

О возможности повышения сейсмической эффективности механических сейсмоисточников ударного типа

Ивашин В.В., Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Идея возбуждения сейсмических волн путем воздействия на грунт падающей с некоторой высоты массой имеет давнюю историю. Наиболее распространенное техническое решение состоит в подъеме груза на высоту $H=2\ldots 3$ м вручную или с помощью простейшего привода. Сброшенный с этой высоты груз ускоряется в поле силы тяжести или специальным, например пневматическим, приводом и наносит удар по расположенной на грунте жесткой плите, применяемой для увеличения площади воздействия на грунт.

Заманчивость этой идеи обусловлена не только относительной простотой её технической реализации, но и возможностью обеспечения значительной энергии воздействия на плиту и грунт. Например, ударник массой всего $m=100$ кг при сбросе с высоты $H=2$ м получает кинетическую энергию $A=mgh=100\cdot 9.8\cdot 2=1960$ Дж, которая приближается к энергии воздействия на грунт электромагнитным сейсмоисточником "Енисей-100", развивающим на излучающий элемент силу 100 тонн. В то время как сбрасываемая масса в механических сейсмоисточниках иногда достигает значений 500, 1000 кг и более! По какой же причине столь мощные сейсмоисточники, с энергией движения ударника до 10 кДж и более, не нашли широкого применения в качестве импульсных источников, взамен взрывных?

Представляется, что одной из основных причин является присущая невзрывным сейсмоисточникам ударного типа несогласованность осуществляемого ими режима импульсного воздействия на излучающую плиту с параметрами грунта как акустической нагрузки и, в первую очередь, по скорости деформации грунта, соответствующей скорости V_{cm} смещения частиц грунта при распространении в нём сейсмической волны. Известно, что

$$V_{cm} = \frac{\sigma}{\rho V_p},$$

где: σ - создаваемое в грунте давление, ρ - плотность грунта, V_p - скорость продольной волны, а произведение $\rho \cdot V_p$ - волновое сопротивление.

При повышении скорости деформации грунта увеличивается создаваемое в нём давление. При превышении давлением предела прочности грунта существенно повышаются потери на деформацию грунта, он уплотняется и даже может разрушаться его структура (скелет). В публикациях по этому вопросу указывается, что скорость смещения излучающей плиты при деформации ею грунта не должна превышать примерно значения 1 м/с. Например при $\rho \approx 2000$ кг/м³, $V_p \approx 300$ м/с и $[\sigma]=5\cdot 10^5$ Па (5 кгс/см²) скорость $V_{cm} \approx 0.8$ м/с, причём значения этой скорости слабо зависят от прочности грунта. С увеличением прочности увеличиваются значения ρ и V_p , однако при этом возрастают и допустимые $[\sigma]$.

Полезно помнить, что нашедшие наиболее широкое применение при проведении сейсморазведочных работ электрогидравлические вибраторы и сейсмоисточники "Енисей" и "Геотон" создают скорости деформации грунта также не превышающие ≈ 1 м/с, т.е. обеспечивают в основном упругие деформации грунта.

Второй причиной являются значительные потери энергии ударника в месте его соударения с плитой-

излучателем при предупредной зависящей от высоты сброса H .

Масса плиты чаще всего в несколько раз превышает массу ударника, что обуславливает потерю энергии при соударении. Характеристикой потерь энергии является коэффициент восстановления R , который характеризует характер удара. При таком ударном взаимодействии, как описано в теории удара, послеударные скорости V_{ny} и энергия A_{ny} значительно меньше скорости V_0 и энергии A_0 ударника перед ударом. Отношение скорости и энергии характеризуются формулой

$$\frac{V_{ny}}{V_0} = \frac{A_{ny}}{A_0} = \frac{1}{1+b}, \quad (1)$$

где b - отношение массы плиты к массе ударника. При $b=2\ldots 3$ скорость V_{ny} и энергия A_{ny} характеризующие последующее механическое воздействие на грунт, снижаются в 3..4 раза из-за значительных потерь при ударном взаимодействии ударника с плитой. Снижение потерь энергии за время удара может быть достигнуто при обеспечении частично упругого характера удара с коэффициентом восстановления $0 < R < 1$, для чего между ударником и плитой необходимо поместить специальный упругий элемент, способный накапливать необходимую часть энергии ударника.

В источниках со сравнительно небольшой необходимой энергией воздействия на грунт, применяющихся при изучении зоны малых скоростей такой упругий элемент может быть выполнен, например, в виде пластины из полиуретана. В более мощных сейсмоисточниках он может быть выполнен в виде некоторого объема, заполненного жидкостью и обеспечивать при ударе необходимую объёмную податливость. В последнем случае занимаемый жидкостью объём может выполнять функцию гидроусилителя с коэффициентом усиления $k > 1$.

В предлагаемой работе приведены результаты аналитического исследования особенностей ударного процесса взаимодействия ударника сейсмоисточника с плитой-антенной через механический преобразователь (гидроусилитель) и дан предварительный прогноз перспективности применения такого решения для повышения сейсмической эффективности сейсмоисточников типа "Падающий груз". На рис. 1 приведена конструктивная схема рассматриваемого сейсмоисточника. Движущийся вниз со скоростью V_0 ударник 1 массой m_1 воздействует на лёгкий поршень 4, в результате чего в жидкости под поршнем создаётся давление $P(t)$. Занимаемый жидкостью объём гидроусилителя ограничивается площадью S_1 поршня, расширяющейся вниз поверхностью корпуса 2 массой m_2 и мембраной 5 с площадью S_3 , обеспечивающей герметичность объема, занимаемого жидкостью. Корпус 2 с мембраной опирается на плиту-антенну 3 массой m_3 . Элементы ξ_3 и R_3 отражают податливость грунта и сопротивление грунта при его деформации плитой. Коэффициент усиления K преобразователя определяется отношением площади S_3 к площади S_1 . При создании в жидкости давления $P(t)$ со стороны жидкости на поршень действует сила P_1 , на плиту 3 через мембрану - сила P_3 , а на корпус - сила P_2 , соотношение между которыми

где $a = m_2/m_1$, $b = m_3/m_1$.
Искомые выражения для послеударных скоростей находятся из (5) с учётом (4)

$$v_1 = v_0 \left[1 - (1 + R)m^* \right],$$

$$v_2 = v_0 \frac{(K-1)(1+R)}{a} m^*, \quad (5)$$

$$v_3 = v_0 \frac{K(1+R)}{b} m^*,$$

где m^* - относительное значение эквивалентной массы рассматриваемой ударной системы

$$m^* = \frac{1}{1 + \frac{(K-1)^2}{a} + \frac{K^2}{b}}. \quad (6)$$

Введение понятия m^* позволило получить решение в наиболее простом виде и проводить исследование ударного процесса при относительных значениях скоростей

$$v_1^* = \frac{v_1}{v_0}, \quad v_2^* = \frac{v_2}{v_0}, \quad v_3^* = \frac{v_3}{v_0}.$$

Следует отметить, что при $K=1$ скорость $v_2=0$ и соотношения (5) вырождаются в известные формулы, соответствующие удару двух масс m_1 и m_3 , применимые для анализа динамики работы сейсмоисточника ударного типа традиционного исполнения (без механического преобразователя)

$$v_{1(K=1)} = v_0 [1 - (1 + R)m_{(K=1)}^*],$$

$$v_{3(K=1)} = v_0 \frac{1+R}{b} m_{(K=1)}^*, \quad (7)$$

$$m_{(K=1)}^* = \frac{b}{1+b}.$$

Воздействие плиты на грунт определяется её послеударной скоростью v_3 и энергией A_3 , полученной от ударника и определяющей к.п.д. передачи энергии от ударника

$$\eta = \frac{A_3}{A_0} = \frac{m_3 v_3^2}{m_1 v_0^2} = b v_3^{*2} =$$

$$= \frac{K^2 (1+R)^2}{b \left[1 + \frac{(K-1)^2}{a} + \frac{K^2}{b} \right]}. \quad (8)$$

Максимум зависимости $\eta(K)$ обеспечивается при условии

$$K_{opt} = \sqrt{\frac{(a-1)b}{a+b}}, \quad (9)$$

которое не зависит от R.

С увеличением R от R=0 (неупругий удар) до R=1 (абсолютно упругий удар) к.п.д. η передачи энергии увеличивается в 4 раза! Из чего следует, что одной из основных технических задач создания сейсмоисточника является обеспечение возможно более высокого значения коэффициента R.

Необходимо отметить, что полученные аналитические зависимости не учитывают влияние реологических свойств грунта на процесс удара: перемещение плиты за время нарастания её скорости предполагается незначительным в том смысле, что влиянием силы реакции грунта на скорость v_3 в

ми определяется коэффициентом K
 $P_2 = P_1(K-1)$, $P_3 = P_1 K$, (2)
где $P_1 = P(t)S_1$.

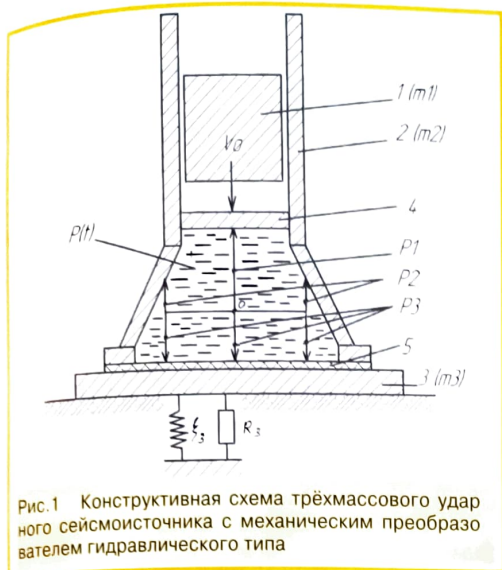


Рис.1 Конструктивная схема трёхмассового ударного сейсмоисточника с механическим преобразователем гидравлического типа

Под действием силы P_1 скорость v_0 ударника за время удара t_y снижается до некоторого значения v_1 , плита 3 силой P_3 ускоряется вниз до скорости v_3 , а корпус 2 ускоряется вверх силой P_2 до скорости v_2 . Особенность протекания ударного процесса определяется податливостью ξ занимаемого жидкостью объёма, сжимающегося во время ударного процесса, массами m_1 , m_2 и m_3 и коэффициентами усиления усилителя K и восстановления R гидроусилителя.

Решение задачи динамики удара при рассматриваемой конструктивной схеме сводится к определению послеударных скоростей v_1 , v_2 и v_3 . Это решение может быть получено с использованием теоремы потеранных скоростей Карно-Остроградского для случая удара трёх масс.

$$A_1 - A = \frac{1-R}{1+R} [m_1 (v_0 - v_1)^2 + m_2 v_2^2 + m_3 v_3^2]$$

Здесь A_1 - кинетическая энергия ударника перед ударом, A - кинетическая энергия масс m_1 , m_2 и m_3 после удара. Следовательно,

$$\frac{m_1 v_0^2}{2} - \frac{m_1 v_1^2}{2} - \frac{m_2 v_2^2}{2} - \frac{m_3 v_3^2}{2} = \frac{1-R}{1+R} [m_1 (v_0 - v_1)^2 + m_2 v_2^2 + m_3 v_3^2] \quad (3)$$

Поскольку изменение скоростей масс за время t_y удара определяется приложенными к ним импульсами сил, то можно, записать, что

$$P_1 t_C = m_1 (v_0 - v_1),$$

$$P_2 t_C = P_1 (K-1) t_C = m_2 v_2,$$

$$P_3 t_C = P_1 K t_C = m_3 v_3$$

Из отношений импульсов сил можно определить связи между скоростью v_0 и скоростями v_1 , v_2 и v_3 с учётом коэффициента усиления K

$$v_2 = (K-1) \frac{v_0 - v_1}{a},$$

$$v_3 = K \frac{v_0 - v_1}{b}, \quad (4)$$



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕЗЕНТАЦИИ: НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ РОССИЙСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

силу малости можно пренебречь.

Полученные зависимости полезны для оценки влияния различных параметров сейсмоисточника на динамику его работы и выбора их относительных значений. Изменение скоростей движения масс в реальном сейсмоисточнике может быть определено численным анализом уравнений движения, составленных с учётом реальных параметров, отражающих упругие и диссипативные характеристики грунта (см. рис.1) при его импульсном нагружении сейсмоисточником. При этом может быть применён метод электромеханических аналогий.

Выбор массы m_1 ударника определяется в основном необходимой энергией воздействия на грунт. На выбор же массы m_2 и коэффициента усиления K механического преобразователя существенное влияние оказывают и другие требования: вес сейсмоисточника, условия его эксплуатации и т.д.

Масса m_2 в общем случае включает не только массу корпуса 2 (см. рис.1), но и дополнительную массу $m_{доп}$, которая может быть помещена на корпусе. Применение $m_{доп}$ (массы "пригруза") увеличивает вес сейсмоисточника.

На рис.2 приведено изменение основных характеристик при увеличении характеризующего массу m_2 параметра a (от $a=0$ (удар при $K=1$) до $a=7$ для случая массы плиты $b=3$) и коэффициента $R=0.7$, значения которых представляются рациональными. Из рис.2 следует, что при увеличении параметра a скорость v_3^* и энергия A_3^* несколько увеличиваются, причём нелинейно. Послеударные значения v_1^* и A_1^* изменяются незначительно при широком изменении параметра a . Рациональным значением является условие $a \approx 2.3$, при котором обеспечивается уменьшение скорости v_3^* воздействия на грунт примерно в два раза (!) при к.п.д. η передачи энергии ударника в движение плиты на хорошем уровне: ($\eta \approx 0.6$).

На рис.3 приведено изменение скорости v_3^* плиты при вариации коэффициента K при условии $b=3$ и $a=3$. Из него следует, что значение K может выбираться существенно больше его

оптимального значения $K_{опт}$ без существенного снижения скорости v_3^* и, следовательно, эффективности воздействия на грунт, что важно при проектировании механического преобразователя.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. В сейсмоисточниках ударного типа "груз" необходимая энергия воздействия на грунт выделяется элементом сейсмоисточника, являющимся наиболее простым конструктивным решением. Основной технической проблемой является повышение коэффициента передачи энергии в энергию упругих деформаций грунта.

2. В известных конструктивных решениях применялись технические решения, основанные на неупругом ударе ударника об упругую плиту, при котором большая часть энергии ударника диссипирует в тепловую в материале плиты, а не передается в упругие деформации грунта.

3. Применение в сейсмоисточниках упругих элементов обеспечивает уменьшение энергии ударника и снижение скорости деформации грунта, что должно приводить к согласованию режима воздействия с его реологическими характеристиками.

4. Важным результатом является решение задачи упругого взаимодействия (на основе гипотезы Ньютона) трёх масс для выявления особенностей ударного процесса. Механический преобразователь, построенный на основе полученных аналитических выражений позволяет выбирать оптимальные параметры конструктивной схемы сейсмоисточника.

5. Для создания методики проектирования механических сейсмоисточников ударного типа с повышенными техническими характеристиками необходимо проведение исследований экспериментальных образцов (физических моделей) сейсмоисточников с целью определения влияния реологических свойств грунта на преобразование энергии ударника в энергию упругих деформаций грунта и обоснования выбора рациональных значений относительных параметров сейсмоисточника (a, b, K, R и т.д.), при которых обеспечивается наиболее эффективное возбуждение сейсмических волн в необходимом частотном диапазоне.

6. Известные сейсмоисточники ударного типа могут обеспечивать режимы работы с накоплением сейсмической информации. Однако при решении задачи адаптивного управления процессом ускорения ударника представляется возможным обеспечение синхронной работы нескольких сейсмоисточников ударного типа, что существенно расширяет возможности их применения.

*статья публикуется в порядке дискуссии

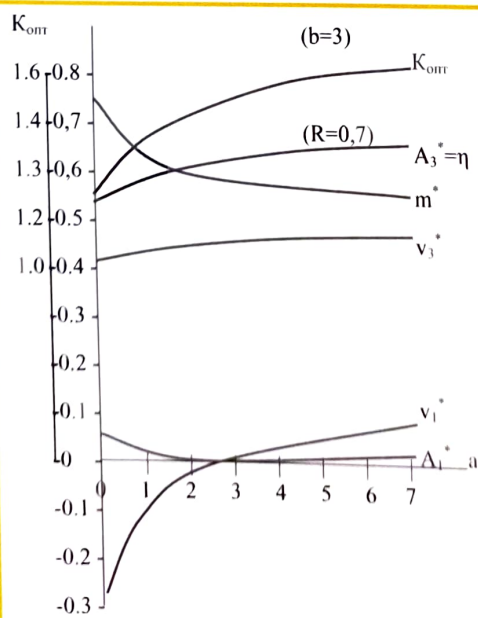


Рис. 2 - Влияние параметра a на основные характеристики удара

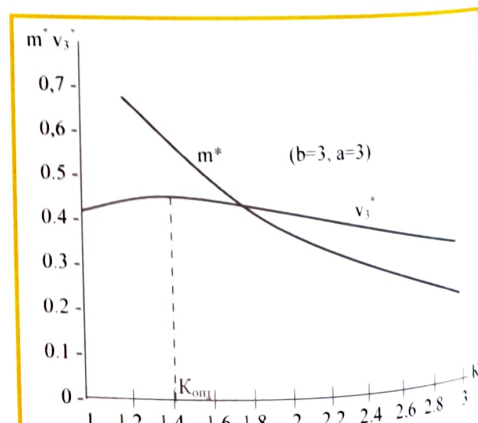


Рис. 3 - Изменение m^* и v_3^* в зависимости от K