

УДК 621.001.63; 62-82

**А. А. Гненный**, инженер

Научно-исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия

Тел.: +7 (916) 5977128; E-mail: [agnenny@gmail.com](mailto:agnenny@gmail.com)

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЯДА ИМПУЛЬСНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ГВОЗДЕЗАБИВНЫХ ПИСТОЛЕТОВ

В статье представлена методика и результат разработки оптимального параметрического ряда импульсных пневматических приводов с продолжительным движением поршня, используемых в конструкции гвоздезабивных пистолетов. Оптимизация членов ряда основана на минимизации стоимости производства и эксплуатации пистолета.

**Ключевые слова:** параметрический ряд, пневматический привод, гвоздезабивной пистолет, математическое моделирование.

**A. A. Gnenny**

## SYNTHESIS OF THE OPTIMUM PARAMETRIC RANGE OF PULSE PNEUMATIC DRIVES FOR NUCLEAR PISTOLS

The technique and the result of development of the optimal parametric series of pulse pneumatic actuators with long-term movement of the piston used in the construction of nail guns are presented in the article. The optimization of the members of the series is based on minimizing the costs in the production and operation of the gun.

**Keywords:** parametric series, pneumatic drive, nail gun, mathematical modeling.

### 1. Введение.

Импульсные пневматические приводы с продолжительным перемещением поршня, перемещение которого встречает нарастающее сопротивление, используют достаточно широко, как в составе технологического оборудования, так и как самостоятельный инструмент. Примером такого инструмента является пневматический гвоздезабивной пистолет [1]. Применяемые в них импульсные пневматические приводы имеют принципиально единую схему работы (рис. 1).

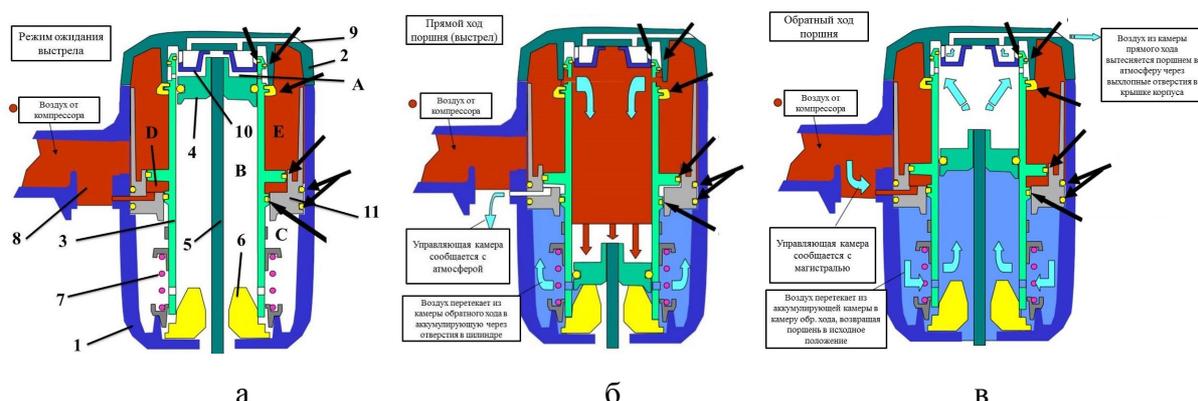


Рисунок 1. Принцип работы импульсного пневматического привода гвоздезабивного пистолета: а – режим ожидания; б – рабочий режим; в – режим обратного хода; 1 – корпус; 2 – крышка корпуса; 3 – цилиндр; 4 – поршень; 5 – шток; 6 – амортизатор; 7 – пружина; 8 – место установки курка; 9 – выхлопное отверстие; 10 – улавливатель; 11 – переключатель; А – камера прямого хода; В – камера обратного хода;

$C$  – аккумуляющая камера;  $D$  – управляющая камера;  $E$  – магистральная камера (стрелками указаны места установки уплотнительных элементов)

Импульсный пневматический привод гвоздезабивного пистолета работает следующим образом: в режиме ожидания выстрела управляющая камера  $D$  сообщается с магистралью, вследствие чего цилиндр 3 отжимается пружиной 7 в верхнее положение, при котором камера прямого хода  $A$  через отверстия в цилиндре и выхлопные отверстия 9 в крышке 2 сообщается с атмосферой. Поршень 4 в сборе со штоком 5 удерживаются в верхней мертвой точке за счет улавливателя 10. При нажатии на спусковой курок пистолета (при рабочем положении предохранительного устройства) управляющая камера  $D$  сообщается с атмосферой, за счет чего цилиндр 3 смещается в нижнюю мертвую точку под действием давления воздуха в магистральной камере  $E$ , перекрывая выхлопные отверстия и сообщая камеру прямого хода  $A$  с магистральной камерой  $E$  через отверстия в цилиндре 3. Под действием давления поршень 4 со штоком 5 движется вниз, преодолевая силу сопротивления со стороны забиваемого гвоздя. Воздух из камеры обратного хода  $B$  устремляется в аккумуляющую камеру  $C$  через отверстия в нижней части цилиндра 3, сжимаясь и запасая потенциальную энергию. Процесс продолжается до соударения поршня 4 об ограничитель в виде амортизатора 6. При обратном ходе управляющая камера  $D$  вновь сообщается с магистралью, цилиндр 3 занимает верхнее положение, а поршень 4 движется вверх под действием сжатого воздуха, перетекающего из аккумуляющей камеры  $C$  в камеру обратного хода  $B$ , при этом воздух из камеры прямого хода  $A$  вытесняется в атмосферу через выхлопные отверстия 9. Процесс заканчивается после возврата поршня 4 в гнездо улавливателя 10.

## 2. Основное содержание и результаты работы.

Математическая модель, описывающая движение поршня в цилиндре импульсного пневматического привода гвоздезабивного пистолета, представлена системой дифференциальных уравнений [1, 2]:

$$\begin{cases} \dot{P}_1 = \frac{k}{s_1[x + H_0(t)]} \{R[T_0 G_{01}(P_0, P_1, T_0, t) - T_1 G_{13}(P_1, P_3, T_1, x)] - P_1 s_1 \dot{x}\}; \\ \dot{T}_1 = \frac{T_1}{P_1 s_1[x + H_0(t)]} \left[ \left( k - \frac{T_1}{T_0} \right) R T_0 G_{01}(P_0, P_1, T_0) - \right. \\ \left. - (k-1) R T_1 G_{13}(P_1, P_3, T_1, \Delta x) - (k-1) P_1 s_1 \dot{x} \right]; \\ \dot{P}_2 = \frac{k}{(s_1 - s_2)(x^* - x)} \left\{ R[-T_2 G_{24}(P_2, P_{атм}, T_2) - T_2 G_{23}(P_2, P_3, T_2)] - \right. \\ \left. - P_2 (s_2 - s_1) \dot{x} \right\}; \\ \dot{T}_2 = \frac{T_2}{P_2 (s_1 - s_2)(x^* - x)} \left[ - (k-1) R T_3 G_{24}(P_2, P_{атм}, T_2) - \right. \\ \left. - (k-1) R T_3 G_{23}(P_2, P_3, T_2) - (k-1) P_2 (s_2 - s_1) \dot{x} \right]; \\ \dot{P}_3 = \frac{k}{V_{const}} \{R[T_1 G_{13}(P_1, P_3, T_1, x) - T_2 G_{23}(P_2, P_3, T_2)]\}; \\ \dot{T}_3 = \frac{T_3}{P_3 V_{const}} \left[ \left( k - \frac{T_3}{T_1} \right) R T_1 G_{13}(P_1, P_3, T_1, x) + \left( k - \frac{T_3}{T_2} \right) R T_2 G_{23}(P_2, P_3, T_2) \right]; \\ \ddot{x} = \frac{1}{m_{п} + \delta_1(x, \dot{x}) m_{ГВ}} [P_1 s_1 - P_2 (s_1 - s_2) - \text{sign}(\dot{x}) F_{тр} - \delta_1(x, \dot{x}) F_{вн} - \delta_2(x, \dot{x}) F_a] \end{cases} \quad (1)$$

где  $H_0(t)$  – высота рабочей камеры, м;  $m_{п}$  – масса поршня, кг;  $m_{ГВ}$  – масса гвоздя, кг;  $s_1$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>;  $s_2$  – площадь штока, м<sup>2</sup>;  $\Delta$  – толщина поршня (и координата столкновения штока со шляпкой гвоздя), м;  $l_{ГВ}$  – длина гвоздя, м;  $f$  – ход амортиза-

тора, м;  $F_{тр}$  – сила трения поршня о цилиндр, Н;  $F_a$  – сила амортизатора, Н;  $F_{вн}$  – сила внедрения гвоздя в материал, Н;  $f_{ij}, \varphi_{ij}, G_{ij}$  – соответственно площади отверстий [м<sup>2</sup>], коэффициенты расхода и функции расхода [м<sup>3</sup>/с] при перетекании воздуха из камеры  $i$  в камеру  $j$  (0 – магистраль; 1 – рабочая камера прямого хода; 2 – камера обратного хода; 3 – амортизационная камера, 4 – атмосфера);  $P_i$  – давление в камерах или в магистрали, Па;  $T_i$  – температура в камерах или в магистрали, К;  $k$  – показатель адиабаты;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг К);  $V_{const}$  – объем амортизационной камеры, м<sup>3</sup>;  $x_{кл}$  – координата положения клапана, м;  $x^*$  – максимальный ход поршня, м;  $\delta_{1,2}$  – операторы, каждый из которых за время цикла может иметь по два значения (1 при  $\Delta \leq x < x^*$  в случае  $x > 0$ ;  $\delta_1 = 0$  при других значениях  $x$  в случае  $x > 0$  и при любом  $x$  в случае  $\dot{x} < 0$ ; 1 при  $\Delta + l_{тв} < x < x^*$ ;  $\delta_2 = 0$  при других значениях  $x$ ).

Расходы газа в математической модели (1) определяются по формуле Сен-Венана и Ванцеля, сопротивления внедрению гвоздя принимаются пропорциональными периметру его сечения и глубине внедрения [3].

Первый этап синтеза оптимального параметрического ряда импульсных пневматических приводов для гвоздезабивных пистолетов предполагает численное интегрирование системы уравнений (1) при различных значениях диаметра поршня, длины гвоздя, а также силы внедрения [4]. Условием успешно подобранных параметров данного типоразмера является наличие достаточного запаса кинетической энергии поршня для полного внедрения гвоздя, исходя из уравнения энергетического баланса

$$A_{пр.х} - A_{сопр.} - A_{акк.} - E_{кин} = 0, \tag{2}$$

где  $A_{пр.х.} = P_1 s_1 X$  – работа, совершаемая в камере прямого хода;  $X$  – перемещение поршня;  $A_{сопр.} = F_{вн} X$  – работа сил сопротивления при внедрении гвоздя в материал;  $A_{акк.} = P_2 (s_1 - s_2) X$  – работа, совершаемая в аккумулирующей камере;  $E_{кин.} = \frac{m_n \dot{x}^2}{2}$  – остаточная кинетическая энергия поршня в конце рабочего цикла при  $X = x^*$ .

В результате численного интегрирования системы уравнений (1) с учетом уравнения энергетического баланса (2) при различных значениях диаметра поршня, длины гвоздя, а также силы внедрения, реализованного в программном пакете MathCad был синтезирован базовый параметрический ряд импульсных пневматических приводов для гвоздезабивных пистолетов, позволяющих забивать гвозди в диапазоне длин от 32 до 100 мм. Принятая величина рабочего давления 5 атм. Базовый ряд включает 14 типоразмеров (табл. 1).

Таблица 1. – Базовый параметрический ряд импульсных пневматических приводов

№ типоразмера	1	2	3	4	5	6	7
Объем камеры, л	0,042	0,045	0,054	0,083	0,127	0,127	0,132
Диапазон размеров гвоздей, мм	2?32	2?40	2,5?40	2,5?50	2,5?60	3?50	3?60
	-	2?32	2?32	2?32	2?32	2,5?40	2,5?40
Расход воздуха, л	0,254	0,265	0,31	0,433	0,565	0,565	0,582
Работа, Дж/сила, Н	12/375	17/425	20/500	26/520	31/517	31/517	32/533
Средняя мощность, Вт/цикл	1818	2576	3077	4000	4697	4697	4848

Продолжение табл. 1

№ типоразмера	8	9	10	11	12	13	14
Объем камеры, л	0,17	0,181	0,195	0,209	0,246	0,264	0,291
Диапазон размеров гвоздей, мм	3?70	3?75	3,5?70	3,5?75	3,5?90	4?90	4?100
	2,5?40	2,5?40	3?50	3?50	3?50	3,5?70	3,5?70
Расход воздуха, л	0,684	0,723	0,738	0,78	0,876	0,888	1,011
Работа, Дж/сила, Н	37/529	38/507	38/543	40/533	43/478	45/500	49/490
Средняя мощность, Вт/цикл	5286	5205	5352	5556	5443	5625	5698

В условиях свободного выбора одного или другого типоразмера гвоздезабивного пистолета для работ с заданным размером гвоздей (табл. 2), можно поставить задачу оптимизации базового параметрического ряда импульсных пневматических приводов для гвоздезабивных пистолетов на основе экономического критерия.

Таблица 2. – Таблица применимости типоразмеров базового параметрического ряда импульсных пневматических приводов для гвоздезабивных пистолетов

Размер гвоздя, мм									
2,5?60	3?50	3?60	3?70	3?75	3,5?70	3,5?75	3,5?90	4?90	4?100
Порядковый номер типоразмера пневматического привода (см. табл. 1)									
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	7	8	9	10	11	12	13	14	
7	8	9	10	11	12	13	14		
8	9	10	11	12	13	14			
9	10	11	12		14				
	11	12							
	12								

Второй этап синтеза оптимального параметрического ряда импульсных пневматических приводов для гвоздезабивных пистолетов предполагает симплификацию полученного базового параметрического ряда импульсных пневматических приводов (см. табл. 1) на основе функции суммарных затрат в сфере производства и эксплуатации проектируемого гвоздезабивного пистолета за весь жизненный цикл [5]

$$Z_{\text{сум.}} = Z_{\text{м}} + \frac{Z_{\text{пр.}}}{B^b} + Z_{\text{эн.}}, \tag{3}$$

где  $Z_{\text{м}}$  – стоимость материалов, руб.;  $Z_{\text{пр}}$  – затраты на изготовление без учета стоимости материалов, руб.;  $Z_{\text{эн}}$  – затраты на электроэнергию за все время эксплуатации, руб.;  $B$  – программа производства данного типоразмера пистолета, шт./год;  $b$  – показатель степени зависимости снижения себестоимости от серийности производства.

Исходные данные, используемые при расчетах слагаемых целевой функции (3), представлены в табл. 3 – 5.

Материалоемкость и время, затрачиваемое на механическую обработку деталей, определялось методами компьютерного моделирования в системах автоматизированного проектирования и подготовки производства КОМПАС 3D и SprutCAM.

Таблица 3. – Расчетная материалоемкость и стоимость материалов

Порядковый номер типоразмера пневматического привода (см. табл. 1)									
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Материалоемкость рабочего цилиндра, г									
165	165	169	185	188	195	198	212	212	226
Расчетная материалоемкость гвоздезабивного пистолета, кг									
2,8	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	3,6	3,8
Расчетная стоимость материалов, руб.									
1120	1120	1160	1240	1280	1320	1360	1440	1440	1520

Таблица 4. – Затраты на изготовление гвоздезабивного пистолета без учета стоимости материалов

Порядковый номер типоразмера пневматического привода (см. табл. 1)									
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Капитальные затраты на изготовление рабочего цилиндра привода, руб.									
706	706	706	752	752	752	775	775	844	897
Капитальные затраты на изготовление гвоздезабивного пистолета, руб.									
7060	7060	7060	7520	7520	7520	7750	7750	8440	8970

При расчете электроэнергии, потребляемой за один рабочий цикл, было принято среднее значение  $1,57 \cdot 10^{-4}$  кВт·ч/л; стоимость 1 кВт·ч электроэнергии 4,65 руб. (табл. 5). Срок службы гвоздезабивного пистолета принят равным двум годам при нагрузке 8000 выстрелов в неделю (всего 912000 крепежных элементов за срок службы).

Таблица 5. – Затраты на электроэнергию за срок службы пистолета

Порядковый номер типоразмера пневматического привода (см. табл. 1)									
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Общий расход сжатого воздуха через пневматический привод за цикл, л									
1,58	1,58	1,63	1,92	2,02	2,07	2,18	2,45	2,49	2,83
Расход электроэнергии за цикл, $\cdot 10^{-4}$ кВт ч									
2,48	2,48	2,56	3,01	3,17	3,25	3,42	3,85	3,91	4,44
Затраты на электроэнергию за срок службы, руб.									
1052	1052	1085	1278	1345	1378	1451	1631	1658	1884

Поиск рациональных значений целевой функции (3) подразумевает выбор размерного ряда пневматических приводов  $L_1, L_2, \dots, L_j$ , где  $j = N_{\max}$ , исходя из условий:

$$\sum_{j=1}^{N_{\max}} (Z_{\text{сум.}j} B_j) \rightarrow \min ; \quad \sum_{j=1}^{N_{\max}} B_j = B_{\text{сум.}} \tag{4}$$

где  $j$  – порядковый номер члена ряда;  $L_j$  – номер типоразмера пневматического привода (см. табл. 2);  $B_{\text{сум.}}$  – годовая программа производства гвоздезабивных пистолетов по всем типоразмерам пневматических приводов, шт./год.

Исходя из анализа потребностей рынка и объемов промышленного производства гвоздезабивных пистолетов с импульсными пневматическими приводами синтез оптимального параметрического ряда проводился на программу  $B_{\text{сум.}} = 30000$  шт./год.

Задача оптимизации была реализована в программной среде MathCAD по специально написанной программе.

В результате симплификации базового ряда по заданной целевой функции (3) с использованием условий поиска её рациональных значений (4) был получен оптимальный ряд гвоздезабивных пистолетов с импульсными пневматическими приводами, содержащий шесть типоразмеров приводов: 4; 7; 10; 12; 13; 14 (см. табл. 2). Значение целевой функции  $Z_{\text{сум.}} = 191\,999\,855$  руб.

Ожидаемый годовой экономический эффект от реализации в промышленном производстве оптимального параметрического ряда гвоздезабивных пистолетов для диапазона длин гвоздей 2,5?60...4?100 мм по сравнению с базовым рядом составит 4 795 455 руб.

### 5. Заключение.

Таким образом, в результате проведенных исследований:

1. Предложена уточненная математическая модель, описывающая движение поршня в цилиндре импульсного пневматического привода гвоздезабивного пистолета, позволившая рассчитать его основные параметры для различных значений диаметра поршня, длины гвоздя и силы внедрения, соответствующие типоразмеру привода.

2. Разработана методика синтеза оптимального параметрического ряда гвоздезабивных пистолетов с импульсными пневматическими приводами, позволившая синтезировать на заданную годовую программу производства оптимальный параметрический ряд, реализация которого в промышленном производстве позволит обеспечить значительный экономический эффект.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов, А. Н. Математическое моделирование рабочего процесса гвоздезабивного пистолета / В. В. Степанов, А. Н. Дроздов // Механизация строительства. - 2015. - № 11. - С. 12-17.

2. Гненный, А. А. Уточнение рабочих параметров математической модели цикловых пневматических машин и проверка её адекватности (на примере строительных монтажных пистолетов) / А. А. Гненный, В. В. Степанов, А. Н. Дроздов // Наукосведение. - Том 9. - №1 (2017). – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/62TVN117.pdf>.

3. Гненный, А. А. Экспериментальное определение рабочего усилия пневматического монтажного пистолета / А. А. Гненный // Механизация строительства. – 2016. – № 11. – С. 50-53.

4. Гненный, А. А. Разработка типоразмерных рядов строительных монтажных пистолетов / А. А. Гненный, А. Н. Дроздов, В. В. Степанов // Механизация строительства. – 2016. – № 11. – С. 41-45.

5. Гненный, А. А. Оптимизация параметрического ряда машин на примере строительных гвоздезабивных пистолетов / А.А. Гненный, А.Н. Дроздов, В.В. Степанов // Механизация строительства. – 2016. – № 10. – С. 39-42.

Поступила в редколлегию 07.05. 2018 г.