

Развитие импульсных невзрывных сейсмоисточников. Источник «Волгарь-27» с индукционно-динамическим двигателем.

- Алелюхин Н.П., ЗАО «Геосвип», г. Москва,
- Асан-Джалалов О.А., ЗАО «Геосвип», г. Москва,
- Ивашин В.В., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти,
- Иванников Н.А., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Статья содержит мнение авторов об основных особенностях конструктивного решения сейсмоисточников и преобразования в них потребляемой энергии в механическую энергию воздействия на грунт, а также результаты разработки источника «Волгарь-27».

Известные основные недостатки классического взрывного способа создания сейсмических волн, который широко применяется и в настоящее время, – экологический вред, большая стоимость и ограниченные области применения, побудили к разработке невзрывных источников виброимпульсного и импульсного типа.

Наиболее широкое применение за рубежом и в России получили сейсмические вибраторы гидравлического типа. В России они изготавливаются в ЗАО «Геосвип», г. Москва. Недостатками вибраторов являются большой вес, высокая стоимость и эксплуатационные расходы. Достоинство – высокая сейсмическая эффективность.

Одними из первых невзрывных импульсных сейсмоисточников были обычная «кувалда» или «Падающий груз», создающие сейсмические волны в результате воздействия ударной массой на поверхность грунта. «Кувалда» и в настоящее время находит применение при проведении работ по малоглубинной сейсмике, а «Падающий груз» практически не применяется.

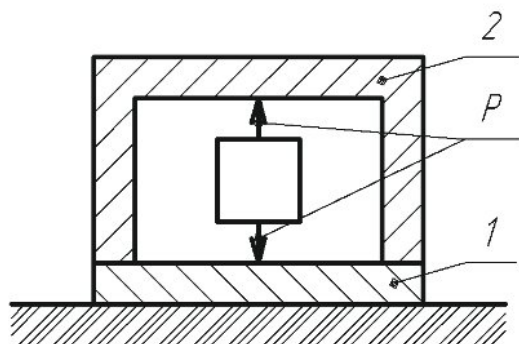
В период 70-80 г.г. основное внимание уделялось разработке импульсных источников различной мощности с использованием в их конструкции специ-

альных двигателей, обеспечивающих создание на излучающую плиту или непосредственно на грунт достаточно мощное механическое воздействие, деформацию грунта и формирование сейсмической волны. Название такого источника обычно определяется видом применяемого двигателя: газодинамический, пневматический, электродинамический и т.д. [1].

В настоящее время ввиду недостаточно высоких технических, сейсмических и эксплуатационных характеристик они практически не применяются.

Начиная с 2000 года, всё более широкое применение находят источники с электромагнитным двигателем в виде специального силового электромагнита с импульсной системой питания, получившие условное название «электромагнитного». Известно, что в США также начаты разработки источников с электромагнитным двигателем, которые выполняются с использованием российского опыта разработок электромагнитных источников.

Упрощённая механическая схема, отражающая силовую связь между основными элементами источника – двигателем, пригрузом и излучающей плитой, (рис. 1) соответствует большинству технических решений импульсных источников.



▲ Рис. 1. Упрощённая механическая схема импульсного источника.

На расположенную на грунте плиту-излучатель 1 опирается пригруз (пригрузочная масса) 2, между которыми применяется двигатель создаёт импульсную силу P длительностью $t_{\text{д}}$ и максимальным значением $P_{\text{м}}$. Под действием силы плита ускоряется и деформирует грунт, создавая в нём деформацию, упругая составляющая которой является, по сути дела, причиной формирования сейсмической волны. Пригруз под действием силы двигателя ускоряется вверх, перемещается в поле силы тяжести земли и затем замедленно возвращается в исходное положение. Применение демпфера обеспечивает уменьшение скорости механического взаимодействия пригруза с плитой с целью ослабления повторного воздействия плиты на грунт и создаваемых при этом волн-помех.

Конструктивное выполнение реально-го источника зависит, в первую очередь, от типа применяемого двигателя (гидравлический, пневматический и т.д.), а также от выбора параметров, определяющих вес сейсмоисточника и его сейсмическую эффективность. Плита-излучатель с площадью прилегания к грунту S должна иметь минимально возможный вес при достаточной её жёсткости и прочности. С уменьшением массы плиты повышается доля механической энергии двигателя, передаваемой через плиту в деформацию грунта, уменьшается необ-

ходимый вес пригруза и, в конечном счете, уменьшается вес источника и улучшаются многие иные его характеристики.

При деформации грунта плитой в нём создаются как упругая, так и неупругая её составляющие. Доля неупругой деформации быстро возрастает с ростом скорости плиты и создаваемого при этом в грунте давления. При превышении давления в грунте значения его прочности, грунт интенсивно уплотняется. При этом разрушается структура грунта, большая часть передаваемой в грунт энергии преобразуется в тепловую, а сейсмическая интенсивность источников резко снижается.

Достаточно обоснованных рекомендаций, касающихся рациональной скорости плиты, при которой обеспечивалось бы допустимое соотношение между упругими и неупругими составляющими деформации грунта, в литературе не приводится. Однако можно принять не противоречащее физике предположение, что эта скорость не должна существенно превышать скорость $V_{\text{см}}$ частиц грунта при распространении в нём сейсмической волны. Известно, что

$$V_{\text{см}} \approx \frac{\sigma}{V_p \cdot \rho}, \quad (1)$$

где σ – давление в грунте, ρ – его плотность, а V_p – скорость распространения продольных волн [2].

Для случая усреднения параметров $\rho \approx 2000 \text{ кг/м}^3$, $V_p \approx 300 \text{ м/с}$ и прочности грунта $[\sigma] = 5 \cdot 10^5 \text{ Паскаль}$ скорость $V_{\text{см}}$ близка к значению 1 м/с .

Важно отметить, что с увеличением плотности грунта и скорости V_p увеличивается и его прочность, характеризуемая значением $[\sigma]$, что приводит к сравнительно небольшому изменению скорости $V_{\text{см}}$ в грунтах различной плотности. В

наиболее широко применяемых вибраторах и импульсных электромагнитных источниках скорости нагрузки грунта плитой-излучателем обычно близки к значениям $(1 \pm 0,5)$ м/с. Для сравнения отметим, что, например, в источниках типа «Падающий груз» при сбросе груза с высоты $(2..3)$ м он ускоряется до скоростей $\sim (6..8)$ м/с. В источниках с предварительным ускорением груза пневмодвигателем его скорость ещё выше. В источниках газодинамического типа скорости деформации грунта так же весьма велики. И, следовательно, можно сделать предположение, что, по крайней мере, одной из причин недостаточной эффективности мощных сейсмоисточников с чрезмерно большими скоростями деформации грунта являются большие потери энергии механического взаимодействия плиты на грунт, затрачиваемые на энергию его неупругих деформаций.

Для создания новых, более эффективных импульсных источников необходимо проведение специальных теоретических и экспериментальных исследований, основной целью которых должно быть обоснование наиболее рациональных скоростей нагружения грунта плитой-антенной.

При ускорении пригруза силой двигателя вверх расходуется часть механической энергии двигателя, которая может быть экспериментально определена по высоте H его «подскока» в поле тяготения

$$A_{\text{пр}} = m \cdot g \cdot H. \quad (2)$$

Она пропорциональна квадрату создаваемого двигателем на пригруз (и на плиту) механического импульса N

$$N = \int_0^{t_{\text{и}}} P(t) dt;$$

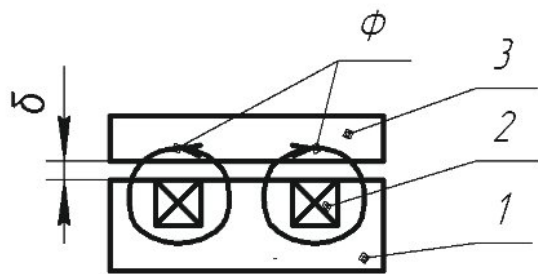
$$(3) \quad A_{\text{пр}} = \frac{N^2}{2 \cdot m}.$$

Доля же механической энергии двигателя $A_{\text{н}}$, передаваемой от него в грунт, зависит не только от массы плиты, но и от реологических характеристик грунта, оказывающего противодействие его деформации плитой, а так же от длительности $t_{\text{и}}$ импульса силы.

Из (3) следует, что увеличение массы пригруза сопровождается уменьшением его энергии $A_{\text{пр}}$, потребляемой из генерируемой двигателем механической энергии, что приводит к возможности уменьшения веса двигателя. Но при этом увеличивается вес сейсмоисточника. Из теоретических результатов следует, что при применении двигателя с возможно более высоким отношением развиваемой им силы к массе его якоря, уменьшаются необходимая масса пригруза и вес сейсмоисточника, повышаются КПД преобразования механической энергии двигателя в энергию упругих деформаций грунта и динамические характеристики источника.

В связи с этим, при создании экспериментального образца мощного электромагнитного источника был применён специальный короткоходовой электромагнитный двигатель с импульсной системой питания, который послужил основой для разработки сейсмоисточников «Енисей» на усилия до 100 тонн (совместная разработка «Енисейгеофизики» и Тольяттинского политехнического института 1989-1993 г.г.).

После почти десятилетнего перерыва (1993-2000 г.г.) работы по повышению механических характеристик «Енисеев» возобновились. Основные их результаты опубликованы в [3 и 4]. На рис. 2 показаны конструктивные особенности электромагнитного двигателя: 1 – магнитопровод его индуктора с обмоткой возбуждения 2. Магнитопровод 3 якоря двигателя, от которого усилие передается на



▲ Рис. 2. Конструктивные особенности электромагнитного двигателя.

излучающую плиту, отделён зазором δ от индуктора 1, закрепляемого на пригрузе.

При подаче в обмотку 2 импульса тока создается магнитный поток Φ и якорь притягивается к индуктору с удельной силой до 150 Н/см², распределенной по площади полюсов магнитопровода индуктора при практически предельном значении индукции B_δ в зазоре на уровне (1,8...2) Тл. В конструктивных решениях электромагнитов источников «Енисей СЭМ» и «Енисей КЭМ» и других их модификациях для увеличения силы в электромагнитном блоке применено по два электромагнита, показанной на рис. 2 конструкции. На рис.3 приведена фотография электромагнитного источника «Геотон-12», созданного в ОАО «Геосейс» (крышка источника поднята). Внутри полоза, являющегося излучающим элементом-плитой источника, размещены пригруз, двигатель с системой питания и аккумулятором. Характеристики «Геотона-12» приведены в таблице.

Из опыта проектирования источников и исследования динамики их работы следует, что на конструктивное выполнение, массогабаритные параметры и сейсмическую эффективность существенное влияние оказывают КПД преобразования потребляемой двигателем энергии в механическую и значения коэффициентов K_1 и K_2 , равных, соответственно, отношению развиваемой двигателем силы P к массе его якоря и массе сейсмоисточника. Для различных

модификаций источников с электромагнитными двигателями они близки к значениям:

КПД $\approx 60...70\%$, $K_1 \approx 1000$ Н/кг, $K_2 \approx 120$ Н/кг. Причём, при увеличении K_1 повышаются динамические характеристики источника и, как следствие, возможности уменьшения веса сейсмоисточника за счет повышения его коэффициента K_2 .

В связи с успешным применением мощных источников «Енисей» и источников средней мощности «Геотон», различными организациями неоднократно делались неудачные попытки создания источника малой мощности с электромагнитными двигателями для малоглубинной сейсмики, например, переносного источника весом 50...70 кг. Поскольку зависимость между силой и массой источника определяется коэффициентом $K_2 = P/m$, то при массе (весе) источника $m = 50$ кг значение создаваемой его электромагнитным двигателем силы $P = K_2 \cdot m = 120 \cdot 50 = 6000$ Н, что явно недостаточно. При приемлемой же силе 50000Н масса источника: $m = P/K_2 = 50000/120 \approx 400$ кг.

Для создания источников небольшого веса (переносных и легко транспортируемых) необходимо применение двигателя с существенно более высоким значением коэффициента K_1 , характеризующим отношение развиваемой двигателем силы к массе его якоря.



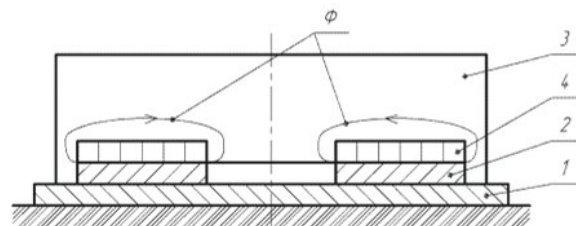
▲ Рис. 3. Сейсмоисточник «Геотон-12», ООО «Геосейс» г. Москва.

Этому условию удовлетворяет индукционно-динамический двигатель (ИДД), который нашёл широкое применение в промышленных устройствах, создающих мощные импульсы воздействия на рабочий объект (штамповка и формовка деталей, привод быстродействующих выключателей и прочее) [5]. В ряде публикаций и патентов так же предлагались технические решения источников с ИДД для применения их в наземной и водной сейсморазведке. Однако о достаточно широком практическом их применении в России авторам ничего неизвестно. Упрощенная конструктивная схема наземного источника с ИДД (рис. 4) содержит излучающую плиту 1 с закрепленной на её верхней стороне электропроводящей пластиной 2, опёртый на плиту пригруз 3, в пазах на обращенной к плите стороне которого помещена обмотка возбуждения 4.

При пропускании по обмотке импульса тока разряда емкостного накопителя энергии, который обычно применяется для питания как электромагнитного двигателя, так и ИДД, состоящего из обмотки возбуждения 4 и пластины 2, выполняющей функцию якоря, создается магнитный поток Φ . Он образуется вокруг обмотки возбуждения ИДД и за счёт экранирующего действия электропроводной пластины 2 якоря замыкается в радиальном направлении в области рабочего зазора между обмоткой 4 и якорем 2. В результате между обмоткой и пластиной-якорем создается расталкивающая их сила P .

$$P \approx \frac{B_{\delta}^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0}, \quad (4)$$

где B_{δ} – индукция магнитного поля в области прилегания обмотки к пластине, S – площадь прилегания, определяемая внутренним и внешними радиусами обмотки, а μ_0 – магнитная постоянная.



▲ Рис. 4. Упрощённая механическая схема импульсного источника с ИДД.

В результате действия силы P якорь с плитой смещается в направлении грунта под плитой и деформирует грунт, в котором формируется сейсмическая волна, а пригруз с обмоткой возбуждения подбрасывается вверх в поле силы тяжести и возвращается в исходное положение на плите.

Допустимые по условию обеспечения механической прочности обмотки возбуждения индукции B_{δ} в рабочем зазоре двигателя пропорциональны величине тока возбуждения обмотки и могут достигать значений 3...4 Тл, при которых создаваемое двигателем силовое давление между обмоткой и якорем в 2...4 раза больше, чем удельные давления, развиваемые в зазоре электромагнитного двигателя. Учитывая, что масса якоря из-за небольшой толщины 5...7 мм пластины 2 имеет существенно меньший вес, коэффициент K_1 , характеризующий отношение силы к массе якоря, с увеличением которого уменьшаются размеры и вес сейсмоисточника, существенно превышает значения K_1 для электромагнитного двигателя.

В связи с перспективностью создания источников с ИДД, в период 2008- 2012 г.г. была выполнена совместная (Тольяттинский гос. университет и ОАО «СКБ СП» г. Саратов) разработка переносного источника «Квант» [6]. Последний вариант его экспериментального образца показан на рис. 5, а основные технические характеристики отражены в таблице.



▲ Рис. 5. Переносной сейсмоисточник «КВАНТ-4,5»

В развитие этого направления Тольяттинским государственным университетом совместно с организацией ЗАО «Геосвип» был разработан экспериментальный образец источника «Волгарь» с ИДД на усилие $\sim 27 \cdot 10^4$ Н весом ~ 300 кг и проведены предварительные заводские испытания на работоспособность с определением его основных технических характеристик. В конструкции «Волгаря-27» (рис. 6) применён ряд новых технических решений, касающихся излучающей плиты, якоря и обмотки возбуждения двигателя, сочленения демпфера с плитой, совмещения пригруза с силовой системой питания двигателя, а так же приняты меры по уменьшению падения давления воздуха в зазоре между якорем и обмоткой возбуждения при работе источника и защите от влияния окружающей среды, что позволило дополнительно уменьшить вес, повысить надежность и расширить возможности применения источника.

Более мощный сейсмоисточник с ИДД на усилия до 106 Н может быть выполнен размещением нескольких источников типа «Волгарь-27» на транспортной базе грузоподъемностью до 2-х тонн.

При разработке «Волгаря-27» была также проведена эскизная проработка

импульсного источника весом ~ 1000 кг с ИДД на силу $20 \cdot 10^4$ Н для создания поперечных сейсмических волн, который мог бы найти применение при решении многих геофизических задач.

В последние годы резко увеличилась потребность проведения геофизических работ на акваториях. За рубежом проводятся разработки малоглубинных, альтернативных традиционно применяемым «пневмопушкам», источников с ИДД. В связи с этим, результаты, полученные при разработке наземных источников типа «Квант» и «Волгарь», могли бы быть использованы при создании водного сейсмоисточника, основными достоинствами которого в сравнении с пневмопушками могут быть возможность оперативного регулирования величины и длительности создаваемых усилий в воде, простота и высокая синхронность работы любого числа источников в группе, уменьшение потребляемой источником мощности, повышенный спектр излучаемых сейсмических волн и простота эксплуатации.

Импульсные источники являются сложными объектами, работающими в напряженных динамических режимах. Для их создания и совершенствования необходимы высококвалифицированные специалисты различного профиля, производственная база, оснащенный



▲ Рис. 6. Сейсмоисточник «Волгарь-27» без внешнего кожуха.

▼ Табл. 1. Основные технические параметры импульсных сейсмоисточников с электродвигателем

Показатели сейсмоисточников	«Геотон-12»	«Енисей СЭМ-100»	«КВАНТ-М»	«Волгарь-27»
Тип привода	Электро-магнитный	Электро-магнитный	Индукционно-динамический	Индукционно-динамический
Сила воздействия двигателя, кН	120	1000	45	270
Длительность воздействия, мс	4...7	4...10	2...2,5	2...3
Масса (вес) якоря двигателя, кг	62	250x4=1000	2,2	21
Масса (вес) пригруза, кг	360	2300x2=4600	42	235
Масса (вес) источника, кг	600	6650	55	300
Энергия емкостного накопителя системы питания, Дж	1350	7200	850	7200
Отношение силы к массам (весу), соответственно, якоря (K_1), источника (K_2) и энергии емкостного накопителя системы питания (K_3): K_1 , Н/кг K_2 , Н/кг K_3 , Н/Дж	~1950 200 ~89	1000 150 ~139	~20500 818 ~53	~13000 900 ~37,5
Интервал времени между воздействиями, с	6	6	6	6
Средняя потребляемая мощность, кВт	~0,25	1,2	~0,15	1,2

контрольно-измерительными приборами испытательный стенд, прогностическая оценка необходимого выпуска источников и, конечно же, стабильное и достаточное для выполнения работ финансирование.

В период 70-90 г.г. эти задачи выполнялись при поддержке и финансовом обеспечении Министерствами геологии и нефтяной промышленности СССР.

В настоящее время работы по созданию опытных образцов источников и их совершенствованию чаще всего проводятся в результате инициативной договорённости руководителей небольших геофизических организаций, имеющих весьма скромные финансовые и производственные возможности, с руководителями научно-технических коллективов, имеющих определённый задел и опыт в

области подлежащих решению задач. Естественно, что абсолютной уверенности в успешном преодолении трудностей при решении новых задач в необходимые сроки не может быть в принципе, что не позволяет прогнозировать технико-экономическую эффективность подлежащей выполнению работы. Попытки привлечения к работам по источникам крупных геофизических организаций не встречают понимания в связи с их нежеланием решать задачи федерального значения. В результате финансовых и организационных трудностей перспективные технические решения не патентуются за рубежом и Россия теряет внешний рынок источников. Для решения отмеченных выше проблем необходимо федеральное бюджетное финансирование.

Список литературы

1. Шнеерсон М.В. Теория и практика наземной сейсморазведки / под редакцией М.В. Шнеерсона. – М.: ОАО «Издательство Недр», 1998. – 527 с.

2. Федьинский В.В. Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1967. – 672 с.

3. Смирнов В.П. Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда «Енисей СЭМ, КЭМ» // Приборы и системы разведочной геофизики / Ежеквартальное издание Саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. 2003. №1. 21-24 с.

4. Детков В.А., Щадин П.Ю., Ивашин В.В. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей»: особенности технического решения и применения. // Приборы и системы разведочной геофизики / Ежеквартальное издание Саратовского отделения Евро-азиатского геофизического общества. 2007. №4. 30-33 с.

5. Карпенко Л.Н. Быстродействующие электродинамические отключающие устройства. Л.: Энергия, 1973. – 158 с.

6. Ивашин В.В., Иванников Н.А., Узбеков К.Х. Импульсный невзрывной сейсмоисточник с индукционно-динамическим приводом для сейсморазведки зоны малых скоростей. // Вектор науки ТГУ. 2012. №4 (22). 160-164 с.



Алелюхин
Н.П.

Генеральный директор
ЗАО «ГЕОСВИП»,
Заслуженный работник
нефтяной и газовой
промышленности РФ



Ивашин
В.В.
д.т.н.,
Тольяттинский
государственный
университет, профессор,
Заслуженный деятель
науки и техники РФ



Асан-Джалалов
О.А.

ЗАО «ГЕОСВИП»,
Директор по НИОКР,
главный конструктор
по электронике
и электротехнике.



Иванников
Н.П.
к.т.н.,
Тольяттинский
государственный
университет,
Заслуженный деятель
науки и техники РФ