

Проведение натуральных испытаний опытного образца водного электромагнитного импульсного невзрывного сейсмоисточника на полигоне

- Кузьмиченко Н. В., Антонец Г. В., Семёновых Р. В., ООО «СибТехИмпэкс», г. Красноярск
- Малюта С.И., Зиновьев С.Г., Сибирский Федеральный Университет, Институт нефти и газа, г. Красноярск

В статье рассматриваются количественные и качественные характеристики опытных образцов сейсмического невзрывного импульсного источника с электромагнитным приводом, в сравнении с опытным образцом, представлена конструкция и описание прототипа невзрывного импульсного источника. Проводится оценка потенциальных возможностей его применения при проведении морской геофизической разведки на нефть и газ при повышенных экологических требованиях. Описывается воздействие на водную среду невзрывными импульсными источниками и пневмоисточниками. Используются данные регистрации сигналов на сейсмозонд и гидрофон. Произведена оценка амплитуды излучаемого сигнала макета, полноразмерного опытного образца с эталонным источником. По измеренным ускорениям плиты и реактивной массы, акселерометром, рассчитаны развиваемые силы.

Введение

Индустриально развитые страны, имеющие значительные запасы углеводородов, демонстрируют темпы опережающего технологического развития в областях разведки, добычи, транспорта и переработки собственных запасов, обеспечивая дополнительный экспортный потенциал для национальной цепи поставок. На мировом рынке хорошо известны современные технологические решения норвежских, канадских, британских и американских компаний. Необходимость опережающего развития российских технологий для нефтяной промышленности актуальна уже в течение нескольких десятилетий [Караев и др., 2016].

Сейсмический метод был первым и остается основным геофизическим методом для картирования недр и определения возможных ловушек углеводородов [Ампилов, Владов, Токарев, 2019]. Для проведения сейсморазведки необходим источник упругих волн. Это могут быть взрывы, или другой вариант — невзрывной способ возбуждения коле-

баний. У последнего есть несколько преимуществ перед взрывным — он не требует длительной и дорогой подготовки, а также работ по ликвидации последствий применения, меньше воздействует на окружающую среду, более безопасен для человека. К тому же может неоднократно использоваться в одной и той же точке [Патин, 2017].

Один из способов повышения эффективности сейсморазведки — увеличение количества источников сигнала на единицу площади (конечно, в данном случае речь идет о невзрывных источниках). Правда, реально увеличить число источников можно только на открытом пространстве — в степи, пустыне или тундре. Большее количество точек возбуждения волн сильнее влияет на окружающую среду, что вызывает опасения экологов, особенно если речь идет о морской сейсморазведке [Семёнов и др., 2016].

Наиболее подходящим методом является способ импульсного воздействия на грунт, реализованный с использованием электромеханических, электродинамических, газодинамических

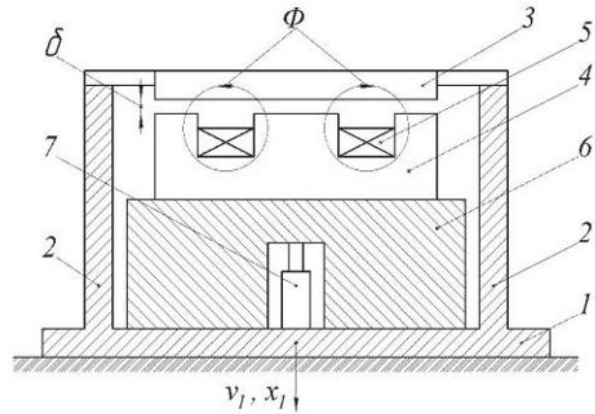
источников, основанный, например, на непосредственном ударе груза на опорную плиту, лежащую на грунте [Молоканов, 1979].

ВИМС обладает рядом базовых характеристик нового типа, определяющих его экологичность при воздействии на окружающую среду. Разработанный комплекс предназначен для повышения качества, рентабельности и энергоэффективности геологоразведки нефтегазовых месторождений в условиях транзитных зон и на морском шельфе [Ампилов, Терехина, Токарев, 2019] при целенаправленном снижении экологической нагрузки на экосистему водоемов при сейсмических работах более, чем в 10 раз в сравнении с существующими пневмоисточниками, создающими избыточное давление в водной среде до 150 атм. Так как в России на данный момент разработка месторождений на континентальном шельфе актуальна, необходим анализ подходов к освоению морского шельфа в транзитной зоне побережья, не доступной для морской сейсморазведки в данный момент [Goertz, Wuestefeld, 2018], [Ramsey, 2018].

Основной целью данного этапа работы, проведение первых натурных испытаний опытного образца водного поверхностного сейсмоисточника в сравнении с рабочим образцом водного электромагнита «серии Енисей» (далее именуемого Енисей ВЭМ-50/ВЭМ-50), на полигоне с регистрацией и сопоставлением рабочих параметров.

Принцип работы электромагнитного источника

Импульсные сейсмоисточники невзрывного типа различаются в основном способом формирования импульса энергии (газодинамические, пневмати-



▲ Рис. 1. Конструктивная схема сейсмоисточника с электромагнитным приводом

ческие и т.д.) [Шнеерсон, 1998]. Создание сейсмических волн является следствием преобразования этого импульса в механическое воздействие на нагрузку (грунт, водную среду), эффективность которого определяется, во многом, выбором конструкции.

Схема конструктивного решения короткоходовых электромагнитных источников соответствует рис. 1. Принцип работы устройства заключается в следующем. Жесткая плита-антенна 1 находится на нагрузке и снабжена стойками 2, на которых расположен якорь 3 электромагнита. Индуктор 4 электромагнита с обмоткой возбуждения 5 закреплен на массивном пригрузе 6, опирающемся на плиту 1. Магнитопровод якоря 3 отделен от индуктора 4 зазором δ.

Энергия механического воздействия А на грунт источником силы F(t):

$$A = \int_0^{t_F} F(t) v_1 dt \quad (1)$$

где F(t) - сила воздействия, v1 – скорость плиты, tF – длительность воздействия силы F(t).

При подаче в обмотку 5 импульса тока вокруг обмотки создается магнитный поток Φ проходящий по магнитопроводам 3 и 4 через зазор δ. При этом между якорем и индуктором создается сила:

$$F_{(t)} \approx \frac{B\delta^2 \cdot S}{2\mu_0} \quad (2)$$

где $B\delta$ – индукция поля в зазоре, S – площадь полюсов магнитопровода, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная воздуха.

Усилие от якоря через стойки передается на плиту, что приводит к созданию деформации нагрузки плитой и генерированию сейсмической волны. При этом якорь в течение времени действия силы $F(t)$, которое определяется временем выбора зазора δ перемещается вместе с излучающей плитой.

При выборе зазора δ между якорем 3 и перемещающимся вверх магнитопроводом индуктора 4 происходит механический удар, что сопровождается шумом и значительными механическими нагрузками. После удара пригруз 6 совместно с якорем 3 перемещаются вверх в поле силы тяжести на некоторую высоту, демпфер 7 обеспечивает уменьшение скорости его возврата в исходное положение.

В источниках невзрывного типа, грунт (водная среда) деформируется излучающей плитой 1 (массой m_1) при приложении к плите силы $F(t)$, создаваемой электромагнитом (рис. 1.) Пригруз 6 (массой m_2) выполняет роль инерционной опоры для источника силы $F(t)$. В результате действия силы $F(t)$ плита-излучатель 1 смещается в направлении грунта, что сопровождается созданием сейсмических волн, а пригруз 6 ускоряется вверх в течение длительности силы t_F , затем перемещается в поле силы тяжести и возвращается в исходное положение на плите.

При работе в воду на плиту воздействует гидродинамическая сила противодействия движению излучателя. Площадь прилегания S_i излучающей плиты 1 к

нагрузке и скорость деформации материала нагрузки определяет передаваемую механическую мощность и сейсмическую эффективность источника [Певчев, 2008].

$$F_{\partial\delta} = \rho \cdot S_{\Pi} \cdot v_1^2 \quad (3)$$

где $\rho = 1000$ кг/м³ – плотность воды, S_{Π} – площадь плиты.

Технические характеристики источника определенно зависят от соотношения масс m_1 и m_2 , и силы $F(t)$, величина и длительность которой обеспечивает деформацию грунта x_1 со скоростью v_1 и в течение определенного времени, которые зависят от геологических характеристик грунта.

$$m_1 + m_2 = \frac{1}{2} \frac{F(t) \cdot t_F}{v_1} \quad (4)$$

Скорость v_1 плиты излучателя зависит от её массы m_1 и реакции грунта на движение плиты и определяет значение силы $F(t)$, прикладываемой двигателем к плите. С целью ограничения доли энергии A , расходуемой на неупругую деформацию грунта под плитой, она не должна существенно, т.е. в несколько раз превышать скорость смещения $v_{см}$ частиц грунта при распространении по нему сейсмической волны.

Отмечается важное положение, что более прочным грунтам обычно соответствует большие значения ρ и v_p . Соответственно допустимые значения скорости смещения для $v_{СМmax}$ грунтов различной плотности обычно изменяются в значительно меньшей мере и составляют 0,7...1,5 м/с [Ивашин и др, 2013]. Следует отметить, что близкие к этим значения скорости излучающей плиты характерны для мощных импульсных электромагнитных источников типа “Енисей СЭМ”, “Енисей ВЭМ” и “Геотон” [Анкушев и др,

2004], [Детков, Зарипов, 2017] наиболее широко применяющихся в настоящее время.

Эти особенности мощных электромагнитных сейсмоисточников, а также простота конструктивного решения, высокий КПД преобразования потребляемой энергии в механическую энергию воздействия на грунт (водная среда) обусловили их широкое применение при проведении профильных сейсморазведочных работ.

Конструктивные особенности ВИМС СТИВ

Разработана и рассматривается следующая конструктивная схема, имеющая отличия и обладающая новизной в сравнении с известными схемами сейсмоисточников серии «Енисей-ВЭМ».

Конструкция ударного модуля опытного образца ВИМС СТИВ далее Модуль (рис. 2) представляет собой импульсную электромагнитную установку, преобразующую силовой импульс тягового электромагнита 1 в мощный механический импульс, передающийся через раму 4 и опорную плиту 3, погруженную в водную среду на уровне днища плавсредства. Возбуждая упругие колебания грунта дна водоема, которые улавливаются сей-

смодиетчиками и передаются для регистрации на сейсмостанцию, управляющую работой сейсмокомплекса.

Модуль состоит из двух частей – активной и инертной. Активная часть включает в себя конструктивную обвязку, находящуюся в жестком контакте с якорем электромагнита 1.1 в рабочем цикле.

Инертная часть 1.3 модуля (реактивная масса), являющаяся составной частью индуктора электромагнита 1.2, предназначена для организации требуемого режима работы ударного модуля

Для силовой развязки воздействия Модуля на несущее плавсредство и размещенного на нем оборудования вся конструкция Модуля установлена на четырех пружинных блоках 6, одновременно участвующих в формировании сейсмоимпульса. Каждая подвеска 6 для уменьшения и подавления распространения резонансной ударной волны в упругом элементе состоит из трех пружин различной жесткости расположенных коаксиально, т.е. одна внутри другой, за счет чего достигнута компактность конструкции.

При наличии ударных нагрузок на пружину усилие распространяется вдоль проволоки пружины. Концевой виток пружины, находящийся в контакте с

► Рис. 2. Ударный модуль ВИМС



приложенной нагрузкой, принимает на себя всю деформацию, а затем передает большую часть своей деформации в соседние витки. Эта волна сжатия распространяется по пружине неограниченно.

С другой точки зрения, ударное воздействие, приложенное к пружине при срабатывании магнита, инициирует деформацию пружины, в соответствии с функцией, которая может быть разложена в ряд Фурье, и которая также содержит гармоники, соответствующие резонансной частоте пружины [Бидерман, 1980], [Roy, 2020]. При колебаниях пружины восстанавливающая сила обусловлена ее упругостью.

Применение в конструкции опор с объединением трёх винтовых пружин, которые имеют различные резонансные частоты, увеличивает эффективность подавления резонансного распространения ударной волны в конструкции, улучшает согласование с водной средой и существенно снижает экологическую нагрузку на окружающее пространство.

Методика натурных испытаний опытного образца ВИМС на полигоне

Порядок проведения испытаний

Измерения проводились в сравнении как с водным электромагнитом серии «Енисей» (Енисей ВЭМ-50). Объект эксперимента на опытном бассейне Минусинского геофизического полигона представлен на рис. 3.

Основными измеряемыми параметрами ударного модуля ВИМС являлись: Напряжение заряда конденсаторов, ток разряда, длительность импульса, ускорение реактивной массы, величина зазора, давление в водной среде, пиковое усилие, фазовая идентичность.

Измерения производились с использованием телеметрической каротажной станции SGD-SLM в комплексе с системой



▲ Рис. 3. Ударный модуль ВИМС на геофизическом полигоне

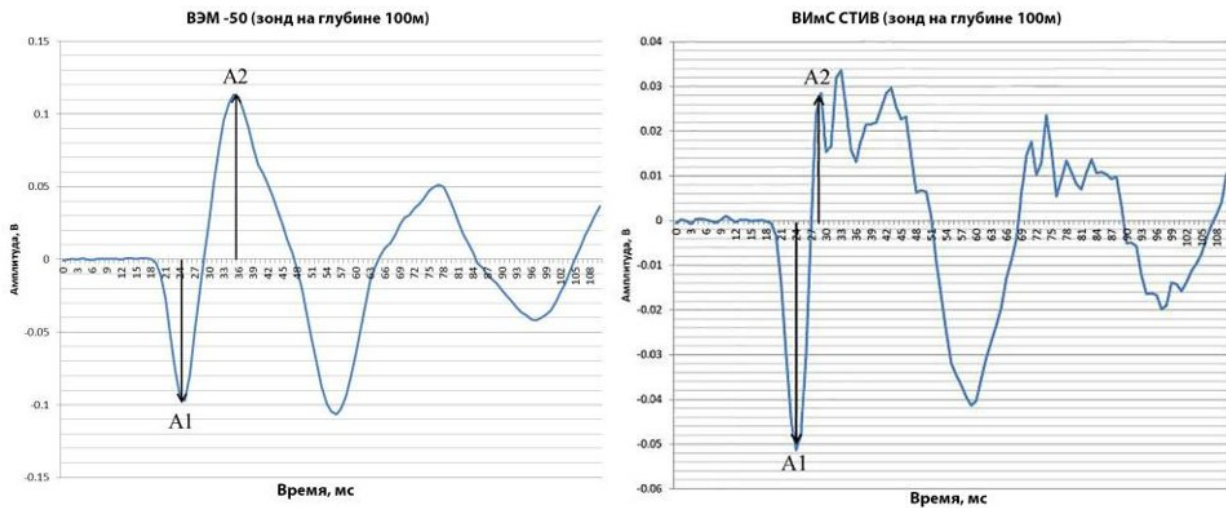
синхронизации SGD-SP. На глубину 100 метров был опущен сейсмозонд. Опытные образцы были помещены в испытательный бассейн. На дне бассейна (глубина 4 м) был установлен гидрофон. Запись сигнала гидрофона производилась на цифровой осциллограф.

Результаты работ

Перед началом эксперимента на зонд был зарегистрирован сигнал от эталонных источников ВЭМ-50 (рис. 4) с пиковой силой воздействия 40 тонн-сил.

Амплитуда сейсмического сигнала измерялась по сумме двух первых пиков A1 и A2. Далее была произведена серия из 10 воздействий образцами ВИМС СТИВ. На рисунках представлены усреднённые значения сигналов. Усреднение производилось с целью подавления некогерентных помех.

Из рисунков видно различие в амплитуде и форме сигнала. У макета ВИМС первый максимум положителен, это связано с дипольным принципом действия источника, который заключается в первоначальном выборе зазора с дальнейшим воздействием на среду. Образец ВИМС СТИВ производит воздействие сразу, поэтому первый максимум отрицателен, как и у всех серийных источников «Енисей». Второй, положительный, максимум у ВИМС СТИВ был



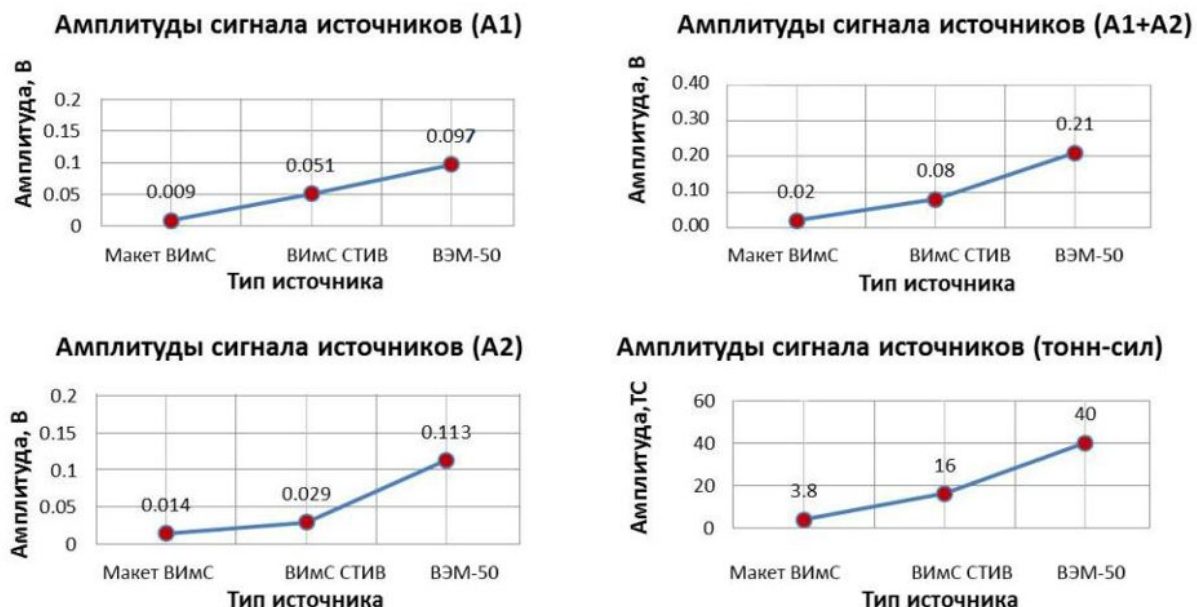
▲ Рис. 4. Сигналы, зарегистрированные на зонд.

выбран из следующего предположения. Поскольку пружинная подвеска Модуля в этот момент разгружена (излучающая плита имеет площадь 0,89 м², а пиковая сила тяги электромагнита составляет 450) кН, то образец создаёт высокочастотную модуляцию (T=2 мс) во втором полупериоде воздействия. Период дискретизации, установленный в ходе эксперимента при записи на сейсмозонд, составлял 1 мс. Если посмотреть на запись гидрофона (рис. 8) то на ней отчётливо проявляется

три пика характерных для импульсных источников (шаг дискретизации при записи сигнала с гидрофона составлял 20 мкс). Невыразительность второго максимума и отсутствие третьего объясняется слишком большим шагом дискретизации при записи на сейсмозонд.

Используя данные регистрации сигналов на сейсмозонд, была произведена оценка амплитуды и осуществлен перевод в единицу тонн-сил (рис. 5).

▼ Рис. 5. Оценка амплитуды излучаемого сигнала макета, полноразмерного опытного образца с эталонным.



Известна сила воздействия источника «Енисей-ВЭМ50» - $ABЭ50=40$ тс

Из соотношения воздействий $ABЭМ50/ABИмС=0,21/0,08$ вычислим воздействие

$$ВИмС\text{СТИВ} ABИмС=40 \cdot 0,08/0,21=16 \text{ тс}$$

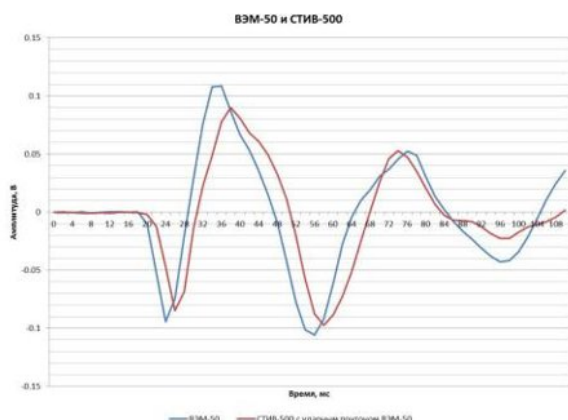
Вычислим воздействие макета ВИмС $ABИмС_{\text{макет}}=40 \cdot 0,02/0,21=3,8 \text{ тс}$

Как видно из амплитуды воздействия ВИмС СТИВ и макета ВИмС составляют 16 и 3,8 тонн-сил соответственно. Поскольку в теории импульсного воздействия амплитуда и частота сейсмического сигнала обусловлена присоединённой массой грунта, то сравнительно малую амплитуду сигнала ВИмС СТИВ можно объяснить малой присоединённой массой воды, участвующей в формировании импульса.

В дальнейшем на ВИмС СТИВ были проведены исследования при различных величинах рабочего зазора электромагнита и изменении емкости конденсаторной батареи для определения оптимальных значений воздействия. В ходе экспериментов было решено проверить характер сигнала при увеличенной площади плиты.

Для этого, опорная плита ВИмС СТИВ была заменена ударным понтоном от источника ВЭМ-50 площадью 4 кв.м.

▼ Рис. 6. Сигналы, зарегистрированные на зонд для ВИмС (на понтоне) и ВЭМ-50.



Как видно из рис. 6 амплитуда и форма сигналов ВИмС СТИВ и ВЭМ-50 стали практически сопоставимы. Амплитуда сигнала ВИмС СТИВ составила 35 тонн-сил. Для повышения эффективности воздействия необходимо увеличить реактивную массу ВИмС СТИВ и площадь плиты до её оптимальной величины.

Данные с гидрофонов и акселерометров

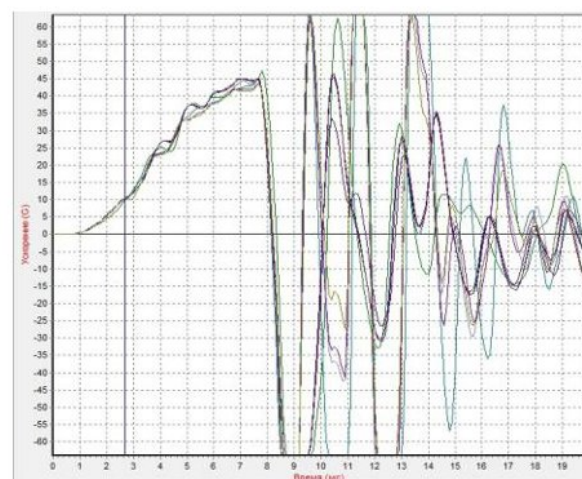
Длительность импульса, ускорение реактивной массы измерялась, а затем вычислялась фазовая и амплитудная идентичность, по показаниям акселерометров установленных на реактивной массе опытных образцов.

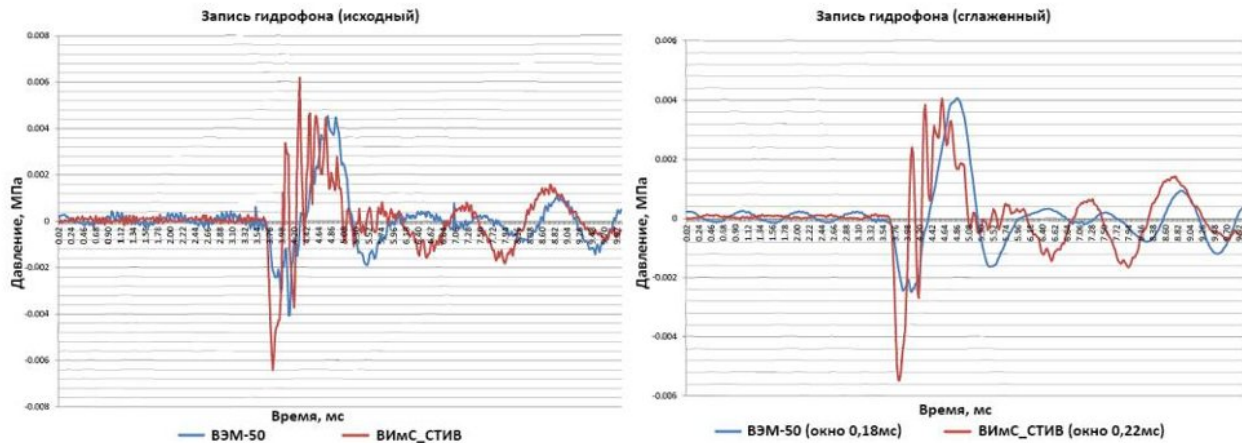
На рис. 7 показаны ускорения реактивной массы для ВИмС СТИВ. Была проведена серия из 10 ударов. Фазовая идентичность ударов – 200мкс, амплитудная идентичность ударов не превышает $\pm 5\%$.

Давление в водной среде рассчитывалось по показаниям гидрофона расположенного на дне бассейна (глубина 4 м) под излучающей плитой.

С целью подавления некогерентной помехи и придания наглядности изображению сигналы были усреднены по количеству воздействий и сглажены в определённом окне (см. рис. 8)

▼ Рис. 7. Графики ускорения реактивной массы. Образец ВИмС





▲ Рис. 8. Сигналы, зарегистрированные на гидрофон исходные (слева), сглаженные (справа).

В ходе испытаний была проведена серия опытов с изменением параметров системы, с целью определения наиболее оптимального режима работы ВИМС_СТИВ. На рис. 9 изображены совмещенные графики ускорений реактивной массы и плиты при различных величинах емкости конденсаторной батареи и вариациях рабочего зазора. Здесь же приложен график разрядного тока.

По ускорениям плиты и реактивной массы, измеренных акселерометром

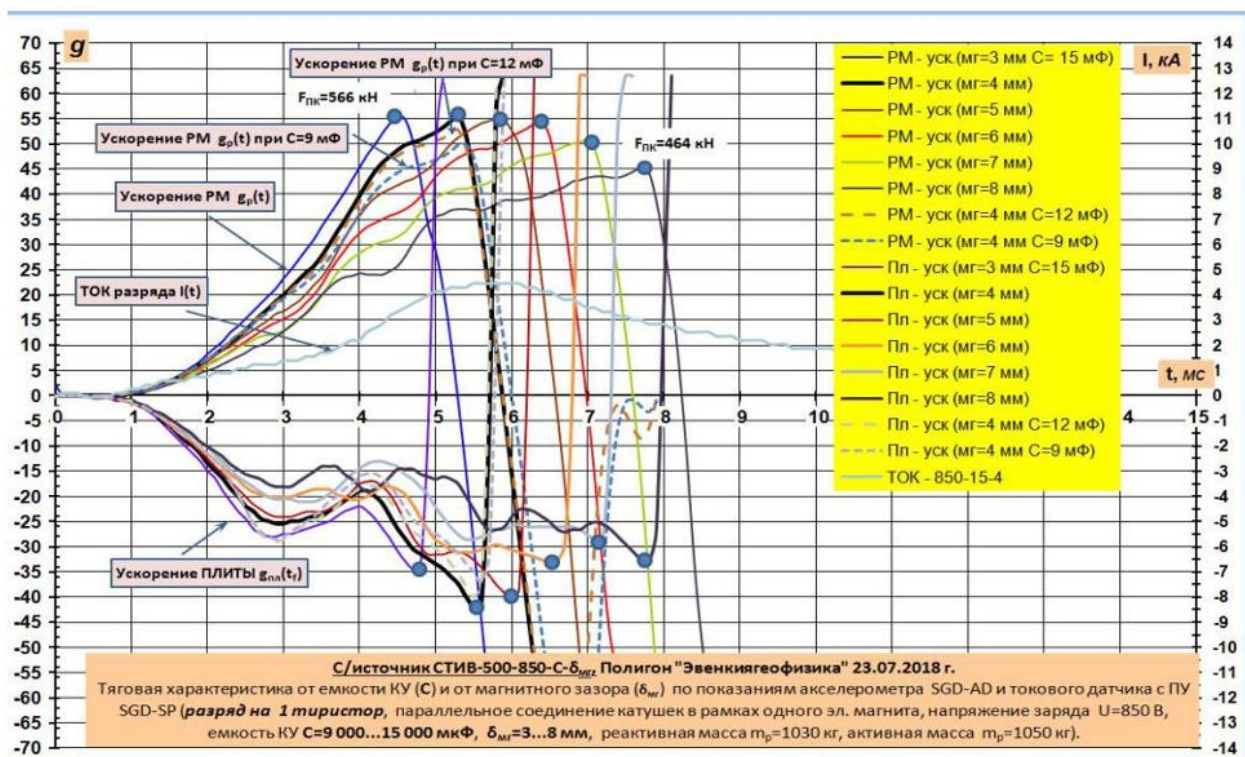
SGD-AD, представленных на рисунке 8 оценим развиваемые силы.

Максимальное ускорение плиты - 42g, масса—1030кг. $F_{\text{maxпл}} = 424 \text{ кН}$.

Максимальное ускорение реактивной массы - 55g, масса – 930 кг. $F_{\text{max}} \text{ PM} = 501 \text{ кН}$.

Силовое воздействие на среду (давление под плитой) можно оценить по ускорению и площади плиты: $R_{\text{пл}} = F_{\text{maxпл}} / S_{\text{пл}} = 47,6 \text{ Н/см}^2 = 0,476 \text{ МПа}$.

▼ Рис. 9. Графики ускорений реактивной массы, плиты и тока разряда.



Присоединенная масса воды $M_{пр}$ определяется по формуле (5):

$$M_{пр} = \frac{4}{3} \cdot \rho \cdot R^3 [\text{кг}], \quad (5)$$

где: R —радиус площади излучателя = 0,53м, $\rho=1000$ кг/м³. Таким образом, $M_{пр} = 1000 \cdot 0,533 \cdot 4/3 = 198$ кг.

Гидродинамическое сопротивление определяется по формуле (6):

$$F_R = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \Omega \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \right], \quad (6)$$

при $v_1 = 2,75$ м/с, $S_{пл} = 0,89$ м²; $F_{дв} = 6730,6$ Н

Выводы

Испытания проводились с целью анализа полученных результатов опытного образца с результатами эталонного водного импульсного источника ВЭМ-50, для определения необходимых корректировок и доработок конструкции, для обеспечения полной работоспособности и автономности опытного образца на будущих этапах.

Что касается конструкции всего опытного образца на данном этапе и о конструкции общей, то речь идет о принципиально новом прототипе электромагнитного источника, в будущем (на следующих этапах) речь пойдет о конструктивных доработках, в частности использование и доработка пружинной подвески, использование оптимальной массы и размеров плиты-излучателя. На данном этапе работ получен рабочий прототип ВИМС, данные с которого могут быть сопоставимы с эталонными электромагнитными источниками, такими как источники серии «Енисей», при соблюдении соответствующих условиях и параметров.

Проведенные испытания опытного образца на полигоне показали, что:

- Амплитуда и форма сигналов ВИМС и ВЭМ-50 стали практически сопоставимы после того как опорная плита ВИМС была заменена ударным понтоном от источника ВЭМ-50 площадью 4 м²

- Амплитуда сигнала ВИМС составила 35 тонн-сил. Для повышения эффективности воздействия необходимо увеличить реактивную массу ВИМС и площадь плиты до её оптимальной величины.

- Полученные результаты ускорения реактивной массы ВИМС показали что, фазовая идентичность ударов – 200мкс, амплитудная идентичность ударов не превышает $\pm 5\%$.

- Эксперимент с использованием гидрофона для макета ВИМС не показал информативных результатов т.к. датчик был размещен рядом с объектом исследования и измерял изменение давления в ближней зоне.

- В ходе испытаний была проведена серия опытов с изменением параметров системы, с целью определения наиболее оптимального режима работы ВИМС. На полученных совмещенных графиках ускорений реактивной массы и плиты при различных величинах емкости конденсаторной батареи были рассчитаны развиваемые силы.

Литература

Ампилов Ю.П., Владов М.Л., Токарев М.Ю. Технологии широкополосной морской сейсмической съемки: проблемы и возможности // Сейсмические Инструменты, Август 2019. №55. С.388–403

Ампилов Ю.П., Терехина Ю.Е., Токарев М.Ю. Прикладные аспекты различных полос частот сейсмических и водно-акустических исследований на шельфе // Известия, Физика атмосферы и океана. Декабрь 2019. №55. С.705–720

Анкушев В.В., Гурьев С.В., Резвов В.И. Компания ГЕОСЕЙС представляет новый

малогабаритный источник возбуждения "Геотон06" // Приборы и системы разведочной геофизики. 2004. №1. С.14–15

Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа. 1980. 408 с.

Детков В.А., Зарипов С.М. Повышение экономической эффективности сейсморазведочных работ на нефть и газ // НЕФТЬ. ГАЗ. НОВАЦИИ. 2017. №1, С.14-19

Караев А.Э., Архипов С.О., Чешмеджиев М.В., Суворова М.С., Антонов Я.И. Актуальность политики импортозамещения в России на примере стратегии «Оборудование для проведения морских сейсморазведочных работ» // «Нефтяное хозяйство». 2016. №4.

Ивашин В.В., Иванников Н.А., Узбеков К.Х. К вопросу создания переносных импульсных невзрывных сейсмоисточников с индукционно-динамическим приводом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. т.15, №4

Молоканов Г.И. Преобразование механической энергии в сейсмическую при ударе по поверхности // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1979. 312с.

Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: ВНИРО, 2017. 326 с.

Певчев В. П. Диссертация кандидата технических наук: Короткоходовой импульсный электромагнитный двигатель источника сейсмических волн. Тольятти. 2008. 165 с.

Семёнов В. Н. Зуенко Ю.И., Атаманова И.А., Мухаметова О.Н., Зеленихина Г.С., Архипов Б.В. Корниенко А.Б. Методическое пособие по оценке размера вреда водным биоресурсам при сейсморазведке и электроразведке. М.: ВНИРО. 2016. 86 с.

Шнеерсон М.В. Теория и практика наземной сейсморазведки // Под редакцией М.Б. Шнеерсона. М.: Недра, 1998. 527 с.

Goertz A., Wuestefeld A. Real-time passive monitoring with a fibre-optic ocean bottom array // First Break. April 2018. V. 36. № 4. P. 55-61

Ramsey E.W. Remote Sensing of Coastal Environments // Encyclopedia of Coastal

Science. March 2018. P. 89-146

Roy K.K. Signal Processing // Natural Electromagnetic Fields in Pure and Applied Geophysics. February 2020. P. 89-146

Подробнее об авторах

КУЗЬМИЧЕНКО Николай Владимирович – инженер – конструктор, ООО «СибТехИмпэкс»

МАЛЮТА Станислав Игоревич – аспирант, Сибирский Федеральный Университет, Институт Нефти и Газа

ЗИНОВЬЕВ Сергей Геннадьевич – доцент кафедры Геофизика, Сибирский Федеральный Университет, Институт Нефти и Газа

СЕМЁНОВЫХ Роман Владимирович – инженер-технолог, ООО «СибТехИмпэкс»

АНТОНЕВИЧ Герман Валентинович – директор «СибТехИмпэкс», ООО «СибТехИмпэкс»