

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

УДК 550.34.037

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО
ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

С.П. ЭКОМАСОВ

*ООО «Силовые импульсные системы»
117997, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; e-mail: itcsys@rambler.ru*

Приведены аналитические выражения для расчёта основных параметров конструкции рабочего органа гидропневматического источника сейсмических волн. Дано решение задачи количественной оценки характеристик силовых импульсов, генерируемых источником на контакте ударной плиты с грунтом. Экспериментом подтверждена хорошая сходимость расчётных и опытных величин.

Ключевые слова: источник; сейсмические волны; конструкция; расчёт; параметры; силовой импульс.

ANALYTICAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE HYDROPNEUMATIC
SOURCE OF SEISMIC WAVES

S.P. EKOMASOV

*LLC «Silovye impulsnye sistemy»
117997, Russia, Moscow, Miklouho-Maklaya street, 23; e-mail: itcsys@rambler.ru*

The analytical expressions for the calculation of the key parameters for the design a working body of new hydropneumatic source of seismic waves are given. The solution of the problem of the quantitative assessment of the characteristics of the power impulses generated by the source at the contact place of a shock plate with soil is given. An experiment has confirmed good convergence of calculated and experimental values.

Key words: source; seismic waves; design; calculation; parameters; power impulse.

В настоящее время проходит производственные испытания гидропневматический источник сейсмических волн ГПИ-2 [1, 3], разработанный инженерно-техническим центром «Силовые импульсные системы». Установлена высокая эффективность и перспективность источника как для решения задач изучения верхней части разреза земной коры, так и целевых глубинных интервалов при поисково-разведочных работах на нефть и газ.

Полный цикл испытаний опытного образца выполнен на полигоне МГРИ-РГГРУ в Сергиево-По-

садском районе Московской области. Работы по серийному освоению ГПИ-2 выполняет ООО «Импалссейс». Исполнительным органом источника является гидропневматическая камера, использующая в качестве рабочего тела сжатый воздух. Порция воздуха сжимается в рабочем цикле источника с помощью гидравлической энергии (гидронасос установлен на валу отбора мощности базовой машины УРАЛ-4320). Использование одной и той же порции воздуха (истечение воздуха в атмосферу не производится) для совершения рабо-

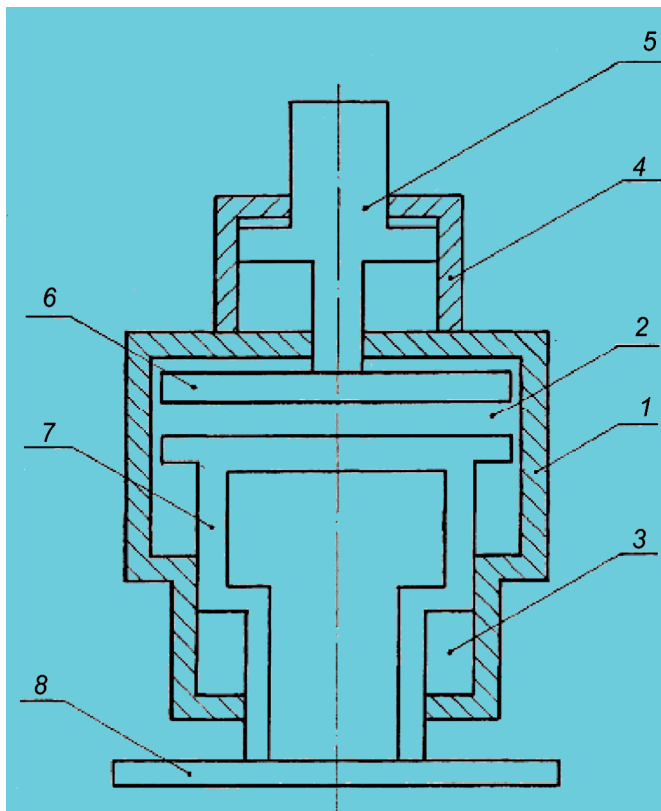


Рис. 1. Схема гидропневматической камеры: 1 – корпус пневматической камеры, разделённой на рабочий объём 2 и демпферный объём 3; 4 – корпус гидроцилиндра камеры; 5 – шток-поршень с тарелкой 6; 7 – волновод с ударной плитой 8

чих циклов повышает КПД источника примерно вдвое, по сравнению с пневматическими и газодинамическими генераторами.

Гидропневматическая камера схематически показана на рис. 1. Принцип действия гидропневматической камеры описан в [3, 4]. Аналитическое её проектирование заключается в расчёте ряда конструктивных и энергетических параметров. При этом основными из них, главным образом определяющими характеристики генерируемых силовых импульсов на контакте ударной плиты с грунтом, являются максимальное давление воздуха в рабочем объёме камеры и её размер. Максимальное давление воздуха по конструктивным соображениям не может превышать 9 МПа. Для определения размера рабочего объёма используется выражение:

$$M_k g h_0 + N_r h_0 (1 - K_z) \frac{P_m V_k}{k-1} \left(1 - \frac{1}{k} \right)^{k-1} = \frac{P_g V_g}{k-1} [(P_g)^{k-1} - 1], \quad (1)$$

где M_k — масса камеры с элементами подвески её к базовой машине, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; h_0 — максимальная величина отката камеры в процессе рабочего цикла, м; N_r — средняя сила сопротивления подъёму камеры, оказыва-

емая гидроцилиндром подвеса камеры в процессе её отката, Н; K_z — коэффициент распределения энергии, учитывающий перемещение волновода и плиты в рабочем цикле; — механический КПД, учитывающий потери энергии на преодоление сил трения в камере и подвеске; P_m — максимальное давление воздуха в рабочем объёме камеры, МПа; V_k — объём рабочего объёма камеры при максимальном в ней давлении, м³; k — показатель адиабаты для воздуха; κ — степень сжатия воздуха в рабочем объёме камеры; P_g — исходное давление воздуха в демпферном объёме, МПа; V_g — объём демпферной полости при исходном давлении воздуха в ней, м³; g — степень сжатия воздуха в демпферной полости в рабочем цикле.

При проектировании необходимо учитывать:

$$M_k K_y N_m,$$

где K_y — коэффициент удельной массы, $K_y (0,75 - 1,0) 10^3$ кг/Н; N_m — максимальное усилие в ударном импульсе, Н.

Задаваясь величиной N_m , определяем M_k и далее V_k ; затем подбирается необходимая грузоподъёмность базовой машины. Грузоподъёмность должна быть не менее $2nM_k$ при размещении камер между осями базовой машины. Здесь n — число камер.

Процесс ударного взаимодействия плиты с грунтом сопровождается расширением сжатого воздуха в рабочем объёме камеры и сжатием его в демпферном объёме. Фаза удара завершается при равенстве сил, действующих на волновод и плиту с обеих сторон этих объёмов. При этом:

$$P_m F_k \frac{h_k}{h_k S} = P_g F_g \frac{h_g}{h_g S}, \quad (2)$$

где F_k — площадь верхнего торца волновода, на которую воздействует воздух со стороны рабочего объёма камеры, м²; h_k — высота рабочего объёма камеры при максимальном в нём давлении, м; F_g — площадь демпферного объёма, м²; h_g — высота демпфера при исходном в нём давлении, м; τ — коэффициент, учитывающий влияние сил трения и прочие потери; S — рабочий ход реактивной массы M_p относительно волновода в процессе удара.

Реактивная масса включает массы корпусов пневматической камеры и гидроцилиндра, шток-поршня с тарелкой и массы элементов подвески камеры к базовой машине. Выражение (2) позволяет рассчитать величину S .

Уравнение перемещения реактивной массы в процессе удара можно представить в следующем виде:

$$M_p \frac{d^2 l}{dt^2} = N(\tau) - F_k(P_m, a) - F_g(P_g, b). \quad (3)$$

Здесь l — перемещение реактивной массы, кг; t — время, с; $N(t)$ — силовая функция.

Выражение (3) предполагает линейную зависимость изменения давлений воздуха от времени в рабочем и демпферном объёмах в процессе удара. Поэтому коэффициенты a и b соответствуют тангенсам углов наклона прямых изменения давлений. При этом ошибка в определении давлений не превышает 10% от истинного значения [5].

Решение уравнения (3) даёт следующее выражение:

$$l = \frac{F_k(3P_M^2 a^3) + F_g(3P_g^2 b^3)}{6M_p}. \quad (4)$$

При t_y ; $l = S$ получаем:

$$t_y = \sqrt{\frac{3M_p S}{F_k P_M + F_g P_g}}, \quad (5)$$

где t_y — время ударного взаимодействия плиты с грунтом, с.

Уравнение перемещения волновода с плитой (активная масса M_a) в процессе удара можно представить в виде:

$$(M_{np} + M_a) \frac{d^2 x}{dt^2} = N(t) - cx, \quad (6)$$

где M_{np} — присоединённая масса грунта, $M_{np} = M_a$ [5]; x — перемещение активной массы, отвечающее деформации грунта, м; c — жёсткость грунта, Н/м.

Жёсткость грунта представляем, как жёсткость линейно-деформируемой пружины длиной L . Тогда:

$$c = \frac{E_g F_r}{L}, \quad (7)$$

где E_g — динамический модуль упругости грунта, Н/м²; F_r — площадь контакта плиты с грунтом, м².

При контактных давлениях, близких к пределу прочности грунта и оптимальной его влажности, величина L составляет примерно 1,1 от диаметра контактной поверхности плиты [5].

Принимая в выражении (6) $\frac{c}{M_{np}} = M_a^{-2}$ в соответствии с известным решением [2], находим:

$$x = \frac{1}{(M_{np} + M_a)} \int_0^t N(\tau) \sin(t - \tau) d\tau. \quad (8)$$

Подставляя в (8) значение из (3) и решая его, получаем:

$$x = \frac{1}{(M_{np} + M_a)} \left(F_k P_M \cos t - F_g P_g \frac{1}{t_y} \cos t - \frac{t}{t_y} \sin t \right). \quad (9)$$

Из (7) следует:

$$x = \frac{P_k L}{E_g} - \frac{NL}{E_g F_r} - \frac{N}{c} - \frac{N}{2(M_{np} + M_a)}, \quad (10)$$

где P_k — давление на контакте плита — грунт, МПа; N — сила, действующая на контакте, Н.

Тогда:

$$N = (F_k P_M + F_g P_g) \left(\frac{1}{t_y} \cos t - \frac{1}{t_y} \sin t \right). \quad (11)$$

Уравнение (9) описывает изменение деформации грунта в процессе удара, а уравнение (11) — изменение усилия на контакте плиты с грунтом.

Дифференцируя (9) по dt и приравнявая правую часть к нулю, находим условие, соответствующее максимальной величине контактного давления:

$$\sin t - \frac{1}{t_y} \cos t = 0. \quad (12)$$

После преобразования (12) получим:

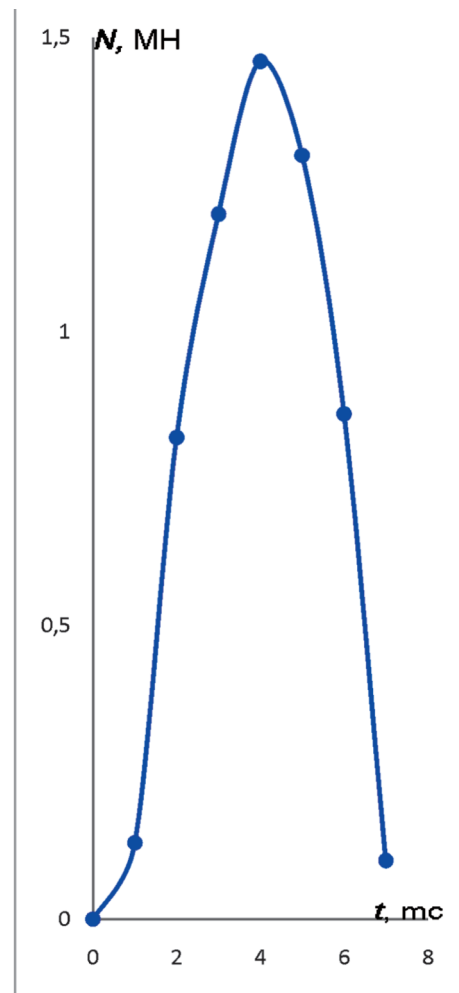


Рис. 2. График расчётной зависимости контактного усилия от времени в течение удара

$$\cos \frac{t}{2} - \frac{1}{t_y} \sin \frac{t}{2}. \quad (13)$$

Откуда определяем время t_m , соответствующее максимальному значению P :

$$t_m = \frac{2}{\pi} \arctg t_y. \quad (14)$$

Результат расчёта зависимости усилия на контакте плита—грунт от времени в процессе удара для гидропневматической камеры приведён на рис. 2. При этом использовались следующие значения параметров: $P_m = 8$ МПа; $F_k = 0,16$ м²; $P_g = 0,15$ МПа; $F_g = 0,027$ м²; $h_k = 0,02$ м; $h_g = 0,09$ м; $F_r = 0,5$ м²; $c = 300$ МН/м; $\gamma = 700$ с⁻¹; $M_a = 600$ кг.

На рис. 3 показана осциллограмма записи контактного усилия. Измерения производились на стенде с использованием датчика параметров удара, жёсткость которого составляла 300 МН/м и равнялась жёсткости грунта, принятой в расчёте графика (рис. 2). Установленное в опыте максимальное усилие в силовом импульсе равно 0,9 от расчётного значения, а t_m опытное практически равно расчётному. Таким образом, данная методика обеспечивает удовлетворительную сходимость опытных и расчётных величин.

Приведённая методика может быть использована при расчёте параметров генерируемых силовых импульсов различными по принципу действия им-

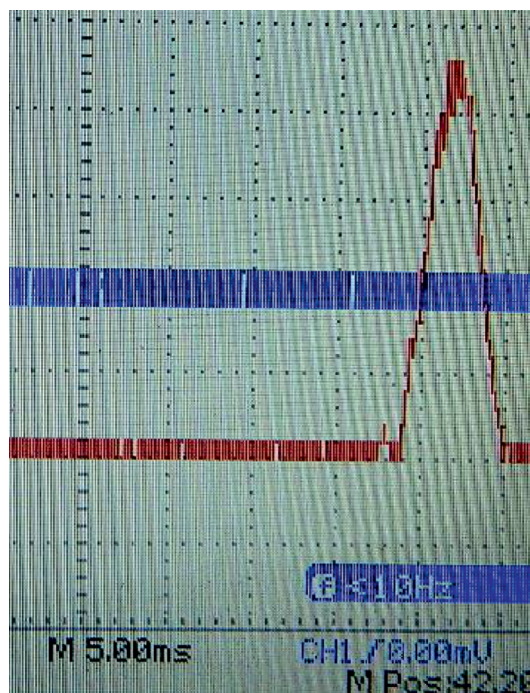


Рис. 3. Опытная зависимость усилия от времени

пульсными источниками, в том числе газодинамическими и электромагнитными. Для этого необходимо знание вида силовой функции $N(t)$, аналогичной (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гафаров Р.М., Ягудин И.Р., Экомасов С.П. и др. Новые результаты полевых испытаний импульсного гидропневматического источника сейсмических волн ГПИ-2. // Приборы и системы разведочной геофизики. 2016. № 1. С. 62—70.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 318 с.
3. Селезнёв В.А., Михеев С.И., Экомасов С.П., Барбиери П. Сравнительные испытания импульсного гидропневматического источника сейсмических волн ГПИ-2. // Приборы и системы разведочной геофизики. 2015. № 2. С. 47—54.
4. Фонберштейн Е.Г., Экомасов С.П. Гидропневматические источники сейсмических волн для инженерных изысканий, поисков и разведки месторождений нефти и газа. // Геофизический вестник. 2011. № 6. С. 14—16.
5. Фонберштейн Е.Г., Экомасов С.П. Процессы генерирования сейсмических волн импульсными наземными источниками. М.: Изд-во МТ2, 2007. 120 с.