

## МЕТОДИКА ПРОЕКТНОГО СИНТЕЗА БАЛЛИСТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ГИДРОДИНАМИЧЕСКИМ ЭФФЕКТОМ НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Н.В. Быков<sup>1,2</sup>

bykovnv@bk.ru

В.В. Зеленцов<sup>1</sup>

dean@sm.bmstu.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФИЦ ИУ РАН, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Предложен метод автоматизированного поиска рациональных параметров баллистических установок с гидродинамическим эффектом. Рассмотрены методики решения прямой и обратной задач. Математическая модель выстрела учитывает двухфазность газопороховой смеси. Деформируемый поршень описан в рамках модели вязкопластической среды. Численное решение прямой задачи проведено по схеме годовновского типа с использованием процедуры AUSM+. В областях потери гиперболичности использована схема Русанова. Синтез оптимальных параметров проведен с помощью генетического алгоритма. Результаты расчетов приведены для двух вариантов выбора критерия оптимальности

### Ключевые слова

*Баллистическое проектирование, баллистические установки, внутренняя баллистика, гидродинамический эффект, внутрикамерные процессы, генетический алгоритм*

---

Поступила в редакцию 22.10.2015

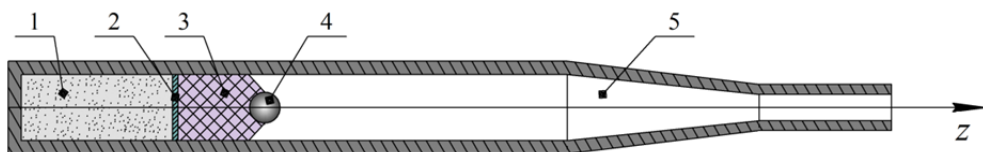
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

*Работа поддержана РФФИ (грант № 16-38-00948 мол\_а)*

Эволюционные алгоритмы в последние годы находят все более широкое применение при решении практических инженерных задач [1]. Задачи выбора рациональных параметров технических устройств регулярно встречаются в различных областях инженерной деятельности. При этом выделяют прямые и обратные задачи или задачи анализа и синтеза. Под прямой задачей понимается определение характеристик устройства по заданным входным параметрам. Обратная задача подразумевает нахождение таких входных параметров устройства, которые бы обеспечивали заданные или оптимальные в смысле выбранного критерия выходные характеристики. Хорошо известно, что решение задачи синтеза не единственно. В большинстве методов решения обратных задач так или иначе используют решение прямой задачи, причем, как правило, многократное. С учетом возможностей современных вычислительных средств сложность математических моделей претерпевает существенный рост и, как следствие, решение прямых задач становится все более ресурсоемким и затратным по времени. Таким образом, например, методы нахождения оптимальных ре-

шений с использованием производных становятся менее удобными, поскольку для численного вычисления производной нужно несколько раз решить прямую задачу (в зависимости от порядка производной). Помимо этого большинство технических задач имеет сложные целевые функции со многими локальными экстремумами, в которые обязательно «сваливается» любой алгоритм направленного поиска, в результате на первое место выходит выбор начальной точки. Абсолютно случайные алгоритмы в то же время сходятся довольно медленно. Эффективной комбинацией направленного и случайного поисков является эволюционный метод поиска.

В настоящей работе предложен новый метод автоматизированного поиска рациональных параметров баллистических установок (БУ) с гидродинамическим эффектом на основе генетического алгоритма. Под БУ с гидродинамическим эффектом понимается установка, схема которой изображена на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема устройства баллистической установки с гидродинамическим эффектом

В результате сгорания порохового заряда 1 происходит расширение образующихся газов, которые выталкивают сборку, образованную метаемо телом 4, деформируемым поршнем 3 и отделяющим его от пороховых газов инерционным поддоном 2. Сборка движется как единое целое по направляющей цилиндрической части ствола вплоть до достижения конического канала 5, в котором поршень 3 испытывает деформацию, в результате чего передняя его часть, а вместе с ней и метаемо тело 4 получают приращение скорости, а задняя часть поршня, как правило, замедляется. В результате такого перераспределения скоростей метаемо тело приобретает дополнительное ускорение. В этом и заключается гидродинамический эффект.

Проектный анализ или расчет основных характеристик БУ на стадии проектирования является неотъемлемой частью процесса синтеза оптимальных или рациональных параметров этих установок. Поэтому построение методик расчета, позволяющих достаточно точно и эффективно оценивать характеристики БУ, является важной задачей.

Расчет внутрикамерных процессов в ствольных системах является сложной и многогранной задачей в первую очередь из-за большого разнообразия физических процессов, сопровождающих выстрел [2–4]. Ситуация осложняется тем, что экспериментальные исследования протекающих при выстреле процессов затруднены в силу его специфических условий: за характерное для выстрела время в миллисекунду давление достигает нескольких тысяч атмосфер, а темпе-

ратура — нескольких тысяч градусов. В связи с этим существенно возрастает роль теоретического моделирования.

Методам расчета и математического моделирования внутрибаллистических процессов в ствольных установках посвящен большой объем исследований (см. работы [3, 5–10] и ссылки в них). Можно выделить по крайней мере три класса эффектов, которые при построении моделей внутрикамерных процессов можно учитывать в известной степени независимо. Это способ описания движения среды в объеме за снарядом, способы описания процессов энерговыделения и взаимодействия между конденсированной и газовой фазами. При наличии деформируемого поршня к этим классам добавляется еще один — способ моделирования движения поршня.

Один из вариантов представления структуры математических моделей внутренней баллистики для БУ с гидродинамическим эффектом показан на рис. 2.



**Рис. 2.** Структура математических моделей внутрикамерных процессов в БУ с гидродинамическим эффектом

Ранее в работах авторов были рассмотрены различные аспекты решения задачи проектного анализа БУ с гидродинамическим эффектом. Основные характеристики установок были рассчитаны в [11, 12]. Вопрос влияния геометрии конуса на баллистические характеристики установки рассмотрен в работах [13, 14]. Тестирование вычислительных программ на примере классической тестовой задачи AGARD проведено в [15]. Вопросы визуализации решения прямой задачи, связанные с подвижностью расчетной сетки, рассмотрены в [16].

Настоящая работа является развитием идей, высказанных в [17]. Сначала кратко описана методика проектного анализа, в которой рассматриваются методы расчета пороховой области и области деформируемого поршня, а также численный метод решения задачи. После этого приведена методика синтеза БУ с гидродинамическим эффектом.

**Методика расчета прямой задачи. Пороховой заряд.** Для описания горения порохов в БУ широкое распространение получили термодинамические и газодинамические модели. Модели первого типа исчерпывающе описаны в работах [2–4, 10], модели второго типа — в работах [2, 4, 5]. Наиболее современным подходом является рассмотрение газопороховой смеси как двухфазной гетерогенной [18]. При этом принимаются следующие допущения: пороховые частицы представляют собой несжимаемую конденсированную фазу, газ является несущей фазой, массовыми силами можно пренебречь, а конденсированные частицы друг с другом не взаимодействуют. В этом случае поведение двухфазной системы описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_g S) + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi \rho_g u_g S) = \dot{m}_c S + \dot{m}_{ign} S; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_g u_g S) + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi S [\rho_g u_g^2 + p]) = \\ & = p \frac{\partial}{\partial x}(\varphi S) + (\dot{m}_c u_p - f_s) S + \dot{m}_{ign} u_{ign} S; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\varphi \rho_g E_g S) + \frac{\partial}{\partial x}(\varphi \rho_g u_g H_g S) = \\ & = (\dot{m}_c (Q_{ex} + p / \rho_p + u_p^2 / 2) - f_s u_p) S - p \frac{\partial}{\partial t}(S \varphi) + Q_{ign} \dot{m}_{ign}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta \rho_p S) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta \rho_p u_p S) = -\dot{m}_c S; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta \rho_p u_p S) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta S [\rho_p u_p^2 + p + R_p]) = p \frac{\partial}{\partial x}(\beta S) + (f_s - \dot{m}_c u_p) S, \quad (5)$$

где  $x$  и  $t$  — пространственная координата и время;  $\varphi$  — объемная доля газовой фазы (пористость);  $\rho_g$ ,  $u_g$  — плотность и скорость газовой фазы;  $S$  — площадь поперечного сечения канала ствола;  $\dot{m}_c$  — приток массы вследствие горения;  $\dot{m}_{ign}$  — приток массы от воспламенителя;  $p$  — давление;  $\beta = 1 - \varphi$  — объемная доля конденсированной фазы;  $\rho_p$ ,  $u_p$  — плотность и скорость конденсированной фазы;  $f_s$  — сила межфазного взаимодействия, обусловленная разностью скоростей фаз;  $u_{ign}$  — скорость потока, порождаемая воспламенителем;  $E_g = e_g + u_g^2 / 2$  — полная удельная энергия газовой фазы;  $H_g = e_g + p / \rho_g + u_g^2 / 2$  — полная удельная энтальпия газовой фазы;  $e_g$  — удельная внутренняя энергия газовой фазы;  $Q_{ex}$  — экзотермическая энергия, выделяемая в процессе горения конденсированной фазы;  $Q_{ign}$  — энергия, выделяемая при горении воспламенителя;  $R_p$  — межгранулярное давление.

Система уравнений (1)–(5) замыкается набором определяющих соотношений, включающих в себя уравнение состояния газа в форме Дюпре, уравнение газоприхода от сгорания конденсированной фазы, уравнение для межгрануляр-

ного давления переноса относительной толщины сгоревшего пороха, закон горения в форме Вьеля и уравнение переноса энтальпии частиц. Подробное изложение этой модели содержится в работах [16, 19].

**Деформируемый поршень** описывается следующими уравнениями [2]:

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u S)}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u S)}{\partial t} + \frac{\partial((\rho u^2 - \sigma^{xx})S)}{\partial x} = 2\pi R \sigma_w^{nt} - \sigma_w^{nn} \frac{\partial S}{\partial x}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho E S)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho E - \sigma^{xx})uS] = 2\pi R(\sigma_w^{nt} u_w - q_w^n), \quad (8)$$

где  $\rho$ ,  $u$ ,  $E$  — плотность, скорость и полная удельная энергия материала поршня соответственно;  $\sigma^{xx}$  — осевая составляющая напряжения;  $R$  — радиус канала; индексом  $w$  отмечены величины, относящиеся к наружной поверхности поршня:  $\sigma_w^{nt}$  и  $\sigma_w^{nn}$  — касательное и нормальное напряжения;  $q_w^n$  — тепловой поток.

Эти уравнения замыкаются эмпирическими зависимостями [20]. Касательное напряжение на стенке определяется как

$$\sigma_w^{nt} = -\tau(u) \operatorname{sign} u,$$

где

$$\tau(u) = \begin{cases} k_0(1+b_1u)\exp(-b_2u)\sigma, & \sigma < \sigma_*; \\ \tau_0(1+b_1u)\exp(-b_2u), & \sigma \geq \sigma_*; \end{cases}$$

$\sigma$  — давление осевого сжатия. Для полиэтилена высокого давления значения эмпирических констант следующие:  $\sigma_* = 25,2$  МПа;  $k_0 = 0,054$ ;  $b_1 = 0,027$  с/м;  $b_2 = 0,00675$  с/м;  $\tau_0 = k_0\sigma_* = 1,36$  МПа — трение при близкой к нулю скорости скольжения.

В силу недостаточности экспериментальных сведений о реологическом поведении полиэтилена при высоких давлениях деформируемый поршень считается вязкопластической жидкостью [2]. В этом случае

$$\sigma^{xx} = -p + \tau^{xx}; \quad \tau^{xx} = \frac{2}{3}k(h)\left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{u}{S}\frac{\partial S}{\partial x}\right); \quad k(h) = \mu + \tau_s/2h,$$

где  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\tau_s$  — предел текучести при чистом сдвиге.

Скорости границ поршня находятся из следующих условий. Если контактная левая поверхность имеет массу  $m$  и справа на нее воздействует материал поршня с напряжением  $\sigma^{xx} = -p + \tau^{xx}$ , а слева пороховые газы с давлением  $p_g$ , то уравнение движения границы имеет вид

$$m \frac{du}{dt} = S(p_g - p + \tau^{xx}).$$

В работе [21] использовалось следующее калорическое уравнение состояния материала поршня:

$$e = \frac{p - c_0^2(\rho - \rho_0)}{(k-1)\rho},$$

где для полиэтилена высокого давления значения постоянных, определенных на основании экспериментальных данных, принимают значения:

$$\rho_0 = 919,03 \text{ кг/м}^3, c_0 = 2380 \text{ м/с}, k = 1,63098.$$

Для рассматриваемого уравнения состояния также следует оговорить случай  $\rho < \rho_0$ . Формально при этом давление не становится отрицательным в отличие от простейших уравнений состояния типа Тэта, поскольку в уравнении состояния существует часть, заимствованная от идеального газа. В этом смысле до определенного предела можно считать, что материал испытывает растяжение до того момента, когда его давление не упадет до нулевого значения или некоторого условного предела, принятого за предел прочности на растяжение [22].

**Численный метод.** Для численного решения рассматриваемой задачи в силу наличия перемещающихся во времени контактных границ удобно пользоваться подвижной сеткой. В процессе решения использовалась двухшаговая конечно-объемная схема типа предиктор–корректор. При этом параметры на границах ячеек определяются из решения задачи о распаде разрыва с использованием процедуры AUSM+ [23, 24]. Принципиальная идея такой схемы для расчета внутренней баллистики была рассмотрена в работах [2, 18], однако в них используются гораздо более сложные процедуры определения параметров на границах ячеек, а в ряде случаев также и дополнительное расщепление по физическим процессам (так называемая модель «химии в закрытой коробке» [7]). Опыт проведения вычислений показал, что применение этой схемы с определением потоков только с помощью метода AUSM+ приводит к потере устойчивости. Это связано с существованием областей отсутствия гиперболичности системы уравнений (1)–(5), которое доказано в работе [19]. Для компенсации этого эффекта используется расчет потоков по схеме Русанова [25], причем она применяется только для расчета потоков, отвечающих конденсированной фазе.

Системы уравнений (1)–(5) могут быть представлены в векторном виде

$$\frac{\partial \mathbf{qS}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{fS}}{\partial x} = \mathbf{h}.$$

Тогда на этапе предиктора и корректора вычисляется разностное решение по следующим формулам:

$$\begin{aligned} (\mathbf{qW})_{i+1/2}^{n+1/2} &= (\mathbf{qW})_{i+1/2}^n - \frac{1}{2} \tau^n \left[ (\mathbf{fS})_{i+1}^n - (\mathbf{fS})_i^n + \mathbf{h}_{i+1/2}^n \Delta x_{i+1/2}^n \right]; \\ (\mathbf{qW})_{i+1/2}^{n+1} &= (\mathbf{qW})_{i+1/2}^n - \tau^n \left[ (\mathbf{fS})_{i+1}^{n+1/2} - (\mathbf{fS})_i^{n+1/2} + \mathbf{h}_{i+1/2}^{n+1/2} \Delta x_{i+1/2}^{n+1/2} \right]. \end{aligned}$$

Здесь  $\tau^n$  — шаг по времени;  $\Delta x_{i+1/2}^n$  — шаг по координате;  $W_{i+1/2}^n$  — объем ячейки, который определяется по формуле для объема усеченного конуса.

**Синтез параметров БУ на основе генетического алгоритма.** В силу того, что решение рассматриваемой задачи зависит от достаточно большого числа входных параметров, имеет смысл выполнять поиск оптимального решения по некоторому выбранному критерию.

Задача оптимизации формулируется следующим образом. Имеется  $N$  входных параметров, образующих вектор  $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)$ ,  $\Omega \in \mathbb{R}^N$ , по значениям которых из сформулированной математической модели определяется  $M$  выходных параметров, также образующих вектор  $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_M)$ ,  $\Phi \in \mathbb{R}^M$ . Таким образом, математическая модель  $\mathfrak{M}$  при этом является отображением  $\mathfrak{M} : \Omega \rightarrow \Phi$ .

С практической точки зрения получение вектора  $\Phi$  по заданному вектору  $\Omega$  сопряжено с численным решением системы дифференциальных уравнений (1)–(8) и явное разрешение  $\mathfrak{M}^{-1} : \Phi \rightarrow \Omega$  в данном случае выполнить нельзя.

Для простоты будем считать, что критерий оптимальности  $\Psi$  зависит только от компонент вектора  $\Phi$  и что  $\Psi : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  — скалярный критерий. В общем случае функция  $\Psi$  может иметь достаточно сложный характер, большое число локальных минимумов и другие особенности.

Исходя из сказанного, можно предложить использовать для поиска оптимального варианта алгоритм глобального поиска, сочетающий в себе как случайные, так и детерминированные механизмы поиска. В настоящее время наиболее распространенным алгоритмом подобного рода является генетический алгоритм, имеющий большое число различных модификаций.

Общая концепция любого генетического алгоритма может быть упрощенно сведена к следующему. С помощью генератора случайных чисел формируется начальное поколение объектов. После этого с использованием определенных алгоритмов мутации, кроссинговера, отбора и других алгоритмов формируется новое поколение, после чего процесс повторяется нужное число раз. При этом формируется процесс направленной эволюции объектов за счет упрощенной аналогии с процессом естественного отбора в природе.

Будем рассматривать генетический алгоритм с фиксированным размером популяции. В этом случае сначала с использованием генератора случайных чисел формируется начальная популяция из  $N$  особей (или хромосом). Каждая  $i$ -я особь характеризуется набором  $K$  генов:  $\mathbf{x}^{(i)} = (x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_K^{(i)})$ ,  $i = 1, N$ , причем значения всех генов нормированы  $\forall i, j : x_j^{(i)} \in [0, 1]$ . Вслед за созданием начального поколения происходит отбор родителей по принципу рулетки, который сводится к следующему. Пусть каждая хромосома оценивается некоторой целевой функцией  $\Psi^{(i)}$  и также  $\Psi^{\max} = \max_i (\Psi^{(i)})$ . Тогда можно организовать процедуру отбора, когда каждой особи ставится в соответствие вероятность ее выбора в качестве родителя:

$$P^{(i)} = \frac{\Psi^{\max} - \Psi^{(i)}}{\sum_{i=1}^N (\Psi^{\max} - \Psi^{(i)})}$$

Механизм кроссинговера можно описать следующим образом. Генерируется случайное число в диапазоне от 1 до  $K - 1$ . Если сгенерировано число  $m$ , то значит, что происходит разрыв между  $m$ -м и  $(m + 1)$ -м генами в хромосоме каждого родителя, после чего гены, стоящие после  $m$ -го гена у первого и второго родителя, меняются местами. В результате получается два потомка.

Таким образом, оператор одноточечного кроссинговера выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{cross}_m(i, j) &= \text{cross}_m \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(i)} \\ \mathbf{x}^{(j)} \end{bmatrix} = \text{cross}_m \begin{bmatrix} x_1^{(i)}, \dots, x_{m-1}^{(i)}, x_m^{(i)}, x_{m+1}^{(i)}, \dots, x_K^{(i)} \\ x_1^{(j)}, \dots, x_{m-1}^{(j)}, x_m^{(j)}, x_{m+1}^{(j)}, \dots, x_K^{(j)} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} x_1^{(i)}, \dots, x_{m-1}^{(i)}, x_m^{(j)}, x_{m+1}^{(i)}, \dots, x_K^{(j)} \\ x_1^{(j)}, \dots, x_{m-1}^{(j)}, x_m^{(i)}, x_{m+1}^{(j)}, \dots, x_K^{(i)} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Аналогично может быть сформирован и оператор многоточечного кроссинговера:

$$\text{cross}_{m_1, m_2, \dots, m_p}(i, j) = \text{cross}_{m_1, m_2, \dots, m_p} \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{(i)} \\ \mathbf{x}^{(j)} \end{bmatrix}.$$

В результате применения оператора кроссинговера к векторам  $\mathbf{x}^{(i)}$  и  $\mathbf{x}^{(j)}$  получается два вектора потомков  $\mathbf{x}_{c1}$  и  $\mathbf{x}_{c2}$ . К каждому потомку применяется оператор мутации  $\text{mut}_p \mathbf{x}$ , который каждому  $x_i$  с вероятностью  $p$  ставит в соответствие случайное число  $x_i^{\text{mut}} \in [0, 1]$ , подчиняющееся закону равномерного распределения.

Для повышения направленности характера поиска оптимального решения оператор мутации может быть применен последовательно к каждой хромосоме  $J$  раз, где  $J$  — заранее заданное число. При этом из полученных результатов выбирается такой, который по значению целевой функции окажется наилучшим.

Из полученных подобным образом двух мутировавших потомков по значению целевой функции выбирается наилучший, который и включается в новое поколение.

Этот процесс должен быть проделан  $N$  раз для формирования нового поколения. При этом общее число поколений  $G$  является заданным.

Перейдем к процедуре нахождения оптимальных параметров баллистических установок с использованием генетического алгоритма.

Задача оптимизации при этом ставится следующим образом: требуется определить параметры системы, при которых достигается максимально возможная дульная скорость при заданных ограничениях.

Традиционным методом учета ограничений при реализации генетических алгоритмов является метод штрафов [17, 26 27]. Пусть требуется найти макси-



мум функции  $f(\mathbf{x})$  при ограничениях  $g_i(\mathbf{x}) \leq g_i^{\max}$ . Тогда может быть синтезирован следующий глобальный скалярный критерий:

$$\psi(x) = f(x) - \sum_{i=1}^N \gamma_i (g_i^{\max} - g_i(x)) \rightarrow \max;$$

$$\gamma_i = \begin{cases} \gamma_i, & g_i > g_i^{\max}; \\ 0, & g_i \leq g_i^{\max}. \end{cases}$$

Таким образом, при превышении  $i$ -м ограничением допустимой границы от оптимизируемой функции отнимается значение, пропорциональное этому превышению («штраф»).

Рассмотрим задачу нахождения максимальной дульной скорости при ограничении на максимальное давление в канале и конусе при варьировании следующих параметров: длины конического участка ( $x_1$ ), начальной длины деформируемого поршня ( $x_2$ ), выходного диаметра ствола ( $x_3$ ), массы инерционного поддона ( $x_4$ ) и массы метаемого тела ( $x_5$ ). Критерий оптимальности имеет вид

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} V_0(\mathbf{x}) - \gamma(p_{\max}(\mathbf{x}) - p_{\max,0}), & p_{\max}(\mathbf{x}) > p_{\max,0}; \\ V_0(\mathbf{x}), & p_{\max}(\mathbf{x}) \leq p_{\max,0}. \end{cases} \quad (9)$$

Вектор параметров задачи  $\mathbf{x}$  нормирован на единицу.

Коэффициент  $\gamma$  определяют, исходя из размера проигрыша в дульной скорости, эквивалентного превышению допустимого предела максимального давления  $p_{\max,0}$  на единицу. Данный коэффициент должен быть получен либо с помощью процедуры экспертного опроса, либо на основе предпочтений лица, принимающего решение. В том случае, если, например, превышение максимального давления на 100 МПа эквивалентно проигрышу в начальной скорости в 500 м/с, значение коэффициента  $\gamma = 5 \cdot 10^{-6}$  м/(с · Па).

Критерий (9) может быть обобщен в том случае, если небольшие отклонения от максимального давления допустимы, а больших отклонений следует избегать, модифицируя функцию штрафа путем введения показателя степени  $\alpha > 1$ :

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} V_0(\mathbf{x}) - \gamma(p_{\max}(\mathbf{x}) - p_{\max,0})^\alpha, & p_{\max}(\mathbf{x}) > p_{\max,0}; \\ V_0(\mathbf{x}), & p_{\max}(\mathbf{x}) \leq p_{\max,0}. \end{cases}$$

**Результаты расчета.** Рассмотрим решение задачи на примере модельной БУ с гидродинамическим эффектом, смонтированной на базе БУ Д-81 со следующими параметрами: диаметр камеры 159 мм; калибр разгонного участка 125 мм; длина камеры 1,19 м; длина ствола 5,2 м; масса порохового заряда 9,845 кг; сила пороха  $f = 1,026$  МДж/кг.

Для решения задачи синтеза рассматривались следующие границы изменения параметров: длина конического участка 0,3...0,7 м; начальная длина поршня

0,3...0,7 м; выходной калибр ствола 0,07...0,125 м; масса инерционного поддона составляет 1...10 кг; масса метаемого тела 1...10 кг.

В нормированном варианте минимальной границе параметра отвечает значение гена, равное нулю, а максимальному — равное единице.

В приведенном примере использовано 80 хромосом в поколении, общее число поколений до остановки процесса поиска — 30.

Ограничение по максимально допустимому давлению в конусе составляет 1 ГПа.

Значение штрафного коэффициента принято  $\gamma = 5 \cdot 10^{-6}$  м/(с · Па).

Значение средней целевой функции поколения в зависимости от номера поколения приведено на рис. 3. Видно, что на первых поколениях оптимизация идет достаточно быстро в течение приблизительно пяти поколений, после чего

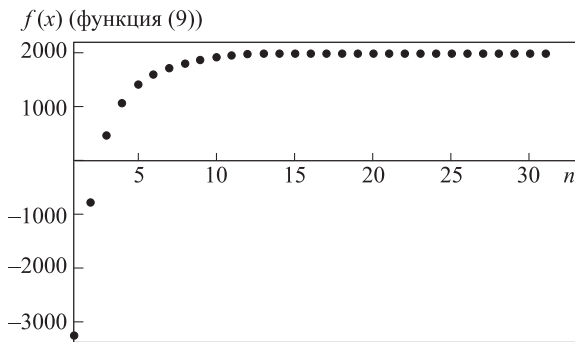


Рис. 3. Зависимость целевой функции (9) от номера поколения  $n$

темп замедляется и приблизительно после 15-го поколения выходит на плато. Причем постоянного выхода на плато в генетическом алгоритме обеспечить нельзя, поскольку происходит «встряска» параметров, обусловленная мутацией.

Дульная скорость в результате оптимизации составила 2041 м/с, максимальное давление в канале ствола 997,23 МПа = 0,99 ГПа, что удовлетворяет введенному ограничению.

Вектор полученных в результате оптимизации параметров следующий: длина конуса 0,993 м; начальная длина пластического поршня 0,410 м; выходной калибр 70 мм; масса инерционного поддона 1,198 кг; масса метаемого тела 5 кг.

Таким образом, по отношению к разгонному стволу коэффициент массы снаряда  $C_q = 2,56$  кг/дм<sup>3</sup>, а по отношению к выходному диаметру  $C_q = 14,57$  кг/дм<sup>3</sup>.

Рассмотрим теперь другой вариант оптимизации, выполняемый по критерию дульной кинетической энергии. Тогда целевая функция имеет вид

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{2} X_5 V_0^2(\mathbf{x}) - \gamma (p_{\max}(\mathbf{x}) - p_{\max,0}), & p_{\max}(\mathbf{x}) > p_{\max,0}; \\ \frac{1}{2} X_5 V_0^2(\mathbf{x}), & p_{\max}(\mathbf{x}) \leq p_{\max,0}. \end{cases} \quad (10)$$

В этом случае с теми же исходными данными при коэффициенте штрафа  $\gamma = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / (\text{с}^2 \cdot \text{Па})$  для целевой функции приведенного вида результат будет другой. Дульная скорость составит 1538 м/с при массе снаряда, равной 11,667 кг. Сравним кинетическую энергию боеприпаса в этом и предыдущем случаях:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \cdot 11,667 \text{ кг} \cdot 1538^2 \text{ м}^2 / \text{с}^2 = \\ & = 13,8 \text{ МДж} > \frac{1}{2} \cdot 5 \text{ кг} \cdot 2041^2 \text{ м}^2 / \text{с}^2 = 10,4 \text{ МДж}. \end{aligned}$$

В последнем случае эта энергия на 32 % больше, что отвечает реализации выбранного критерия.

Результат сходимости метода изображен на рис. 4. Видно, что принципиальная сходимость метода реализуется приблизительно за 15 поколений.

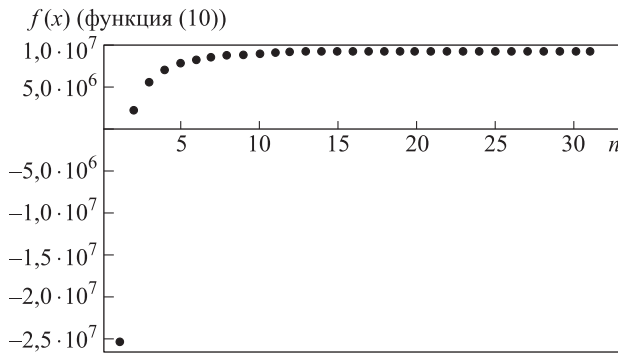


Рис. 4. Результат сходимости метода на основе генетического алгоритма (10)

Следует отметить, что методика позволяет использовать различные формулировки критериев оптимальности и ограничений.

**Выводы.** Рассмотрено построение методики проектного синтеза параметров БУ с гидродинамическим эффектом на основе генетического алгоритма. Методика позволяет находить оптимальные геометрические и другие параметры БУ на основе выбранного критерия при наличии заданных ограничений.

Данная методика без ограничений может быть перенесена на любые классы БУ, в частности артиллерию классических схем, легкогазовые установки и другие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kureychik V.M., Malyukov S.P., Kureychik V.V., Malyukov A.S. Genetic Algorithms for Applied CAD Problems. Springer, 2009. 253 p.
2. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
3. Ассовский И.Г. Физика горения и внутренняя баллистика. М.: Наука, 2005. 357 с.

4. Ружько И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 259 с.
5. *Газодинамические основы внутренней баллистики* / под ред. К.П. Станюковича. М.: Оборонгиз, 1957. 384 с.
6. Bogdanoff D.W. CFD Modelling of bore erosion in two-stage light gas guns. Rep. NASA / TM-1998-112236.
7. Bogdanoff D.W., Miller R.J. New Higher-order godunov code for modelling performance of two-stage light gas guns. Rep. NASA / TM-1995-110363.
8. Fitt A.D., Crowley A.B., Aston J.A.G. Contrasting numerical methods for two-dimensional two-phase internal ballistics test problems // Proc. 11th. Int. Symp. on Ballistics. Brussels, 1989. P. 337–346.
9. Gollan R.J. et al. Development of Casbar: a two-phase flow code for the interior ballistics problem // 16th Australasian Fluid Mechanics Conference. Crown Plaza, Gold Coast, Australia, 2007, 2–7 December. P.295–302.
10. Горохов М.С. Внутренняя баллистика ствольных систем. М.: ЦНИИ информации, 1985. 160 с.
11. Быков Н.В., Владимиров В.С., Зеленцов В.В. Инженерная методика расчета внутренней баллистики систем высокоскоростного метания // Оборонная техника. 2011. № 8. С. 3–9.
12. Быков Н.В., Владимиров В.С., Зеленцов В.В. Численное моделирование внутренней баллистики цилиндрических стволов с использованием пластических снарядов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/310721.html>
13. Быков Н.В., Зеленцов В.В., Карнейчик А.С. Влияние длины конического участка на баллистические характеристики цилиндрических стволов с пластическими снарядами // Оборонная техника. 2012. № 8/9. С. 21–26.
14. Быков Н.В., Зеленцов В.В., Карнейчик А.С. Баллистическая бикалиберная установка с деформируемым поршнем // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 9. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-945 URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/945.html>
15. Быков Н.В., Нестеренко Е.А. Анализ и сравнение вычислительных кодов для решения задачи внутренней баллистики на примере тестовой задачи AGARD // Оборонная техника. 2015. № 2. С. 21–36.
16. Быков Н.В., Нестеренко Е.А. Математическое моделирование и визуализация внутрикамерных процессов в баллистических установках с гидродинамическим эффектом // Научная визуализация. 2015. Т. 7. № 1. С. 65–77. URL: <http://sv-journal.org/2015-1/06.php?lang=ru>
17. Быков Н.В., Нестеренко Е.А. Автоматизированный выбор проектных параметров баллистических установок с гидродинамическим эффектом на основе генетического алгоритма // Тез. докл. VIII Всерос. научн. конф. «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и технологий». ЭКОМОД-2014. Москва, 21–24 октября 2014 г. М.: ВЦ РАН, 2014. С. 53.
18. Семенов И.В., Уткин П.С., Ахмедьянов И.Ф., Меньшов И.С. Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения задач внутренней баллистики // Вычислительные методы и программирование. 2011. Т. 12. С. 183–193. URL: <http://num-meth.srcc.msu.ru/index.html>

19. *Nessbaum J., Helluy P., Herard J.-M., Carriere A.* Numerical simulations of gas-particle flows with combustion // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2006. Vol. 76. Iss. 4. P. 403–417.
20. *Иоселевич В.А., Пилюгин Н.Н., Чернявский С.Ю.* О влиянии трения на движение поршня под действием продуктов горения // *ПМТФ*. 1978. № 5. С. 73–80.
21. *Касимов В.З., Ушакова О.В., Хоменко Ю.П.* Численное моделирование внутрибаллистических процессов в легкогазовой пушке // *ПМТФ*. 2003. Т. 44. № 5. С. 13–22.
22. *Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю.* Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: Физматлит, 2001. 608 с.
23. *Liou M.S., Steffen C.J.* A new flux splitting scheme // *J. of Computational Physics*. 1993. Vol. 107. P. 23–39.
24. *Wada Y.* A flux splitting scheme with high-resolution and robustness for discontinuities. NASA Techn. Memorandum 106452; AIAA-94-0083. 1994.
25. *Русанов В.В.* Расчет взаимодействия нестационарных ударных волн с препятствиями // *ЖВМиМФ*. 1961. Т. 1. № 2. С. 267–279.
26. *Шефер И.А.* Исследование эффективности генетического алгоритма условной оптимизации // Молодежь и наука: Сб. материалов VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского [Электронный ресурс]. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012.  
URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section21.html>
27. *Deb K.* An efficient constraint handling method for genetic algorithms // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2000. No.186. P. 311–338. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8

**Быков Никита Валерьевич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН (ФИЦ ИУ РАН) (Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, к. 2), старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

**Зеленцов Валентин Викторович** — канд. техн. наук, советник при ректорате МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

#### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Быков Н.В., Зеленцов В.В. Методика проектного синтеза баллистических установок с гидродинамическим эффектом на основе генетического алгоритма // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2016. № 4. С. 128–143.  
DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-128-143

## GENETIC ALGORITHM-BASED METHODS FOR PROJECT SYNTHESIS OF BALLISTIC INSTALLATIONS WITH HYDRODYNAMIC EFFECT

N.V. Bykov<sup>1, 2</sup>

bykovnv@bk.ru

V.V. Zelentsov<sup>1</sup>

dean@sm.bmstu.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Federal Research Center for Computer Science and Control, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

## Abstract

This paper proposes a method for automated search for rational parameters of ballistic installations with hydrodynamic effect. We consider the techniques for solving direct and inverse problems. The mathematical model takes into account the two-phase nature of gas-powder mixture. We describe the deformable piston in the model of visco-plastic medium and carry out the numerical solution of the direct problem according to Godunov-type scheme with the solution of Riemann problem by means of AUSM+ method. In the areas of hyperbolicity loss we use Rusanov scheme. We perform the synthesis of optimal parameters using the genetic algorithm. The calculation results are given in two variants of optimality criterion

## Keywords

*Ballistic design, ballistic installation, interior ballistics, inter-chamber processes, hydrodynamic effect, genetic algorithm*

---

## REFERENCES

- [1] Kureychik V.M., Malyukov S.P., Kureychik V.V., Malyukov A.S. Genetic algorithms for applied CAD problems. Springer, 2009. 253 p.
- [2] Khomenko Yu.P., Ishchenko A. N., Kasimov V.Z. Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh [Mathematical Modeling of Interior Ballistics Processes in Barrel Systems]. Novosibirsk, Sib. Otd., Ross. Akad. Nauk Publ., 1999.
- [3] Assovskiy I.G. Fizika goreniya i vnutrennyaya ballistika [Physics of Combustion and Interior Ballistics]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 357 p.
- [4] Rusyak I.G., Ushakov V.M. Vnutrikamernye geterogennyye protsessy v stvol'nykh sistemakh [Interchamber heterogeneous processes in barrel systems]. Ekaterinburg, UrO Ross. Akad. Nauk Publ., 2001. 259 p.
- [5] Betekhtin S.A., Vinit'skiy A.M., Gorokhov N.A. Gazodinamicheskie osnovy vnutrenney ballistiki [Gasdynamic Fundamentals of Internal Ballistics]. Moscow, Oborongiz Publ., 1957.
- [6] Bogdanoff D.W. CFD Modelling of bore erosion in two-stage light gas guns. *Rep. NASA / TM-1998-112236*.
- [7] Bogdanoff D.W., Miller R.J. New higher-order godunov code for modelling performance of two-stage light gas guns. *Rep. NASA / TM-1995-110363*.
- [8] Fitt A.D., Crowley A.B., Aston J.A.G. Contrasting numerical methods for two-dimensional two-phase internal ballistics test problems. *Proc. 11th. Int. Symp. on Ballistics/Brussels, 1989*, pp. 337–346. Coast, Australia, 2007, 2–7 December. P. 295–302.
- [9] Gollan R.J. et al. Development of casbar: a two-phase flow code for the interior ballistics problem. *16th Australasian Fluid Mechanics Conference. Crown Plaza, Gold Coast, Australia, 2007, December 2–7*, pp. 295–302.
- [10] Gorokhov M.S. Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem [Interior ballistics of barrel systems]. Moscow, CNII informacii Publ., 1985. 160 p.
- [11] Bykov N.V., Vladimirov V.S., Zelentsov V.V. Engineering approach for calculating internal ballistics high-velocity system. *Oboronnaya tekhnika [Defense technology]*, 2011, no. 8, pp. 3–9 (in Russ.).

- [12] Bykov N.V., Vladimirov V.S., Zelentsov V.V. Numerical simulation of cylindrical-conical barrels' interior ballistics with plastic projectile body. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education of the Bauman MSTU. Electronic Journal], 2012, no. 3. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/310721.html>
- [13] Bykov N.V., Zelentsov V.V., Karneychik A.S. Effect of the length of the tapered section on the ballistic characteristics of cylindroconical barrels with plastic shells. *Oboronnaya tekhnika* [Defense technology], 2012, no. 8/9, pp. 21–26 (in Russ.).
- [14] Bykov N.V., Zelentsov V.V., Karneychik A.S. Bicaliber ballistic gun mount with the deformable piston. *Jelekt. nauchno-tekh. izd. «Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii»* [El. Sci.-Tech. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation"], 2013, iss. 9.  
DOI: 10.18698/2308-6033-2013-9-945 Available at: <http://engjournal.ru/eng/catalog/machin/rocket/945.html>
- [15] Bykov N.V., Nesterenko E.A. Analysis and comparison of computer codes for solving the problem of internal ballistics on the test problem AGARD. *Oboronnaya tekhnika* [Defense Technology], 2015, no. 2, pp. 21–36 (in Russ.).
- [16] Bykov N.V., Nesterenko E.A. Mathematical modeling and visualization of intrachamber processes in a ballistic setup with hydrodynamic effect. *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization], 2015, vol. 7, no. 1, pp. 65–77.  
Available at: <http://sv-journal.org/2015-1/06.php?lang=en>
- [17] Bykov N.V., Nesterenko E.A. Automated selection of the design parameters of ballistic systems with hydrodynamic effect on the basis of genetic algorithm. *Abstr. VIII All-Russian sci. conf. with inter. participation "Mathematical modeling of the developing economy, ecology and technology"*. ECOMOD 2014. Moscow, October 21–24, 2014. Moscow, CC Ross. Akad. Nauk Publ., 2014. 53 p.
- [18] Semenov I.V., Utkin P.S., Akhmed'yanov I.F., Men'shov I.S. The use of multiprocessor computers for the internal ballistics problems solution. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Numerical methods and programming], 2011, vol. 12, pp. 183–193. Available at: <http://num-meth.srcc.msu.ru/english/index.html>
- [19] Nessbaum J., Helluy P., Herard J.-M., Carriere A. Numerical simulations of gas-particle flows with combustion. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2006, vol. 76, iss. 4, pp. 403–417.
- [20] Ioselevich V.A., Pilyugin N.N., Chernyavskii S.Yu. On the effect of friction on the motion of the piston under the action of the combustion products. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [J. of Appl. Mech. and Tech. Phys.], 1978, no. 5, pp. 73–80 (in Russ.).
- [21] Kasimov V.Z., Ushakova O.V., Khomenko Yu.P. Numerical modeling of interior ballistics processes in light gas guns. *J. of Appl. Mech. and Tech. Phys.*, 2003, vol. 44, iss. 5, pp. 612–619.
- [22] Kulikovskiy A.G., Pogorelov N.V., Semenov A.Yu. *Matematicheskie voprosy chislennogo resheniya giperbolicheskikh sistem uravneniy* [Mathematical problems of the numerical solution of hyperbolic systems]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 608 p.
- [23] Liou M. S., Steffen C. J. A new flux splitting scheme. *J. of Computational Physics*, 1993, vol. 107, pp. 23–39.
- [24] Wada Y. A flux splitting scheme with high-resolution and robustness for discontinuities. *NASA Tech. Memorandum 106452; AIAA-94-0083*, 1994.

[25] Rusanov V.V. The calculation of the interaction of non-stationary shock waves and obstacles. *J. Comp. Math. Phys. USSR*, 1962, vol. 1, iss. 2, pp. 304–320.

DOI: 10.1016/0041-5553(62)90062-9

[26] Schaefer I.A. Investigation of the effectiveness of the genetic algorithm of constrained optimization // *Youth and Science: Proc. of the VIII All-Russian sci. and tech. conf. of students, graduate students and young scientists dedicated to the 155th anniversary of Tsiolkovsky* [electronic resource]. Krasnoyarsk, Siberian Federal Univ. Publ., 2012.

Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section21.html>

[27] Deb K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2000, no. 186, pp. 311–338. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8

**Bykov N.V.** — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of Federal Research Center for Computer Science and Control, Russian Academy of Sciences (Vavilova ul. 44, korp. 2, Moscow, 119333 Russian Federation), Assist. Professor, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Zelentsov V.V.** — Cand. Sci. (Eng.), Rector's Council, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Bykov N.V., Zelentsov V.V. Genetic Algorithm-Based Methods for Project Synthesis of Ballistic Installations With Hydrodynamic Effect. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 4, pp. 128–143. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-128-143