

Глава 1

Вибрационные источники сейсмических волн

Развитие приборной базы современных методов активной сейсмологии началось с создания специализированных мощных вибрационных источников в Сибирском отделении АН СССР. Здесь следует вспомнить сейморазведочный комплекс “Вибролокатор”, который был разработан в 60–70-х годах по идее и под научным руководством И. С. Чичинаина совместными силами нескольких научных и геофизических организаций Сибири. “Вибролокатор” принципиально отличался от американского “Вибросейса” как по конструктивной схеме, так и по алгоритму обработки вибрационных колебаний. В процессе выполнения научно-исследовательских работ было опробовано множество конструктивных схем виброисточника и аппаратуры и, главное, вырос отряд специалистов – инженеров и экспериментаторов, глубоко понимающих вибросейсмическую проблему.

Перечислим лишь некоторые оригинальные конструктивные решения, впервые предложенные и реализованные в научно-исследовательских разработках “Вибролокатора”:

- цифровой синтез управляющих свип-сигналов [212];
- прецизионное цифровое управление частотой и фазой вращения дебалансных вибраторов [208];
- синхронно-двигательный привод, обеспечивающий распределенную нагрузку по виброплатформе большой площади и позволяющий простой коммутацией электрических цепей менять поляризацию излучаемых колебаний (вертикальные, горизонтальные, круговые) [90];
- несколько конструктивных схем саморегулирующихся дебалансов, обеспечивающих существенное расширение частотного диапазона вибратора [127, 208, 211, 79, 89].

Многие из конструктивных решений были впоследствии использованы при создании мощных вибраторов, которые и сегодня относят к уникальным установкам, не имеющим мировых аналогов.

Следует подчеркнуть, что на первом этапе исследований основным назначением комплекса “Вибролокатор” была многоволновая сейморазведка в зимних условиях Сибири. Этим условиям в наибольшей степени отвечали и гусеничная транспортная база, и чисто электрическая силовая схема виброисточника.

Серийный вариант виброисточника “Вибролокатор-2” сконструирован на шасси гидрофицированного трактора Т130-МГ (рис. 1.1). Два идентичных вибромодуля установлены на подвижных навесных кронштейнах спереди и сзади трактора и оснащены гидравлическими спускоподъемными механизмами. Силы гидравлических подъемников достаточно для “вывешивания” трактора, так что при работе вибромодули прижимаются к грунту полным весом трактора (около 15 т). Каждый вибромодуль содержит четыре синхронных двигателя особой конструкции (с усиленными подшипниками и активным якорем), на валах которых

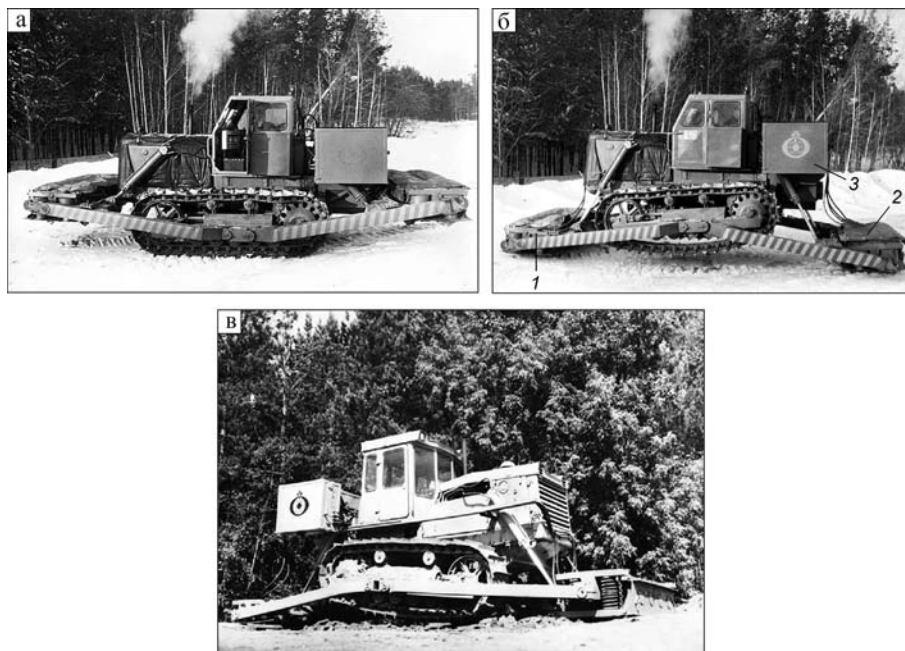


Рис. 1.1. Сейсморазведочный комплекс “Вибролокатор” на базе трактора Т100: а – походное положение, б – рабочее положение (1, 2 – вибромодули, 3 – контейнер с силовым преобразователем), в – вибратор комплекса “Вибролокатор-2” на базе трактора Т130-МГ, способный возбуждать продольные и поперечные волны. Разработка СибОКБ НПО “Нефтегеофизика”

укреплены дебалансы, и трехкомпонентную пружинную виброразвязку от несущего кронштейна. Источником энергии вибратора служит электрогенератор переменного тока мощностью 60 кВт (380 В, 50 Гц), подсоединенный к коробке отбора мощности маршевого двигателя трактора. Позади кабины водителя укреплен контейнер с силовым преобразователем, питающим напряжением переменной частоты синхронные двигатели. Главным элементом этого силового блока является тиристорно-электромашинный преобразователь, вырабатывающий трехфазное напряжение строго управляемой переменной частоты и фазы для питания синхронных вибродвигателей. Такая конструкция и схема питания виброисточника обеспечивают распределение силового вибровоздействия на грунт по большой площади контакта, не предъявляя чрезмерных требований к жесткости виброплатформ.

Аппаратура управления вибратором размещена в кабине водителя. Она включает в себя систему радиосинхронизации, состоящую из УКВ-радиостанции, дешифратора команд, синтезатора зондирующего сигнала и системы прецизионного управления частотой и фазой вибратора.

Поступающая по радио с сейсмостанции короткая кодированная команда воспринимается дешифратором и включает синтезатор зондирующего сигнала

(СЗС), который генерирует управляющий сигнал в виде линейной развертки частоты (свип-сигнал). Последний формирует управляющий сигнал для системы прецизионного управления, которая, в свою очередь, управляет силовой системой, получая от нее сигналы обратной связи таким образом, что вибродвигатели вращаются в точном соответствии с сигналом СЗС.

Дебалансы, укрепленные на валах двигателей, создают при синхронном вращении суммарную центробежную силу до 10 т. Направление вращения двигателей – попарно встречное, благодаря чему их равнодействующая поляризована линейно. В зависимости от полярности подключения обмоток возбуждения вибромодуль может генерировать вертикальные или горизонтальные колебания, т. е. излучать продольные или поперечные волны.

Особенностью примененных дебалансов является то, что с ростом частоты их статический момент автоматически уменьшается, в результате чего компенсируется квадратичное возрастание силы и тем самым обеспечивается довольно широкий для дебалансных вибраторов эффективный диапазон частот (8–60 Гц).

Дальнейшее развитие метода активной сейсмологии и создание новых геотехнологий были связаны с разработкой ряда мощных низкочастотных управляемых вибраторов. Ставилась задача обеспечить глубинность вибросейсмических просвечиваний по крайней мере до подошвы земной коры (40–50 км). По теоретическим расчетам [137, 134, 194, 196] для этой цели требовался вибратор с амплитудой силы около 100 т в частотном диапазоне 2–15 Гц. Серия таких вибраторов была разработана и изготовлена организациями Сибирского отделения АН СССР – Институтом гидродинамики, Институтом горного дела, Вычислительным центром, СКБ прикладной геофизики и Новосибирской опытно-методической вибросейсмической экспедицией в 1975–1990 гг. по программе “Вибрационное просвечивание Земли”. В дальнейшем работы были продолжены в рамках Государственной научно-исследовательской программы “Глобальные изменения природной среды и климата”. Созданные вибраторы имеют диапазон частот 1.5–15 Гц и развивают возмущающую силу до 100 тс. С этими виброисточниками выполнен большой объем экспериментальных работ по разработке метрологических основ глубинного вибросейсмического мониторинга.

1.1. Стационарные электромеханические дебалансные вибраторы ЦВ-40, ЦВ-100, ЦВА-100

Традиционная схема сейсморазведочного вибратора содержит виброплатформу, с которой жестко соединен вибровозбудитель. Платформа прижата к грунту массивным грузом через эластичные амортизаторы. В сейсморазведочных вибраторах платформу конструируют возможно более легкой, а возбудитель имеет постоянную силовую характеристику во всем диапазоне частот. Тем не менее на реальных грунтах такая система обладает резонансными свойствами, с которыми приходится бороться специальными методами управления возбудителем.

Обычно резонанс сейсморазведочных вибраторов лежит в диапазоне частот 20–30 Гц. Оказавшийся впоследствии наиболее эффективным мощный стационарный вибратор первоначально конструировался по этой же традиционной

схеме. В качестве вибровозбудителя из соображений простоты был выбран дебалансный механизм с приводом от электродвигателей. Однако при испытаниях обнаружилось, что блокирование амортизаторов, т. е. увеличение веса колеблющейся платформы до амплитуды требуемой силы воздействия на грунт, резко повышает интенсивность сейсмического излучения в области низких частот от 6 до 10 Гц. При этом оказалось, что необходимая вынуждающая сила, генерируемая дебалансами, может быть снижена в 2–3 раза по сравнению с расчетной без учета резонанса. Это открытие значительно сократило путь к созданию практически пригодного для глубинных экспериментов вибратора. Дебалансные сейсмические вибраторы, работающие на Быстровском, Байкальском и Краснодарском вибросейсмических полигонах, показаны на рис. 1.2.

Основные конструктивные особенности таких вибраторов можно увидеть на примере схемы вибратора ЦВ-100 (рис. 1.3).

1. Излучающая платформа, возбудитель и пригруз жестко соединены между собой в единое целое, а их суммарный вес равен или больше требуемой амплитуды переменной силы воздействия на грунт. Большая колеблющаяся масса обеспечивает низкочастотный резонанс с естественной упругостью рыхлого непромороженного грунта (обычно на частотах от 6 до 7 Гц) и, следовательно, эффективное излучение сейсмических волн в значительно более низкочастотной области, чем у разведочных вибраторов. Анкерное крепление платформы к

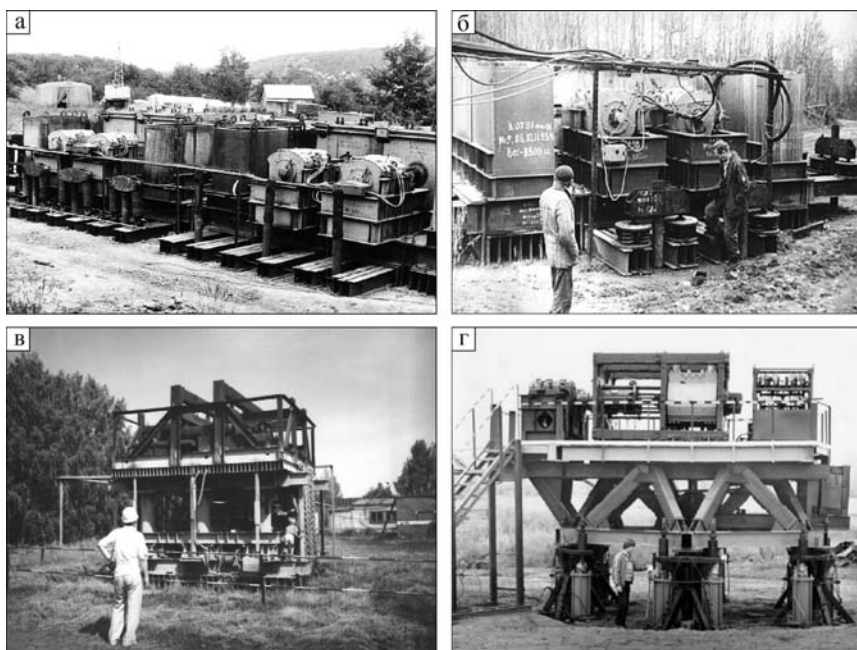
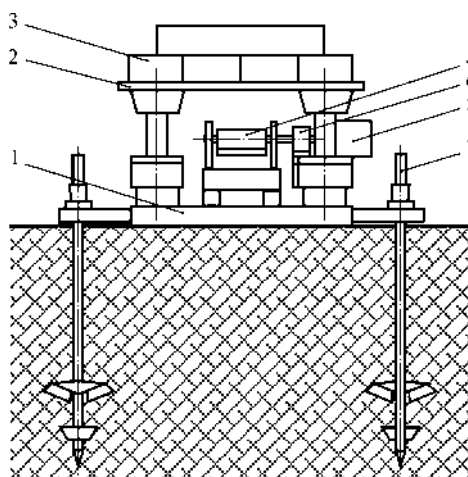


Рис. 1.2. 100-тонные дебалансные вибраторы ЦВ-100 на Краснодарском (а) и Байкальском (б) полигонах, ЦВ-100 (в) и ЦВА-100 (г) на Быстровском полигоне

Рис. 1.3. Механическая схема вибратора ЦВ-100:

- 1 – излучающая платформа,
- 2 – корпус,
- 3 – пригруз,
- 4 – дебаланс,
- 5 – электропривод,
- 6 – редуктор,
- 7 – анкеры



грунту не обязательно. Оно полезно при форсированных режимах работы, когда сказывается недостаток общей массы вибратора и платформа начинает терять контакт с грунтом.

2. Относительно большая площадь платформы (20–25 м²) обеспечивает более широкое воздействие на грунт: статическое давление и амплитуда переменного давления не превышают 50–60 кПа (0.5–0.6 бар), тогда как у обычных вибраторов эта величина достигает 150 кПа и более. Это дает относительно малые потери энергии на неупругие деформации и высокую стабильность повторных воздействий. Кроме того, некоторые эксперименты показывают, что сплошная жесткая платформа большой площади обеспечивает более эффективную прокачку сейсмической энергии сквозь слой рыхлых осадков в консолидированную кору, чем группа разделенных свободной поверхностью более мелких платформ такой же общей площади. По схеме, приведенной на рис. 1.3, было изготовлено несколько мощных вибраторов, с помощью которых затем проводились сейсмические эксперименты в различных районах России (Западная и Восточная Сибирь, Краснодарский край).

3. Круто возрастающая (квадратичная) зависимость амплитуды вынуждающей силы от частоты компенсирует послерезонансный спад амплитудно-частотной характеристики и тем самым расширяет эффективную полосу частот до приемлемого значения. При этом верхняя рабочая частота такого вибратора ограничена только запасом прочности конструкции возбудителя и платформы.

Перечисленные конструктивные особенности приводят к резкому возрастанию мощности сейсмического излучения в области низких частот.

На рис. 1.4 и в сводной табл. 1.1 приведены важнейшие рабочие характеристики вибратора ЦВ-100. Основные особенности характеристик следующие: резонанс вибраторов, установленных на рыхлых грунтах, располагается, как правило, в диапазоне частот 6–7 Гц; уменьшение амплитуды вынуждающей силы ведет к повышению резонансной частоты; левая сторона резонансной характеристики

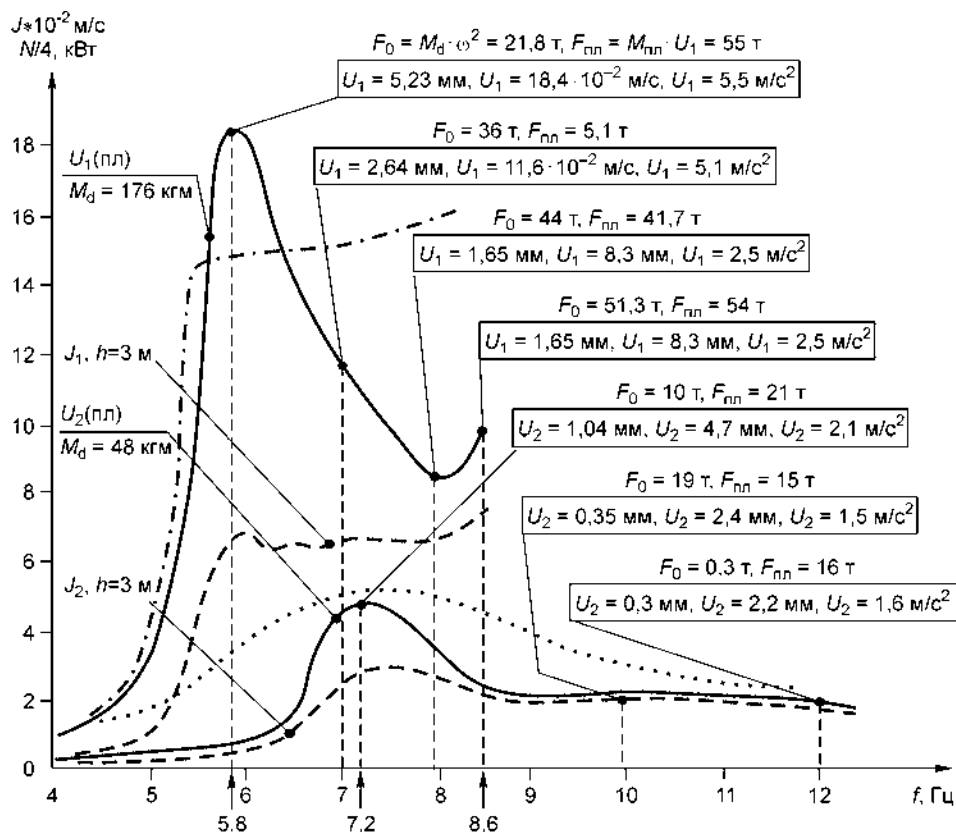


Рис. 1.4. Рабочие характеристики дебалансного вибратора ЦВ-100: — — колебания платформы; - - - колебания грунта на глубине 3 м; —●— полная мощность; - · - · амплитудный спектр вибросигнала на удалениях 100–300 км

имеет исключительно крутой, почти лавинообразный подъем, связанный с нелинейной природой резонанса типа “эффекта прыгающего мяча” [196, 207]. Повышение жесткости грунта вследствие промораживания резко сдвигает резонансную частоту вправо и сопровождается значительным снижением амплитуды колебаний платформы. Такой же эффект имеет место при установке вибратора на скальные породы. В то же время влагонасыщенность грунта мало влияет на характеристику вибратора. Следует также обратить внимание на неожиданно малую абсолютную величину потребляемой 100-тонным вибратором электрической мощности, не превышающей 60–70 кВт.

Из опыта конструирования грунтовых вибраторов известен эмпирический закон: правильно спроектированный вибратор требует 1 кВт мощности на 1 т развиваемой силы. Как видим, мощные вибраторы подтверждают эту закономерность, что свидетельствует о близости их конструкции к энергетически оптимальной.

Таблица 1.1

Характеристика	Тип вибратора				
	ЦВ-40	ЦВ-100, ЦВО-100	ГСВ-100	ГРВ-50	ГРВ-200
Амплитуда силы, т	50	100	100	60	250
Полоса частот, Гц	6–15	5–12	1–3	1–15	1–10
Поляризация силы	Универсальная	Вертикальная	Горизонтальная	Вертикальная	Горизонтальная
Конструктивная схема	Дебалансная		Гидрорезонансная		
Площадь контакта, м ²	15	25	60	30	500
Источник энергии	Промышленная сеть		Компрессор		
Потребляемая мощность, кВт	40	60	75	150	150
Габариты, м	5 × 2 × 2	5 × 5 × 4	20 × 3 × 3	3 × 3 × 10	Ф 1.2 × 50
Масса (снаряженная), т	40	120	100	15[75]	60[300]
Место установки	Новосибирская обл., полигон СО РАН	Новосибирская обл., оз. Байкал, Краснодарский край	Новосибирская обл., полигон СО РАН		

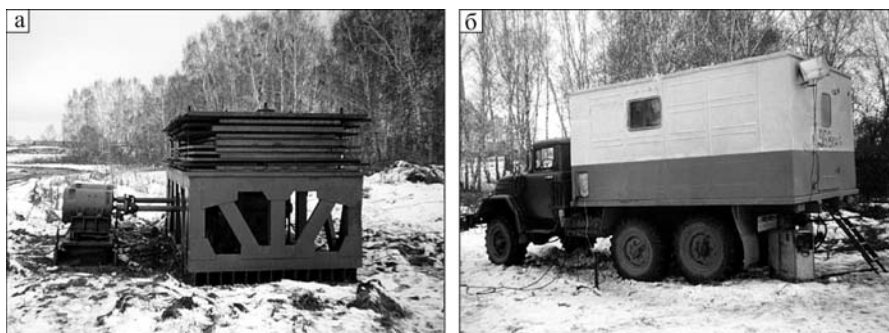


Рис. 1.5. Передвижной вибратор ЦВ-40 (а), мобильный модуль управления (б)

На основе дебалансной схемы разработан транспортируемый виброисточник ЦВ-40 (рис. 1.5), который развивает вибрационные усилия в 40–50 т и имеет рабочий диапазон 5–15 Гц. Он используется для площадных и профильных работ, выполняемых Алтае-Саянской опытно-методической сейсмологической экспедицией СО РАН.

1.2. Гидрорезонансные источники ГСВ-100, ГРВ-50, ГРВ-200

Разработка резонансных схем построения мощных вибрационных источников для низкочастотного диапазона 1–5 Гц была связана с необходимостью рекуперации большой реактивной мощности в области еще более низких частот, чем у дебалансных источников. Одним из первых источников 100-тонного класса был гидромеханический вибратор ГСВ-100 с диапазоном частот 1–3 Гц, разработанный в 1980 г. [95, 57]. Колебательный контур вибратора был образован 300-тонной инерционной массой, колеблющейся в горизонтальном направлении и заневоленной пневмопружиной с нелинейной характеристикой и гидроприводом (рис. 1.6).

Резонансная частота системы квадратично зависела от амплитуды и не требовала регулировки пневмопружины, при этом амплитуда возбуждающей силы оставалась постоянной и составляла 100 т. Вибратор ГСВ-100 оказался эффективным источником в диапазоне частот 1–3 Гц. С ним были поставлены рекордные по дальности эксперименты по регистрации гармонических сигналов на расстоянии до 2 000 км.

Другое направление в создании вибраторов связано с регулируемой гидрорезонансной схемой, в которой для упрощения и удешевления конструкции в качестве многотонной колеблющейся массы используется вода. Гидрорезонансный вибратор ГРВ-50 осуществляет вертикальное воздействие на грунт с усилием 50–60 т в диапазоне частот 1.5–15 Гц [24, 25]. Конструктивная схема вибратора ГРВ-50 приведена на рис. 1.6, а общий вид – на рис. 1.7. Вибратор имеет металлический корпус, в котором расположены подвижная инерционная масса воды и две пневмопружины. Корпус вибратора изготовлен из железнодорожной цистерны, установленной вертикально на платформе диаметром 6 м. Он заполнен водой общей массой около 60 т. Нижняя пневмопружина имеет вид подводного колокола. Герметичное пространство под верхней крышкой также заполнено сжатым воздухом.

В конструкции гидрорезонансных вибраторов нет подвижных уплотнений, поскольку в качестве инерционной массы используется столб жидкости, что обеспечивает большой ресурс работы. Подвижная масса воды, пневмопружины и корпус вибратора, связанный с грунтом, образуют колебательную систему с регулируемой резонансной частотой, которая зависит от изменения объема воздуха в нижней пневмопружине. Энергетической установкой вибратора служит компрессор.

Компьютерная система управления вибратором ГРВ-50 связана через интерфейсы с системой датчиков вибратора и силовой электроникой клапанов. Она осуществляет периодическую подачу и сброс сжатого воздуха из пневмопружины вибратора с заданной частотой, обеспечивая подвод энергии к колебательному контуру, и осуществляет настройку всей системы вибратора в резонанс с текущей частотой.

Гидрорезонансный вибратор ГРВ-200 разрабатывается как мощный сейсмический источник поперечных волн с амплитудой силы до 200 т и частотным диапазоном 1–10 Гц [24, 25]. Вибратор характеризуется очень большой площадью

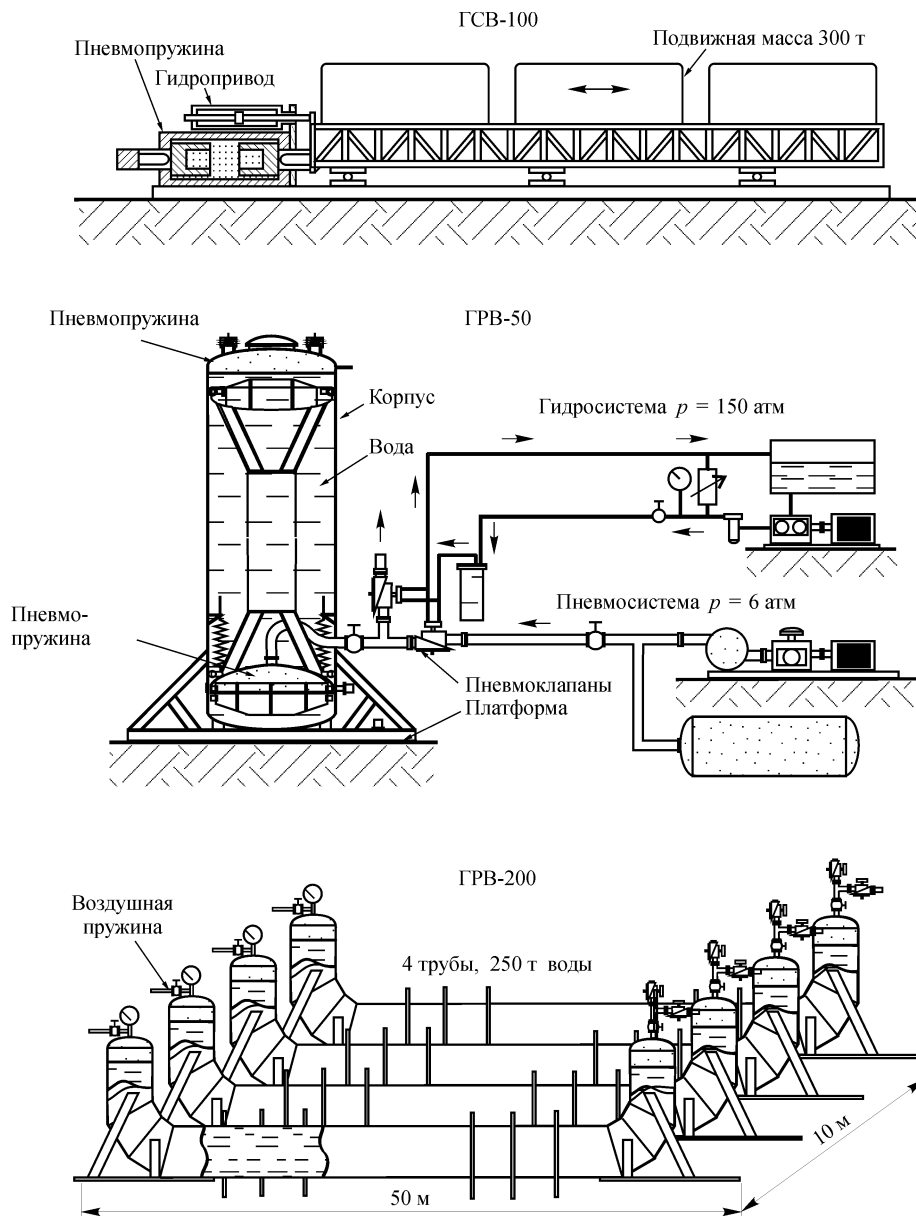


Рис. 1.6. Схемы резонансных гидромеханических виброисточников

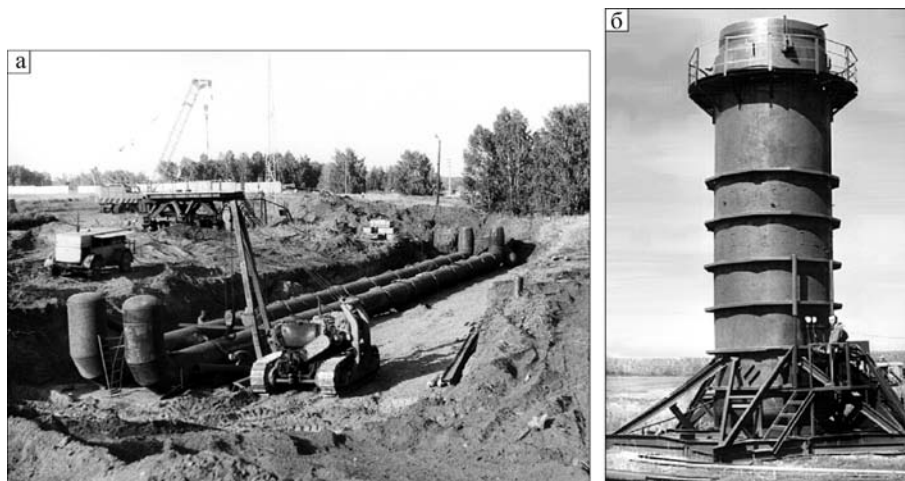


Рис. 1.7. Гидрорезонансные вибраторы ГРВ-200 (а) и ГРВ-50 (б)

контакта излучающей платформы с грунтом (около 500 м^2), что позволяет передавать грунту касательные усилия в несколько сотен тонн (см. рис. 1.6, 1.7). Горизонтальная конструкция вибратора включает четыре 50-метровых трубы, каждая из которых диаметром 1.2 м. Трубы расположены параллельно и закопаны в грунт на глубину около 3 м. Общий объем воды в корпусах 250 т. Концы труб вертикальные и герметично закрыты крышками, под которыми находится сжатый воздух.

Характеристики разработанных вибраторов даны в табл. 1.1.

Принцип действия, система управления и энергетическая установка полностью аналогичны вибратору ГРВ-50.