты и использованием пластика для защиты её от налипания снега. Новые плиты, в отличие от старых, довольно слабых и покрытых толстой резиноканевой защитой, стали иметь более резкую границу контакта с поверхностью, без какого-либо промежуточного частичного отрыва. Поэтому срыв в неустойчивую работу стал резким, чётко выраженным. Однако всё это требует уточнения и экспериментальной проверки.

Выводы

1. Мониторинг ощущаемой вибратором нагрузки позволит выявлять дополнительные факторы, влияющие на точность излучения. Поэтому давайте контролировать нагрузку и каждый раз настораживаться, обнаружив странности в её поведении. Инструмент для этого и готов проверен.

2. Необходимо совершенствование конструкции вибраторов в направлении улучшения качества и надёжности контакта излучающей плиты с грунтом. Это особенно актуально для зимних работ.

Литература:

1. Циммерман В.В. Качество вибрационного излучения // Статья в журнале "Приборы и системы разведочной геофизики", 2004, №3, С. 19-21.

2. Юшин В.И. Мифы и парадоксы вибрационной сейсморазведки // Статья в журнале "Приборы и системы разведочной геофизики", 2007, №2, С. 5-8.

3. Циммерман В.В. Нелинейные свойства электрогидравлического вибрационного источника сейсмических сигналов // Статья в сборнике "Проблемы

нелинейной сейсмики" ИФЗ АН СССР – М.: Наука, 1987, С. 273-279.

4. Шагинян А.С., Циммерман В.В., Гинзбург В.С. Анализ динамики системы "Виброисточник – Среда" по уточнённой модели. Влияние упругости плиты // Статья в сборнике НПО "Сейсмотехника", 1983.

5. Шагинян А.С., Циммерман В.В., Гинзбург В.С. Нелинейные эффекты процесса возбуждения сейсмических волн электрогидравлическим вибратором // Нефтегазовая геология и геофизика, 1983, №12, С.14-16.

6. Закариев Ю.Ш., Казаков А.К., Циммерман В.В. Seismic Source Tester – инструмент супервайзера // Статья в журнале "Приборы и системы разведочной геофизики", 2007, №2, С. 46-48.

Подробнее об авторах



**Циммерман
Валерий Вильгельмович**
Главный специалист
НТЦ ПАО «ГЕОТЕК
Сейсморазведка», к. т. н.
Вибрационные источники
сейсмических сигналов.



**Закариев
Юсуп Шимагомедович**
Генеральный директор
ЗАО НПЦ
"ГеоСейсКонтроль"



**Зозуля
Андрей Петрович**
Главный специалист
НТЦ ПАО «ГЕОТЕК
Сейсморазведка».
Системы управления
невзрывными источниками
сейсмических сигналов.